

# MODELAGEM DE SISTEMAS COMPLEXOS PARA POLÍTICAS PÚBLICAS

Editores

Bernardo Alves Furtado  
Patrícia A. M. Sakowski  
Marina H. Tóvolli





# MODELAGEM DE SISTEMAS COMPLEXOS PARA POLÍTICAS PÚBLICAS

**Editores**

Bernardo Alves Furtado  
Patrícia A. M. Sakowski  
Marina H. Tóvolli

**ipea**

## **Governo Federal**

**Secretaria de Assuntos Estratégicos da  
Presidência da República**  
**Ministro** Roberto Mangabeira Unger



Fundação pública vinculada à Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, o Ipea fornece suporte técnico e institucional às ações governamentais – possibilitando a formulação de inúmeras políticas públicas e programas de desenvolvimento brasileiro – e disponibiliza, para a sociedade, pesquisas e estudos realizados por seus técnicos.

**Presidente**

Jessé José Freire de Souza

**Diretor de Desenvolvimento Institucional**

Alexandre dos Santos Cunha

**Diretor de Estudos e Políticas do Estado,  
das Instituições e da Democracia**

Daniel Ricardo de Castro Cerqueira

**Diretor de Estudos e Políticas**

**Macroeconômicas**

Cláudio Hamilton Matos dos Santos

**Diretor de Estudos e Políticas Regionais,  
Urbanas e Ambientais**

Marco Aurélio Costa

**Diretora de Estudos e Políticas Setoriais  
de Inovação, Regulação e Infraestrutura**

Fernanda De Negri

**Diretor de Estudos e Políticas Sociais**

André Bojikian Calixtre

**Diretor de Estudos e Relações Econômicas  
e Políticas Internacionais**

Brand Arenari

**Chefe de Gabinete**

José Eduardo Elias Romão

**Assessor-chefe de Imprensa  
e Comunicação**

João Cláudio Garcia Rodrigues Lima

Ouvidoria: <http://www.ipea.gov.br/ouvidoria>

URL: <http://www.ipea.gov.br>

# MODELAGEM DE SISTEMAS COMPLEXOS PARA POLÍTICAS PÚBLICAS

**Editores**

Bernardo Alves Furtado  
Patrícia A. M. Sakowski  
Marina H. Tóvolli

**ipea**  
Brasília, 2015

---

Modelagem de sistemas complexos para políticas públicas / editores:  
Bernardo Alves Furtado, Patrícia A. M. Sakowski, Marina H. Tóvolli. –  
Brasília : IPEA, 2015.  
436 p. : il., gráfs. color.

Inclui Bibliografia  
ISBN: 978-85-7811-248-6

1. Políticas Públicas. 2. Política de Desenvolvimento. 3. Sistemas Complexos. 4. Análise de Redes. 5. Análise de Interação. 6. Métodos de Planejamento. I. Furtado, Bernardo Alves. II. Sakowski, Patrícia A. M. III. Tóvolli, Marina H. IV. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

---

CDD 003.

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ou da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados nele contidos, desde que citada a fonte.  
Reproduções para fins comerciais são proibidas.

**Foto de capa**

National Aeronautics and Space Administration (Nasa)

Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/nasa2explore/8380847362>

# SUMÁRIO

|                    |    |
|--------------------|----|
| APRESENTAÇÃO ..... | 9  |
| PREFÁCIO .....     | 11 |

## PARTE I COMPLEXIDADE: TEORIA, MÉTODOS E MODELAGEM

### CAPÍTULO 1

|   |    |
|---|----|
| ABORDAGENS DE SISTEMAS COMPLEXOS PARA POLÍTICAS PÚBLICAS..... | 21 |
| Bernardo Alves Furtado  |    |
| Patrícia Alessandra Morita Sakowski                           |    |
| Marina Haddad Tóvolli   |    |

### CAPÍTULO 2

|   |    |
|---|----|
| SISTEMAS COMPLEXOS: CONCEITOS, LITERATURA,<br>POSSIBILIDADES E LIMITAÇÕES ..... | 43 |
| William Rand  |    |

### CAPÍTULO 3

|  |    |
|--|----|
| MÉTODOS E METODOLOGIAS EM SISTEMAS COMPLEXOS ..... | 65 |
| Miguel Angel Fuentes                               |    |

### CAPÍTULO 4

|   |    |
|---|----|
| MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA POLÍTICAS PÚBLICAS..... | 85 |
| James E. Gentile                                  |    |
| Chris Glazner                                     |    |
| Matthew Koehler                                   |    |

### CAPÍTULO 5

|  |    |
|--|----|
| OPERACIONALIZANDO SISTEMAS COMPLEXOS ..... | 97 |
| Jaime Simão Sichman                        |    |

## **PARTE II OBJETOS DE POLÍTICAS PÚBLICAS E A ABORDAGEM DE SISTEMAS COMPLEXOS**

### **CAPÍTULO 6**

- O AMBIENTE COMO SISTEMA SOCIONATURAL, DINÂMICO E COMPLEXO: OPORTUNIDADES E DESAFIOS DE POLÍTICAS PÚBLICAS NA PROMOÇÃO DA SUSTENTABILIDADE GLOBAL ..... 141  
Masaru Yarime  
Ali Kharrazi

### **CAPÍTULO 7**

- A NATUREZA COMPLEXA DOS SISTEMAS SOCIAIS ..... 157  
Claudio J. Tessone

### **CAPÍTULO 8**

- A ECONOMIA COMO OBJETO COMPLEXO ..... 187  
Orlando Manuel da Costa Gomes

### **CAPÍTULO 9**

- MODELAGEM DA ECONOMIA COMO UM SISTEMA COMPLEXO ..... 211  
Herbert Dawid

### **CAPÍTULO 10**

- CIDADES COMO SISTEMAS COMPLEXOS ..... 241  
Luís M. A. Bettencourt

## **PARTE III APLICAÇÕES DE SISTEMAS COMPLEXOS EM OBJETOS DE POLÍTICAS PÚBLICAS**

### **CAPÍTULO 11**

- APLICAÇÕES DE SISTEMAS COMPLEXOS EM POLÍTICAS PÚBLICAS NO MUNDO ..... 267  
Yaneer Bar-Yam

### **CAPÍTULO 12**

- SISTEMAS COMPLEXOS EM POLÍTICAS PÚBLICAS NO BRASIL ..... 291  
Bernardo Mueller

### **CAPÍTULO 13**

- MÉTODOS DE COMPLEXIDADE APLICADOS AO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES ..... 309  
Dick Ettema

**CAPÍTULO 14**

- A EDUCAÇÃO COMO SISTEMA COMPLEXO: IMPLICAÇÕES  
PARA A PESQUISA EDUCACIONAL E POLÍTICAS.....335  
Michael J. Jacobson

**CAPÍTULO 15**

- PERSPECTIVAS DA COMPLEXIDADE PARA A EDUCAÇÃO NO BRASIL.....351  
Patrícia A. Morita Sakowski  
Marina H. Tóvolli

**CAPÍTULO 16**

- SUPERANDO O CAOS: LEGISLATIVOS COMO SISTEMAS  
COMPLEXOS ADAPTATIVOS.....375  
Acir Almeida

**CAPÍTULO 17**

- O TERRITÓRIO COMO UM SISTEMA SOCIAL COMPLEXO.....403  
Marcos Aurélio Santos da Silva



## **APRESENTAÇÃO**

Políticas públicas são o meio e o fim do Ipea. Avaliação, formulação e acompanhamento de políticas estão no cerne do instituto, bem como a assessoria ao Estado baseada no melhor conhecimento científico disponível. Assim, ferramentas que proporcionem aos formuladores de política e à academia uma compreensão mais profunda dos mecanismos de políticas e de seus efeitos entrelaçados, assíncronos e espacialmente delimitados estão no centro de nosso interesse.

Complexidade é uma abordagem relativamente nova na ciência, que integra conhecimentos de diferentes áreas, na busca por entender o comportamento coletivo em sistemas vivos e fenômenos que abrangem muitos elementos com diferentes formas de inter-relação e com efeitos em várias escalas. A complexidade trouxe *insights* importantes para a ciência, mas os aspectos de política dessa nova abordagem foram pouco explorados, tanto no Brasil quanto no mundo.

Este livro busca ajudar a construir essa ponte entre complexidade e políticas públicas, reunindo um grupo internacional de pesquisadores renomados, provenientes do Instituto Santa Fe, Universidade de Maryland, Universidade de Michigan, Universidade de Tóquio, Universidade de Sidney, ETH Zurique, Universidade de Bielefeld, Universidade de Utrecht, New England Complex Systems Institute, Instituto Politécnico de Lisboa, MITRE Corporation, Universidade de Brasília, Universidade de São Paulo, e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), além de técnicos do Ipea.

Ao introduzir os principais conceitos, métodos e o estado da arte da pesquisa na área, a coletânea busca constituir-se em uma contribuição seminal para a aplicação da abordagem de complexidade às políticas públicas, assim como uma porta de entrada para o mundo da complexidade.

Dado o foco do Ipea em aprimorar políticas públicas, já é tempo de olharmos para os diferentes aspectos desta nova abordagem e de explorar os *insights* e aplicações que podem aprimorar a formulação e análise de políticas. Você está convidado a se juntar a nós nesta jornada.

Jessé Souza  
**Presidente do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**



## PREFÁCIO<sup>1</sup>

Scott E. Page<sup>2</sup>

No clássico *The phantom toolbooth*, de Norman Juster, o protagonista Milo e seu companheiro, um grande cão chamado Tock, não conseguiam descobrir como fazer seu coche avançar. Um duque se aproxima e diz a eles que se quisessem que a carroça se movesse, bastaria apenas se sentarem em silêncio, que a carroça se moveria por vontade própria. O mesmo poderia se pensar sobre a relevância da teoria da complexidade para políticas públicas – que se move por vontade própria.

Dada a complexidade dos processos políticos e burocráticos envolvidos na formulação de políticas e dada a complexidade dos sistemas sobre os quais a maioria das políticas são aplicadas, pode-se supor que a complexidade obteria sua relevância por vontade própria. No entanto, não é o que ocorre. A multiplicidade de modelos, conceitos e ideias que compõem o campo de estudos da complexidade raramente são considerados na arena política, e quando o são, participam marginalmente.<sup>3</sup>

Portanto, ao contrário de Tock e Milo, cientistas da complexidade não podem sentar-se calmamente em silêncio. Se cientistas da complexidade querem que suas ideias contribuam no avanço e aprimoramento de políticas públicas, devem se pronunciar claramente e em voz alta. Neste volume, muitos estudiosos proeminentes optaram por fazer exatamente isso. O impacto das suas ações deve ser substancial.

O livro inclui contribuições de vários dos principais estudiosos no campo de sistemas complexos. Com isso, não é surpreendente que o volume alcance objetivos múltiplos e ambiciosos: introduz os conceitos e as ferramentas de sistemas complexos; demonstra a relevância da teoria da complexidade para políticas públicas; contrasta a abordagem da complexidade para políticas públicas em relação aos métodos tradicionais; e, finalmente, apresenta estudos de caso e exemplos que demonstram provas da validade do conceito, concentrando-se em políticas específicas no Brasil e no exterior.

---

1. Tradução: Bernardo Alves Furtado.

2. Professor de sistemas complexos e ciências políticas da cátedra Leonid Hurwicz e da Universidade de Michigan. É membro da Academia Americana de Artes e Ciências. Professor externo do Santa Fe Institute. Autor dos livros *The difference* e *Complex adaptive systems*.

3. Modelos de mudança climática podem ser vistos como um contraexemplo. De um lado, podem ser descritos como modelos do tipo de sistemas complexos, de outro, podem ser vistos como uma mistura de modelos econômicos-padrão com modelos geofísicos, que não incluem vários elementos centrais de modelos de sistemas complexos.

Então, o que são sistemas complexos? Sistemas complexos consistem de atores diversos e que se adaptam, que interagem com seus vizinhos e por conexões de redes. Essas interações produzem resultados agregados – o consumo total de petróleo ou o preço médio do trigo vermelho, padrão 2 –, mas também produzem fenômenos emergentes, tais como ondas em padrões de tráfego, quebras nos mercados de ações e até mesmo elementos de cultura, como a espanhola, por exemplo. Esses fenômenos globais incorporam-se como parte real do mundo e, por sua vez, induzem (novas) adaptações no nível micro. Estes, ainda, criam novos fenômenos no nível macro.

As ricas dinâmicas resultantes podem assumir várias formas. Elas podem convergir para equilíbrios. Podem produzir ciclos ou padrões simples, tal como a tendência linear de produção mundial de petróleo ao longo dos últimos cem anos. Podem produzir séries temporais complexas, como é o caso dos preços de petróleo. Finalmente, podem produzir dados que parecem aleatórios, uma propriedade quase satisfeita pelos preços de ações dessazonalizadas. Em suma, sistemas complexos podem produzir qualquer resultado. E porque eles podem fazê-lo, podem também nos ajudar a entender quase tudo.

O discurso, então, “de elevador” que, em dois minutos, explicita o porquê de precisarmos trazer a abordagem da complexidade para o domínio da política, depende, em parte, dessa sintonia: se quisermos compreender o ambiente da política como geradora de resultados complexos, tais como mudanças constantes de quantidade e preços de imóveis, padrões de tráfego, ou caminhos divergentes de sucesso escolar, então deveríamos utilizar modelos capazes de reproduzir padrões similares de complexidade.

Olhando de forma comparada, essa lógica desafia o paradigma predominante de equilíbrio: por que alguém embasaria políticas em domínios complexos a partir de modelos que pressupõem equilíbrio? O argumento coaduna com aquilo a que William Rand, neste volume, se refere como a crítica dita “luz ao pé do poste” de modelos econômicos neoclássicos: eles iluminam, mas não exatamente onde nós deveríamos estar investigando. Modelos de sistemas complexos representam lanternas a guiar-nos para novos locais no espaço de modelagem.

O argumento também se sustenta na interconexão entre ações de políticas. Política de educação, política ambiental, política de zoneamento, decisões de infraestrutura, energia e políticas de todos os tipos chocam-se umas com as outras. De forma metafórica, as políticas não podem ser armazenadas em silos. De forma matemática, parciais cruzadas diferentes de zero proliferam. Esforços para reduzir a desigualdade econômica, com empréstimos à habitação, induzem preferências residenciais, que, por sua vez, influenciam a qualidade das escolas, a densidade de tráfego, as taxas de criminalidade e assim por diante. Como demonstrado por Furtado *et al.*, neste volume, abordagens de sistemas complexos permitem que

políticas públicas possam ser consideradas de forma abrangente e simuladas explicitamente em toda a sua multiplicidade de setores e escalas, de causa e de efeito. Uma observação corroborada pelo excelente capítulo escrito por Claudio Tessone.

A despeito dos argumentos, este livro assume postura balanceada. Não se nega que abordagens típicas de avaliação de políticas – modelos de equilíbrio e, quando possível, experimentos naturais – são ferramentas úteis e muitas vezes poderosas. Sistemas complexos não representam uma bala de prata, mas outra seta no arco do tomador de decisões políticas. Mais precisamente, todas essas ferramentas juntas podem ser pensadas como várias setas imperfeitas que fornecem informações sobre o que é provável que aconteça, o que poderia acontecer e como o que acontece pode afetar outros domínios.

Considere, por exemplo, um experimento natural padrão ouro que revela uma política como caso de sucesso. Modelos de sistemas complexos podem sugerir que a política poderia criar vários tipos de resultados. O sucesso da política pode bem ter sido boa sorte – como pegar um dado e sair um seis. Em vez de aplicar a política nacionalmente, um gestor de política prudente poderia realizar mais alguns experimentos para ver se, de fato, o resultado não foi apenas uma jogada de sorte.

Alternativamente, modelos de sistemas complexos podem demonstrar que a política, embora bem-sucedida, produz *feedbacks* negativos no longo prazo. Uma análise desses *feedbacks*, como William Rand demonstra em seu capítulo, nos proporciona uma compreensão mais profunda dos efeitos de uma dada política.

Note-se que esses *feedbacks* produzem efeitos não lineares que, em conjunto com a heterogeneidade típica da complexidade, podem tornar um modelo intratável do ponto de vista das técnicas de otimização ou teoria dos jogos. Durante décadas, essas restrições de tratabilidade limitaram a dimensionalidade e o realismo dos modelos. Os tomadores de decisão política tinham de contar com modelos que pudessem resolver. Esses modelos não eram complexos.

Devido ao aumento no poder computacional e à introdução de uma nova metodologia, os modelos baseados em agentes (ABMs), a tratabilidade matemática tornou-se menos restritiva. Qualquer modelo que pode ser codificado como um programa de computador pode ser explorado. No entanto, devemos ser céticos, duvidar (ouso dizer, desdenhar), quando alguém afirma: “Eu tenho uma simulação que mostra (preenche o espaço em branco)”. Há vasto grupo de modelos mal construídos, codificados como “macarrão”, não validados, não verificáveis, não calibrados; com existência de número bem menor de modelos úteis. Como Gentile, Glazner e Koehler deixam claro em seu capítulo, os ABMs têm um enorme potencial como ferramenta para a comparação de soluções de políticas, mas devem ser construídos por pessoas com experiência na utilização da metodologia.

Os modelos resultantes podem incluir agentes que usem algoritmos de aprendizagem sofisticados<sup>4</sup> ou podem contar com regras relativamente simples. Nenhum ABM vai nos dizer com certeza os efeitos da política, mas muitos modelos com diferentes níveis de detalhamento e domínios de interação nos darão uma melhor compreensão do conjunto de possibilidades e, consequentemente, garantirão políticas mais robustas. Não seria mesmo o *evitar surpresas* um dos objetivos importantes dos tomadores de decisões políticas?

A política econômica é um domínio no qual os eventos-surpresa podem ter consequências dramáticas. Mais de duas décadas atrás, vários economistas seniores propuseram a noção de que a economia seria descrita de forma mais precisa como um sistema complexo adaptativo do que como um sistema em equilíbrio. Embora os modelos de equilíbrio ainda predominem, estes modelos incluem redes, aprendizagem e agentes heterogêneos, mas que nem sempre tomam decisões ótimas. Além disso, o estado da arte indica que esse tipo de modelo em equilíbrio (modelos dinâmicos estocásticos de equilíbrio geral – DSGEs) passa grande parte do tempo fora do equilíbrio.

Em sua essência, porém, os modelos DSGEs dependem de equilíbrios para caracterizar a dinâmica. A economia está sempre se dirigindo para um equilíbrio. Em outras palavras, o modelador e os atores do modelo sabem para onde a economia está indo. Em contraste, os modelos ABM de economia fazem suposições e, em seguida, repetindo as ideias de Orlando Gomes e dos capítulos de Rand, a economia emerge de baixo para cima.

Dois capítulos deste volume esclarecem essa abordagem da complexidade para a modelagem em economia. Gomes tanto descreve o caso conceitual como apresenta um modelo de sistemas complexos (relativamente) simples. Em contraste, Herbert Dawid mostra como se abraçar a complexidade na sua íntegra. Ele fornece uma introdução ao elaborado modelo Eurace@Unibi de economia. Esse modelo, intencionalmente realista, inclui consumidores espacialmente situados e dotados de orçamentos, empresas com fornecedores e estoques para permitir melhor compreensão das políticas relevantes. Os resultados indicam que: a política pode ser relevante longe do equilíbrio; as respostas individuais podem diferir dos efeitos agregados;<sup>5</sup> os resultados podem ser dependentes da trajetória; e os detalhes institucionais podem ser importantes. Essas não são afirmações vazias. Evidências sugerem que, em alguns domínios, ABMs podem fazer previsões melhores do que os modelos convencionais.

---

4. A esse respeito, ver o capítulo de Jaime Sichman nesta obra.

5. Esse seria o caso quando o resultado é emergente e não incremental. Quando *feedbacks* e não-linearidades estão presentes, a heterogeneidade dos agentes pode produzir resultados agregados que são distintos daqueles resultados que seriam produzidos por uma economia composta de agentes idênticos.

Mas ABMs também podem fazer previsões piores. E, embora seja tentador encenar uma corrida de cavalos entre os modelos de complexidade e os modelos de equilíbrio da economia, esse não é o ponto levantado anteriormente acerca de existirem várias setas à disposição no arco do tomador de decisões políticas. Os modelos econômicos consideram a economia. Modelos de abordagem complexa têm o potencial de ver a economia como parte de um sistema mais abrangente, no qual as pessoas se envolvem em movimentos sociais, enfrentam mudanças de regimes políticos, respondem a ameaças de epidemias, desastres naturais e mudanças climáticas. Tudo isso pode ser considerado como endógeno ao sistema econômico. Poderíamos tentar separar a economia e estudá-la de forma isolada, assim como poderíamos estudar somente o sistema circulatório, o sistema nervoso, o sistema imunológico ou o sistema digestivo, mas, se o fizermos, perderemos o verdadeiro espetáculo.

O verdadeiro espetáculo ocorre em múltiplas escalas: a partir da família, da cidade, da nação, para o mundo. As cidades oferecem uma escala útil, como mostra Luis Bettencourt em seu capítulo, que resume vários anos de estudos. As cidades, como muitos notaram, são os motores da economia. Como Paul Krugman disse certa vez, quase qualquer um pode identificar cidades de um avião em uma noite clara, mas quase ninguém poderia desenhar os limites de um país. Cidades, por isso, constituem-se como importante escala de atividade para a análise. Bettencourt mostra que isso é verdade, destacando descobertas provocativas das chamadas leis exponenciais de escala – escalas de produtividade observadas como superlineares e escalas de infraestrutura, como sublineares – e justapondo a tais leis implicações do paradigma da complexidade e visões históricas da cidade analisadas a partir da engenharia. Ele valoriza a participação da informação e do processo de aprendizagem ao ponderar os efeitos de políticas públicas e identifica critérios para indicar quando a adaptação local supera a implementação de políticas centralizadas.

Yaneer Bar-Yam enfatiza múltiplas escalas – desde mercados únicos até mercados mundiais de larga amplitude. Desregulamentação de uma mercadoria (uma política nacional na escala econômica) pode resultar em mudanças na escala global de preços. Essas mudanças, por sua vez, podem deprimir receitas de firmas, o que poderia, em certas condições, resultar em manifestações e protestos em escala regional. Citando Bar-Yam, “subsídios energéticos de uma nação podem causar fortes altas de preços globais de alimentos, desencadeando agitação política do outro lado do mundo” (p. 288 deste volume). Os fenômenos gerais a que ele se refere são capturados na famosa letra da Disney de Richard e Robert Sherman – vivemos, na verdade, “em um pequeno mundo, afinal”.

Nesse pequeno mundo, os tomadores de decisão política devem fazer escolhas. Inevitavelmente, haverá sucessos e fracassos. A razão de ser deste volume é aumentar a incidência de sucessos e reduzir a de fracassos. Talvez a frase mais forte do livro seja a

de Bernardo Mueller, descrevendo dois estudos de caso. Relatando o arranjo político brasileiro, escreve ele: “o uso desta abordagem por parte de governos no processo de formulação e implementação de políticas públicas tem sido limitado” (p. 291).

No Brasil, a abordagem da complexidade não se move por vontade própria, ainda que as instituições legislativas do país pareçam ser bastante complexas, como comprovado por Acir Almeida. O autor mostra as contribuições de uma perspectiva da complexidade sobre a atividade legislativa. Usando modelos de ciência política e de sistemas complexos, ele demonstra como as ideias da teoria da complexidade acrescentam à nossa compreensão de padrões emergentes de tomada de decisão no Congresso Nacional.

Essa tomada de decisão legislativa ocorre dentro de um sistema brasileiro, no qual, de acordo com Mueller, o Executivo exerce um poder enorme. É claro que há uma estrutura de pesos e contrapesos neste poder, mas o mais relevante é a maneira como as políticas são formuladas. Mueller aponta falhas no que ele chama de modelo reducionista, ou seja, abordagem não complexa. Os domínios de intervenção da política em questão – o uso da terra, a saúde pública, o meio ambiente e o transporte – são todos domínios complexos. As políticas são desenvolvidas e avaliadas como se eles não fossem. Em sua opinião, isso é um erro.

O capítulo subsequente, de Dick Ettema, desenvolve essa linha de crítica com mais detalhes. Ele descreve a abordagem de engenharia para a política de transportes, com ênfase no cumprimento de critérios individuais de alcance de sucesso ou de utilidade, tais como evitar congestionamento ou níveis de poluição. Esses modelos nivelam os efeitos sobre os mercados da habitação, desigualdade e exclusão social.

A maioria das pessoas aceita que os sistemas de transporte e os mercados de ações são sistemas complexos. As pessoas passam por congestionamentos e engarrafamentos de trânsito. Elas observam os preços das ações subir por semanas com apenas pequenas mudanças e, em seguida, cair 5% ou 10% em poucas horas. Outros sistemas, como os sistemas de ensino, são menos obviamente complexos. O tempo passa de forma mais lenta. Mudanças fenomenológicas são mais abstratas e menos facilmente mensuráveis. No entanto, como demonstra Michael Jacobson, escolas podem ser vistas como sistemas complexos, e isso pode ser útil na sua análise.

Políticas públicas podem tentar melhorar escolas, alterando certos parâmetros – reduzindo o tamanho da classe ou aumentando a qualidade dos professores. Políticas públicas também podem tentar melhorar mecanismos. Ambos os tipos de políticas têm uma orientação linear e são apresentados como tal, sugerindo que uma redução de X% na razão professor-aluno levaria a um aumento de Y% em notas dos alunos. Esse é mais um exemplo de um foco falacioso em uma única derivada parcial dentro de um sistema complexo, ponto esse reforçado por Sakowski e Tóvolli em sua análise da política educacional brasileira.

Políticas públicas estão interconectadas a outros domínios. Na construção de uma política pública eficaz, não se pode proceder dimensão por dimensão. Passo 1: minimizar o tempo médio de viagem. Passo 2: maximizar os resultados dos testes dos alunos. Passo 3: reduzir a inflação. Passo 4: produzir plano de manejo florestal sustentável. Políticas ocorrem dentro de sistemas, e esses sistemas interagem entre si. Em particular, há forte interação entre o social e o natural, como deixa bem claro o capítulo de Marcos Aurélio Santos da Silva, em sistemas socioterritoriais.

Em suma, se concentramos a análise nas florestas ou nos estudantes do Brasil, ou do mundo, não podemos deixar de ver a complexidade inerente aos sistemas. Vemos pessoas diversas, com propósitos distintos, construindo vidas, interagindo dentro das instituições, conformando-se às restrições e às regras e reagindo a incentivos criados por políticas públicas. Essas atividades ocorrem em sistemas complexos, e quando as atividades e seus efeitos se agregam, eles produzem *feedbacks* e criam padrões emergentes e funcionalidades. Por definição, sistemas complexos são difíceis de se descrever, explicar e prever, por isso mesmo não podemos esperar políticas ideais. Mas podemos ter esperança de melhorar, de fazer melhor. Dispondo-se de mais ferramentas, especialmente as ferramentas da ciência da complexidade, que se encontram em constante maturação e evolução, melhores cientistas e gestores de políticas públicas teremos. Cientistas da complexidade podem mover levemente a agulha da bússola. Mas eles não podem mais se sentar calmamente em silêncio.





Aerial night view of a city, showing a dense network of illuminated streets and buildings. The lights are primarily yellow and orange, creating a glowing pattern against the dark sky.

# PARTE I

## Complexidade: Teoria, Métodos e Modelagem



## CAPÍTULO 1

# ABORDAGENS DE SISTEMAS COMPLEXOS PARA POLÍTICAS PÚBLICAS

Bernardo Alves Furtado<sup>1</sup>  
Patrícia Alessandra Morita Sakowski<sup>2</sup>  
Marina Haddad Tóvolli<sup>3</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas complexos podem ser definidos de forma ampla e abraçar conceitos de diferentes campos da ciência, da física à biologia, à computação e às ciências sociais. O conceito central de sistemas complexos pressupõe sistemas dinâmicos, não lineares, que contêm grande número de interações entre as partes. Esses sistemas se modificam, de modo a aprenderem, evoluírem e adaptarem-se e geram comportamentos emergentes e não determinísticos.<sup>4</sup> Políticas públicas são aplicadas em uma vasta gama de questões que envolvem o público, a ampla comunidade de cidadãos e comunidades, empresas e instituições. Políticas públicas também abarcam uma série de questões setoriais que são entrelaçadas, assíncronas e espacialmente sobrepostas. Esse entendimento cruzado de sistemas complexos e de políticas públicas sugere que a maioria dos objetos de políticas públicas – sejam eles de natureza econômica ou urbana, de consequências ambientais ou políticas – podem ser vistos como sistemas complexos. Assim, se objetos de políticas públicas podem ser vistos como sistemas complexos, a compreensão desses objetos pode se beneficiar do uso de metodologias associadas a sistemas complexos. São exemplos dessas metodologias: análise de redes, modelagem baseada em agentes, simulação numérica, teoria dos jogos, formação de padrões e outras abordagens no âmbito de sistemas complexos. Essas metodologias são aplicadas a diferentes aspectos da ciência, mas com menos frequência para análise de políticas públicas.<sup>5</sup> Nossa hipótese neste texto é que o uso desses conceitos e metodologias em conjunto pode contribuir para melhorar a forma como as políticas de objetos complexos são planejadas, executadas, previstas e avaliadas de um ponto de vista da sociedade como um todo.

1. Pesquisador e Coordenador na Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação, Regulação e Infraestrutura (Diset) do Ipea e bolsista de Produtividade do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

2. Técnica de Planejamento e Pesquisa e assessora de Planejamento e Articulação Institucional do Ipea.

3. Economista, mestre em Ciência Política e bolsista do Programa Nacional de Pós Doutorado (PNPD) do Ipea.

4. Uma discussão abrangente e didática sobre complexidade está disponível em Mitchell (2011). Os conceitos clássicos que compõem a ciência da complexidade podem ser encontrados em Furtado e Sakowski (2014).

5. Inicialmente, o leitor poderá consultar Colander e Kupers (2014), que fornecem uma revisão focada na economia. Edmonds e Meyer (2013) fornecem referências técnicas ao tema. Um relatório inicial pode ser encontrado em OECD (2009).

Dadas as rápidas definições de sistemas complexos e de políticas públicas feitas, este capítulo ainda aprofunda os conceitos, lista as metodologias e descreve a implementação computacional de metodologias de sistemas complexos. Em seguida, o texto demonstra a aderência desses conceitos e metodologias para análise de políticas sociais, urbanas e econômicas e enumera as vantagens da abordagem de sistemas complexos especificamente para políticas públicas. Finalmente, o capítulo destaca algumas aplicações no planejamento de transportes, na educação, no estudo do Legislativo e na análise territorial. Com isso, este capítulo apresenta e resume o conteúdo do livro.

Em suma, o objetivo deste capítulo é: definir sistemas complexos e seus atributos mais proeminentes; listar as metodologias mais comuns associadas com sistemas complexos; apresentar gama variada de aplicações de modelagem de sistemas complexos para as políticas públicas; e discutir, ainda que brevemente, as vantagens da aplicação destas abordagens a um contexto de políticas públicas.

## 2 DEFINIÇÕES DE SISTEMAS COMPLEXOS E DE POLÍTICAS PÚBLICAS

As definições de sistemas complexos são geralmente feitas em um dado contexto específico; entretanto, usualmente incorpora o seguinte conjunto de elementos.

Em primeiro lugar, está a ideia forte de interação entre as partes, considerando as escalas e dando relevância espacial e temporal. Essas interações, por sua vez, levam a um sistema que não é redutível a suas partes. Ou seja, um sistema que não pode ser descrito apenas pelos atributos de suas partes componentes. Citando o clássico artigo de Anderson *Mais é diferente* (1972, p. 395): “Neste caso, podemos ver como o todo se torna não só mais do que, mas muito diferente da soma de suas partes”.

Em segundo lugar, a interação entre as partes pode levar à auto-organização do sistema, sem a necessidade de controle central. Isto implica que as interações locais podem gerar comportamentos que emergem de baixo para cima. Esse conceito poderoso pode ser ilustrado para o leitor iniciante com o exemplo de voo de pássaros em formação. Nenhum pássaro específico controla a direção e posição de todas as aves em voo. Cada pássaro só observa aqueles mais próximos e sincroniza seu voo com seus vizinhos imediatos. Como resultado, a partir das aves individuais (de baixo para cima), o voo coordenado emerge.

Um terceiro atributo a ressaltar é que os sistemas complexos podem experimentar *feedback*. Em sistemas complexos, as interações têm efeitos no tempo: ações, em um determinado momento, refletem-se sobre as possibilidades e limitações nos momentos seguintes. É por isso que os sistemas complexos são caracterizados como sistemas que aprendem, se adaptam e evoluem.

Todas essas características de sistemas complexos parecem ser úteis para o estudo das políticas públicas. Como indicado a seguir (e ao longo dos capítulos do livro), a maioria dos objetos de políticas públicas contêm características semelhantes e podem ser facilmente rotulados como sistemas complexos. A relevância dessa perspectiva de objetos de políticas públicas como sistemas complexos é que os métodos associados e metodologias disponíveis para o estudo de tais sistemas tornam-se disponíveis para serem aplicados a políticas públicas, contribuindo para melhorar a sua análise.

Essencialmente, isso significa que modelagem (de sistemas) e simulações podem ser usadas para investigar políticas públicas. Isto é especialmente relevante em áreas de políticas públicas, nas quais experimentos geralmente não são simples, baratos ou mesmo viáveis.

Simular significa modelar a ação e a interação entre os cidadãos, as empresas, as instituições e o ambiente, condicionados pela legislação e regulamentação, o orçamento, a política e os limites espaciais (...) *trabalhar com sistemas complexos, aplicados a política pública significa criar ambientes experimentais computacionais em que a essência dos sistemas está presente e de onde se podem retirar elementos de melhoria das políticas públicas de uma forma relativamente simples e barata, além de aumentar a compreensão dos efeitos (espacial e temporal) das políticas* (Furtado e Sakowski, 2014, p. 7, grifo nosso).

Assim, o argumento que se defende é que os métodos de sistemas complexos têm o potencial para informar políticas públicas e ajudar a compreender seus efeitos, sua efetividade e seus custos diretos e indiretos.

Ao longo do livro, definições semelhantes de sistemas complexos e de políticas públicas são apresentadas. No entanto, cada definição enfatiza perspectivas próprias, que, no conjunto, se somam à definição mais completa a que o livro se propõe. Fuentes, por exemplo, recupera a definição de Murray Gell-Mann e Seth Lloyd de *complexidade eficaz* como o comprimento de uma descrição altamente compacta de suas regularidades (capítulo 3 deste livro). Sichman, por sua vez, centra-se nas interações como “processamento de informação”. Tessone investiga o conceito de heterogeneidade e distingue heterogeneidade idiosincrática, aquela original ao sistema, da heterogeneidade endógena que emerge no próprio sistema na medida em que ele evolui. Dawid e Gomes discutem complexidade do ponto de vista da economia e lembram ao leitor a relevância da análise dinâmica, em contraste com a noção de mercados em equilíbrio que se ajustam instantaneamente. Bettencourt afirma que o problema da interação entre cidadãos e ambiente urbano se resume a “como criar um conjunto de procedimentos no espaço que faça tal interação possível com um custo proporcional aos seus benefícios” (capítulo 10 deste livro). Mueller avança nos conceitos de processamento de informações já elaborados por Sichman e defende que:

a política [seja] intensiv[a] em informação quando a informação é escassa; governos tentam centralizar políticas que são inherentemente locais; o governo assume o controle

do processo, quando, na realidade, só pode agir de forma reativa; exige a mensuração e avaliação ao longo de uma série de margens diversas e sutis, enquanto, na realidade, uma métrica única e imprecisa é usada (o número de famílias assentadas); trata-se de forma míope política que se desenrola a longo prazo (capítulo 12 deste livro).

Consistentemente, os capítulos referem-se à dinâmica de influência entre os objetos e os sujeitos no tempo; a dinâmica das causalidades de efeito cruzado em que “os produtos e os efeitos são ao mesmo tempo causas e produtores do que os produz” (Morin, 2011, p. 74, citado por Sakowski e Tóvolli no capítulo 15 deste livro). Assim, as metodologias têm que ser capazes de “incorporar as mudanças endógenas” (capítulo 16 deste livro) ou “capturar explicitamente as hipóteses causais subjacentes das propostas de política, de modo que possamos experimentar” (capítulo 4 deste livro).

Essa discussão da dinâmica dos sistemas também leva a um debate sobre o momento da análise e do calendário de política. Bettencourt argumenta que existem problemas que podem ser gerenciados em “sua [forma] mais simples, a gestão técnica de curto prazo”, mas também fenômenos que anseiam por “desafios complexos de longo prazo” (capítulo 10 deste livro). Para Ettema, a questão do transporte pode ser colocada em duas categorias: um problema de engenharia, baseado em métricas de desempenho, tais como a frequência de uma linha de ônibus; ou o transporte também pode ser visto como uma questão imbuída nos processos urbanos e sua mobilidade, em uma perspectiva de longo prazo. Ainda sobre a dinâmica dos processos, Jacobson lembra que a aprendizagem cognitiva ocorre em vários lugares, momentos e experiências, com escalas temporais que variam entre minutos, horas, semestres e anos.

Finalmente, Mueller também menciona que avaliações de políticas públicas baseiam-se, implicitamente, na definição de um sistema que pode ser facilmente controlado e medido sobre métricas que são conhecidas *a priori*. Essa hipótese não permite a concepção de que os sistemas se adaptam, evoluem e aprendem, especialmente sistemas que são objetos de políticas públicas, tais como a economia, o meio ambiente, a sociedade e as cidades (capítulos 6-9 deste livro).

### 3 MÉTODOS<sup>6</sup>

Os métodos e as metodologias utilizadas na abordagem de sistemas complexos vêm de disciplinas já existentes e não são novas *per se*. No entanto, essas metodologias refletem os princípios e conceitos discutidos anteriormente.

6. Descrições detalhadas de métodos e metodologias se encontram no capítulo 3.

Assim, a primeira questão a salientar é considerar de forma estrutural a não linearidade dos sistemas. De outra forma, sistemas não lineares são aqueles em que as saídas não são proporcionais às entradas. Não linearidade refere-se ainda à interação entre elementos que geram comportamentos emergentes. Além disso, o resultado do sistema pode não ser totalmente dedutível de forma analítica *ex-ante*. Abordagens que incluem não linearidade têm sido usadas em aplicações da física (*laser*, supercondutores, dinâmica de fluidos), engenharia, biologia (ritmos biológicos, surtos de insetos, estudos genéticos), química e criptografia (Strogatz, 2014).

A análise de redes<sup>7</sup> – campo metodológico relativamente recente – estuda as interações (arestas) entre partes (nós). Quão forte, por quanto tempo e quão relevante são as ligações entre as pessoas ou instituições? Como é a conectividade de uma determinada rede, de que modo mudanças em um nó específico afetam as outras conexões de forma significativa? Essas são algumas das perguntas a que a análise de redes pode ajudar a responder.

Estritamente ligada à análise de redes está a teoria da informação ou, segundo Shannon (1948), de modo mais amplo, teoria da comunicação. A teoria da informação foi proposta antes da análise de redes e está relacionada com a definição de informação propriamente dita. Estabelece a quantificação e definição dos elementos envolvidos em qualquer troca de informação, seu armazenamento e características de compressão. É a partir da teoria da informação (e teoria da probabilidade)<sup>8</sup> que indicadores, como entropia e informação mútua, são definidos. Essas medidas quantitativas são aplicadas a diferentes áreas da ciência de telecomunicações, da biologia à teoria da probabilidade, à física estatística, ciência da computação e medicina. Um aspecto central da teoria da informação e suas medidas associadas é a quantificação de incerteza. Dada a informação passada, quão incerto é o próximo *bit*? Novamente, isso está relacionado com a noção de uma medida para a complexidade e também para a definição de entropia (Crutchfield e Feldman, 2001; Gell-Mann e Lloyd, 2004; Szilard, 1964; Turing, 1952).

Duas outras metodologias usualmente utilizadas em sistemas complexos são autômatos celulares (CAs, do inglês *cellular automata*) e modelos baseados em agentes (ABMs, do inglês *agent-based models*).<sup>9</sup> São metodologias semelhantes no sentido de que ambas utilizam-se de agentes – com desenho amplo e livre – que seguem regras. O uso de ABMs e CAs possibilita simular interações no sistema e observar as propriedades que emergem dessas interações. A diferença entre CAs e ABMs é que, enquanto para CAs os agentes são fixos no espaço, para ABMs estes podem ser móveis. Os CAs são mais relevantes para o estudo de análise espacial em que as interações locais,

7. Para mais informações, ver: Newman (2003), Newman, Barabási e Watts (2006) e Williams e Martinez (2000).

8. Tais como em análises de agrupamento de análise de árvores hierárquicas.

9. Para mais informações, ver revisão abrangente das aplicações de ABMs nas ciências sociais no capítulo 5.

fisicamente limitadas, são relevantes para o problema em questão. Os ABMs, por sua vez, podem ser modelados para serem fixos ou móveis e podem estar em estrutura de tal modo que o espaço é completamente irrelevante. Os ABMs podem até mesmo ser pensados como ligações em redes, assemelhando-se, assim, à análise de redes.

Por fim, vale ressaltar os esforços decorrentes da ciência da computação e da disponibilidade contemporânea de dados espacialmente precisos e individualmente detalhados. Essa abundância de dados facilita o uso de metodologias como a mineração de dados (*data mining*), o aprendizado de máquinas e a inteligência artificial, que são conjuntos de técnicas que contribuem na simulação de sistemas complexos e, portanto, permitem outras perspectivas.

### 3.1 Ferramentas metodológicas

A maioria das metodologias são implementadas utilizando métodos computacionais. De fato, foi a disponibilidade de poder de processamento, juntamente com bancos de dados detalhados, que permitiu a expansão de estudos e aplicações em sistemas complexos nas últimas décadas.<sup>10</sup> Contemporaneamente, há inúmeros programas de computador específicos para rodar modelos de simulação.<sup>11</sup>

Os modelos também podem ser simulados em linguagem típica de programação, tais como C++ e Java, ou podem ser utilizados programas estatísticos e de modelagem tradicionais, tais como Matlab ou Mathematica. Python é uma linguagem de alto nível, flexível, e tem sido usada bastante para simulação e modelagem (Downey, 2012; McKinney, 2012; North, Collier e Vos, 2006) – por exemplo, usando a biblioteca Simpy<sup>12</sup> – ou associada a softwares espaciais, tal como o QGIS. Especificamente para análise de redes, a biblioteca de Python NetworkX<sup>13</sup> é considerada bem adequada.

Um programa de computador que já existe há algum tempo é o NetLogo.<sup>14</sup> Construído em Java, contém conjunto de comandos de fácil utilização, o que leva rapidamente o programador iniciante à capacidade de modelador operacional. O NetLogo permite a modelagem de CAs, bem como ABMs. Mais recentemente, o programa incorporou recursos de *links* em formato de rede. Seus resultados são facilmente intercambiáveis com outras linguagens e programas de análise, tais como Python, R ou o QGIS.

10. Periódicos dedicados aos sistemas complexos incluem: *Journal on policy and complex systems*, *Complex systems*, *The journal of artificial societies and social simulation*, *Complex adaptive systems modeling*, *Ecological modelling*, *Advances in complex systems*, *computers, environment and urban systems*, *Complexity*, *computational economics*. Uma lista com pelo menos 41 centros em complexidade está disponível em: <<http://goo.gl/aTTjKQ>>.

11. Exemplos incluem (não exaustivamente): MASON, Swarm, RePast, NetLogo, Flame, MASS e pelo menos outros 78: <<http://goo.gl/loMoFE>>.

12. Documentação completa disponível em: <<http://goo.gl/K9Mwqv>>.

13. Documentação completa disponível em: <<http://goo.gl/uiYUwQ>>.

14. Disponível em: <<http://goo.gl/veJ74Q>>.

## 4 POLÍTICAS PÚBLICAS COMO OBJETOS COMPLEXOS

Esta seção discute a natureza complexa de objetos de políticas públicas, tais como sistemas sociais, econômicos, urbanos e ambientais. A hipótese é que todos estes objetos podem ser facilmente definidos como sistemas complexos. Os capítulos 6-9 do livro aprofundam os argumentos.

### 4.1 Sociedade

Os sistemas sociais podem ser descritos como uma coleção de agentes heterogêneos (indivíduos, bancos, países etc.), cujo estado de um agente (opinião, a liquidez, a riqueza etc.) influencia e é influenciado pelo estado dos outros e cujas interações juntas dão origem às propriedades globais do sistema, propriedades essas que são mais que a soma do comportamento individual. Esses aspectos caracterizam sistemas sociais como complexos. A compreensão de como esses sistemas respondem às influências externas, como evoluem e quais características emergem a partir de quais configurações são de particular interesse para a análise de políticas públicas. Por exemplo, como um sistema social responde a mudanças na política? Simular os efeitos de mudanças de política pode ser particularmente útil para medidas de políticas de governo.

### 4.2 Economia

Um sistema econômico é composto por atores heterogêneos, com características, expectativas e regras de comportamento diferentes, atores que interagem uns com os outros e com o meio ambiente. Além disso, os atores estão em constante processo de aprendizagem, gerando sistemas econômicos que se transformam no tempo. A visão econômica tradicional ou clássica se baseia nos pressupostos de equilíbrio de mercado, previsão perfeita e comportamento de equilíbrio, assim, não incorpora os elementos acima mencionados, produzindo análises, por vezes, muito abstratas e que tornam difícil a compreensão do sistema como um todo, em especial nos seus momentos de crise.

Nesse contexto, os modelos alternativos que incorporam tais elementos podem trazer ganhos para a análise e aumentar a compreensão de processos econômicos. A heterogeneidade dos agentes e as características de configurações institucionais que orientam as interações econômicas não devem ser ignoradas. Muitas metodologias, já apresentadas na seção 2, são utilizadas na análise econômica a fim de capturar tais elementos. Uma das metodologias mais utilizadas em modelagem econômica tem sido a abordagem de simulação baseada em agentes. Este método é a base do modelo Eurace@unibi,<sup>15</sup> um modelo macroeconômico baseado em agentes, fechado, que tem sido usado como estrutura unificada para análise de

15. Ver capítulo 9 e Dawid et al. (2012; 2014) para detalhes do modelo Eurace@unibi.

políticas em diferentes áreas de política econômica, tais como política fiscal, mercado de trabalho e questões relacionadas à desigualdade de renda. Além disso, não só os modelos de economia computacional baseados em agentes (Farmer e Foley, 2009; LeBaron e Tesfatsion, 2008), mas também a análise de redes (Jackson, 2010; Newman, 2010) e as abordagens analíticas com modelos baseados em agentes (Alfarano, Lux e Wagner, 2008; Dawid, 1996; Delli Gatti *et al.*, 2012) são úteis para fornecer imagem mais clara da dinâmica dos sistemas econômicos.

### 4.3 Cidades

Cidades em particular ou espaços urbanos em geral são lugares por excelência onde as pessoas e as instituições entrelaçam-se, geralmente, de forma produtiva e inovadora (Glaeser, 2012; Jacobs, 1970). No entanto, para alcançar o máximo de seus potenciais, pessoas e instituições precisam cobrir algumas funções básicas dentro desse seu espaço compartilhado: habitar, transitar, trabalhar e se divertir.<sup>16</sup> Cidades são gerenciadas politicamente, o que reforça o fato de que até mesmo essas quatro funções não podem ser realizadas individualmente. Todas essas atividades precisam compartilhar espaços em comum. Além disso, cidades são pensadas para prosperar, para promover o melhor (e às vezes o pior) das sociedades. Desse modo, o uso exclusivo de políticas estritamente setoriais, tais como políticas de habitação, políticas de saneamento ou políticas de transporte, sem fundo teórico e metodológico que contenha explicitamente as interações – como mencionado acima – faz com que a aplicação de políticas para as cidades seja de baixa efetividade.

De todo modo, a abordagem das cidades como objeto científico pode diferir significativamente. Cidades podem ser vistas como máquinas a serem consertadas, como mercados a serem regulamentados (ou liberados), como organismos em um ecossistema ou como um exercício social no qual prevalecem os valores políticos ou religiosos acima de tudo?

Principalmente, a mensagem relevante é que as tentativas de interferir na cidade – e, ocasionalmente, até mesmo a inércia e omissão em políticas urbanas – têm de ser feitas com entendimento claro de suas consequências em todos os aspectos e facetas da cidade. Ou seja, o planejamento da cidade deve ser feito de forma concatenada entre cidadãos e instituições, considerando as não linearidades, em uma abordagem dinâmica e integrada. Como esses atributos são típicos de sistemas complexos, pode ser de interesse utilizar metodologias de sistemas complexos no estudo e aplicações de políticas no âmbito urbano.

---

16. Esses são os quatro princípios fundamentais da cidade funcional, proposta pelo arquiteto Le Corbusier na *Charte d'Athènes* em 1943.

#### 4.4 Ambiente

O desenvolvimento sustentável é um dos principais desafios para a sociedade de hoje. Como gerir recursos naturais em um mundo que é cada vez mais complexo, onde tudo está interligado? Como lidar com os problemas de sustentabilidade, tais como as alterações climáticas ou a conservação da biodiversidade, demasiado complexos para serem cobertos por uma única disciplina?

A abordagem e as metodologias de sistemas complexos podem fornecer ferramentas para contribuir na análise de sistemas socioecológicos e informar a formulação de políticas ambientais e de sustentabilidade. De fato, muitas ideias e conceitos da teoria da complexidade vêm do campo da biologia.

Comportamentos emergentes e processamento de informações podem ser ilustrados na ecologia pelo modo como as formigas procuram alimentos, ou como os neurônios interagem para constituir o comportamento cognitivo global e a consciência. O sistema imunológico também pode ser visto como outro exemplo de auto-organização, por meio do qual a interação de células simples leva a comportamento complexo, sem a presença de controle central. Cadeias alimentares tróficas e suas dinâmicas podem ser usadas para compreender a biodiversidade e analisar as implicações de diferentes tipos de perturbações no ecossistema.

Modelos podem ser ferramentas valiosas para a compreensão da dinâmica de sistemas ambientais. Por meio de modelagem, podem-se identificar fatores-chave e regras que regem os sistemas, permitindo a simulação de diferentes cenários, ao mesmo tempo que se realizam análises de sensibilidade. Essa abordagem tem sido usada para estudar alterações climáticas, propagação de doenças e mudanças de uso do solo ao longo do tempo.

A modelagem também pode ajudar a identificar pontos críticos no ecossistema social.<sup>17</sup> A identificação desses pontos pode ser útil na gestão de recursos hídricos, uma vez que a poluição de águas, por exemplo, apresenta pontos de saturação a partir dos quais se torna caro e difícil reverter o processo de poluição. Da mesma forma, a política de conservação pode se beneficiar da análise de cadeias alimentares e da resiliência de ecossistemas a choques externos, tais como aumento de desmatamento ou emissões de carbono.

Essas e outras metodologias de sistemas complexos podem ajudar a descobrir como administrar os recursos naturais, como construir cidades sustentáveis e como promover políticas ambientais e sustentáveis mais eficazes.

---

17. Mitchell (2011, p. 253) define ponto crítico como "*points at which some process [...] starts increasing dramatically in a positive-feedback cycle*". Para mais informações, ver Gladwell (2006).

## 5 OUTROS SISTEMAS E APLICAÇÕES

### 5.1 Educação

Já há bastante pesquisa feita sobre a natureza complexa dos sistemas de ensino e aprendizagem. Um relatório da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE (Snyder, 2013) investiga a forma de operacionalizar a abordagem de sistemas complexos em reformas educacionais e fornece exemplos de reformas educacionais que usaram princípios de complexidade em diferentes países. Outros estudos (Lemke *et al.*, 1999; Morrison, 2003; Batista e Salvi, 2006, Santos 2008) focam na natureza complexa da aprendizagem, com foco no desenvolvimento de currículos, ressaltando a importância da transdisciplinaridade. Há ainda uma revista acadêmica<sup>18</sup> dedicada exclusivamente ao estudo da educação e da complexidade (Davis, Phelps e Wells, 2004).

### 5.2 Transportes

Transportes são exemplos típicos de sistemas compostos por grande número de agentes independentes que interagem, de acordo com algumas regras, e que reagem ao seu ambiente local, a partir do qual um sistema emergente, com comportamento coletivo, pode ser observado. Se um número de passageiros tem que viajar por uma rota específica e eles têm uma janela de tempo específica para fazê-la, eles podem decidir irem todos ao mesmo tempo. Esta decisão (probabilisticamente improvável) é definitivamente subótima, uma vez que diminui a capacidade total do sistema. Além disso, se supostamente houvesse um controlador central de tráfego que estabelecesse uma hora específica, tal controlador precisaria do momento exato de partida para todos os viajantes, e qualquer pequena perturbação poderia resultar em congestionamento total. Em média, nenhuma dessas duas alternativas ocorre. De qualquer forma, o exemplo demonstra que os sistemas de transporte são complexos e em sintonia com os conceitos descritos anteriormente.

Os técnicos de planejamento e engenheiros de transporte já usaram modelos de simulação a fim de obter cenários e possibilidades de escolhas de tráfego que não são capazes de identificar os fluxos de tráfego de forma exata, mas que permitem boa previsão da demanda no sistema, contribuindo para o dimensionamento do sistema.

Um uso mais recente de modelagem em transportes busca simular ao mesmo tempo a dinâmica da cidade – considerada como densidade e uso da terra – juntamente com a dinâmica de passageiros. O modelo denominado UrbanSim (Waddell *et al.*, 2007) é um exemplo pioneiro. Modelagens mais sofisticadas buscam incluir e calcular localização e mudanças no mercado de trabalho e comportamento dos mercados de habitação. Juntos, esses modelos tentam antecipar

---

18. *Complicity*.

o “movimento” que a cidade está tomando – juntamente com suas possibilidades ou “vocações” – e incluir o planejamento do sistema de transporte em sintonia com as mudanças vislumbradas.

Assim como a maioria das outras experiências de modelagem, a modelagem em transportes pode ajudar os tomadores de decisões a descrever cenários nos quais os principais parâmetros de ajuste são visíveis e suas consequências e efeitos podem ser medidos de forma objetiva.

### 5.3 O processo legislativo

O processo de elaboração legislativa implica que indivíduos heterogêneos (os legisladores), geralmente sob nenhum controle centralizado, estrategicamente interajam uns com os outros a fim de produzir decisões coletivas.<sup>19</sup> Quando essa interação ocorre em uma instituição com votações por maioria, problemas de escolha coletiva podem surgir. Nesse sentido, a teoria da complexidade pode ajudar a explicar por que os resultados variam de acordo com o contexto em que são incorporados e como as instituições legislativas promovem regras de convivência e se adaptam.

## 6 SISTEMAS COMPLEXOS E POLÍTICAS PÚBLICAS

Essa seção resume as principais conclusões sobre o uso dos conceitos, métodos e metodologias da abordagem de complexidade para análise e aplicações de políticas públicas.

Em primeiro lugar, a especificação de conceitos pode impedir que visões simplistas se imponham sobre os objetos de políticas públicas. A abordagem complexa sugere que, quando se pensar em políticas públicas, devem-se considerar os seguintes aspectos:

#### 1) Os agentes são heterogêneos

Assumir um agente representativo tal como um consumidor ou empresa média pode ser altamente impreciso e produzir efeitos e resultados equivocados de políticas públicas. Esse é o caso especialmente de países como o Brasil, onde as desigualdades de diferentes tipos são predominantes e marcantes.

Como Claudio Tessone resume: “a heterogeneidade [dos agentes] pode afetar significantemente as propriedades observadas do sistema, e ser a origem de fenômenos *a priori* inesperados em sistemas socioeconômicos” (capítulo 7 deste livro).

#### 2) As coisas estão interconectadas

Isso é outra forma de dizer que “o todo é maior do que a soma das partes”; que o comportamento complexo não trivial emerge da interação entre os agentes; ou

19. Seção baseada nas contribuições de Acir Almeida ao projeto “Modelagem de Sistemas Complexos para Políticas Públicas”.

que os sistemas são não lineares. Em matéria de políticas públicas, esses conceitos implicam que análises do tipo linear tradicional podem ser inadequadas ou insuficientes. A abordagem complexa indica ainda que as conexões entre os agentes, setores e escalas não devem ser negligenciadas, o que sugere uma visão interdisciplinar e sistêmica de objetos de política.

A análise de políticas, quando estudada do ponto de vista de múltiplos setores, garante que externalidades, interesses e perspectivas sejam devidamente ponderadas entre si. A multiplicidade de escalas permite a conexão entre a microanálise – ao nível dos indivíduos, empresas ou o agregado familiar – até a análise macro de comunidades e partidos, de grandes setores da economia, bairros, cidades e metrópoles.

A multiplicidade de escalas nos parece central dado que o surgimento de padrões, ou, de outra forma, a eficácia das políticas públicas, tende a ser específico de uma escala e não automaticamente válido em outras escalas. Há interação contínua e idiossincrasias nas interações entre escalas. Isso é especialmente verdadeiro quando se consideram objetos de políticas públicas, por exemplo, entre os diferentes níveis federativos. A política macroeconômica, por meio da definição de taxa de juros, gera resultados que variam por regiões, setores e tamanho de empresas. A mudança da taxa vai impactar fornecedores e compradores de forma diferente. Além disso, ações de múltiplos agentes com interesses múltiplos, meios de ação e pontos de vista distintos podem gerar resultados que também podem ser diferentes em seu alcance, velocidade de ocorrência, características qualitativas e permanência dos efeitos.

### *3) Políticas não funcionam com causas e efeitos óbvios, lineares ou diretos*

Políticas de ação-reação podem ser consideradas ingênuas, do ponto de vista da abordagem complexa, uma vez que os objetos da política não funcionam de forma mecânica, mas mudam, evoluem e se adaptam. Os objetos são dinâmicos. A política deve levar em consideração, portanto, múltiplas causalidades e efeitos indiretos que surgem como consequência da interação entre diferentes agentes.

O filósofo romeno Basarab Nicolescu (1999) enumera três princípios fundamentais das ciências exatas que não são facilmente aplicáveis às ciências humanas. São eles: *i*) a existência de leis gerais e fundamentais; *ii*) o uso de experimentos para decodificar essas leis; e *iii*) a possibilidade de que, dadas as mesmas condições (*coeteris paribus*), de forma independente, seria possível replicar os experimentos e, portanto, as leis que eles atestam.

As dificuldades em aplicar leis fundamentais, realizar experimentos e replicá-los é clara em fenômenos sociais e políticas públicas pela identificação de: *i*) descontinuidades, saltos e rupturas; *ii*) eventos únicos, discretos, que não seguem padrões universais óbvios que poderiam ser decodificados em linguagem matemática de forma imediata; e *iii*) incertezas que, juntamente com a subjetividade dos atores e a falta de racionalidade coerente e rigorosa leva a ambiente social não determinístico.

Assim, a política pública pode ser mais eficaz se orientada para: *i*) aprimorar a resiliência do sistema e reduzir suas vulnerabilidades; *ii*) evitar (ou promover) perigosos (ou positivos) pontos críticos; e *iii*) identificar os principais intervenientes em uma rede que possam promover (ou prevenir) mudanças no sistema.

Em outras palavras, documento da OCDE afirma: “não é incomum que pequenas mudanças gerem grandes efeitos; grandes mudanças levem a efeitos surpreendentemente pequenos; e que efeitos surjam a partir de causas imprevistas” (OECD, 2009, p. 2). Isso significa que políticas públicas devem tentar compreender os mecanismos subjacentes do sistema em análise a fim de identificar a melhor forma de direcioná-lo para o caminho desejado.

Em segundo lugar, os métodos e as metodologias da abordagem complexa podem ajudar a considerar de forma mais ampla as características dos sistemas em análise.

1) A modelagem é uma boa estratégia para se obter melhor compreensão de como o sistema funciona, ao mesmo tempo, incorporando as características complexas do sistema. Modelos podem ajudar a identificar os atores importantes do sistema em análise (agentes), suas diferentes características (heterogeneidade), suas inter-relações (interconexão) e como esses componentes juntos dão origem a comportamentos emergentes e, por vezes, inesperados. Exemplos de tais técnicas de modelagem são autômatos celulares e modelagem baseada em agentes. Heemskerk e colegas coletaram uma sequência de pontos que definem vantagens de modelagem e uso de modelos:

Um modelo é uma abstração ou simplificação da realidade. Os cientistas costumam usar modelos para explorar sistemas e processos que não podem manipular diretamente (Jackson *et al.*, 2000). Os modelos podem ser mais ou menos quantitativos, determinísticos, abstratos e empíricos. Eles ajudam a definir questões e conceitos, mais precisamente, gerar hipóteses, auxiliar em testar essas hipóteses e gerar previsões (Turner *et al.*, 2001). Construir modelos consiste em determinar as partes do sistema, escolher as relações de interesse entre estas partes, especificando os mecanismos pelos quais as partes interagem, quais são as informações de identificação, e explorar o comportamento do modelo. O processo de construção do modelo pode ser tão esclarecedor quanto o próprio modelo, porque revela o que sabemos e o que não sabemos sobre as conexões e causalidades nos sistemas em estudo (Levins, 1966; Jackson *et al.*, 2000; Taylor, 2000). Assim, a modelagem pode tanto sugerir o que podem ser caminhos fecundos de estudo como ajudar a perseguir esses caminhos (Heemskerk, Wilson e Pavao-Zuckerman, 2003).

2) A modelagem permite a simulação de cenários como ferramenta de apoio à decisão e para informar a formulação de políticas. Modelos funcionam como plataformas para a chamada em experimentos *in silico*, por meio das quais as diferentes opções de políticas podem ser simuladas computacionalmente e testadas com baixos custos.

- 3) A modelagem estimula a ênfase no futuro, uma visão prospectiva da política, ao permitir estruturalmente a construção de cenários. Os modelos permitem prognósticos que não são baseados unicamente em probabilidades, mas que incluem interações essenciais em várias escalas e com interesses diversos dos agentes considerados. Os tomadores de decisão política podem, assim, trabalhar com espaços de cenários e intervalos de probabilidades que ocorrem em pontos críticos conhecidos.
- 4) Os modelos podem ser continuamente melhorados quanto mais conhecimento se obtiver sobre a operacionalização do sistema. Os modelos também podem ser simples e fornecer informações gerais ou específicas para ajudar a resolver problemas particulares.
- 5) Modelos funcionam ainda como meio de comunicação de ideias e de teorias e podem funcionar como “ ponto de encontro” para o trabalho colaborativo entre equipes interdisciplinares. “Os modelos não só ajudam a formular perguntas, esclarecer limites do sistema, e identificar lacunas nos dados existentes, mas também revelam os pensamentos e suposições de colegas cientistas” (Heemskerk, Wilson e Pavao-Zuckerman, 2003).
- 6) A noção de múltiplos modelos contribui para a compreensão dos fenômenos sociais, em particular, e de políticas públicas, em geral, porque se baseia na riqueza da diversidade, diferença e dessemelhanças (Page, 2007). Como Page (2007) argumenta, nenhum modelo único cobre independentemente, de forma abrangente, todos os meandros de alguns fenômenos, especialmente os de natureza subjetiva, os complexos. Page também afirma que modelos compartimentam a análise com parâmetros específicos, seja do ponto de vista teórico, metodológico ou processual. Assim, a diversidade de modelos implica maior cobertura de possíveis cenários que são mais prováveis de cobrir sequências inesperadas, importantes eventos improváveis, pontos críticos singulares.

Em terceiro lugar, bancos de dados são recursos valiosos para a elaboração de políticas, e abordagens complexas permitem seu uso de forma mais eficiente.

- 1) Os dados podem ajudar a visualizar, descrever e identificar as características do sistema a ser explorado. Análises de redes sociais, por exemplo, utilizam-se da representação visual de redes para explicitar informações complexas.
- 2) Mineração de dados, aprendizado de máquina, análise de rede e outros estudos de associação podem fornecer *insights* sobre o funcionamento do sistema.
- 3) Os dados podem ajudar a validar e melhorar os modelos.

Por fim, o conhecimento pode ser visto como um processo de *feedback*, “um ciclo interminável de propostas ousadas e dúvidas recorrentes” (Mitchell, 2011, p. 295). A modelagem proporciona um meio de estruturar este processo e melhorar a compreensão do sistema que se quer influenciar. O ciclo de análise de dados, modelagem, validação, simulação, implementação, análise de dados, remodelação, e assim por diante, pode ser o “estranho ciclo” que pode fornecer apoio à decisão para resolver problemas complexos por meio de políticas públicas. Se não for um caminho certo, determinado para se pisar, pelo menos sistemas complexos podem iluminar os caminhos-chave para os tomadores de decisão política, esclarecendo o que é provável que aconteça, dadas as opções de conjuntos de caminhos, a cada momento de caminhada.

## 7 CONTEÚDO DO LIVRO

O livro está organizado em três partes. A parte I, *Complexidade: teoria e métodos*, discute os principais conceitos de sistemas complexos, seus métodos e metodologias, e traz dois capítulos especificamente sobre a modelagem computacional necessária para implementar essa abordagem.

Este é o capítulo introdutório. O segundo capítulo, escrito por William Rand, apresenta e detalha os principais conceitos de sistemas complexos e descreve brevemente alguns métodos de sistemas complexos. Além disso, discute possibilidades e limitações da análise de sistemas complexos em contraste com os métodos tradicionais, indicando as vantagens de aplicação dos sistemas complexos para o debate de políticas públicas.

O terceiro capítulo, *Métodos e metodologias de sistemas complexos*, por Miguel Fuentes, apresenta detalhes mais técnicos das metodologias e uma leitura orientada da literatura sobre os métodos que são comumente usados na abordagem de sistemas complexos. O capítulo apresenta uma discussão conceitual e referências para leitura com o objetivo de apresentar o tema para leitores de diferentes áreas da ciência e da política.

O quarto capítulo, *Modelos de simulação para ordem pública*, é de autoria dos cientistas da computação James E. Gentile, Chris Glazner e Matthew Koehler. O capítulo apresenta uma visão geral de modelagem e simulação, com linguagem clara para os interessados e o público em geral. Os autores argumentam que a modelagem computacional pode ser uma ferramenta interessante para analistas de políticas públicas como ferramenta para comparar opções de política. Eles se concentram em ABM e fornecem uma visão geral de seus benefícios para a análise de políticas. Além disso, o capítulo discute cada etapa de modelagem: construção, implementação, verificação, validação e refinamento, apontando os principais desafios em cada um deles.

O capítulo 5, *Sistemas complexos: operacionalização*, por Jaime Sichman, apresenta conceitos e as ferramentas de simulação computacional de forma detalhada. O capítulo tem como objetivo ajudar o leitor interessado na implementação dos métodos e técnicas de sistemas complexos de computação. O capítulo enfoca os conceitos e ferramentas de implementação de sistemas multiagentes (*multi-agent-based* – MABs), mas também discute a aplicação de outros métodos, tais como redes sociais e de aprendizagem de máquina.

A parte II contém cinco capítulos que, juntos, qualificam quatro objetos de políticas públicas como sistemas complexos.

O capítulo 6, *O ambiente como sistema sacionatural, dinâmico e complexo*, de autoria de Masaru Yarime e Ali Kharrazi, discute o acoplamento-desacoplamento de sistemas sacionaturais e as implicações do sistema do ponto de vista da sua sustentabilidade. A abordagem dos autores enfoca dimensões quantitativas e qualitativas dos conceitos de resiliência, eficiência e redundância. A partir do quadro conceitual construído, eles investigam casos de governança em sistemas em rede e seus rebatimentos em políticas públicas.

*A natureza complexa dos sistemas sociais*, por Claudio Tessone, é o tema do capítulo 7. O capítulo discute por que a sociedade deve ser vista como um sistema complexo e apresenta os desafios envolvidos na modelagem do comportamento complexo encontrado em sistemas sociais. Além disso, o capítulo discute quais são as implicações políticas dessa visão. Tessone descreve ainda as características dos sistemas sociais que são mais relevantes para a análise de políticas públicas, como a heterogeneidade dos agentes, a evolução dinâmica da sociedade por meio de interações e *feedback*, a finitude de sistemas sociais e a própria natureza sistêmica da sociedade, que torna sua decomposição em diferentes porções de análise inadequada.

A economia é discutida em dois capítulos. O capítulo 8, *A economia como um objeto complexo*, de Orlando Gomes, apresenta uma defesa mais geral da economia como objeto complexo. O autor analisa a literatura contemporânea sobre economia de complexidade e discute por que a macroeconomia deveria ser analisada como um sistema complexo. O capítulo também fornece um exemplo ilustrativo de um ambiente econômico complexo simulado com um modelo em rede. O capítulo 9, *Modelagem da economia como um sistema complexo*, de Herbert Dawid, continua a linha de raciocínio de Gomes, mas foca nos processos e em como modelar a economia sob uma estrutura de sistemas complexos. O capítulo enfatiza a modelagem baseada em agentes e discute as vantagens e desvantagens desse modelo de abordagem para a análise econômica. O texto é particularmente forte na discussão de questões relacionadas com a modelagem da economia para a análise de políticas e fornece ilustrações perspicazes de aplicações para políticas pública, em especial o modelo Eurace@Unibi.

O capítulo 10, *Cidades como sistemas complexos*, de autoria de Luis Bettencourt, discute por que as cidades devem ser vistas e analisadas como sistemas complexos. O autor apresenta breve panorama histórico dos conceitos de cidade e como tais conceitos são discutidos no planejamento urbano e de políticas públicas. Em seguida, ele descreve as principais propriedades de cidades como sistemas complexos e discute como essa nova compreensão das cidades revela que áreas urbanas de diferentes tamanhos representam diferentes desafios para o planejador. O capítulo discute as implicações da abordagem de sistemas complexos para o planejamento urbano e as políticas públicas, bem como as contrabalança com soluções de engenharia.

A parte III apresenta aplicações no mundo e no Brasil, além de uma série de aplicações em transportes, na educação e no processo legislativo, bem como um capítulo sobre a abordagem territorial.

O primeiro capítulo das aplicações, *A teoria da complexidade da política aplicada em todo o mundo*, de Yaneer Bar-Yam, enfatiza a importância da análise de efeitos potenciais causados por mudanças de política em qualquer parte do globo, considerando o mundo cada vez mais interdependente. O capítulo destaca algumas metodologias de sistemas complexos, como a análise multiescala, análise de redes e análise de padrões de comportamento. Apresenta também as aplicações dessas metodologias em análises de mercados financeiros e de *commodities*, disseminação de doenças e violência, e argumenta que sistemas complexos têm sido usados comprovadamente para explicar e prever fenômenos globais.

Bernardo Mueller, em *Modelagem de sistemas complexos nas políticas públicas brasileiras*, apresenta dois estudos de caso de política pública no Brasil, um sucesso e um fracasso, e baseia-se nesses exemplos para explicar por que uma abordagem de sistemas complexos pode ser mais adequada para avaliar políticas públicas do que os indicadores usualmente utilizados. Além disso, o capítulo apresenta panorama de estudos relacionados com questões de políticas públicas que utilizaram a abordagem de sistemas complexos no Brasil. O mapeamento desses estudos indica potencial uso de metodologias de sistemas complexos em áreas de políticas relevantes para o país e também permite que o leitor identifique as pesquisas em seu tema de interesse.

O capítulo 13, *Métodos de complexidade aplicados ao planejamento de transportes*, elaborado por Dick Ettema, enfatiza uma área específica de políticas públicas: o planejamento dos transportes. O autor discute por que o transporte deve ser visto como um sistema complexo e analisa as principais características dos métodos complexos existentes no planejamento de transportes, as questões relacionadas com a implementação desses métodos e as principais implicações para o sistema de transportes, para as cidades e para a sociedade. Em geral, o capítulo apresenta uma

visão ampla dos modelos de tráfego e de simulação de transportes, com destaque para as inovações e os desafios dos modelos de transporte.

Dois capítulos discutem a educação. O primeiro, *A educação como um sistema complexo: implicações para a pesquisa e política educacional*, de Michael Jacobson, discute por que a educação deve ser considerada como um sistema complexo e quais são as implicações metodológicas desse ponto de vista para pesquisadores e formuladores de políticas. Além disso, o capítulo apresenta uma visão geral das aplicações de métodos de complexidade em políticas públicas e na pesquisa educacional. O segundo capítulo, *Abordagens complexas para a educação no Brasil*, de Patrícia Sakowski e Marina H. Tóvolli, contribui para a discussão sobre a educação feita no capítulo anterior, somando-se ao debate conceitual com olhar específico para o caso brasileiro. O capítulo apresenta as pesquisas na área de complexidade no Brasil e discute como essas abordagens podem contribuir com a educação no país.

O capítulo 16, *Superando o caos: legislaturas como sistemas adaptativos complexos*, de Acir Almeida, descreve a natureza complexa das legislaturas e discute por que o Legislativo deveria ser visto como sistema complexo adaptativo. Almeida apresenta dois principais modelos de organização legislativa e discute as limitações dessas abordagens tradicionais para explicar a evolução das instituições legislativas. O capítulo destaca a contribuição potencial da abordagem de sistemas complexos para a análise do surgimento e da mudança das instituições. Olhando especificamente para o caso brasileiro, o capítulo mostra como a abordagem de sistemas complexos pode explicar a recente evolução dos padrões de construção de leis no Congresso Nacional.

Finalmente, o capítulo 17, *O território como um sistema social complexo*, de Marcos Aurélio Santos da Silva, centra-se no estudo de sistemas socioterritoriais, bem como na necessidade de métodos interdisciplinares para a análise de tais sistemas. O capítulo apresenta a sociologia de ação organizada (SOA) para repensar a análise das relações de poder e dependência em sistemas socioterritoriais. O capítulo, em seguida, apresenta o método Soclab, que é uma formalização da teoria SOA. O capítulo destaca como o método Soclab pode contribuir para a análise das relações sociais nos sistemas socioterritoriais utilizando-se de simulações computacionais.

## REFERÊNCIAS

- ALFARANO, S.; LUX, T.; WAGNER, F. Time variation of higher moments in a financial market with heterogeneous agents: an analytical approach. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 32, n. 1, p. 101-136, 2008.
- ANDERSON, P. W. More is different. **Science Magazine**, v. 177, n. 4047, p. 393-396, 8 Aug. 1972.

BATISTA, L. I.; SALVI, R. F. Perspectiva pós-moderna e interdisciplinaridade educativa: pensamento complexo e reconciliação integrativa. **Perspectiva**, v. 8, n. 2, 2006.

COLANDER, D.; KUPERS, R. **Complexity and the art of public policy**: solving society's problems from the bottom up. Princeton: Princeton University Press, 2014.

CRUTCHFIELD, J. P.; FELDMAN, D. P. **Regularities unseen, randomness observed**: levels of entropy convergence. Santa Fe: Institute Working Paper, 9 Feb. 2001.

DAVIS, B.; PHELPS, R.; WELLS, K. Complicity: an introduction and a welcome. **Complicity: an International Journal of Complexity and Education**. v. 1, n. 1, 2004.

DAWID, H. **Adaptive learning by genetic algorithms**: analytical results and applications to economic models. New York: Springer-Verlag New York, Inc., 1996.

DAWID, H. *et al.* Labor market integration policies and the convergence of regions: the role of skills and technology diffusion. **Journal of Evolutionary Economics**, v. 22, n. 3, p. 543-562, 2012.

DAWID, H. *et al.* The Eurace@Unibi model: agent-based macroeconomic modeling and policy analysis. **Working Paper**. Universität Bielefeld, 2014.

DELLI GATTI, D. *et al.* Reconstructing aggregate dynamics in heterogeneous agents models. A Markovian Approach. **Revue de l'OFCE**, n. 5, p. 117-146, 2012.

DOWNEY, A. B. **Think complexity**: complexity science and computational coding. 1st ed. United States: O'Reilly Media, 2012.

EDMONDS, B.; MEYER, R. **Simulating social complexity**: a handbook. New York: Springer, 2013.

FARMER, J. D.; FOLEY, D. The economy needs agent-based modelling. **Nature**, v. 460, n. 7256, p. 685-686, 2009.

FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M. **Complexidade**: uma revisão dos clássicos. Brasília: Ipea, 2014. (Texto para Discussão, n. 2019).

GELL-MANN, M.; LLOYD, S. Effective complexity. In: **Nonextensive entropy**. New York: Oxford University Press, v. 3, p. 387-398, 2004.

GLADWELL, M. **The tipping point**: how little things can make a big difference. United States: Little; Brown, 2006.

GLAESER, E. L. **Triumph of the city**: how our greatest invention makes us richer, smarter, greener, healthier, and happier. New York: Penguin Books, 2012.

HEEMSKERK, M.; WILSON, K.; PAVAO-ZUCKERMAN, M. Conceptual models as tools for communication across disciplines. **Conservation Ecology**, v. 7, n. 3, p. 8, 2003.

JACKSON, M. O. **Social and economic networks**. Cambridge: Princeton University Press, 2010.

JACOBS, J. **The economy of cities**. New York: Vintage Books, 1970.

LEBARON, B.; TESFATSION, L. Modeling macroeconomies as open-ended dynamic systems of interacting agents. **The American Economic Review**, p. 246-250, 2008.

LEMKE, J. L. *et al.* **Toward systemic educational change**: questions from a complex systems perspective. Cambridge: New England Complex Systems Institute, 1999. Disponível em: <<http://goo.gl/Fr8gXB>>. Acesso em: 10 set. 2014.

MCKINNEY, W. **Python for data analysis**: data wrangling with pandas, NumPy, and IPython. 1<sup>st</sup> ed. China: O'Reilly Media, 2012.

MITCHELL, M. **Complexity**: a guided tour. Oxford: Oxford University Press, 2011.

MORIN, E. **Introdução ao pensamento complexo**. Porto Alegre: Sulina, 2011.

MORRISON, K. Complexity theory and curriculum reforms in Hong Kong. **Pedagogy, Culture and Society**, v. 11, n. 2, p. 279-302, 2003.

NEWMAN, M. **Networks**: an introduction. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press, 2010.

NEWMAN, M.; BARABÁSI, A.-L.; WATTS, D. J. **The structure and dynamics of networks**. 1<sup>st</sup> ed. Princeton: Princeton University Press, 2006.

NEWMAN, M. E. J. The structure and function of complex networks. **Siam Review Journals**. v. 45, p. 167-256, 2003.

NICOLESCU, B. **O manifesto da transdisciplinaridade**. São Paulo: Triom, 1999.

NORTH, M. J.; COLLIER, N. T.; VOS, J. R. Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. **ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation**, v. 16, n. 1, p. 1-25, Jan. 2006.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Applications of complexity science for public policy**: new tools for finding unanticipated consequences and unrealized opportunities. França: OECD, 2009.

- PAGE, S. E. **The difference:** how the power of diversity creates better groups, firms, schools and societies. New Jersey: Princeton University Press, 2007.
- SANTOS, A. Complexidade e transdisciplinaridade em educação: cinco princípios para resgatar o elo perdido. **Revista Brasileira de Educação**, v. 13, n. 37, p. 71-83, 2008.
- SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **The Bell System Technical Journal**. v. 27, p. 379-423 e 623-656, 1948.
- SNYDER, S. **The simple, the complicated, and the complex:** educational reform through the lens of complexity theory. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 12 Dec. 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/ty1rHk>>. Acesso em: 22 ago. 2014.
- STROGATZ, S. H. **Nonlinear dynamics and chaos:** with applications to physics, biology, chemistry, and engineering. Colorado: Westview Press, 2014.
- SZILARD, L. On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings. **Behavioral Science**. v. 9, n. 4, p. 301-310, 1º Jan. 1964.
- TURING, A. M. The chemical basis of morphogenesis. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. **Biological Sciences**. v. 237, n. 641, p. 37-72, 1952.
- WADDELL, P. *et al.* Incorporating land use in metropolitan transportation planning. **Transportation Research**. v. 41, p. 382-410, 2007.
- WILLIAMS, R. J.; MARTINEZ, N. D. Simple rules yield complex food webs. **Nature**. v. 404, n. 6774, p. 180-183, 9 Mar. 2000.



## CAPÍTULO 2

# SISTEMAS COMPLEXOS: CONCEITOS, LITERATURA, POSSIBILIDADES E LIMITAÇÕES<sup>1</sup>

William Rand<sup>2</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

O objetivo da política pública é muitas vezes alterar ou manter o comportamento de um grande grupo de indivíduos ou organizações para o alcance de um resultado socialmente desejável. O desafio na avaliação das políticas públicas está no fato de que os indivíduos de uma população não reagem de uma mesma maneira à introdução de novas políticas ou de um conjunto de incentivos. Além disso, o resultado global de uma política pública não é a simples soma das reações individuais, pois essas reações interagem e alimentam-se umas às outras. Sendo assim, o resultado da implementação de qualquer política pública é um produto que emerge de muitas decisões individuais e da maneira pela qual essas decisões interagem entre si e com a política.

Por exemplo, uma organização governamental ou entidade pode pôr em prática uma política como uma política fiscal, um limite de velocidade ou uma política de incentivo para renovação urbana. Os indivíduos afetados por essas políticas podem reagir de diferentes maneiras. Como os indivíduos nem sempre são perfeitamente racionais, ou necessariamente cumpridores da lei, às vezes eles reagirão de maneiras que a organização governamental nunca previu ou desejou. Por exemplo, algumas organizações podem sonegar impostos, alguns motoristas podem dirigir acima do limite de velocidade e algumas famílias podem se mudar para áreas fora do perímetro urbano; enquanto outros indivíduos agirão exatamente da maneira para a qual foi concebida a política. Além disso, os indivíduos não reagem apenas à política; eles também reagem uns aos outros e podem modificar seu comportamento com base no que veem nos outros. O efeito da política pública não é apenas um evento pontual e estático; pelo contrário, é o resultado de uma série de ações tomadas pelo governo e pelos cidadãos para o alcance de um desejado resultado. Por exemplo, novas políticas podem ser decretadas para tentar encurralar o comportamento não desejado, ou novos grupos de ações dos cidadãos podem se formar para tentar alterar políticas. A agregação de todas estas diferentes

1. Traduzido por João Carlos Ramos Magalhães.

2. Centro de Complexidade nos Negócios, Robert H. Smith Escola de Negócios, da Universidade de Maryland, Van Munching Hall, College Park, MD EUA 20742. E-mail: wrand@umd.edu.

ações resulta em um padrão comportamental emergente e complexo que afetará as decisões de políticas futuras e decisões em níveis individuais. Assim, o efeito da política pública não é apenas um produto do controle do governo, ou das forças de mercado, ou das ações dos cidadãos, mas pelo contrário, é um produto combinado da interação de todos esses atores (Colander e Kupers, 2014).

Estudos dos tipos de interações complexas que ocorrem nas políticas públicas estão no centro do estudo de sistemas complexos. Sistemas complexos são sistemas de componentes de interação, autônomos, onde o resultado do sistema não é simplesmente a soma das partes subjacentes (Mitchell, 2009; Waldrop, 1993; Casti, 1994). Isto faz dos sistemas complexos uma lente natural para se estudar políticas públicas.

Um exemplo clássico de sistemas complexos foi descrito no capítulo 1, baseado no processo de voo de um pássaro em seu bando. Craig Reynolds ilustrou em seu *modelo de boids* que os pássaros podem voar sem que um líder central os dite como deve ser o voo (Reynolds, 1987). Neste modelo, os agentes (pássaros/*boids*) seguem três regras simples: *i*) evite outros pássaros; *ii*) dirija-se ao centro de massa dos pássaros de sua vizinhança; e *iii*) alinhe sua trajetória à dos pássaros mais próximos. Este modelo é robusto e irá gerar padrões emergentes de comportamento que se assemelham a bandos sob uma grande variedade de situações. No entanto, nenhum dos pássaros contém a noção de um “bando”, e o bando, como uma entidade, não existe, em vez disso, é inteiramente composto por pássaros individuais.

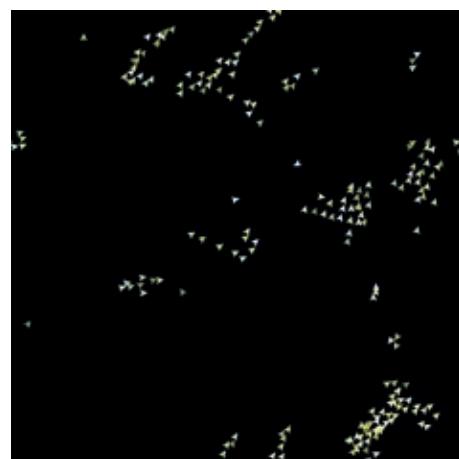
Outro exemplo clássico de sistemas complexos no âmbito de políticas públicas é algo que tem sido explorado usando uma variedade de métodos ao longo dos anos, o engarrafamento (Resnick, 1994). O tráfego de uma estrada é composto por muitos atores individuais, isto é, pelos motoristas de carros, caminhões e por outros tipos de veículos em movimento. Nenhum desses atores individuais define um engarrafamento. Em vez disso, um engarrafamento é o produto emergente de muitas decisões individuais diferentes. No entanto, o padrão global emergente de um tráfego lento se retroalimenta ao afetar as decisões individuais. Motoristas reduzem suas velocidades, mudam suas rotas e podem até alterar suas decisões de dirigir em primeiro lugar. Este sistema, que parece simples no começo, já contém os componentes básicos de um sistema complexo, especificamente padrões emergentes de comportamento que se retroalimentam ao afetar as decisões individuais dos atores envolvidos no sistema.

Devido às interações complexas destes sistemas e à forma não linear em que os elementos de um sistema complexo dão origem a padrões gerais de comportamento, sistemas complexos podem ser muito difíceis de prever, de controlar e de gerenciar. Portanto, o melhor uso dos métodos de análise de sistemas complexos para a avaliação de políticas públicas não se dá em um contexto de previsão perfeita, mas em um contexto de *simulador de voo* (Holland, 1996; Sterman, 2000; 1994).

Pilotar um simulador de voo padrão não é a mesma coisa que pilotar um avião, mas, no entanto, fornece ao potencial piloto uma educação sobre como um avião pode reagir em diferentes ambientes e condições diferentes. Da mesma forma, sistemas complexos podem dar a um analista ou a um gerente a capacidade de compreender como uma política pode se desenrolar e até mesmo de desenvolver planos de contingência quanto a quais ações tomar em diferentes contextos. Alguns sistemas não podem ser facilmente manipulados ou alterados. O método do *simulador de voo* para a análise de políticas, ou simplesmente o *simulador de voo de políticas*, pode identificar esses locais onde não importa quais sejam as políticas implementadas, o sistema ainda acaba em um resultado pré-determinado. A estrutura de incentivos ou as forças em atuação podem ser tais que é muito difícil, se não impossível, alterar o processo do sistema. Embora isso possa ser frustrante, o *simulador de voo de políticas* propõe ao usuário procurar soluções alternativas, ou considerar uma repriorização de suas metas e de seus objetivos.

FIGURA 1

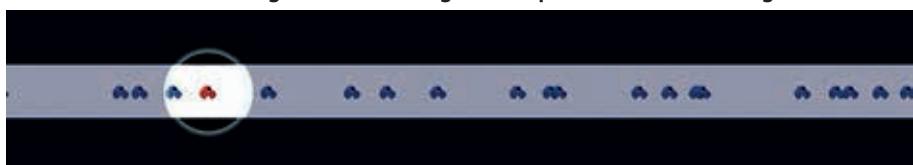
**Um modelo baseado em agentes do comportamento de revoada [80] implementado no NetLogo**



Fonte: Wilensky (1998; 1999).

FIGURA 2

**Um modelo de tráfego baseado em agentes implementados no NetLogo**



Fonte: Wilensky (1997; 1999).

O objetivo então de uma análise de sistemas complexos de políticas públicas é fornecer uma visão e uma compreensão de como o sistema complexo da sociedade pode ser afetado pela aplicação de uma política. Ademais, ao examinar um conjunto de políticas, é possível identificar as que terão o maior benefício por um menor custo. Além disso, testes de robustez e análises de sensibilidade podem ser realizados, e políticas suplementares podem ser examinadas para facilitar a adaptação às circunstâncias imprevistas.

Neste capítulo, apresentaremos os conceitos básicos e as ideias dos sistemas complexos, incluindo uma breve descrição das ferramentas que os sistemas complexos empregam.<sup>3</sup> Vamos então discutir as possibilidades e limitações da análise de sistemas complexos. Finalmente, nós terminaremos com uma breve discussão sobre o futuro da abordagem de sistemas complexos para a avaliação de políticas públicas.

## 2 CONCEITOS E FERRAMENTAS

O conceito básico de sistemas complexos é que muitos sistemas que observamos e queremos entender ao nosso redor são mais bem descritos por métodos que permitem a modelagem e a análise das interações de diferentes partes do sistema. Nesta medida, um número de diferentes conceitos e ferramentas que são empregadas pela ciência dos sistemas complexos focam-se em interações e propriedades de um grande número de partes em interação. Para explicar isso mais detalhadamente, vamos começar nesta seção por explorar alguns conceitos básicos e examinar ferramentas que são usadas para a análise de sistemas complexos. Vamos então terminar esta seção pela descrição de algumas áreas em que foram aplicados esses conceitos e ferramentas para o exercício da política pública.

### 2.1 Conceitos

Existem várias características-padrão que sistemas complexos apresentam regularmente que são úteis para serem compreendidas a partir de uma perspectiva da política pública. Esses recursos ajudam analistas políticos e pesquisadores a descrever e compreender as propriedades desses sistemas que muitas vezes os tornam difíceis de administrar e prever. Como destacado na introdução, há dois conceitos principais que são importantes em todos os sistemas complexos. Eles são a *emergência*, e a *retroalimentação (feedback)*.

Emergência é a ideia de que “a ação do todo é maior do que a soma das partes”(Holland, 2014). Sistemas complexos são, inevitavelmente, compostos por muitas diferentes entidades ou indivíduos. Estes indivíduos têm suas próprias

3. Uma melhor descrição das ferramentas de sistemas complexos é apresentada no capítulo 3 deste livro, e uma discussão mais detalhada da aplicação das ferramentas de sistemas complexos em uma ampla variedade de áreas de aplicações pode ser encontrada nos capítulos 6 a 17 deste livro.

propriedades e ações, mas uma propriedade emergente é algo que não pode ser descoberto pela inspeção de qualquer um dos agentes individuais. Em vez disso, é um produto das interações dos diferentes agentes e que apenas pode ser observada em nível populacional (Holland, 1999; Miller e Page, 2009). Por exemplo, no caso do engarrafamento, nenhum dos agentes o define ou contém sua propriedade. No entanto, o resultado emergente de todas as ações de muitos indivíduos é o engarrafamento. Da mesma forma, nenhum indivíduo pode ser responsável pelo desenvolvimento de uma cidade. Em vez disso, o padrão de desenvolvimento de uma cidade é um resultado emergente de construtoras, residentes, empregadores, políticos, paisagem ambiental e de muitos outros fatores. Nenhuma entidade única dentro deste sistema contém a propriedade de “desenvolvimento da cidade”; em vez disso, essa propriedade é o resultado emergente de muitos atores atuando juntos. Além disso, estas propriedades emergentes retroalimentam-se para afetar as decisões individuais. Por exemplo, dentro do contexto de desenvolvimento da cidade, sua evolução eventualmente afetará onde construtoras construirão novos edifícios, onde os moradores decidirão viver, quais os tipos de negócios se moverão para a cidade, como os políticos irão posicionar suas plataformas de campanha, e ela mesma transformará o ambiente físico da cidade. Por sua vez, estas decisões resultarão em novos padrões emergentes de comportamento, que por sua vez resultarão em novas retroalimentações.

Então, como um analista de políticas públicas deveria entender esses sistemas? Uma das melhores maneiras seria criar um modelo do sistema subjacente. Como discutido na introdução deste capítulo, os resultados destes modelos não devem ser usados como previsões perfeitas ou entendimentos completos, mas sim como simuladores de voos. Na verdade, um dos melhores usos da análise de sistemas complexos para avaliação de políticas públicas é a identificação de pontos de alavancagem (*leverage points*) no âmbito do sistema geral da sociedade (Holland, 1996). Pontos de alavancagem são locais dentro de um sistema complexo onde o sistema pode ser alterado ou mudado. Modelagem dá ao analista a capacidade de identificar estes pontos de alavancagem por experimentar muitos cenários diferentes e intervenções, além de visualizar quais políticas têm o maior efeito positivo sobre o objetivo que eles estão esperando alcançar. A identificação de pontos de alavancagem possibilita a exploração de uma política (Bankes, 1993; Lempert, 2002) e a descoberta de quando e em que magnitude esta política será mais eficaz.

Pontos de alavancagem estão também relacionados com outro conceito importante em sistemas complexos, conhecido como *pontos críticos* (*tipping points*). Pontos críticos são quando um sistema (Lamberson e Page, 2012; Mitchell, 2009; Schelling, 1972). De repente muda de estado com base em uma pequena mudança em um parâmetro do sistema – em alguns campos, isto também é chamado transição de fase (Lamberson e Page, 2012) ou bifurcação (Drake e Griffen, 2010).

Sistemas com pontos críticos às vezes podem parecer que não estão respondendo às políticas públicas que tentam alterá-los, mas de repente, com apenas algumas pequenas mudanças, o sistema muda drasticamente (Shiell, Hawe e Gold, 2008).

No entanto, outros sistemas podem ser presos em um estado que não podem escapar devido a escolhas feitas no início da evolução do estado. Este é um conceito conhecido como dependência de trajetória – *path dependence* (Brown *et al.*, 2005a). Dependência de trajetória significa que as possibilidades atuais do sistema são, em algum sentido, restrinvidas pelas escolhas anteriores que foram feitas. Por exemplo, o desenvolvimento urbano muitas vezes apresenta efeitos dependentes de trajetória, dado que os moradores tendem a se mover para onde serviços estão disponíveis nas cidades, assim como cidades e empresas tendem a colocar serviços onde há muitos residentes. Isso significa que inicialmente, quando alguns residentes ou serviços fazem algumas escolhas, estes podem alterar drasticamente o desenvolvimento futuro da cidade (Brown *et al.*, 2004).

Um caso especial de dependência de trajetória é a sensibilidade às condições iniciais (Mitchell, 2009). Esta propriedade, que é também uma marca dos sistemas caóticos, afirma que cada ponto de partida do sistema está muito perto de outro ponto de partida com um futuro muito diferente.

Isso é por vezes referido como o *efeito borboleta*, ou seja, como disse Edward Lorenz, “o bater das asas de uma borboleta no Brasil pode desencadear um tornado no Texas” (Lorenz, 1972). Em outras palavras, as condições exatas de um sistema devem ser conhecidas a fim de compreender como esse sistema vai se desenvolver no futuro, e, infelizmente, do ponto de vista da previsibilidade, conhecer de perto as condições exatas não ajuda muito nas previsões para o futuro. Esta é uma afirmação muito forte sobre um sistema, e em geral muitos sistemas complexos apresentam alguma sensibilidade às condições iniciais, mas não têm exatamente essa propriedade. No entanto, uma versão fraca desta propriedade pode dizer que onde você inicia importa significativamente, o que também parece afetar a maioria dos sistemas complexos. Em outras palavras, muitos sistemas complexos podem ser muito afetados por suas condições de partida, mesmo que os estados resultantes dos sistemas possam não ser completamente divergentes dadas as condições de partida similares. No entanto, facilmente pode haver regiões de condições de partida e pode ser possível que a alteração de um parâmetro do sistema possa mover todo um sistema de uma região para outra. Isto é novamente semelhante ao conceito dos pontos críticos, mas agora estabelecido em termos das condições iniciais do sistema, em vez do estado em andamento do sistema.

Sensibilidade às condições iniciais e pontos críticos são algumas das muitas propriedades que surgem em sistemas complexos que são não lineares. A não linearidade também foi discutida no primeiro capítulo, mas um sistema não linear é aquele no qual os insumos não necessariamente afetam os produtos de forma linear. Em outras

palavras, pode ser o caso em que se alterando um insumo para um sistema de forma gradual, altera-se gradualmente o produto até certo ponto, mas de repente este já não pode mais afetar o produto resultante, ou pode ser o caso em que interações entre diversos insumos signifique que não é possível resolver o problema subdividindo-o em seus componentes, avaliando cada componente e depois reagrupando as partes. Não linearidade significa que sistemas complexos, muitas vezes, têm de ser considerados como sistemas holísticos, nos quais não é possível simplesmente avaliar o impacto de cada um dos componentes individuais separadamente.

Na verdade, em alguns casos, é possível ser capaz de remover todos os subcomponentes do sistema sem que o sistema quebre completamente, ou que o resultado do sistema seja alterado significativamente. Isto é o que se conhece como a propriedade de *robustez* (Lempert, 2002; Bankes, 2002b). Robustez significa que um sistema mantém seu comportamento característico mesmo depois de uma perturbação do sistema (Bankes, 2002a). Robustez é uma propriedade que muitas vezes lutamos para conquistar em políticas públicas, pois é importante que as políticas sejam robustas a ações individuais e às alterações nos sistemas. Em condições ideais, as políticas são úteis e mantêm sua legitimidade por muito tempo, e isso as torna verdadeiramente robustas. No entanto, é bem possível que a robustez em sistemas complexos possa ser uma coisa ruim. Por exemplo, Ross Hammond e Robert Axelrod (2006) mostraram, ao usarem um modelo baseado em agentes, que mesmo sob uma ampla gama de valores de parâmetros, existem muitos casos de evolução da sociedade que levam à primazia do comportamento etnocêntrico, no qual indivíduos ajudam os seus similares e ferem os outros que são diferentes deles. Este sistema pode ser dito como robusto, mesmo sob grandes perturbações, mas isto não é algo considerado socialmente desejável na maioria dos casos.

Uma das características inerentes à análise de sistemas complexos é o uso da modelagem da diversidade e da heterogeneidade (Page, 2010; Hong e Page, 2004; Sondahl e Rand, 2007). Como o primeiro e o sétimo capítulo neste livro indicam, a compreensão da heterogeneidade de um sistema pode ser crucial para a compreensão do próprio sistema. Tradicionalmente, abordagens de modelagem se concentram em tratar mais heterogeneidade quanto for possível, pois a heterogeneidade muitas vezes torna o sistema dificilmente modelável. No entanto, sistemas complexos comprehendem o valor da heterogeneidade, e um modelo de sistemas complexos bom representará heterogeneidade adequadamente dentro do modelo. Uma suposição fundamental em muitas formas de análise de sistemas complexos é que a diversidade pode alterar enormemente o resultado de um sistema (Sharara, Rand e Getoor, 2011). Muitas abordagens tradicionais de análise de sistema fracassaram em contabilizar suficientemente a diversidade subjacente, e isso pode levar a entendimentos incorretos, ou pelo menos enganosos, do sistema.

Uma das razões que explicam o fato de a sociedade moderna ser cada vez mais diversificada é que esta também apresenta um elevado nível de interligação e interações entre os indivíduos (Barabási, 2014). O uso de redes, que também foi discutido no primeiro capítulo, para examinar o sistema complexo é uma ferramenta poderosa. Pode-se agora chegar a pessoas do outro lado do mundo por uma chamada de telefone em questão de segundos, assim como é possível realizar uma teleconferência com indivíduos que nunca conhecemos. Estas interações complexas geram decisões em interessantes maneiras e são a essência do que dá origem aos padrões emergentes de comportamento que se observam nos sistemas complexos. Conforme a sociedade se torna cada vez mais conectada e esses padrões de comunicação aumentam, a análise de sistemas complexos torna-se cada vez mais importante.

Agora que se tem um vocabulário básico para discutir os conceitos de sistemas complexos em políticas públicas, é hora de olhar para as ferramentas que permitem o estudo de sistemas complexos.

## 2.2 Ferramentas

O capítulo seguinte (capítulo 3) deste livro, escrito por Miguel Fuentes, irá discutir ferramentas de sistemas complexos em mais detalhes, mas neste capítulo olharemos brevemente para algumas das ferramentas de sistemas complexos, porque estas estão indelevelmente ligadas aos conceitos e ajudam-nos a falar sobre noções básicas, tais como os agentes e as redes que são necessários enquanto se continua a discutir o uso de sistemas complexos em políticas públicas. É interessante notar que um dos objetivos dos sistemas complexos é desenvolver teorias e entendimentos que são generalizáveis – às vezes chamados de universais (Boccara, 2004; Holland, 2012). Estas teorias podem ser aplicadas a uma grande variedade de situações e de teorias aplicadas. Como tal, é frequente o caso em que as mesmas ferramentas são usadas em muitos contextos diferentes dentro de sistemas complexos, e uma das características de uma boa análise de sistemas complexos é que as conclusões podem ser facilmente traduzidas para outros sistemas.

Uma ferramenta que muitas pessoas associam aos sistemas complexos é a modelagem baseada em agentes – ABM (Wilensky e Rand, 2015; North e Macal, 2007; Epstein e Axtell, 1996; Bankes, 2002a; Bonabeau, 2002; Gilbert, 2007), na qual entidades computacionais são criadas como um mapeamento para os componentes reais do sistema. Isto permite a modelagem de cada indivíduo em um sistema complexo, juntamente com suas interações. A ABM, que também foi discutida no primeiro capítulo, é uma descrição do processo de como agentes interagem uns com os outros e com o ambiente ao seu redor. A ABM tem sido empregada em diferentes contextos das políticas públicas, pois permite que pesquisadores vejam que efeitos as políticas teriam sobre as regras básicas de comportamento do

agente. A ABM é normalmente uma estrutura para simulação; várias das outras ferramentas dos sistemas complexos caem sob a alcada da simulação (Gilbert e Troitzsch, 2005; Casti, 1997), que permite a análise de cenários hipotéticos. As ferramentas da simulação são úteis para a análise de políticas públicas, pois elas permitem que os analistas criem muitos cenários diferentes e entendam as ramificações desses cenários na sociedade.

Outras ferramentas frequentemente usadas por pesquisadores de sistemas complexos são a análise de redes sociais – ARS (Wasserman e Faust, 1994) e as relacionadas à ciência de redes (Newman, 2003). O objetivo da ARS e da ciência de redes é entender sistemas complexos ao descrever o sistema de interações que ocorrem dentro do sistema. Muitas políticas públicas afetam ou diretamente laços em redes sociais (por exemplo, uma política que altera os limites da escola e, portanto, afeta quem faz amigos com quem), ou alternativamente, por meio da forma como as informações sobre as diretivas são difundidas através de rede social (por exemplo, os cidadãos descobrem sobre radares ao conversarem com seus colegas de trabalho). Em consequência, compreender o efeito das redes sociais na política pública é importante para avaliar corretamente como essas políticas públicas afetarão a sociedade.

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é usado frequentemente em pesquisas de sistemas complexos para a avaliação de políticas públicas, porque ele fornece uma maneira unificada de descrever dados espaciais complexos (Heppenstall, Crooks e See, 2012). Como muitas vezes o pleno entendimento de sistemas complexos requer um número de diferentes conjuntos de dados, um tema unificador para esses conjuntos de dados deve ser identificado. Isto permite que uma grande variedade de dados seja amarrada a um banco de dados unificador. Um exemplo de uma maneira de unificar dados díspares é anexar coordenadas espaciais quando for apropriado. O padrão de dados, então, pode ser descrito por métodos e estatísticas espaciais. Como resultado, o SIG é uma boa descrição da padronização de sistemas complexos. A composição de ABM, que descreve o processo, com o SIG, que descreve os padrões, pode criar uma poderosa ferramenta para análise de sistemas complexos de políticas públicas (Brown *et al.*, 2005b).

Outra ferramenta de sistemas complexos, a modelagem de sistemas dinâmicos descreve interações de alto nível entre as populações e os recursos (Sterman, 2000). Sistemas dinâmicos são construídos em torno da noção de estoques e fluxos e podem ser usados para modelar um sistema complexo, uma vez que permite descrever conceitos, tais como respostas positivas e negativas. No contexto da avaliação de políticas públicas pelos sistemas dinâmicos, as políticas são muitas vezes avaliadas ao examinar como a mudança em alguns dos fluxos do sistema afeta os resultados deste sistema.

O modelo de *aprendizagem automática (machine learning)* extrai padrões de comportamento de grandes conjuntos de dados e procura aprender um modelo geral capaz de prever quais dados provavelmente serão observados, dadas as entradas correntes baseadas em dados prévios (Holland, 1975; Mitchell, 1997). A aprendizagem automática permite a pesquisadores de sistemas complexos inferir modelos em nível do indivíduo a partir de grandes conjuntos de dados, que podem ser usados para avaliar como uma nova política vai afetar as decisões destes indivíduos.

Naturalmente, além desses métodos mais novos, as pesquisas de sistemas complexos com relação à avaliação de políticas públicas também empregam muitos métodos-padrão para a compreensão de sistemas, tais como análise estatística, experimentos de psicologia, *surveys*, teoria dos jogos, análises de sistemas dinâmicos e outros métodos mais tradicionais. O verdadeiro valor dos sistemas complexos de análise não está em um método ou ferramenta particular, mas sim em uma combinação de ferramentas e métodos que ajudam a fornecer respostas da melhor forma às perguntas que surgem.

Este livro examina, em vários capítulos, como utilizar essas várias ferramentas em uma ampla gama de aplicações, então não nos aprofundaremos neste momento na aplicação destas ferramentas, mas os sistemas complexos têm sido aplicados a uma ampla gama de áreas, incluindo: sistemas sociais (Gilbert e Troitzsch, 2005; Casti, 1995; Epstein, 2006), finanças e economia (Tsfatson, 2003; LeBaron, 2001; Holland e Miller, 1991; May, Levin e Sugihara, 2008; Arthur e Durlauf, 1997), cidades (Batty, 2005; Zellner *et al.*, 2009; Benenson e Torrens, 2004), ecologia (Schmitz e Booth, 1997; Grimm, 1999; Pascual e Dunne, 2006; Williams e Martinez, 2000; Grimm *et al.*, 2005), sistemas de transporte (Lu, Kawamura e Zellner, 2008; Bazzan e Klugl, 2004; Balmer *et al.*, 2004; Zhang e Levinson, 2004; Balmer, Axhausen, e Nagel, 2006), educação (Maroulis *et al.*, 2010; Klopfer, 2003), análise legislativa (Rand e Liepelt, 2009), negócios (Rand e Rust, 2011; North e Macal, 2007) e uso e regulação do solo (Parker *et al.*, 2003; Brown *et al.*, 2008).

### 3 VANTAGENS E POSSIBILIDADES

Ferramentas e métodos de sistema complexo oferecem várias possibilidades e benefícios que os métodos tradicionais não fornecem, ou que são difíceis de obter em métodos tradicionais. Por exemplo, muitos métodos de sistemas complexos podem modelar um nível de heterogeneidade (Rand *et al.*, 2003) e de diversidade (Page, 2010) em componentes individuais subjacentes que não é facilmente modelável pelos métodos tradicionais (Goldenberg, Libai e Muller, 2001). Além disso, os métodos de sistemas complexos podem incorporar modelos em múltiplos níveis de escala (North *et al.*, 2010), que possibilita uma estrutura de modelagem que não se restringe a simplesmente olhar para os resultados da política em um nível de escala.

Muitos métodos de sistemas complexos também permitem um comportamento *adaptativo* e *evolutivo* (Holland e Miller, 1991; Mitchell, 2009). Isso permite que os indivíduos modelados não só mudem seu comportamento uma vez, como resultado de uma nova política, mas que adaptem e evoluam seus comportamentos ao longo do tempo. Uma vantagem dessa abordagem é que ela tem o potencial de ajudar a superar a crítica de Lucas de política (Lucas, 1976). A crítica de Lucas é que, sendo os modelos construídos para compreender os efeitos das políticas sobre os padrões de comportamento em nível macro são construídos sob as regras correntes de comportamento em nível micro, as previsões que fazem estarão inevitavelmente erradas, porque o comportamento dos indivíduos em nível mais básico mudará em face de uma nova política. Métodos de sistemas complexos dão aos analistas uma forma de modelar como indivíduos aprendem e se adaptam a novas políticas no nível micro. Isto significa que, se o modelo de adaptação for válido (e presumindo que a política não afete o processo de adaptação em si, mas apenas o comportamento do indivíduo), este será capaz de levar em conta as mudanças de comportamento em nível micro em face da nova política e, assim, ainda fazer previsões precisas. Isto, por sua natureza, significa que os analistas de política pública podem conseguir mais facilmente evitar a maldição das “consequências imprevisíveis” ao utilizarem métodos de sistemas complexos.

Finalmente, a análise de sistemas complexos tem mais benefícios do que os métodos tradicionais como um dispositivo de comunicação para os agentes interessados (*stakeholders*) e os tomadores de decisão. Métodos de sistemas complexos fornecem uma série de vantagens. A maior parte dos métodos de sistemas complexos pode gerar uma grande quantidade de dados. Esses dados são úteis para construir e criar poderosas visualizações para a história que o pesquisador está tentando explorar (Bankes, 2002b; Kornhauser, Wilensky e Rand, 2009). Além disso, muitos métodos de sistemas complexos têm uma ontologia (ou seja, uma teoria das coisas que existem no modelo) que está mais perto dos sistemas do mundo real. Em outras palavras, se o pesquisador estiver tentando descrever um sistema educacional que use o ABM e o ARS, eles podem de fato descrever as interações de agentes com seus pares na escola e explicar o modelo de interação para um agente interessado. Ao contrário de um modelo tradicional baseado em equação (Rahmandad e Sterman, 2008; Parunak, Savit e Riolo, 1998), onde o pesquisador tem frequentemente termos matemáticos complexos que descrevem essas propriedades de interação. Isso torna a análise dos sistemas complexos mais fácil de ser entendida a muitas das partes interessadas do que os métodos tradicionais.

Ao todo, métodos de sistemas complexos fornecem um conjunto poderoso de ferramentas para a compreensão da política pública.

## 4 RESISTÊNCIA E LIMITAÇÕES

Tem havido resistência à adoção generalizada dos métodos de sistemas complexos no âmbito das políticas públicas. Esta resistência vem de um número de diferentes áreas. Em primeiro lugar, sistemas complexos são um campo bastante jovem (Waldrop, 1993) e, como tal, há uma falta de educação dos métodos de sistemas complexos e em como aplicá-los. Como resultado, os pesquisadores são resistentes a usar métodos que sentem não entender totalmente. A solução para isso é prosseguir com os esforços para educar os analistas de políticas públicas, bem como as partes interessadas sobre o tema. Aumentar a educação sobre como interpretar e compreender a análise de sistemas complexos pode não somente conduzir a uma maior aceitação dos métodos, em termos de influenciar políticas públicas, mas também, conforme mostraram pesquisas anteriores (Cockcroft *et al.*, 2014), educar os formuladores de políticas sobre como interpretar a evidência para a política aumenta a eficácia dessa política.

Outro fator na resistência aos métodos de sistemas complexos tem sido que os métodos tradicionais, tais como a modelagem baseada em equações e a estatística clássica, foram muito bem-sucedidos em fazer o que fazem. Tais métodos têm sido capazes de fornecer a pesquisadores e interessados um número de conclusões e soluções interessantes para os problemas de política pública. Como resultado, há uma predileção para continuar a usar tais métodos para resolver problemas e analisar soluções, mesmo quando estas ferramentas possam não ser bem adequadas para o trabalho. Para entender por que haveria uma ênfase sobre os métodos que podem não ser aplicáveis ao problema em mãos, às vezes é útil examinar a história do bêbado, das chaves e das luzes da rua (Colander e Kupers, 2014). A história diz que um homem sóbrio está andando pela rua quando encontra um homem bêbado agarrado a um poste e procurando algo sob as luzes da rua. Quando o homem sóbrio pergunta ao bêbado o que ele está procurando, o homem bêbado responde que ele está procurando as chaves de casa. Depois de ajudá-lo a procurar por um tempo, o sóbrio pergunta por que o homem bêbado está apenas olhando sob as luzes da rua e o indaga se as chaves não poderiam estar sob a cobertura onde está escuro. O bêbado responde que não vale a pena olhar no escuro pelas chaves dele porque ele não seria capaz de encontrá-las de qualquer maneira, então é preferível manter-se ao poste de luz. Da mesma forma, pesquisadores e analistas muitas vezes continuam a usar os métodos que eles sabem bem para tentar resolver os problemas, mesmo quando esses métodos não são realmente aplicáveis ao problema em questão (Colander e Kupers, 2014). A solução para esta resistência é mostrar que abordagens de sistemas complexos de fato podem resolver problemas que os métodos tradicionais não abordam adequadamente. Os capítulos deste livro sobre as aplicações dos métodos de sistemas complexos para política pública são oferecidos parcialmente como um primeiro passo nesta direção.

Além disso, há também uma resistência psicológica profunda às abordagens de sistemas complexos. Na década de 1990, Mitchel Resnick e Uri Wilensky realizaram um número de estudos psicológicos para mostrar que, desde a tenra idade, as pessoas tendem a desenvolver o que eles chamaram de *mentalidade determinística e centralizada* – DC (Resnick e Wilensky, 1993a; 1993b; Resnick, 1994). A mentalidade DC é, basicamente, aquela em que as pessoas esperam que todos os sistemas tenham regras determinísticas que governem seu comportamento e que exista um controlador central na maioria dos sistemas. É essa mentalidade que leva alguns especialistas em política a acreditar que apenas um decreto de uma política com sanções suficientes incentivará o comportamento que eles procuram e, assim, levará ao resultado que desejam. No entanto, sistemas complexos mostram que, em muitos sistemas, não existe um verdadeiro padrão determinístico de comportamento e, em seu lugar, o acaso e a oportunidade desempenham um grande papel. Além disso, nem todos os sistemas requerem um controlador centralizado. Por exemplo, a situação de tráfego que foi mencionada no início apresenta ações não determinísticas (por exemplo, usuários aceleram e reduzem suas velocidades de maneira irracional e às vezes imprevisível) e causas dispersas (não centralizadas) – ou seja, não há nenhuma causa centralizada de engarrafamento em muitos casos (Resnick, 1994). Estas características dos sistemas complexos significam que alguns indivíduos enfrentam dissonância cognitiva ao tentarem compreender a análise de sistemas complexos.

Apesar de os sistemas complexos nos fornecerem benefícios para a compreensão das políticas públicas, também existem algumas limitações legítimas para a análise de sistemas complexos em comparação com as abordagens tradicionais: *i*) o alto custo computacional; *ii*) os muitos parâmetros livres; *iii*) a exigência de conhecimento no nível do indivíduo; *iv*) a falta de educação; e *v*) a alfabetização. As três primeiras dessas restrições (alto custo computacional, muitos parâmetros livres e conhecimento em nível do indivíduo) aplicam-se ao utilizador corrente da pesquisa de sistemas complexos e as duas últimas (falta de educação e alfabetização) aplicam-se para uma aplicação futura da pesquisa de sistemas complexos nas políticas públicas.

Um alto custo computacional resulta do fato de que a maior parte das abordagens de sistemas complexos utiliza simulações e análises de dados em larga escala. No entanto, o alto custo computacional vem com um benefício, pois oferece muito mais detalhes e modelos de interações em níveis mais finamente detalhados do que os métodos tradicionais. Muitos métodos de sistemas complexos realmente empregam um grande número de parâmetros livres, então é importante ter a certeza de que os resultados do modelo são robustos a alterações nesses parâmetros, e encontrar as configurações adequadas para tais parâmetros. No entanto, esta limitação é também um benefício, porque ela fornece ao pesquisador ou analista um maior controle sobre o método. Métodos de sistemas complexos, muitas vezes, exigem

conhecimento ou pelo menos teorias sobre o *conhecimento no nível do indivíduo*, e sobre como componentes individuais irão se comportar quando confrontados com novas políticas. Às vezes não existe nenhum conhecimento forte ou ainda há poucas teorias que descrevem como os indivíduos irão se comportar em tal sistema, o que torna muitas vezes os métodos de sistemas complexos difícil de serem aplicados. No entanto, é esta limitação que permite uma análise mais detalhada e dá aos sistemas complexos a habilidade de modelar a heterogeneidade individual detalhada, bem como as regras de adaptação para os indivíduo. É importante notar que não é necessário dispor de dados exatos no nível do indivíduo, mas é importante ter uma teoria (ou duas) sobre como os indivíduos se comportam no nível micro.

Atualmente, não há muitos programas educativos que ensinem a estudantes ou pesquisadores como aplicar métodos de sistemas complexos para políticas públicas, logo, há uma falta de conhecimento sobre a prática de sistemas complexos no que diz respeito à análise de políticas públicas. Como resultado, pode ser difícil construir um grupo de pesquisa ou criar, dentro do governo, uma organização funcional que construa modelos de sistemas complexos. No entanto, isso pode ser retificado aumentando a ênfase na educação futura de sistemas complexos. Essa educação precisa acontecer não apenas para os alunos, mas também para as outras partes interessadas e os tomadores de decisão, que precisam compreender as análises a fim de tomar decisões adequadas. Em alguns casos, eles não têm a alfabetização de sistemas complexos necessária para compreender os resultados. A educação ajudará neste ponto, assim como os esforços intensificados na visualização, pois a visualização pode tornar modelos e resultados mais fáceis de serem compreendidos. Além disso, embora métodos de sistemas complexos possam ser novos e exigir uma terminologia diferente de aprendizagem, métodos de sistemas complexos muitas vezes empregam ontologias que estão mais próximas de ontologias do mundo real do que os métodos tradicionais. Isto significa que provavelmente será mais fácil aumentar a alfabetização de sistemas complexos entre os formuladores de política do que tem sido aumentar a alfabetização em torno de outras ideias técnicas.

## 5 CONCLUSÃO

Em conclusão, para uma ampla variedade de aplicações de políticas públicas, sistemas complexos fornecem uma lente útil para entender as ramificações políticas e o impacto das políticas. Existem muitas áreas de políticas públicas que não empregam atualmente sistemas complexos, logo, há um grande leque de possibilidades e vantagens que ainda precisam ser exploradas. Se voltarmos para os objetivos das políticas públicas, os sistemas complexos fornecem a capacidade de reunir intuições sobre como é possível manter ou alterar o comportamento de grandes grupos de indivíduos ou organizações e, portanto, podem fornecer uma visão única para a compreensão da aplicação das políticas públicas.

O uso futuro de sistemas complexos para políticas públicas é promissor. Finalmente, temos algumas das ferramentas que são realmente necessárias para entender como o complexo sistema da sociedade evolui em resposta direta às políticas públicas. Não só é possível descrever como os cidadãos praticarão diferentes ações em resposta à política, mas também como esse modelo comportamental irá adaptar-se; isto dá a pesquisadores e analistas a capacidade de incorporar a adaptação e a aprendizagem a seus modelos. Além disso, pode-se levar em conta a interação social entre indivíduos, que está se tornando cada vez mais importante conforme o custo de comunicação se reduz próximo a zero – até mesmo em distâncias muito longas. Claro, ainda existem muitos desafios pela frente, pois estes modelos de aprendizagem e comunicação devem ser validados e verificados para serem usados para a tomada de decisões de política. No entanto, a capacidade de realmente considerar as características citadas faz com que esse objetivo valha a pena ser perseguido.

Na verdade, em alguns aspectos, o futuro dessa aplicação pode ter sido previsto por um dos maiores escritores de ficção científica. Isaac Asimov, em sua série de livros *Trilogia da fundação*, escreveu sobre um personagem chamado Hari Seldon, que usava uma ciência fictícia chamada psico-história (Asimov, 1951). Nestes livros, psico-história representa uma combinação de história, sociologia e matemática, que são campos que influenciaram também a análise de sistemas complexos. Psico-história foi usada para fazer previsões aproximadas sobre o comportamento futuro de grandes grupos de indivíduos. Da mesma forma, sistemas complexos têm o potencial de nos ajudar a entender como grandes grupos de indivíduos e organizações reagirão a novas políticas públicas, o que abre potencialmente o caminho para uma psico-história real (Turchin, 2007). No entanto, assim como o Seldon de Asimov, o objetivo não deveria estar em fazer previsões específicas, mas sim em abraçar a incerteza do futuro e em criar políticas que sejam robustas e que possam ser alteradas em resposta às mudanças das circunstâncias.

## REFERÊNCIAS

- ARTHUR, W. B.; LANE, D.; DURLAUF, S. (Eds.). **The economy as an evolving complex system II**. Redwood City: Addison-Wesley, 1997.
- ASIMOV, I. **Foundation**. New York: Gnome Press, 1951.
- BALMER, M. et al. **Towards truly agent-based traffic e mobility simulations**. In: THIRD INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON AUTONOMOUS AGENTS AND MULTI-AGENT SYSTEMS. New York: July, 2004. p. 60-67.
- BALMER, M.; AXHAUSEN, K. W.; NAGEL, K. Agent-based demand-modeling frame-work for large scale microsimulations. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, v. 1985, n. 1, p. 125-134, 2006.

BANKES, S. C. Agent-based modeling: a revolution? **Proceedings of the National Academy of the Sciences**, v. 99, n. 10, p. 7199-7200, 2002.

\_\_\_\_\_. Exploratory modeling for policy analysis. **Operations Research**, v. 41, n. 3, p. 435-449, 1993.

\_\_\_\_\_. Tools e techniques for developing policies for complex e uncertain systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 99, n. 3, p. 7263-7266, 2002.

BARABASI, A-L. **Linked**: how everything is connected to everything else e what it means for business, science, e everyday life. New York: Basic Books, 2014.

BATTY, M. **Cities e complexity**. Cambridge; London: MIT Press, 2005.

BAZZAN, A. L. C.; KLUGL, F. (Eds.). **Multi-agent systems for traffic e transportationengineering**. Hershey: IGI Global, 2009.

BENENSON, I.; TORRENS, P. M. **Geosimulation**: automata-based modeling of urban phenomena. New Jersey: Wiley, 2004.

BOCCARA, N. **Modeling complex systems**. New York: Springer, 2004. v. 1.

BONABEAU, E. Agent-based modeling: methods e techniques for simulating human systems. **Proceedings of the National Academy of the Sciences**, v. 99, p. 7280-7287, 2002.

BROWN, D. G. *et al.* Agent-based e analytical modeling to evaluate the effectiveness of greenbelts. **Environmental Modelling & Software**, v. 19, n. 12, p. 1097-1109, 2004.

BROWN, D. G. *et al.* Path dependence e the validation of agent-based spatial models of land use. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 19, n. 2153-174, 2005a.

BROWN, D. G. *et al.* Spatial process e data models: toward integration of agent-based models e GIS. **Journal of Geographical Systems**, v. 7, n. 1, p. 25-47, 2005b.

BROWN, D. G. *et al.* Exurbia from the bottom-up: Confronting empirical challenges to characterizing a complex system. **Geoforum**, v. 39, n. 2, p. 805-818, 2008.

CASTI, J. L. **Complexification**: explaining a paradoxical world through the science of surprise. New York: HarperCollins, 1994.

\_\_\_\_\_. Seeing the light at El Farol: A look at the most important problem in complex systems theory. **Complexity**, v. 1, n. 5, p. 7-10, 1995.

- \_\_\_\_\_. **Would-be worlds:** how simulation is changing the frontiers of science. New York: Wiley, 1997.
- COCKCROFT, A. *et al.* Legislators learning to interpret evidence for policy. **Science**, v. 345, n. 6202, p. 1244-1245, 2014.
- COLANDER, D.; KUPERS, R. **Complexity e the art of public policy:** solving society's problems from the bottom up. New Jersey: Princeton University Press, 2014.
- DRAKE, J. M.; GRIFFEN, B. D. Early warning signals of extinction in deteriorating environments. **Nature**, v. 467, n. 7314, p. 456-459, 2010.
- EPSTEIN, J. M.; AXTELL, R. **Growing artificial societies:** social science from the bottom up. Washington: Brookings Institution Press, 1996.
- EPSTEIN, J. M. **Generative social science:** studies in agent-based computational modeling. New Jersey: Princeton University Press, 2006.
- GILBERT, N.; TROITZSCH, K. G. **Simulation for the social scientist.** 2nd ed. New York: Open University Press, 2005.
- GILBERT, N. **Agent-based models.** New York: SAGE Publications, 2007.
- GOLDENBERG, J.; LIBAI, B.; Muller, E. Using complex systems analysis to advance marketing theory development: modeling heterogeneity effects on new product growth through stochastic cellular automata. **Academy of Marketing Science Review**, v. 9, n. 1, p. 1-18, 2001.
- GRIMM, V. Ten years of individual-based modelling in ecology: what have we learned e what could we learn in the future? **Ecological Modeling**, v. 115, p. 129-148, 1999.
- GRIMM, V. *et al.* Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: lessons from ecology. **Science**, v. 310, n. 5750, p. 987-991, 2005.
- HAMMOND, R. A.; AXELROD, R. The evolution of ethnocentrism. **Journal of Conflict Resolution**, v. 50, n. 6, p. 926-936, 2006.
- HEPPENSTALL, A. J. *et al.* (Eds.). **Agent-based models of geographical systems.** New York: Springer, 2012.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems.** Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- \_\_\_\_\_. **Hidden order:** how adaptation builds complexity. New York: Basic Books, 1996.
- \_\_\_\_\_. **Emergence:** from chaos to order. Boston: Addison Wesley, 1999.

- \_\_\_\_\_. **Signals e boundaries:** building blocks for complex adaptive systems. Cambridge: MIT Press, 2012.
- \_\_\_\_\_. **Complexity:** a very short introduction. Oxford University Press, 2014.
- HOLLAND, J. H.; MILLER, J. Artificial adaptive agents in economic theory. **American Economic Review**, v. 81, n. 2, p. 365-370, 1991.
- HONG, L.; PAGE, S. E. Groups of diverse problem solvers can outperform groups of high-ability problem solvers. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 101, n. 46, p. 16385-16389, 2004.
- KLOPFER, E. Technologies to support the creation of complex systems models – using StarLogo software with students. **Bio Systems**, v. 71, n. 1-2, p. 111-123, 2003.
- KORNHAUSER, D.; WILENSKY, U.; RAND, W. Design Guidelines for agent based model visualization. **Journal of Artificial Societies e Social Simulation**, v. 12, n. 2, p. 1, 2009.
- LAMBERSON, P. J.; PAGE, S. E. Tipping points. **Quarterly Journal of Political Science**, v. 7, n. 2, p. 175–208, 2012.
- LEBARON, B. A builder's guide to agent-based financial markets. **Quantitative Finance**, v. 1, n. 2, p. 254-261, 2001.
- LEMPERT, R. J. A new decision science for complex systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 99, n. 3, p. 7309-7313, 2002.
- LORENZ, E. N. **Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas?** American association for the advancement of science. In: MEETING OF THE AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE, 139. Washington: Dec., 1972. Unpublished.
- LU, Y.; KAWAMURA, K.; ZELLNER, M. L. Exploring the influence of urban form on work travel behavior with agent-based modeling. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2082, p. 132–140, 2008.
- LUCAS JUNIOR, R. E. Econometric policy evaluation: a critique. **Carnegie-Rochester Conference Series Public Policy**, v. 1, n. 1, p. 19-46, 1976.
- MAROULIS, S. R. *et al.* Complex systems view of educational policy research. **Science**, v. 330, n. 6000, 2010.
- MAY, R. M.; LEVIN, S. A.; SUGIHARA, G. Complex systems: ecology for bankers. **Nature**, v. 451, p. 893-895, 2008.

- MILLER, J. H.; PAGE, S. E. **Complex adaptive systems**: an introduction to computational models of social life. New Jersey: Princeton University Press, 2009.
- MITCHELL, M. **Complexity**: a guided tour. New York: Oxford University, 2009.
- MITCHELL, T. M. **Machine learning**. Maidenhead: McGraw-Hill Science: 1997.
- NEWMAN, M. E. J. The structure e function of complex networks. **SIAM Review**, v. 45, n. 2, p. 167-256.
- NORTH, M. J.; MACAL, C. M. **Managing business complexity**: discovering strategic solutions with agent-based modeling e simulation. New York: Oxford University Press, 2007.
- NORTH, M. J. *et al.* Multiscale agent-based consumer market modeling. **Complexity**, v. 15, n. 5, p. 37-47, 2010.
- PAGE, S. E. **Diversity e complexity**. New Jersey: Princeton University Press, 2010.
- PARKER, D. C. *et al.* Multi-agent systems for the simulation of land-use e land-cover change: a review. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 93, n. 2, p. 314-337, 2003.
- PARUNAK, H. V. D.; SAVIT, R.; RIOLO, R. L. Agent-based modeling vs. equation-based modeling: a case study e user's guide. In: SICHMAN, J. S.; CONTE, R.; GILBERT, N. (Eds.). **Multi-agent systems e agent-based simulation**: first international workshop, MABS '98, Paris, France, July 4-6 1998, Proceedings. v. 1534, p. 10-25. New York: Springer, 1998.
- PASCUAL, M. Dunne, J. A. (Eds.). **Ecological networks**: linking structure to dynamics in food webs. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- RAHMANDAD, H.; STERMAN, J. Heterogeneity e network structure in the dynamics of diffusion: comparing agent-based e differential equation models. **Management Science**, v. 54, n. 5, p. 998-1014, 2008.
- RAND, W. *et al.* **Statistical validation of spatial patterns in agent-based models**. In: PROCEEDINGS OF AGENT-BASED SIMULATION. Montpellier: 2003.
- RAND, W.; LIEPELT, K. **Simulating the formation of parliamentary decision teams, or how the bundestag is like a musical**. In: SUNBELT, INTERNATIONAL NETWORK FOR SOCIAL NETWORK ANALYSIS, 29. San Diego: Mar., 2009.
- RAND, W.; RUST, R. T. Agent-based modeling in marketing: guidelines for rigor. **International Journal of Research in Marketing**, v. 28, n. 3, p. 181-193, 2011.
- RESNICK, M.; WILENSKY, U. Beyond the deterministic, centralized mindsets: a new thinking for new science. In: ANNUAL MEETING OF AMERICAN EDUCATIONAL RESEARCH ASSOCIATION. Atlanta: Apr. 1993a.

\_\_\_\_\_. Diving into complexity: developing probabilistic decentralized thinking through role-playing activities. **Journal of Learning Sciences**, v. 7, n. 2, p. 153-181, Apr. 1993b.

RESNICK, M. **Turtles, termites, e traffic jams**: explorations in massively parallel microworlds. Cambridge: MIT Press, 1994.

REYNOLDS, C. W. Flocks, herds e schools: a distributed behavioral model. **ACM SIG-GRAPH Computer Graphics**, v. 21, n. 4, p. 25-34, 1987.

SCHELLING, T. C. A process of residential segregation: neighborhood tipping. In: PASCAL, A. **Racial discrimination in economic life**. Lexington: D. C. Heath e Company, 1972. p. 157-174.

SHARARA, H.; RAND, W.; GETOOR, L. **Differential adaptive diffusion**: understanding diversity e learning whom to trust in viral marketing. In: The International Conference on Weblogs e Social Media – ICWSM. Oxford: Jul. 2011.

SHIELL, A.; HAWE, P.; GOLD, L. Complex interventions or complex systems? Implications for health economic evaluation. **British Medical Journal**, v. 336, n. 7656, p. 1281-1283, 2008.

SONDAHL, F.; RAND, W. **Evolution of non-uniform cellular automata using a genetic algorithm**: diversity e computation. In: Proceedings of the ANNUAL CONFERENCE ON GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION, 9. London: Jul. 2007. p. 1531.

STERMAN, J. D. Learning in e about complex systems. **System Dynamics Review**, v. 10, n. 2-3, p. 291-330, 1994.

\_\_\_\_\_. **Business dynamics**: systems thinking e modeling for a complex world. Boston: Irwin McGraw-Hill, 2000.

TESFATSION, L. Agent-based computational economics: modeling economies as complex adaptive systems. **Information Sciences**, v. 149, p. 263-269, 2003.

TURCHIN, P. **War e peace e war**: the rise e fall of empires. New York: Penguin, 2007.

WALDROP, M. M. **Complexity**: the emerging science at the edge of order e chaos. New York: Simon & Schuster, 1993.

WASSERMAN, S.; FAUST, K. **Social network analysis**: methods e applications. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

WILENSKY, U. Traffic basic. **NetLogo**, 1997. Disponível em: <<http://goo.gl/hpnZfy>>.

\_\_\_\_\_. NetLogo flocking model. **NetLogo**, 1998.

- \_\_\_\_\_. Uri Wilensky. {NetLogo}. 1999. Disponível em: <<https://goo.gl/VZyCNC>>.
- WILENSKY, U.; RAND, W. **Introduction to agent-based modeling**: modeling natural, social, e engineered complex systems using NetLogo. Cambridge: MIT Press, 2015.
- WILLIAMS, R. J.; MARTINEZ, N. D. Simple rules yield complex food webs. **Nature**, v. 404, n. 6774, p. 180-183, 2000.
- ZELLNER, M. *et al.* The emergence of zoning policy games in exurban jurisdictions. **Land Use Policy**, v. 26, n. 2, p. 356-67, 2009.
- ZHANG, L.; LEVINSON, D. Agent-based approach to travel demand modeling: Exploratory analysis. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1898, n. 1, p. 28-36, 2004.



## CAPÍTULO 3

# MÉTODOS E METODOLOGIAS EM SISTEMAS COMPLEXOS<sup>1,2</sup>

Miguel Angel Fuentes<sup>3</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresentamos os métodos utilizados na abordagem de sistemas complexos. Ele é dirigido a colegas que vêm de outros campos da ciência. Especificamente, discutimos os seguintes temas: introdução à ciência da complexidade e sua importância para políticas públicas, não linearidades, teoria da bifurcação, formação de padrões, análise de redes, teoria dos jogos, teoria da informação, superestatística, medidas de complexidade, autômatos celulares, modelagem baseada em agentes e mineração de dados. Em cada seção, são fornecidas diversas referências, na esperança de motivar o leitor a continuar seu aprofundamento nos temas.

A ciência da complexidade tornou-se um ramo principal no contexto científico. É muito provável que seu sucesso seja baseado fundamentalmente no cerne do cotidiano dos cientistas que trabalham com complexidade. A ciência da complexidade não é um ramo disciplinar da ciência, é uma inter/transdisciplinar exploração da natureza, em quase todas as escalas e ambientes. Abrange áreas aparentemente distantes, como a física de plasma, em um extremo, e a evolução de línguas humanas, em outro.

No passado, a fronteira da ciência foi definida principalmente por dois extremos fascinantes: o do muito pequeno – um exemplo é o grande sucesso da física quântica logo após o trabalho de Max Planck, por volta de 1900 – e o do muito grande – podemos citar outra enorme mudança de paradigma, após a teoria da relatividade, uma contribuição incrível feita pelo jovem Albert Einstein (então com 26 anos de idade) durante seu *annus mirabilis* em 1905. No entanto, hoje em dia parte importante da comunidade científica faz grandes esforços para compreender, de forma científica e quantitativa, os fenômenos que envolvem comportamentos coletivos em sistemas vivos. Podemos dizer que um extremo da fronteira da ciência mudou: estamos tentando entender o comportamento humano (entre outros tipos de sistemas similares). Nesse sentido, o presente livro,

---

1. Traduzido por Bernardo Alves Furtado.

2. Agradecemos o apoio do Conicyt Projeto: Anillo en Complejidad Social SOC-1101 e Fondecyt 1.140.278.

3. Professor no Instituto Santa Fe, nos Estados Unidos. Pesquisador no Instituto de Investigaciones Filosóficas, na Argentina, e no Instituto de Sistemas Complexos de Valparaíso, no Chile.

*Modelagem de sistemas complexos para políticas públicas*, centra-se em uma tarefa muito importante e difícil: a interseção entre ciência e política.

Vale a pena notar que alguns dos métodos aqui discutidos têm uma longa tradição em física e matemática, outros são relativamente novos – como a análise de redes em sua forma contemporânea, sem considerar suas origens relacionadas à teoria dos grafos. No entanto, a abordagem de sistemas complexos dá novo sentido para o conjunto dessas metodologias tradicionais, é uma nova maneira de explorar a natureza de forma quantitativa, abordando a questão com uma profunda visão interdisciplinar.

Ainda que não seja muito precisa e, portanto, única, a definição de sistemas complexos com a qual a maioria dos pesquisadores concorda contém algumas propriedades essenciais para ser chamado complexo (Boccara, 2004; Erdi, 2008; Mitchell, 2009). Um sistema complexo: *i*) consiste em um grande número de agentes que interagem normalmente por meio de regras simples; e *ii*) exibe emergência, comportamento coletivo de difícil previsão – não resulta da existência de um controlador central, ou seja, é auto-organizado (Miller, 2007). Uma boa discussão sobre estas características (que qualquer sistema complexo apresenta) e os modelos matemáticos que poderiam ser usados como uma aproximação para tais características podem ser encontrados em Nicolis e Nicolis (2007). A ideia básica é que o comportamento não linear é condição necessária para o comportamento complexo, e sua assinatura é a multiplicidade de diferentes estados que o sistema pode alcançar.

## 2 NÃO LINEARIDADE

Estudos de algumas décadas atrás tinham conceitos estabelecidos: para um determinado sistema (fenômeno) sujeito a um conjunto de condições – dadas temperatura e pressão, para os sistemas físicos, ou dados o tamanho da população e a média de anos de escolaridade, no caso das sociedades humanas –, ligeiras mudanças nessas condições produziriam também pequenas (ou semelhantemente, sem importância) mudanças no comportamento final do sistema. Ao se estudar a superposição de efeitos sobre o sistema, o efeito final esperado de duas ou mais ações sobre o sistema seria a simples sobreposição de cada efeito, tendo em conta o efeito de cada ação separadamente (Nicolis, 1995).

As propriedades citadas são as leis de um mundo linear. Infelizmente sistemas lineares são, em geral, muito raros, apesar de algumas equações dinâmicas lineares serem importantes – por exemplo, a equação de Schrödinger, na física quântica. Muitos sistemas, tais como as sociedades humanas, são altamente não lineares. Isto significa basicamente que, neste tipo de sistema, transições bruscas podem ser observadas, isto é, o estado do sistema muda dramaticamente ao sofrer pequenas

perturbações. Por exemplo, o sistema pode entrar em colapso, extinguir-se ou prosperar. Em alguns casos, várias soluções estáveis possíveis podem surgir; ao mesmo tempo, há imprevisibilidade em ambos, tempo e espaço, imprevisibilidade esta, que, em sistemas determinísticos, é conhecida como caos clássico (Strogatz, 2001).

Outro tema às vezes relacionado com a termodinâmica é a escala. Um atributo importante de potenciação é sua invariância em relação à escala. Isto é, dada uma função matemática, ao se dimensionar o argumento por um fator constante, provocam-se apenas alterações em escala proporcional à da própria função. É fácil ver que, quando logaritmos são tomados sobre a função, é isto que produz uma relação linear. A importância dessa relação simples é *a equivalência das leis de potência com um expoente de escala particular*, e tal equivalência pode, por vezes, ter origem nos processos dinâmicos que geram este comportamento em um nível microscópico. O expoente crítico, como é normalmente referido na física, é associado com transições de fase em sistemas termodinâmicos. Na ciência de sistemas complexos, é muito comum encontrar essa característica particular de expoentes específicos para dados fenômenos. Leis de escala aparecem em: sistemas biológicos – por exemplo, a relação entre a taxa metabólica e o tamanho de um organismo (West, Brown e Enquist, 1997); fractais; interações sociais; cidades – um exemplo pode ser o comprimento total de estrada como uma função do tamanho da população.

Por todas estas razões a não linearidade é uma pedra angular em estudos de complexidade. A variedade de soluções, muitas vezes imprevisíveis, é referida comumente como comportamento emergente (Bedau e Humphreys, 2008), algo que é comum em sistemas sociais e biológicos.

### 3 TEORIA DA BIFURCAÇÃO

Como mencionei antes, o comportamento não linear é o tipo mais comum de dinâmica observada nos sistemas sociais. Nestes sistemas, as soluções estáveis finais – pontos de equilíbrio ou estados finais – podem se alterar drasticamente quando alguns dos parâmetros – ou seja, os parâmetros de controle – que conduzem a evolução do sistema, nomeadamente, atingem um determinado valor. Para entender esta propriedade, comum a quase todos os sistemas não lineares, vamos estudar algumas bifurcações clássicas (Hale e Kocak, 1996; Guckenheimer e Holmes, 1983). Uma aplicação recente e interessante para a ciência social, em particular para a geografia econômica, pode ser encontrada em Ikeda e Murota (2013). Como o leitor pode antecipar, bifurcação é a mudança estrutural na solução de uma equação diferencial. Menciono ainda, nesta seção, algumas bifurcações locais. Nestes casos, a dinâmica do sistema completo é reduzida para o que acontece na vizinhança do ponto de bifurcação. A forma reduzida da equação de movimento é chamada forma normal.

### 3.1 Bifurcação sela-nó

Esta bifurcação aparece quando dois pontos de equilíbrio colidem e imediatamente depois desaparecem. O nome refere-se, como em todas as bifurcações típicas, às características da bifurcação. Como já mencionado, nas bifurcações sela-nó há dois pontos fixos que colidem, um é estável (o nó) e o outro é instável (a sela). A equação na forma normal que define uma bifurcação sela-nó é:

$$\dot{x} = -\alpha + x^2. \quad (1)$$

Tem-se então que: para  $\alpha > 0$  há dois pontos de equilíbrio, um equilíbrio estável, em  $x = -\sqrt{\alpha}$ , e um equilíbrio instável, em  $x = \sqrt{\alpha}$ . Em  $\alpha = 0$  ocorre o colapso das duas soluções estacionárias no ponto fixo (sela-nó) em  $x = 0$ ; finalmente, quando  $\alpha < 0$ , não existem pontos fixos para o sistema.

### 3.2 Bifurcação transcritica

Esta é uma bifurcação típica que ocorre quando duas soluções estacionárias alteram suas propriedades fixas em um valor crítico para o parâmetro de controle  $\alpha$ . Para entender o que acontece, vamos escrever a forma normal desta bifurcação:

$$x = x(\alpha - x). \quad (2)$$

Os pontos estacionários são  $x = 0$  e  $x = \alpha$ . É fácil ver que haverá uma alteração do comportamento estável desses pontos estacionários em função do sinal de  $\alpha$ . Se  $\alpha$  for menor que zero, o ponto estável é  $x = 0$ , é instável quando  $x = \alpha$ . Quando  $\alpha$  é maior que zero, as propriedades desses pontos de estabilidade mudam, isto é,  $x = 0$  é instável e  $x = \alpha$  é estável. O ponto de bifurcação, neste caso, também é  $\alpha = 0$ .

### 3.3 Bifurcação *pitchfork*

O caso da bifurcação tipo *pitchfork* (em formato de forquilha) é muito interessante. A bifurcação pode estar associada a algumas propriedades de simetria do sistema envolvido. Vale a pena lembrar que, em sistemas físicos, para cada simetria matemática contínua, há uma quantidade conservada correspondente, o que é de fato uma propriedade muito importante. A equação da evolução desta bifurcação pode ser escrita como:

$$x = \alpha x \pm x^3. \quad (3)$$

Quando o sinal no termo cúbico é negativo, a bifurcação é chamada de supercrítica. Nesses casos, para  $\alpha$  inferior a zero, há apenas um equilíbrio, em  $x = 0$ ; para  $\alpha$  maior que zero, há três soluções, uma instável, em  $x = 0$ , e duas soluções estáveis, em  $x = \pm \sqrt{\alpha}$ . O caso subcrítico ocorre quando o sinal do termo cúbico, na equação de evolução, é positivo. Há uma inversão das soluções estáveis e das suas propriedades de estabilidade. Para o caso subcrítico  $\alpha$  menor que zero, há três soluções estacionárias,  $x = 0$ , estável, e  $x = \pm \sqrt{\alpha}$ , instável. Para  $\alpha$  maior

que zero, a única solução (instável) é  $x = 0$ . É evidente que o ponto de bifurcação acontece em  $\alpha = 0$ .

## 4 FORMAÇÃO DE PADRÕES

Em linha com o assunto discutido, existe um fenômeno muito importante e que foi matematicamente formulado pela primeira vez no âmbito da morfogênese. É também um tipo de bifurcação que é conhecida como a instabilidade Turing.

Padrões aparecem em toda a natureza. Padrões espaço-temporais podem ser observados em reações químicas ou em sistemas vivos, tais como em culturas de bactérias (Murray, 2007). É muito importante notar que, como em quase todos os estudos quantitativos, o tratamento usual de formação de padrões é feito por meio do rastreamento de interações macroscópicas (Hoyle, 2006; Cross e Greenside, 2009). Em geral, o comprimento ou a escala do padrão observado é registrado em ordens de grandeza do tamanho da interação microscópica que o gera.<sup>4</sup> Depois de discutir a formulação matemática típica do mecanismo de Turing, vamos dar um exemplo importante da aplicação desse modelo em ciências sociais.

### 4.1 O mecanismo de Turing

A palavra difusão vem do latim *diffudere*, que significa espalhar-se. Até o trabalho de Turing, em 1952, difusão era geralmente considerada como um mecanismo que homogeneíza o sistema em que está atuando. A contribuição do trabalho de Turing foi demonstrar como um mecanismo de difusão pode concentrar elementos de um sistema em uma região específica, criando padrões espaço-temporais.

Vamos escrever uma equação clássica de reação-difusão para a instabilidade de Turing:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f(u, v) + Du \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = g(u, v) + Dv \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (5)$$

Nesta seção busco manter a discussão simples e oriento os leitores curiosos para uma discussão mais formal e completa sobre o assunto nas referências a seguir. Nas equações (4) e (5), há as partes de reação, as funções  $f$  e  $g$ , e os termos de difusão, caracterizados por dois parâmetros de difusão  $D_u$  e  $D_v$ . Uma condição necessária para a instabilidade de Turing é haver uma diferença nestes coeficientes de difusão – em particular, a difusão do chamado inibidor,  $v$ , deve ser maior que o ativador,  $u$ . Com as condições adequadas, há um ponto de bifurcação onde a solução desta equação muda de uma solução uniforme para uma com padrões.

---

4. Voltarei a esse ponto mais tarde, explicando modelos baseados em agentes.

Em um trabalho recente, Lim, Metzler e Bar-Yam (2007) estudaram a formação de padrões globais e de violência cultural e étnica. Usando um modelo mais sofisticado que o discutido anteriormente, esses autores preveem zonas de conflito na Europa Oriental com uma precisão surpreendente. Este tipo de estudo mostra o poder e a universalidade desses conceitos.

## 5 ANÁLISE DE REDES

Até agora nossa discussão se baseava em modelos contínuos. Redes são diferentes. Uma rede é um conjunto de nós – também chamados de vértices – que são conectados por arestas (Newman, Barabasi e Watts, 2006). A teoria das redes pode ser rastreada até o célebre problema das pontes de Konigsberg e sua solução por Euler em 1735. Este problema e sua solução têm sido tratados como o início formal da teoria dos grafos, uma teoria matemática que precedeu a análise de redes. É importante perceber que existem muitos casos em que abordagens contínuas, como o mecanismo de Turing – equações (4) e (5) – não são uma boa aproximação para o problema em questão, e apenas uma visão de redes irá descrever os fenômenos de forma precisa. Entre tais sistemas, podemos listar: redes sociais, com conexões entre indivíduos; redes de transportes nas cidades ou entre cidades, por exemplo, redes de avião; a World Wide Web; teias em cadeias alimentares; redes neurais; redes de colaboração (científicas, organizações ou comunidades de negócios) etc. Existem alguns conceitos relevantes para se compreender ao discutir redes. Alguns deles são (Costa *et al.*, 2007; Newman, 2010):

- grau: é o número de vértices conectados a um nó. Pode-se facilmente ver a importância desse indicador, mas alguns trabalhos recentes demonstraram que, no caso de muitos sistemas, este não é o conceito mais importante. Isto porque há nós que atuam com fraca conexão, mas servem de intermediários entre as partes de uma grande rede;
- direcional ou não direcional: se uma aresta é unidirecional, é chamada direcional, equivalente, por exemplo, há uma estrada de sentido único. Em contraste, se as arestas são válidas em ambos os sentidos, são chamadas não direcionais; e
- caminho geodésico: é o caminho mais curto, a menor rota, seguindo as arestas de ligação, entre dois nós. Esta quantidade é importante no tratamento de questões como a propagação de informações, a propagação de doenças infecciosas ou afins.

## 6 TEORIA DOS JOGOS

A teoria dos jogos, ou a teoria de dilemas sociais, se concentra em como um grupo de elementos interage por meio de tomada de decisão estratégica. Pode-se dizer que a história da teoria dos jogos pode ser rastreada ao início dos anos 1700. A versão moderna, ao que parece, surgiu após o trabalho de John von Neumann, em 1928 (Neumann e Morgenstern, 2007). Várias obras seguem os esforços de Von Neumann. Podemos citar o importante trabalho feito por Nash, em 1950, que introduziu a ideia do equilíbrio de Nash e a coerência entre as estratégias. Hoje em dia, esta teoria também é empregada em diferentes áreas, tais como: ciência política, biologia, economia (Kahneman e Tversky, 2000), ciência da computação etc. Um exemplo interessante de um ramo dessa disciplina é a teoria evolucionária, que se concentra na dinâmica de mudanças na estratégia. Nesse contexto, os jogos são chamados de jogos evolutivos.

No esquema clássico da teoria dos jogos, os jogadores têm escolhas de movimento – decisões que podem levar a diferentes premiações –, e o jogo pode ser em uma única rodada ou com jogadas repetidas. As regras ou as escolhas que os jogadores podem fazer normalmente são organizadas em árvores de decisão ou matrizes.

Vamos mostrar um exemplo muito simples para ver como a teoria funciona. Vou discutir um exemplo bem conhecido na teoria dos jogos: o dilema do prisioneiro. Dois jogadores são parceiros em um crime e depois de capturados, por suspeição, são confinados em células diferentes. A polícia oferece-lhes a oportunidade de confessar o crime. Podemos, então, representar os jogadores em uma matriz dois a dois com os diferentes *pay-offs* (consequências) das quatro opções de escolha possíveis (figura 1): *i*) o prisioneiro A permanece em silêncio e o prisioneiro B também fica em silêncio: cada um pega pena de um ano; *ii*) o prisioneiro A permanece em silêncio e o prisioneiro B confessa o crime de ambos: o prisioneiro A cumpre pena de três anos e o prisioneiro B é liberado; *iii*) o prisioneiro A confessa e o prisioneiro B fica em silêncio: o prisioneiro A é liberado e o prisioneiro B pega três anos de pena; e *iv*) ambos confessam: cada um pega dois anos de pena.

O melhor resultado possível para os dois prisioneiros é *não confessar*. Se apenas um confessa, ela/ele ganha benefícios, enquanto o outro perde. A alternativa é a confissão dos dois prisioneiros. O que seria, então, o resultado final mais provável nesse cenário? Como o leitor pode imaginar, a teoria dos jogos pode ser aplicada também em redes complexas, tendo em conta a topologia em que o indivíduo interage: a rede social. Há muitos tipos de jogos, podemos citar: jogos cooperativos e não cooperativos; jogos discretos e contínuos; simultâneos e sequenciais; jogos evolucionários; perfeitos ou com informação imperfeita; com muitos jogadores e jogos de população etc.

É importante perceber que em todas as situações, para o caso particular do comportamento racional, os jogadores – que podem ser pessoa, empresa etc. – devem antecipar o que fazer, considerando o que o outro agente racional faria (Camerer, 2003).

**FIGURA 1**  
**Matrix para o jogo o dilema do prisioneiro**

|                           | Prisioneiro A  |  |
|---------------------------|--|--|
| Prisioneiro B             | Permanecem<br>em silêncio  | Confessam  |
| Permanecem<br>em silêncio | Permanecem<br>em silêncio  | Confessam  |
| Permanecem<br>em silêncio | Prisioneiro A:<br>pega pena<br>de um ano<br><br>Prisioneiro B:<br>pega pena<br>de um ano | Prisioneiro A:<br>é liberado<br><br>Prisioneiro B:<br>pega pena de<br>três anos                |
| Confessam                 | Prisioneiro A:<br>pega pena de<br>três anos<br><br>Prisioneiro B:<br>é liberado          | Prisioneiro A:<br>pega pena<br>de dois anos<br><br>Prisioneiro B:<br>pega pena de<br>dois anos |

Elaboração do autor.

## 7 TEORIA DA INFORMAÇÃO

Claude Shannon desenvolveu uma teoria para encontrar os limites de processamento de sinal; sua obra *A teoria matemática da comunicação* foi publicada no periódico *Bell System Technical Journal*, em julho/outubro de 1948. Este é o marco para o que hoje é chamado de teoria da informação (Shannon, 1948). Desde este trabalho de Shannon, a teoria da informação tem sido aplicada com sucesso em diferentes campos das ciências (Pierce, 1980; Cover e Thomas, 2006): genética molecular, criptografia, inferência estatística, física, biologia e em geral para análise de dados. Em sistemas complexos, a teoria da informação tem sido utilizada em conexão com uma teoria que foi desenvolvida por ET Jaynes. Em uma série de artigos, por volta de 1952, ele discutiu a correspondência entre a mecânica estatística e a teoria da informação (Rosenkrantz, 1989).

Esse passo de gigante nos diz que a mecânica estatística – e todas as aplicações/previsões derivadas desse campo do conhecimento foram muito bem-sucedidas – deve ser vista como um caso particular de uma teoria mais geral: a teoria da informação. O trabalho de Jaynes enfatizou um princípio geral: o Princípio de Máxima Entropia (ou MaxEnt). Hoje em dia, MaxEnt é usada para entender várias distribuições que aparecem na biologia e ecologia – a partir de abordagens

de sistema complexo – por exemplo: distribuição de tamanho, distribuição gama, distribuição de energia etc. Em um esforço muito recente, Jaynes aplicou a teoria MaxEnt para compreender os sistemas sociais e urbanos, mas este trabalho ainda é inédito e se encontra em andamento.

## 8 SUPERESTATÍSTICA

Tenho enfatizado a importância da contribuição da mecânica estatística e da teoria MaxEnt para o estudo de sistemas complexos e fenômenos naturais em geral. Em trabalho recente, Beck e Cohen (2003) e Cohen (2004) introduziram uma generalização natural da mecânica estatística. A ideia é muito simples, mas também muito poderosa. Ao lidar com sistemas de equilíbrios não complexos com estados estacionários de longo prazo, sujeitos a flutuações espaço-temporais intensivas, a distribuição de probabilidade, que tem características muito peculiares, pode ser obtida por meio do cálculo da média durante estas flutuações. Um exemplo dessas características pode indicar a presença de cauda longa.

Para ser mais explícito, suponha-se que tenhamos um sistema composto por vários subsistemas. Cada subsistema tem partículas que se difundem por meio de diferentes parâmetros de difusão. Em consequência, cada subsistema será caracterizado por uma distribuição de Gauss caracterizada pelo parâmetro de difusão que possui. Mas se considerarmos o sistema completo (a agregação de todos os subsistemas), podemos calcular uma média com todas essas distribuições de Gauss. Para entender como isto pode ser feito, vamos dar uma olhada em um exemplo simples.

Imaginemos que temos uma partícula browniana descrita pela seguinte equação diferencial estocástica:

$$\frac{dr}{dt} = \sigma \xi(t), \quad (6)$$

na qual  $\xi(t)$  é um ruído branco gaussiano de variância igual à unidade, ou seja:

$$\langle \xi(t) \rangle = 0, \quad (7)$$

$$\langle \xi(t) \xi(t') \rangle = \delta(t - t'), \quad (8)$$

em que  $t$  é o tempo e  $\sigma$  é a intensidade do ruído. De acordo com o cálculo de Ito, essa dinâmica estocástica leva imediatamente a uma equação de probabilidade evolucionária, conhecida como equação de Fokker-Planck, qual seja:

$$\frac{\partial P(r,t)}{\partial t} = \frac{\sigma^2}{2} \frac{\partial^2 P(r,t)}{\partial r^2}. \quad (9)$$

Essa equação tem uma solução analítica, que é a mesma que *L. Bachelier* encontrou para preços não logarítmicos em 1900 (*Bachelier, Davis e Etheridge, 2006*), e que cinco anos depois dele *Einstein* sugeriu como distribuição para partículas brownianas: a distribuição normal (*Einstein, 1905*):

O problema, que corresponde à difusão a partir de um único ponto (ignorando as interações entre as partículas de difusão), está agora completamente definido matematicamente e sua solução é:

$$P(r,t) = \sqrt{\frac{1}{2\pi\sigma^2 t}} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2 t}\right), \quad (10)$$

portanto, a distribuição dos deslocamentos resultantes em um determinado tempo  $t$  é o mesmo que o erro aleatório (*Einstein, 1905*, tradução nossa).

Agora, imaginemos a quantidade  $\beta=1/S$ , oscilando de acordo com uma distribuição Gama, um cálculo imediato indica a seguinte distribuição final para o sistema

$$P(r,\tau) = \frac{\Gamma[(n+1)/2]}{\Gamma[n/2]} \sqrt{\frac{\beta_0}{2\pi\tau}} \left(1 + \frac{\beta_0 r^2}{n\tau}\right)^{-(n+1)/2}, \quad (11)$$

que é uma variante da distribuição  $t$  de Student. A forma não Gausiana da distribuição resulta de coleta de  $r$  períodos de tempo, separados por longos intervalos, em que  $\beta$  é diferente.

É fácil perceber o poder desse conceito e a generalização que pode ser feita seguindo esses métodos (*Hanel, Thurner e Gell-Mann, 2011*). Ao se considerar um composto de elementos, é necessário primeiro verificar se sua interação pode ser decomposta em subsistemas. Não existe um método formal para fazer isto, a única ferramenta para saber qual é a subdivisão adequada do sistema é o conhecimento sobre o problema em si. Por exemplo, em um artigo recente, os dados de séries temporais financeiras foram divididos em dias, ou seja, um dia de negociação foi a divisão temporal para o sistema completo, que continha muitos anos de negociação (*Gerig, Vicente e Fuentes, 2009*). Se este tipo de subdivisão pode ser feito, estes subsistemas seguirão a mesma dinâmica subjacente – como a partícula browniana no exemplo anterior –, e a única diferença será alguma flutuação em uma variável intensiva. Em seguida, o comportamento do sistema agregado será simplesmente uma média dos subsistemas.

## 9 MEDIDAS DE COMPLEXIDADE

Muito tem sido escrito tentando definir (ou medir) a complexidade de um sistema. A importância disto pode ser compreendida quando se pensa que sistemas com o mesmo nível de complexidade (definida, de alguma forma) poderiam partilhar propriedades universais.

A história do estudo de regularidades probabilísticas em sistemas físicos pode ser rastreada até 1857 com a própria ideia de entropia proposta por Rudolf Clausius. Claude Shannon derivou a mesma forma funcional – utilizada quase um século antes – ao introduzir o conceito de entropia da informação. Embora a ideia intuitiva de complexidade e informações em sistemas físicos apresente algumas semelhanças, foi necessário introduzir diversas medidas a fim de compreender vários tipos de complexidades e quantificar as propriedades do sistema intimamente relacionadas com tais complexidades e características (Lloyd, 2001): complexidade de Kolmogorov, profundidade lógica, complexidade eficaz etc.

Algumas dessas medidas têm sido propostas para estudar diferentes sistemas – por exemplo, cadeias de símbolos, dados que o sistema produz etc. A partir de todas estas medidas, creio que a única que capta de forma mais precisa a noção de complexidade de um determinado sistema é a *complexidade eficaz*, introduzida por Murray Gell-Mann e Seth Lloyd. Em suma, a complexidade eficaz de uma entidade corresponde “(a)o comprimento de uma descrição altamente comprimidoade suas regularidades”(Gell-Mann, 1995; Gell-Mann e Lloyd, 1996). A ideia é simples, elegante e profunda: se dividirmos o conteúdo da informação algorítmica de alguma sequência de dados em duas componentes – uma com suas regularidades (relacionada com a complexidade de Kolmogorov) e outra com suas características aleatórias (relacionada a sua entropia) –, a complexidade eficaz dos dados será apenas o conteúdo de informação algorítmica de suas regularidades.

Um leitor mais atento vai notar um aspecto muito importante da teoria desenvolvida por Gell-Mann e Lloyd, qual seja, que a complexidade eficaz de uma entidade é dependente do contexto (Gell-Mann, 1994). Vamos dar um exemplo simples para motivar a análise deste aspecto da teoria. Imaginemos que estamos estudando um sistema particular, um organismo vivo, então, qual é a sua complexidade? Não há dúvida de que temos de ser mais específicos ao mencionarmos exatamente quais características ou funcionalidades queremos estudar usando este conceito, e de que conjunto de dados dispomos a fim de fazê-lo. Não só isto, mas, para ser mais preciso, temos de ter uma teoria que explique como os dados se organizam.

## 10 AUTÔMATOS CELULARES

Por volta de 1950, Stanislav Ulam e John Von Neumann criaram um modelo para entender o comportamento de unidades discretas, como uma função do comportamento de seus vizinhos. Era o início de modelos de autômatos celulares (CAs). O CA é um modelo discreto baseado em células, cada uma com um conjunto de estados: ligado-desligado ou similares. As posições das células correspondem geralmente a uma grade regular – mas novamente eles podem ser organizados em redes complexas, como mencionado anteriormente. Então, dada uma condição inicial para os autômatos celulares, o próximo estado será uma atualização de cada grade de acordo com as regras locais estabelecidas (Toffoli e Margolus, 1987; Schif, 2008).

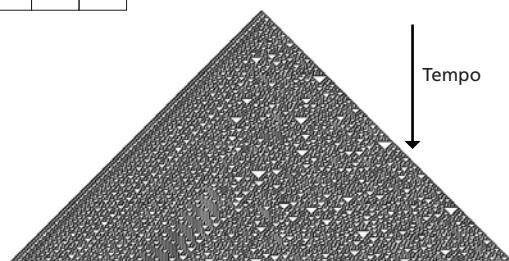
Para explicar as ideias essenciais, vamos examinar um exemplo simples: um autômato celular dimensional. Em um autômato celular dimensional, cada célula pode estar em dois estados: zero e um (ou vivo e morto etc.). Dado o estado de uma célula no tempo  $t$ , a sua configuração no momento  $t+1$  dependerá: de seu próprio estado no tempo  $t$  e do estado dos dois vizinhos também no tempo  $t$ . Fica claro, então, que os valores possíveis para dada vizinhança (uma célula de cada lado) é dois elevado à potência de três, ou seja,  $2^3 = 8$ , e, em seguida, a opção zero ou um, haverá um total de  $2^8 = 256$  regras para um autômato celular dimensional. Na figura 2, mostramos a chamada regra 30. À esquerda podemos ver a regra de evolução, à direita temos a evolução de uma condição inicial com apenas a célula central com estado 1, todo o resto das células estão em estado zero.

FIGURA 2

**Uma visão explícita da regra número 30 de um autômato celular dimensional**

|                       |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Estado no tempo $t$   | 111 | 110 | 101 | 100 | 011 | 010 | 001 | 000 |
| Estado no tempo $t+1$ | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   |

Condição inicial = 1



Elaboração do autor.

Obs.: Esta figura mostra a evolução da regra (à esquerda) e o resultado, para uma condição inicial, que tem apenas uma célula com o estado 1, no centro (à direita).

Dependendo do comportamento da evolução das células no tempo, S. Wolfram, em seu livro *A new kind of science*, definiu quatro categorias em que autômatos celulares podem ser classificados. Na classe 1, quase todos os padrões iniciais evoluem rapidamente para um estado homogêneo estável, qualquer aleatoriedade no padrão inicial desaparece. Na classe 2, quase todos os padrões iniciais evoluem rapidamente para estruturas estáveis ou oscilantes, algumas das aleatoriedades no padrão inicial podem ser filtrados, mas alguns permanecem. Alterações locais para o padrão inicial tendem a permanecer localmente. Na classe 3, quase todos os padrões iniciais evoluem de uma forma pseudoaleatória ou caótica. Qualquer estrutura estável que aparece é rapidamente destruída pelo ruído do ambiente. Alterações locais para o padrão inicial tendem a se espalhar indefinidamente. Finalmente, para quase todos os casos da classe 4, padrões iniciais evoluem para estruturas que interagem de forma complexa e interessante, com a formação de estruturas locais que são capazes de sobreviver durante longos períodos de tempo.

Autômatos celulares podem ser aplicados em diferentes áreas, desde em processadores de computador, usados para compreender a formação de padrões em biologia, epidemiologia, até em modelos para simular a dinâmica urbana, por meio de ações locais de autômatos celulares (Batty, 2007) etc.

## 11 MODELAGEM BASEADA EM AGENTES

Com a chegada de novas tecnologias e o aumento do poder computacional, é possível utilizar modelos computacionais para estudar a evolução de muitos agentes, em diferentes escalas e cenários. A modelagem baseada em agentes (ABMs) pode ser vista como a evolução dos modelos de autômatos celulares. Esta pode ser considerada como uma abordagem de baixo para cima, devido ao fato de que as propriedades observadas no sistema como um todo – isto é, as propriedades emergentes – são o resultado das interações entre os componentes microscópicos do sistema. Tal ponto de vista é diferente de outros discutidos neste capítulo, como o mecanismo de Turing, no qual a difusão de partículas é modelada por meio de um operador espacial que atua em escala macroscópica.

Não há receita específica para aplicar a modelagem baseada em agentes, uma vez que podem ser utilizados muitos sistemas com cenários diferentes. Normalmente, eles podem ser estudados em vários níveis, como indivíduos (Axelrod, 1997), populações (Gustafsson e Sternad, 2010), organizações etc.; modelos para a tomada de decisão;<sup>5</sup> topologia de interações, treliças regulares ou irregulares, redes complexas; ambiente em que a interação acontece e regras de aprendizagem (ou processos adaptativos).

---

5. Podemos notar que a teoria dos jogos também pode ser aplicada aqui.

Argumenta-se que os principais benefícios da modelagem baseada em agentes são (Bonabeau, 2002):

- ele captura fenômenos emergentes; isto ocorre porque, em princípio, fenômenos emergentes vêm de interações microscópicas (ou entidades individuais), e quando se utilizam modelos baseados em agentes, qualquer característica macroscópica será, por definição, resultado de regras microscópicas que agem em um grande número de agentes. Estes fenômenos emergentes podem aparecer quando: o comportamento individual é não linear, os agentes são heterogêneos e podem se conectar em formato de rede, os modelos baseados em agentes podem amplificar flutuações – algo que é difícil de conseguir agregando-se equações diferenciais – e quando o comportamento individual exibe *path dependence* (dependência da trajetória) e/ou memória (como no caso de um engarrafamento); e
- em muitos casos, ABMs fornecem a maneira mais natural para descrever a dinâmica e as regras do sistema, com foco nas regras individuais dos agentes.

Algumas das áreas onde estão sendo aplicados ABMs são: difusão da inovação e adoção, risco operacional, desenho de organizações, mercado de ações, fluxos – como de trânsito ou de evacuação (figura 3).

**FIGURA 3**  
**Simulação baseada em agentes em uma escada de incêndio – saída**



Elaboração do autor.

Obs.: As pessoas estão representadas por círculos abertos. À direita, o ambiente tem uma coluna representada por um círculo preto.

A simulação mostra que o fluxo de pessoas que saem da sala com uma coluna na saída é mais eficiente; isto significa que o fluxo que é gerado na presença da coluna permite que mais pessoas possam sair por unidade de tempo (Helbing, Farkas e Vicsek, 2000).

## 12 MINERAÇÃO DE DADOS

Existem muitos sistemas em que a dinâmica subjacente é desconhecida. Estes são, de alguma forma, sistemas com formas muito diferentes do tipo clássico de sistemas dinâmicos, nos quais os modelos de primeiros-princípios podem ser propostos para descrevê-los. Nesses sistemas, a equação de Newton de movimento, para sistemas

clássicos; as equações de Maxwell, para sistemas eletromagnéticos; ou equações relativistas ou quânticas, podem ser o ponto de partida para construir modelos que descrevem o fenômeno usando uma abordagem de baixo para cima. Para outros sistemas, este tipo de redução não é possível devido: *i*) à complexidade do problema, que, por vezes, faz com que seja quase impossível criar um modelo matemático; e *ii*) à falta de informação, pois algumas vezes os dados, ou os resultados, do sistema estão disponíveis apenas em um nível muito alto e macroscópico.

Hoje em dia, há abundância de dados disponíveis: de instituições científicas, de governos, vários tipos de empresas, da rede mundial de computadores etc. Todos estes dados disponíveis podem ser armazenados e estudados, mas, como o leitor pode adivinhar, para alguns deles a abordagem do primeiro-princípio está longe de ser alcançada.

O termo *mineração de dados* não se refere à extração e coleta de uma grande quantidade de dados, como se pode pensar à primeira vista. A mineração de dados refere-se à extração e ao reconhecimento de padrões em grandes conjuntos de dados. Nesse sentido, a mineração de dados tem dois objetivos primários (Kantardzic, 2003): previsão e descrição. Para alcançá-los, a mineração de dados usa a seguinte tarefa: classificação, regressão, agrupamento, sumarização, modelagem e detecção de desvio.

Mesmo que o reconhecimento de padrões e, por vezes, a detecção de sinais de causalidade em algumas interações tenha sido um tema de pesquisa que usa métodos antigos – por exemplo, análise de correlação e análise de regressão –, a mineração de dados explora uma enorme quantidade de dados disponíveis, graças ao incremento de potência e de armazenamento dos computadores. A mineração de dados identifica (padrões) propriedades desconhecidas presentes nos dados, usando (entre outros) inteligência artificial e técnicas de aprendizado de máquina (Hastie, Tibshirani e Friedman, 2009). Devido à variedade de dados disponíveis hoje em dia, graças à internet, às comunicações celulares etc., a mineração de dados está se tornando uma poderosa ferramenta para estudar os padrões sociais em sistemas urbanos. As aplicações mais comuns deste ramo da ciência da computação podem ser vistas em: astronomia, genética, comportamento social, transportes, sistemas financeiros, telecomunicações etc.

### 13 CONCLUSÕES

Como podemos ver cotidianamente, o mundo ao redor de nós e a sociedade em que vivemos estão cheios de redes muito complexas de relações em muitas escalas. Existe uma interação entre o emaranhado de pessoas, empresas, cidades, sistemas ecológicos etc., e, a fim de entendê-los, e fazer boas previsões, especificamente para a política pública, é difícil imaginar como resolver um problema em completo

isolamento. Para fazer isso, é necessário ter uma boa representação do sistema, tendo em conta os seus componentes e as interações entre eles.

Os métodos apresentados neste capítulo são alguns dos mais utilizados na ciência da complexidade, o que, ao mesmo tempo, é provavelmente a melhor maneira científico-metodológica para lidar com estes tipos de problemas em matérias de políticas públicas.

É muito importante compreender que nenhum dos métodos incluídos neste capítulo define a ciência da complexidade, muito menos o conjunto deles. Além dos conceitos, das ferramentas e dos métodos apresentados, a ciência da complexidade oferece uma nova maneira de pensar sobre a elaboração de políticas públicas. Este capítulo chama a atenção para ligações dinâmicas, evolução e pensamento interdisciplinar.

## REFERÊNCIAS

- AXELROD, R. **The complexity of cooperation:** agent-based models of competition and collaboration. Princeton: Princeton University Press, 1997.
- BACHELIER, L.; DAVIS, M.; ETHERIDGE, A. **Louis Bachelier's theory of speculation:** the origins of modern finance. Translated by Mark Davis and Alisson Etheridge. Princeton: Princeton University Press, 2006.
- BATTY, M. **Cities and complexity:** understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals. London: The MIT Press, 2007.
- BECK, C.; COHEN, E. G. D. Physica A: statistical mechanics and its applications, **Superstatistics**, v. 322, p. 267-275, 2003.
- BEDAU, M. A.; HUMPHREYS, P. (Eds.). **Emergence:** contemporary readings in philosophy and science. London: The MIT Press, 2008.
- BOCCARA, N. **Modeling complex systems.** Germany: Springer, 2004.
- BONABEAU, E. **Agent-based modeling:** methods and techniques for simulating human systems. Washington: National Academy of Sciences, May 2002.
- CAMERER, C. F. **Behavioral game theory:** experiments in strategic interaction. Princeton: Princeton University Press, 2003. (Roundtable Series in Behavioral Economics).
- COHEN, E. G. D. Physica D. **Superstatistics**, v. 139, n. 1, p. 35-52, 2004.
- COSTA, L. F. *et al.* Characterization of complex networks: a survey of measurements. **Advances in Physics**, v. 56, n. 1, p. 167-242, 2007.

- COVER, T. M.; THOMAS, J. A. **Elements of information theory**. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2006. (Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing).
- CROSS, M.; GREENSIDE, H. **Pattern formation and dynamics in non-equilibrium systems**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- EINSTEIN, A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. **Annalen der Physik**, v. 322, n. 8, p. 549-560, 1905.
- ÉRDI, P. **Complexity explained**. Germany: Springer, 2008.
- GELL-MANN, M. **The quark and the jaguar**: adventures in the simple and the complex. 3<sup>rd</sup> ed. New York: St. Martin's Griffin, 1994.
- \_\_\_\_\_. What is complexity? **Complexity**, v. 1, n. 1, p. 16-19, 1995.
- GELL-MANN, M.; LLOYD, S. Information measures, effective complexity, and total information. **Complexity**, v. 2, n. 1, p. 44-52, 1996.
- GERIG, A.; VICENTE, J.; FUENTES, M. A. Model for non-Gaussian intraday stock returns, **Physical Review**, E 80, 065102(R), 2009.
- GUCKENHEIMER, J.; HOLMES, P. **Nonlinear oscillations, dynamical systems and bifurcations of vector fields**. First ed. Germany: Springer, 1983. (Applied Mathematical Sciences).
- GUSTAFSSON, L.; STERNAD, M. Consistent micro, macro, and state-based population modelling. **Mathematical Biosciences**, v. 225, p. 94-107, 2010.
- HALE, J. K.; KOCAK, H. **Dynamics and bifurcations**. Germany: Springer, 1996. (Texts in Applied Mathematics).
- HANEL, R.; THURNER, S.; GELL-MANN, M. Generalized entropies and the transformation group of super-statistics. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 16, p. 6390-6394, 2011.
- HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The elements of statistical learning**: data mining, inference, and prediction. Germany: Springer, 2009.
- HELBING, D.; FARKAS, I.; VICSEK, T. Letters to nature. **Nature**, London, v. 407, p. 487-490, 2000.
- HOYLE, R. **Pattern formation**: an introduction to methods. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. (Cambridge Texts in Applied Mathematics).
- IKEDA, K.; MUROTA, K. **Bifurcation theory for hexagonal agglomeration in economic geography**. Germany: Springer, 2013.

- KAHNEMAN, D.; TVERSKY, A. (Eds.). **Choices, values, and frames**. First ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- KANTARDZIC, M. **Data mining**: concepts, models, methods, and algorithms. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- LIM, M.; METZLER, R.; BAR-YAM, Y. Global pattern formation and ethnic/cultural violence, **Science**, v. 317, n. 5844, p. 1540-1544, 2007.
- LLOYD, S. Measures of complexity: a nonexhaustive list, **IEEE Control Systems Magazine**, v. 21, n. 4, p. 7-8, 2001.
- MILLER, J. H.; PAGE, S. E. **Complex adaptive systems**: an introduction to computational models of social life. New Jersey: Princeton Studies in Complexity, 2007.
- MITCHELL, M. **Complexity a guided tour**. Oxford: Oxford University Press, 2009.
- MURRAY, J. D. **Mathematical biology**: an introduction. Third ed. Germany: Springer, 2007. (Interdisciplinary Applied Mathematics).
- NEUMANN, J. V.; MORGENSTERN, O. **Theory of games and economic behavior**. Princeton: Princeton Classic Editions, 2007. (60th Anniversary Commemorative Edition).
- NEWMAN, M. **Networks**: an introduction. First ed. Oxford: Oxford University Press, 2010.
- NEWMAN, M.; BARABASI, A.; WATTS, D. J. **The structure and dynamics of networks**. Princeton: Princeton University Press, 2006.
- NICOLIS, G. **Introduction to nonlinear science**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- NICOLIS, G.; NICOLIS, C. **Foundations of complex systems**: nonlinear dynamics, statistical physics, information and prediction. Singapore: World Scientific, 2007.
- PIERCE, J. R. **An introduction to information theory**: symbols, signals and noise. Mineola: Dover Publications, Nov. 1980. (Dover Books on Mathematics).
- ROSENKRANTZ, R. D. (Ed.). **E. T. Jaynes**: papers on probability, statistics and statistical physics. Germany: Springer, 1989.
- SCHIF, J. L. **Cellular automata**: a discrete view of the world. First ed. New Jersey: Wiley-Interscience, 2008.
- SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **Bell System Technical Journal**, v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948.

STROGATZ, S. H. **Nonlinear dynamics and chaos**: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering. First ed. Boulder: Westview Press, 2001. (Studies in Nonlinearity).

TOFFOLI, T.; MARGOLUS, N. **Cellular automata machines**: a new environment for modeling. London: The MIT Press, 1987. (Scientific Computation. Series: Scientific and Engineering Computation).

WEST, G. B.; BROWN, J. H.; ENQUIST, B. J. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. **Science**, v. 276, n. 5309, p. 122-126, 1997.



## CAPÍTULO 4

# MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA POLÍTICAS PÚBLICAS<sup>1</sup>

James E. Gentile<sup>2</sup>

Chris Glazner<sup>3</sup>

Matthew Koehler<sup>4</sup>

## 1 APLICAÇÕES DE MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE POLÍTICAS PÚBLICAS

A análise de políticas públicas enfrenta os desafios de identificar e implementar uma mudança desejada em sistemas sociais e governamentais. De acordo com a definição de Weimer e Vining (1996), é a “comparação e avaliação sistemática de alternativas disponíveis para os gestores públicos para a solução de problemas sociais”. Frequentemente nos voltamos à análise de políticas públicas para nos ajudar a compreender qual das opções disponíveis levam aos resultados mais “desejados”. Para poder comparar políticas ou resultados, no entanto, precisamos entender como uma ação gera uma mudança e ser capazes de chegar a um acordo sobre o que é desejado.

Dada a própria complexidade do menor dos sistemas sociais, essa análise não é trivial. Sistemas sociais compreendem indivíduos autônomos que não se comportam de forma perfeitamente racional e que têm diferentes modelos mentais explicativos de como a sociedade funciona. Sistemas sociais não se comportam de formas determinísticas que se prestem a uma simples análise de planilha ou a uma formulação matemática fechada no nível causal. O comportamento de sistemas sociais não pode ser perfeitamente construído, como um relojoeiro fabricaria relógios para “manter” o tempo. Perante esses desafios, como um analista político pode comparar opções de políticas com uma relação de causa e efeito pouco clara?

A relação entre causa e efeito pode ser compreendida por modelos. Na sua forma mais básica, um modelo pode ser simplesmente um conceito mental; a descrição de uma crença de como um sistema responderá a uma mudança. Um modelo mental pode ser compartilhado em um simples guardanapo ou por meio

1. Traduzido por Patrícia Alessandra Morita Sakowski.

2. Da Mitre Corporation. *E-mail:* jegentile@gmail.com.

3. Da Mitre Corporation. *E-mail:* cglazner@mitre.org.

4. Da Mitre Corporation. *E-mail:* mkoehler@mitre.org.

de uma apresentação de *slides* elaborada, mas não tem a capacidade de fornecer comparações defensáveis de quão efetivamente determinadas políticas levarão aos resultados desejados. Modelos quantitativos, de simples planilhas até representações matemáticas mais avançadas, como as usadas na economia clássica, geralmente apresentam suposições rígidas sobre comportamento, como exemplificadas pelo modelo do agente perfeitamente racional frequentemente utilizado na economia clássica. Apesar de sabermos que modelos quantitativos determinísticos não são válidos (indivíduos não são perfeitamente racionais, não possuem informação perfeita, nem são homogêneos), eles têm servido de base para grande parte das análises de políticas públicas do nosso tempo. Tais modelos assumem implicitamente que um sistema pode ser conhecido e controlado.

Políticas públicas operam em um ambiente altamente complexo – além do que pode ser controlado ou observado de forma determinística. Na formulação de políticas públicas, devemos considerar mais adiante do que de fato podemos controlar e examinar atentamente o que podemos influenciar. Temos de ser capazes de capturar explicitamente as hipóteses causais subjacentes das propostas de política, de modo que possamos experimentar e fornecer aos *stakeholders* uma forma de compartilhar e testar suas próprias hipóteses e ideias com outros de maneira analiticamente defensável.

A modelagem de simulação tem o potencial de fornecer essa possibilidade. Alguns dos primeiros modelos de simulação que capturavam as complexas relações em políticas públicas foram criados utilizando a metodologia de dinâmica de sistemas, desenvolvida por Jay Forrester no MIT nos anos 1950 e 1960. A dinâmica de sistemas modela os sistemas por meio de equações diferenciais, emparelhados com uma técnica de diagramação de fácil compreensão (diagramação de *loop causal*), que viabiliza a participação de especialistas no assunto no processo de modelagem, em vez de relegá-lo apenas a matemáticos ou cientistas da computação. A abordagem é particularmente adequada para a modelagem de políticas, na medida em que visualiza relações causais e dá ao formulador de política acesso explícito a “controles”, tais como financiamento para um programa ou taxa de produção. Esse controle cria uma ligação clara entre a política e o comportamento dos resultados do modelo. Os modelos são simulados utilizando computadores, e métricas críticas são representadas graficamente ao longo do tempo, em contraste com os cálculos geralmente estáticos de custo-benefício muitas vezes utilizados na análise de políticas. Os modelos rodam rapidamente, incentivando os formuladores de política a construir uma compreensão intuitiva de causa e efeito via experimentação.

Forrester interessou-se muito por política urbana após discussões com o prefeito de Boston, John Collins. Ele escreveu o livro *Urban dynamics* em 1969 (Forrester, 1969), em que examinou o impacto a longo prazo das políticas de habitação em áreas urbanas, decorrente da modelagem de política feita para Boston.

Seu modelo forneceu aos formuladores de política as ferramentas para compartilhar modelos mentais e descobrir efeitos contraintuitivos que não haviam sido tratados popularmente. O modelo pediu críticas, e forneceu aos analistas políticos uma estrutura para comparações quantificadas.

Alunos de Forrester, liderados por Donella Meadows, criaram um dos modelos de política mais controversos já construídos, o World 3, o qual foi documentado no livro *The limits to growth (limites ao crescimento)*, em 1974 (Meadows *et al.*, 1974). Esse modelo examinou a relação entre o crescimento da população e nosso planeta e previu consequências terríveis, dadas as atuais políticas. O modelo foi recebido com críticas veementes, decorrentes tanto dos dados disponíveis quanto das hipóteses assumidas sobre a capacidade dos indivíduos e da tecnologia se adaptarem às mudanças futuras (Nordhaus, 1973). Ele apresenta uma perspectiva *top down* (de cima para baixo) da política, guiada pela estrutura do sistema com relações causais deterministas diretas. Embora essa perspectiva possa ocorrer em alguns sistemas de política, em muitos outros ela não procede: o comportamento social não emerge de um edital *top down*. Apesar de a dinâmica de sistemas ainda possuir uma comunidade de praticantes e grande utilidade para modeladores de políticas, ela nunca se tornou uma ferramenta primária dos formuladores de política na esteira da controvérsia em torno do livro *The limits to growth*.

Novas perspectivas surgiram a partir do experimento mental de Thomas Schelling, um futuro Prêmio Nobel de Economia, que, como Forrester, estava muito interessado em política urbana no final dos anos 1960. Ao contrário de Forrester, Schelling olhou para o problema não do ponto de vista do formulador de política, mas a partir da perspectiva de um cidadão. Utilizando um modelo simples de “agentes” representados por moedas e dispostos em um papel milimetrado, ele foi capaz de demonstrar que bastaria uma ligeira preferência das populações em viverem com pessoas de raça semelhante para que fosse gerada uma segregação dramática nestas populações ao longo do tempo. Schelling posteriormente publicou esse trabalho no livro *Micromotives and macrobehavior (Micromotivos e macrocomportamento)*, em 1978 (Schelling, 1978). Apesar de os modelos de Schelling não serem prescritivos para formuladores de política, nem fornecerem controles ou alavancas específicas de política para incentivar a experimentação pelos formuladores de políticas, eles destacam a emergência de comportamentos macro impulsionados por motivações no nível do indivíduo que podem parecer contraditórias. Esta é uma lição poderosa que os formuladores de política devem entender.

Desde as primeiras explorações de Schelling usando moedas e papel, tornou-se popular uma classe de modelos computacionais, conhecidos como modelos baseados em agentes (ABMs), que examinam o surgimento de comportamentos macro a partir da interação de agentes em *software*. Uma vez “inseridos” no

*software*, os agentes podem assumir uma variedade de comportamentos, tais como a localização geográfica, *path dependence*, a comunicação com redes sociais e, até mesmo, a inteligência artificial. Isso amplia muito o campo do que pode ser feito com modelos. Ao longo dos últimos vinte anos, modelos baseados em agentes têm encontrado maior aceitação como ferramenta laboriosa no estudo de sistemas complexos adaptativos (Holland, 1992) e, mais recentemente, na área de economia comportamental (Arthur, 1994; Tesfatsion, 2006) e ciências sociais (Epstein e Axtell, 1996; Miller e Page, 2007).

A modelagem baseada em agentes é um paradigma, e não um conjunto de ferramentas com um módulo de políticas associado, como no caso da dinâmica de sistemas. A flexibilidade dos modelos baseados em agentes tornou-os extremamente poderoso, mas a curva de aprendizagem associada à criação de simulações e a falta de ferramentas para compartilhar os resultados do modelo têm inibido o seu uso como ferramenta comum para a análise de políticas. Para realmente entender as relações complexas e adaptativas tantas vezes associadas a políticas, precisamos continuar a desenvolver as ferramentas e os métodos necessários para apoiar a modelagem baseada em agentes, como uma ferramenta prática na análise de políticas públicas.

## 2 ENTENDENDO COMPORTAMENTOS CAUSAIS

Compreender os mecanismos geradores é importante por – ao menos – dois motivos. Em primeiro lugar, porque quando os potenciais mecanismos geradores de uma dinâmica podem ser descobertos, é possível começar a determinar como afetar o sistema de modo a causar uma determinada mudança (objetivo final da análise de política). Sem a compreensão dos mecanismos geradores, seria muito difícil saber quais alavancas de política produziriam o efeito desejado. Em segundo lugar, porque os métodos geradores permitirão compreender, ou pelo menos caracterizar as dinâmicas temporais ao longo do tempo. Isso, por sua vez, ajudará a projetar um sistema de monitoramento sensível às mudanças almejadas.

Adicionemos agora um pouco mais de formalidade à discussão com a definição mais cuidadosa de raciocínio abdutivo. Fundamentalmente, os modelos baseados em agentes são um tipo de simulação – nem mais, nem menos. O que os diferencia como uma ferramenta para a análise de políticas é que eles focam nos indivíduos e em suas interações. Eles representam explicitamente cada indivíduo dentro do sistema e como eles ali interagem (Axtell, 2000; Epstein, 2006). Dessa forma, ABMs podem lidar com seres humanos adaptativos, com racionalidade limitada e outros *outliers* que podem ter um impacto desproporcional sobre a evolução do sistema. Dado o enorme potencial de expressividade dos ABMs, a ferramenta deve ser aplicada de maneira fundamentada, especialmente quando usada para impactar a política pública. Ademais, isso permite que o analista de política inclua os *outliers*

e outros eventos de baixa taxa de base que podem conduzir o sistema, em vez de ignorá-los com métodos estatísticos, o que ocorre frequentemente.

A típica análise de otimização de forma fechada de um sistema é uma dedução matemática. Começa com um conjunto de afirmações (*statements*) sobre um sistema e, em seguida, deduz-se uma solução ótima. Infelizmente, dada a natureza aberta e estocástica dos sistemas tipicamente estudados com ABMs, uma solução única dedutiva pode não ser útil. Em vez disso, o ABM deve ser executado diversas vezes, mapeando os resultados obtidos em cada uma das rodadas. Neste ponto, pode-se ser tentado a argumentar que *big data* é a solução. Poderíamos simplesmente analisar dados suficientes de um sistema para compreender todas as suas dinâmicas potenciais e incluir *outliers*. No entanto, sob a perspectiva de políticas públicas, essa abordagem analítica é de utilidade limitada. O que uma análise de *big data* pode fornecer são as estruturas de correlação presentes dentro de um conjunto de dados. Isso é bastante diferente da estrutura de causalidade. Além disso, a análise de política normalmente é realizada para instruir uma mudança desejada no sistema. Sendo este o caso, o novo sistema potencial estaria “fora da amostra” da análise de *big data*, e pode não ficar clara a maneira como os sistemas antigo e novo se relacionam.

ABMs, por outro lado, permitem investigar mecanismos geradores potenciais e realizar experimentos com as estruturas causais. Como Epstein coloca: “Se não geramos  $x$ , não explicamos  $x$ ” (Epstein, 2006). Como apontado por Axtell, gerar um determinado resultado só demonstra suficiência (Axtell, 2000). Pode-se demonstrar o que irá causar um resultado, mas, provavelmente, não será possível provar que tal é o verdadeiro mecanismo utilizado no sistema em estudo. Essa observação põe em questão a utilidade do método ABM. A dedução matemática leva a um e somente um resultado que pode então ser utilizado para apoiar a tomada de decisão. O uso de ABM requer uma estrutura lógica com mais nuances, utilizando dedução, indicação e, muitas vezes, abdução.

Como indicado anteriormente, ABM é um tipo de simulação. Portanto, quando controlado adequadamente para qualquer estocacidade dentro do modelo, cada execução do modelo é uma dedução estrita e leva a um – e apenas um – resultado (Epstein, 2006). Quando se alteram as configurações ou os números aleatórios contidos no ABM, pode-se construir um conjunto de mapeamentos (teoremas de suficiência) de insumos ao ABM e resultados.

Conforme as deduções se acumulam, podem ser usadas para produzir induutivamente hipóteses sobre as relações causais que podem existir no sistema em estudo – um exercício de estatística e mineração de dados. Como na maioria das induções, só é possível deixar de rejeitar uma hipótese causal; nunca é garantido que se revele a estrutura causal real do sistema real com esses métodos. É preciso

executar o modelo muitas vezes para explorar e definir o mapeamento entre seus insumos e resultados. Conforme a dinâmica do ABM é mais bem compreendida, os resultados podem ser categorizados em três tipos básicos: esperado válido, esperado inválido (valores de entrada conhecidos que causam comportamento degenerado) e resultados inesperados. Esses resultados inesperados são os que dão *insights* sobre o sistema (Koehler, Barry e Meyer, 2006). No entanto, a fim de saber o quanto se deve crer nesses *insights*, o máximo possível do espaço de parâmetros deve ser explorado para fornecer uma compreensão completa do comportamento do modelo.

Muitas vezes, os resultados gerados a partir de múltiplas execuções de um ABM são usados como parte de uma investigação abdutiva de um fenômeno, tal como o famoso estudo sobre segregação conduzido por Thomas Schelling (1978), aqui anteriormente discutido. Abdução é simplesmente um método para descobrir um componente faltante do nosso modelo de comportamento de um sistema (Aliseda, 2006). Uma investigação abdutiva normalmente é precedida pela observação de comportamentos surpreendentes ou aparentemente excludentes do sistema. Por exemplo, no estudo Schelling, os dois sinais do sistema foram: *i*) padrões de assentamento segregados; e *ii*) autorrelato da população de um desejo de viver em bairros integrados (não segregados). A quantidade de informação utilizada para definir o sistema inicial e a especificidade da dinâmica inesperada vão não somente restringir os novos componentes potenciais, mas também ditar os dados necessários.

Se o sistema for razoavelmente abstrato e a dinâmica inesperada for uma observação macroscópica geral do sistema, então a nova característica suficiente será, também, abstrata. Utilizando os níveis de relevância empírica de Axtell (Axtell, 2005), o que seria produzido nessas condições é, provavelmente, um modelo baseado em agentes de relevância empírica de nível 1 (correspondência qualitativa em nível macro para o referente). À medida que a especificidade do sistema e a dinâmica inesperada aumentam, é provável que a especificidade da nova característica também deva elevar-se. Agora, o ABM provavelmente está tentando alcançar o nível 2 de relevância empírica (correspondência quantitativa no nível macro). Existem dois níveis adicionais no modelo de Axtell: nível 0 (correspondência qualitativa no nível microagentes que se comportam de forma plausível para um determinado sistema) e nível 3 (correspondência qualitativa no nível microagentes que se comportam de forma idêntica aos seus correspondentes no mundo real). ABMs de nível 0 são, essencialmente, experimentos mentais (*thought experiments*) e são improváveis de serem utilizados para a elaboração de políticas. ABMs de nível 3, por sua vez, seriam ideais para apoiar a elaboração de políticas por serem uma representação quase perfeita do sistema em questão. No entanto, devido à quantidade de dados necessária para criar um ABM de nível 3, é improvável que seja possível criar tal modelo. Isso implica normas específicas para o ABM com base em seu uso pretendido. Experimentos mentais e investigações iniciais são bem servidos por modelos de níveis 0 e 1.

Por outro lado, ABMs utilizados para ajudar a definir políticas a serem implementadas devem atingir pelo menos o nível 2. Isso será melhor discutido na próxima seção.

Conforme já indicado aqui, entender quão bem um ABM representa o sistema em estudo é extremamente importante, pois isso ajudará a informar um tomador de decisões sobre como utilizar os resultados deste modelo como suporte à decisão. Além do nível de detalhe e quantidade de dados usados para criar o ABM, o modelo pode e provavelmente deve ser comparado a um referente (o mundo real ou outro modelo). A correspondência com o sistema de referência pode ser caracterizada utilizando o quadro de ancoragem (*docking framework*) criado em Axtell *et al.* (1996).

Nesse quadro existem três níveis de correspondência: identidade, quando a simulação produz resultados idênticos ao referente (dados do sistema real ou outra simulação); distributivo, quando a simulação produz resultados estatisticamente indistinguíveis do referente; e relacional, quando a simulação produz resultados estatisticamente distingúíveis do referente, mas qualitativamente semelhantes. Como discutido, ABMs utilizados para experimentos mentais podem ser considerados adequados se tiverem equivalência relacional com o sistema humano em estudo. ABMs utilizados para informar decisões que irão impactar sistemas humanos devem estar relacionados com o sistema de referência, pelo menos no nível distributivo.<sup>5</sup>

### 3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

A modelagem e simulação (M&S) proporcionam aos cientistas um conjunto de ferramentas para resolver problemas sem soluções analíticas, numéricas. No entanto, esta abordagem tem seu próprio conjunto de desafios, entre os quais a relevância é provavelmente o maior. A importância de um esforço de M&S depende do engajamento dos *stakeholders*, o que muitas vezes determina a longevidade e o impacto do projeto. O envolvimento dos *stakeholders* geralmente depende da forma como eles avaliam o modelo conceitual. Muitos modelos acadêmicos podem falhar neste aspecto e ser rapidamente descartados por serem demasiado pretensiosos.

O cientista de simulação deve equilibrar a *tradeoff* entre construir um *toy model* muito simples e gerar um modelo muito complicado de explicar e entender. Um modelo muito grande, muito inclusivo, pode rapidamente levar os pesquisadores a fazer muitas hipóteses simplificadoras fora de seu domínio de *expertise*, como adivinhar como as pessoas reagiriam em diferentes situações. Um bom modelo para a análise de políticas está provavelmente em algum lugar entre esses dois extremos: um modelo construído para incluir muitas das características-chave dos sistemas,

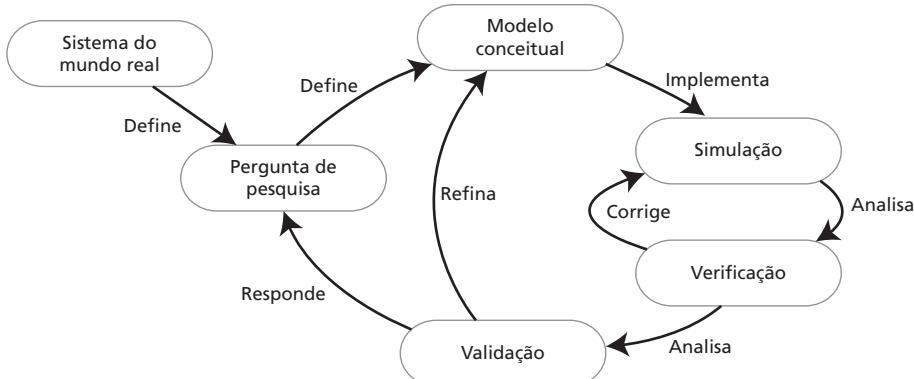
5. Detalhes adicionais da utilização de *docking* e do modelo de relevância empírica para a avaliação de modelos baseados em agentes (ABMs) podem ser encontrados em Egert, Klein e Schomorrow (2014); Koehler, Barry e Meyer (2006); e Barry, Koehler e Tivnan (2009).

ainda que não captem dinâmicas menos importantes. O processo de modelagem e simulação ajuda o pesquisador a identificar o que deve ser incluído.

Modelagem e simulação são processos iterativos em que os cientistas de simulação geralmente trabalham em estreita colaboração com especialistas do domínio. Em cada rodada do ciclo, os resultados do modelo são verificados, validados e refinados (figura 1). Os modelos devem começar com uma pergunta de pesquisa diretamente relevante para um problema do mundo real. Em seguida, um modelo conceitual é construído – normalmente, uma descrição em linguagem natural da dinâmica do modelo. O modelo conceitual é implementado, geralmente em código de computador, e os resultados são analisados. Os resultados da simulação devem primeiro ser comparados com o modelo conceitual para verificar que o código é adequadamente implementado, o que é conhecido como verificação. Aqui, os cientistas devem examinar os resultados da simulação até acreditarem que a implementação descreve corretamente o modelo conceitual. Então, os resultados da simulação são validados com fontes externas de dados, o que pode incluir formas analíticas de validação e ajuste, bem como a validade de face (*face validity*) entre os especialistas do domínio. Se a implementação não responde à pergunta de pesquisa inicial, o modelo conceitual deve ser refinado, o que muitas vezes requer a captura de mais dinâmica.

O processo de M&S pode nos dar grandes *insights*, mas seus métodos requerem que nos concentremos nos processos de engenharia por trás da construção do modelo, dado que os resultados só serão reproduzíveis com estruturas e documentação claras e concisas. A modelagem de sistemas complexos pode exigir que os pesquisadores caracterizem comportamentos e interações muito complicadas em lógica de programação, mas essas implementações podem ser não triviais.

**FIGURA 1**  
**Processo de modelagem e simulação**



Obs: O processo de modelagem e simulação é um processo iterativo e compreende muitos ciclos. Cada passo pode incorporar novas tecnologias e habilidades.

A equipe de modelagem e simulação precisa se assegurar de que sua implementação represente o modelo conceitual, o que pode ser um processo complicado se considerarmos que muitos modelos baseados em agentes são usados para estudar a emergência, e esta nem sempre é conhecida *a priori*. Aqui, o desafio de verificação é agravado, porque os resultados do modelo de simulação não podem ser comparados a um resultado conceitual conhecido. Em casos como este, o modelo pode ser desmontado em componentes, e cada componente pode ser verificado de forma independente. Este processo muitas vezes é conhecido como o teste de unidade em que a operação de um componente é comparada a uma especificação funcional formal. À medida que os componentes são remontados, porções do sistema podem ser validadas, trazendo o sistema para as fases de estado estacionário conhecidas (Gentile, Davis e Rund, 2012).

O processo pode ser complicado ainda mais por uma série de armadilhas que geralmente assolam os projetos (Barth, Meyer e Spitzner, 2012), que vão desde o engajamento dos *stakeholders* até o detalhamento excessivo dos modelos de simulação. Para evitar algumas dessas armadilhas, as equipes podem ser encorajadas a revisitá-las frequentemente a pergunta de pesquisa da tarefa, envolver-se e comunicar-se com as partes interessadas (*stakeholders*), sempre procurar maneiras de simplificar o modelo e seguir as melhores práticas de *design de software* e sistemas.

Axelrod (1997) determina que a programação de um modelo de simulação deve ser verificada – o que é referido como validade interna –, útil e extensível. Nenhum desses requisitos é fácil de se conseguir com qualquer modelo, especialmente quando os cientistas de simulações iteram no processo de simulação e incorporam cada vez mais dinâmica no seu modelo conceitual. Cada nova dinâmica muitas vezes carrega um novo conjunto de pressupostos e uma interface limitada ao modelo todo. Para facilidade de uso e extensibilidade, o usuário deve ser capaz de interagir facilmente com as dinâmicas existentes e de adicionar novas.

É uma boa prática manter um registro do modelo de simulação, com uma lista completa de pressupostos. Um processo padrão de documentação registra uma visão geral dos elementos, conceitos de *design* e detalhes do modelo (*model elements' overview, design concepts and details*) (Grimm et al., 2010). Esse modelo é extremamente útil na manutenção de muitas decisões de *design* por trás da modelagem e muitas vezes dá à equipe de simulação uma melhor compreensão de como os elementos e submodelos funcionam, o que pode diminuir o tempo necessário para a verificação.

## 4 CONCLUSÕES

As técnicas de modelagem e simulação têm uma longa história com a análise de políticas públicas, com a maioria dos métodos envolvendo modelos de dinâmica de sistemas e de equações matemáticas de forma fechada (*closed form mathematical equations*). Esses métodos não expõem os comportamentos subjacentes de nível micro que causam

a dinâmica observada em nível macro. Muitas opções de política podem afetar de forma eficiente essas escolhas no nível micro, que podem levar a resultados sistêmicos muito diferentes. A fim de mudar o sistema no nível micro, precisamos entender quais comportamentos individuais causam diferentes propriedades emergentes no sistema.

A modelagem baseada em agentes fornece um conjunto de ferramentas para os analistas testarem quais comportamentos subjacentes poderiam causar dinâmicas em nível macro. Isso é realizado por meio de exercícios de abdução em que explicações plausíveis são testadas *in silico*, ao longo de muitas repetições. O objetivo do ABM não está em prever um resultado, mas em explicar como um resultado pode ser alcançado por meio das escolhas e interações de muitos atores.

Esse método de experimentação é único porque construímos o sistema que observamos. Geralmente, isso é feito com o uso modelos de simulação por computador, no qual um modelo conceitual é expresso, codificado em computador e executado. A modelagem e a simulação são um processo iterativo onde os cientistas de simulação adicionam complexidade em seus modelos até que os resultados pareçam válidos. Essa rápida iteração pode desafiar o desenvolvimento e gerar erros de *software* na simulação. Esses erros são de grande preocupação, porque o objetivo de um sistema é estudar a emergência que não é conhecida *a priori*. Portanto, devemos checar e recheckar nossas implementações, sempre à procura de maneiras de simplificar nosso modelo, verificar o funcionamento da simulação e validar os resultados do modelo de simulação com o sistema do mundo real. Os pesquisadores precisam não apenas entender o potencial das ferramentas de complexidade para as políticas públicas, mas também transmitir com precisão o uso adequado e as limitações destes métodos.

## REFERÊNCIAS

- ALISEDA, A. **Abductive reasoning**: logical investigations into discovery and explanation. Synthese Library Springer. 2006.
- ARTHUR, W. **Increasing returns and path dependence in the economy**: economics, cognition, and society. Michigan: University of Michigan Press, 1994.
- AXELROD, R. Advancing the art of simulation in the social sciences. In: CONTE, R.; HEGSELMANN, R.; TERRA, P. (Eds.). **Simulating social phenomena**. Springer Berlin Heidelberg, 1997.
- AXTELL, R. **Why agents?** On the varied motivations for agent computing in the social sciences. Washington: Center on Social and Economic Dynamics; Brookings Institution, 2000. (Working Paper, n. 17).
- \_\_\_\_\_. The complexity of exchange. **Economic Journal**, n. 504, p. 193-210, 2005.
- AXTELL, R. L. et al. Aligning simulation models: a case study and results. **Computational and Mathematical Organization Theory**, v. 1, n. 2, p. 123-141, 1996.

BARRY, P. S.; KOEHLER, M. T.; TIVNAN, B. F. Agent-directed simulation for systems engineering. In: PROCEEDINGS OF THE 2009 SPRING SIMULATION MULTICONFERENCE, SPRINGSIM'09. San Diego: Society for Computer Simulation International, 2009.

BARTH, R.; MEYER, M.; SPITZNER, J. Typical pitfalls of simulation modeling: lessons learned from armed forces and business. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 15, n. 2, 2012.

EGETH, J. D.; KLEIN, G. L.; SCHMORROW, D. **Sociocultural behavior sensemaking**: state of the art in understanding the operational environment – chapter agent-based model forecasts. The Mitre Corporation, 2014.

EPSTEIN, J. **Generative social science**: studies in agent-based computational modeling. Princeton: Princeton University Press, 2006.

EPSTEIN, J. M; AXTELL, R. **Growing artificial societies**: social science from the bottom up. Washington: The Brookings Institution, 1996.

FORRESTER, J. **Urban dynamics**. Cambridge: MIT Press, 1969.

GENTILE, J. E.; DAVIS, G. J.; RUND, S. S. C. Verifying agent-based models with steady-state analysis. **Computational and Mathematical Organization Theory**, v. 18, n. 4, 2012.

GRIMM, V. et al. The ODD protocol: a review and first update. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 23, p. 2760-2768, 2010.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. Cambridge: MIT Press, 1992.

KOEHLER, M.; BARRY, P.; MEYER, T. **Sending agents to war**. In: PROCEEDINGS OF THE AGENT 2006 CONFERENCE. Chicago: Argonne National Lab, 2006.

MEADOWS, D. et al. **The limits to growth**: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind. New York: Universe Books, 1974.

MILLER, J. H.; PAGE, S. E. **Complex adaptive systems**: an introduction to computational models of social life (Princeton Studies in Complexity). Princeton: Princeton University Press, 2007.

NORDHAUS, W. D. World dynamics: measurement without data. **The Economic Journal**, v. 83, n. 332, p. 1156-1183, 1973.

SCHELLING, T. C. **Micromotives and macrobehavior**. New York: W. W. Norton and Company, 1978.

TESFATSION, L. S. **Agent-based computational economics**: A constructive approach to economic theory. Society for Computational Economics, 2006.

WEIMER, D.; VINING, A. R. **Policy analysis**: concepts and practice. 3rd ed. Pearson, 1996.



## CAPÍTULO 5

# OPERACIONALIZAÇÃO DE SISTEMAS COMPLEXOS

Jaime Simão Sichman<sup>1</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

O principal objetivo deste capítulo é apresentar uma visão geral de como se pode implementar em um computador a maioria dos métodos e das técnicas apresentadas nos capítulos anteriores. Esta análise será concentrada, principalmente, em técnicas de simulação baseadas em multiagentes, uma vez que estes podem ser vistos naturalmente como uma metáfora para sistemas complexos, nos quais uma grande quantidade de interação entre elementos individuais ocorrem. Sempre que for possível, serão fornecidos exemplos do domínio de sistemas complexos para ilustrar os principais conceitos.

## 2 SISTEMAS COMPLEXOS COMO SISTEMAS MULTIAGENTES

Nesta seção, caracterizam-se os sistemas sociais e complexos e mostram-se como sistemas multiagentes (MAS – acrônimo do termo em inglês *multi-agent systems*), uma vertente teórica e aplicada de inteligência artificial (AI – acrônimo do termo em inglês *artificial intelligence*), são considerados como a realização de computação ideal para este tipo de sistemas. Assim, será introduzida uma técnica de simulação baseada em MAS, chamada de simulação baseada em multiagente (MABS – acrônimo do termo em inglês *multi-agent-based simulation*), apresentando seus objetivos, suas vantagens e suas limitações.

### 2.1 Sistemas sociais como sistemas complexos

Os sistemas complexos apresentam como principal característica o fato de serem compostos por um grande número de *indivíduos* que *interagem* uns com os outros, de acordo com regras diferentes e contextos distintos.

As principais características desses sistemas são:

- não linearidade: padrões de interação entre indivíduos diferentes raramente seguem regras lineares;

---

1. Laboratório de Técnicas Inteligentes (LTI) da Escola Politécnica (EP) da Universidade de São Paulo (USP).  
E-mail: <jaime.sichman@poli.usp.br>.

- múltiplos níveis de abstração: podem-se visualizar e analisar tais sistemas adotando a perspectiva de diferentes níveis de abstração, que vão desde indivíduos a entidades coletivas;
- emergência: o comportamento de todo o sistema dificilmente pode ser predito *a priori*, dado que interações locais podem resultar em alguns fenômenos emergentes dinâmicos; e
- sistemas abertos: em sistemas complexos reais, é frequente o caso em que indivíduos possam entrar e sair dinamicamente do sistema, sem uma governança global.

Desse modo, certos fenômenos físicos, biológicos e sociais podem ser caracterizados como complexos. Se forem considerados especificamente os sistemas sociais humanos, estes apresentam pelo menos duas outras dimensões, *emergência de 2<sup>a</sup> ordem* e *construções sociais*.

Pelo termo emergência de segunda ordem, denota-se o seguinte processo: *i*) interações no nível individual criam padrões no nível global; *ii*) no entanto, ao contrário de outros sistemas complexos, alguns desses padrões globais podem continuar a existir mesmo quando os indivíduos que os originaram deixam o sistema; *iii*) tais padrões são, então, reconhecidos por outros indivíduos, que os nomeiam e os representam como parte da realidade social, e respondem a eles de forma adequada; e *iv*) dessa forma, há um *feedback* do nível global para o nível individual, gerando o que é chamado de emergência de 2<sup>a</sup> ordem.

Além disso, uma vez que as pessoas trocam suas representações subjetivas da realidade usando linguagem natural, pode-se considerar que esses padrões globais são socialmente construídos pelos indivíduos.

Como exemplo, uma política de ocupação de terras públicas que desmata certa área para a construção de uma nova rodovia gera um fenômeno global único. Um sistema de GPS pode detectar uma clareira na floresta, uma área significativa sem cobertura verde. No entanto, as construções sociais criadas pelos indivíduos envolvidos podem ser muito diferentes. Provavelmente, os moradores locais interessados em um desenvolvimento mais rápido irão considerar esse fenômeno como positivo – *eles estão executando bem a tarefa da construção da estrada* –, enquanto os habitantes da região preocupados com a sustentabilidade vão adotar um viés negativo – *eles estão destruindo a floresta*. Tais construções sociais são levadas em conta nos próximos ciclos de decisão destes agentes – *Eu vou/não vou votar para este candidato por causa deste fato*.

Tais características tornam difícil a utilização de técnicas convencionais de computação para o desenvolvimento de tais sistemas. Nenhum algoritmo predefinido pode prever o surgimento de fenômenos coletivos, nem a ocorrência de

*feedback* entre os níveis individual e coletivo. Assim, devem-se utilizar técnicas de modelagem e implementação mais específicas, conforme explicado a seguir.

## 2.2 Sistemas multiagentes

Sistemas multiagentes (MAS) correspondem a um ramo bem estabelecido de pesquisa teórica e aplicada, cuja origem vem da inteligência artificial, e tenta resolver os problemas encontrados quando se decide resolver um conjunto de tarefas inter-relacionadas em um ambiente computacional distribuído. Nomeado nos primeiros tempos como inteligência artificial distribuída (DAI – acrônimo do termo em inglês *distributed artificial intelligence*), uma síntese abrangente do domínio de MAS está fora do escopo deste capítulo.<sup>2</sup>

A inteligência artificial distribuída logo revelou a necessidade de certo grau de *autonomia* aos seus componentes: quanto mais autônomos as unidades locais do sistema são, mais eficientes são a distribuição de tarefas e de operações, e, consequentemente, menor será também a carga de processamento do sistema global. Esta descoberta estimulou pesquisadores e projetistas de IA a centrar a sua atenção para certas questões intrigantes e aparentemente filosóficas, tais como a forma de conceber, projetar e desenvolver um sistema *autônomo*. Além disso, o desenvolvimento de sistemas autônomos levantou uma segunda questão, talvez ainda mais complicada que a primeira: como obter *coordenação* e *cooperação* entre sistemas autônomos que executam uma mesma tarefa? Em outras palavras, como *orquestrar* comportamentos cooperativos em sociedades de agentes com interesses próprios? Curiosamente, estas questões também são fundamentais para os legisladores, como ilustrado nos últimos exemplos deste capítulo.

Desse modo, o domínio de MAS é caracterizado pelo estudo, pela concepção e pela implementação de sociedades de agentes artificiais. Estes agentes podem ser muito diferentes, vão desde os muito simples, chamados de agentes *reativos*; aos mais complexos, dotados de algumas habilidades cognitivas, chamados de agentes *deliberativos*.

Em particular, DAI e MAS proveram arquiteturas e plataformas para projetar e implementar agentes autônomos. Este fato contribuiu de forma significativa para o estabelecimento de uma técnica de simulação chamada simulação baseada em multiagentes (MABS), abordagem que produziu uma grande quantidade de resultados de simulação de fenômenos sociais e complexos. Em particular, a reconstrução da abordagem mais tradicional de autômatos celulares, graças aos novos instrumentos técnicos e teóricos dos MABS.<sup>3</sup>

2. Para mais detalhes sobre o assunto, consultar Ferber (1995) e Wooldridge (2002).

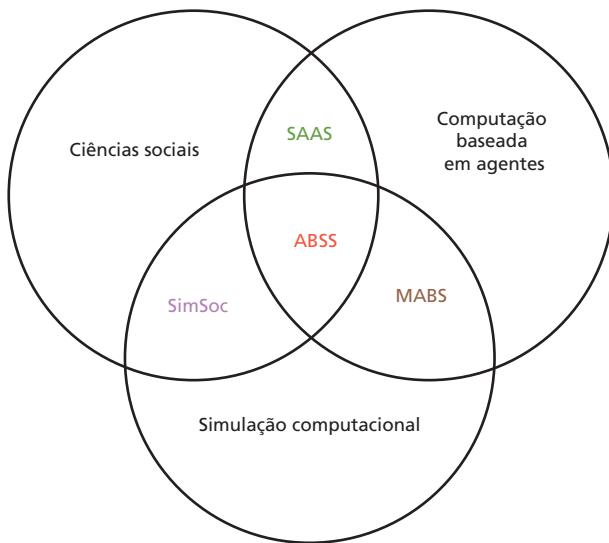
3. Para uma revisão de estudos de simulação baseado em autômatos celulares, ver Hegselmann (1997), e para uma visão abrangente de MABS, ver Sichman (2008).

A abordagem de simulação baseada em multiagentes reforçou o potencial da simulação computacional como uma ferramenta para teorizar sobre questões científicas em sistemas complexos e sociais. Em particular, a noção de um agente computacional, implementando capacidades cognitivas (Doran, 1998), está incentivando a construção e a operação de *sociedades artificiais* (Nigel e Conte, 1995; Epstein e Axtell, 1996).

### 2.3 Simulação baseada em multiagentes

Davidsson (2002) define o domínio de pesquisas denominado de simulação social baseada em agentes (ABSS) como “o uso da tecnologia de agentes para simular fenômenos sociais em um computador”, e o caracteriza pela intersecção de três domínios científicos: *computação baseada em agentes*, *ciências sociais*, e *simulação computacional*, como mostra a figura 1.

FIGURA 1  
As intersecções das três áreas que definem ABSS



Fonte: Davidsson (2002).

Computação baseada em agentes é considerada um subdomínio da ciência da computação, cujo objetivo é modelar, projetar e implementar agentes artificiais. Por sua vez, as ciências sociais têm por objetivo estudar as interações entre as entidades sociais, como a psicologia social, gestão, ciência política, e algumas áreas da biologia. Finalmente, a simulação computacional propõe diferentes técnicas para representar qualquer fenômeno em um computador, a partir de eventos discretos,

orientada a objetos, e simulação baseada em equações. Ela fornece uma compreensão mais detalhada do fenômeno, permitindo experiências que não podem ser feitas no mundo real, ou cujo custo e tempo envolvidos seriam proibitivos.

Qualquer combinação de dois desses domínios apresenta desafios interessantes e possui trabalhos importantes que estão sendo atualmente realizados sobre os seguintes temas.

- 1) Aspectos sociais dos sistemas de agentes (SaaS): intersecção entre as ciências sociais e a computação baseada em agentes, preocupa-se principalmente com o estudo das construções sociais de ambas as sociedades humanas e biológicas, que podem servir de inspiração para o desenvolvimento de modelos computacionais para a implementação de técnicas baseadas em sociedades, como normas, instituições, organizações, cooperação, competição etc.
- 2) Simulação baseada em multiagentes (MABS): intersecção entre a simulação computacional e a computação baseada em agentes, pretende usar a tecnologia de agentes para simular qualquer fenômeno em um computador.
- 3) Simulação social (SocSim): intersecção entre as ciências sociais e a simulação computacional, interessa-se em simular fenômenos sociais em um computador, utilizando qualquer técnica de simulação. Normalmente, usam-se modelos simples das entidades sociais simuladas, como autômatos celulares e objetos, resultando em interações que não são muito complexas. Por isso, ABSS pode ser visto como uma especialização particular de Soc-Sim, por agregar agentes de *software* com modelos cognitivos mais potentes e mecanismos de comunicação e interação mais ricos.

Segundo Davidsson (2002), a abordagem MABS, bem como outras técnicas de microssimulação, apresentam algumas vantagens para simular fenômenos complexos:

A contribuição da computação baseada em agentes para o campo da simulação computacional mediado por ABSS é um novo paradigma para a simulação de sistemas complexos onde há muita interação entre as entidades do sistema. Como ABSS, e outras técnicas de microssimulação, tentam explicitamente modelar comportamentos específicos de indivíduos específicos, pode ser contrastado com técnicas de macrossimulação que são tipicamente baseadas em modelos matemáticos onde as características de uma população são conjuntamente ponderadas e o modelo tenta simular as mudanças nestas características médias para o conjunto da população. Assim, em macrossimulações, o conjunto de indivíduos é visto como uma estrutura que pode ser caracterizada por um número de variáveis, enquanto que em microssimulações a estrutura é vista como emergente a partir das interações entre os indivíduos.

Parunak, Savit e Riolo (1998) compararam essas abordagens e apontaram seus pontos fortes e fracos. Eles concluíram que:

modelagem baseada em agentes é mais apropriada para domínios caracterizados por um elevado grau de localização e distribuição e dominados por decisões discretas. Modelagem baseada em equações é mais naturalmente aplicada a sistemas que podem ser modelados centralmente, e em que a dinâmica é dominada pelas leis da física, ao invés de processamento de informações.

Desse modo, julga-se que as mesmas conclusões obtidas por Davidsson (2002) para a vantagem de usar técnicas MABS para abordar os fenômenos sociais se mantêm caso sejam considerados outros fenômenos complexos, mas não necessariamente sociais. Em outras palavras, se se substituir na figura 1 o domínio das ciências sociais por outro relacionado a fenômenos complexos que se quer estudar, como física, ciências do ambiente, ou engenharia de tráfego, possivelmente existiriam as mesmas vantagens do uso de técnicas baseadas em agentes para analisar estes fenômenos.

Assim, acredita-se que as técnicas MABS podem ser vistas como um importante substrato para simular quaisquer fenômenos complexos.

### 2.3.1 Vantagens e limitações de MABS

Segundo Nigel e Troitzsch (2005), as principais vantagens de uma abordagem MABS são as seguintes.

- 1) As hipóteses experimentais são expressas no nível individual, sendo assim mais fáceis de modelar, de executar e de visualizar.
- 2) Ao se especificarem as regras de interação entre os agentes de modo simples, podem-se modelar padrões dinâmicos complexos no nível social.
- 3) Os próprios modelos são os objetos experimentais, ou seja, eles são simulados, o que aumenta a compreensão de seus aspectos positivos e negativos.

Por seu turno, as principais desvantagens, segundo Nigel e Troitzsch (2005), de uma abordagem MABS são as seguintes.

- 1) A reprodução exata da complexidade do sistema real, incluindo emergência de 2<sup>a</sup> ordem (micro/macrolink) é muito difícil de se obter.
- 2) Devido ao grande número de interações locais, possivelmente distribuídas em vários níveis de abstração, é muito difícil, em alguns casos, entender como os resultados são produzidos.
- 3) Validação é uma tarefa difícil, como será discutido na seção 3.2.

### 2.3.2 Objetivos do MABS

Uma pesquisa exploratória de estrutura da pesquisa interdisciplinar em simulação social baseada em agentes é apresentada por Nuno *et al.* (2004). Cento e noventa e seis estudiosos participaram de uma pesquisa chamada *SimCog Survey*, preenchendo um questionário *on-line*. Nele havia três seções distintas: *i*) classificação de domínios de investigação; *ii*) classificação de modelos; e *iii*) inquérito sobre os requisitos de *software* para a concepção de plataformas de simulação.

Os resultados da pesquisa permitiram retirar a ambiguidade, com um nível razoável de detalhe, das diversas metas científicas e *modus operandi* dos pesquisadores, e também identificar uma classificação de modelos baseada em agentes utilizados em simulação.

Em particular, os pesquisadores foram motivados a usar MABS por motivos diferentes, são eles:

- modelos sociais artificiais: modelar e simular sociedades artificiais que não necessariamente fazem referência a um alvo concreto ou a uma teoria específica sobre o mundo real, mas apenas alguma teoria ou ideia proposta de natureza abstrata; e
- modelos científico-sociais: nesta tendência, os pesquisadores usam a base teórica das ciências sociais e/ou ambientais para modelar fenômenos sociais e ambientais. Os sistemas de destino são diretamente observáveis, ou aqueles para os quais existe alguma evidência significativa sobre a sua existência. Duas direções principais podem ser detectadas:
  - a) modelos sociocognitivos: modelar teorias sociocognitivas ou sociológicas e implementar animação computacional de formalismos lógicos, a fim de refinar/estender teorias sociais e verificar a sua consistência; e
  - b) modelos socioconcretos: modelar e simular sistemas sociais baseados na observação direta e nos dados estatísticos concretos, a fim de compreender os processos e fenômenos sociais e institucionais.
- prototipagem para resolução: modelar e simular sistemas multiagentes para explorar os requisitos de sistemas multiagentes e comportamentos pretendidos, para uso em ambientes reais e engenharia de propósito geral.

Amblard (2010) classifica os possíveis objetivos de MABS em três grupos distintos.

- 1) Compreensão: o objetivo é ter um melhor entendimento de um fenômeno social/complexo. Este objetivo pode ser atingido pelo teste/elaboração de hipóteses, que pode ser considerado como uma espécie de simulação prospectiva, e pela formalização/verificação de teorias de sistemas complexos.

- 2) Decisão: o objetivo é utilizar MABS como uma ferramenta para ajudar partes interessadas a tomar decisões em ambientes complexos. Isto pode ser alcançado fazendo simulação preditiva para a tomada de decisão, a fim de testar diferentes cenários por meio da simulação, e/ou pela construção de artefatos para ajudar a negociação e/ou gestão coordenada.
- 3) Simulação participativa: o objetivo é usar MABS como uma ferramenta para incentivar os interessados e/ou estudantes de interagir em um ambiente complexo comum, com o objetivo de treinamento ou de ensino. Esta característica também é conhecida no domínio da gestão como jogos sérios.

### **3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE MABS**

Nesta seção, demonstram-se as várias etapas que se deve enfrentar para projetar, implementar e testar um experimento MABS. Também discutem-se brevemente algumas questões fundamentais, como verificação, validação e calibração. Na sequência, indica-se como se pode melhorar a legibilidade e a repetibilidade do experimento.

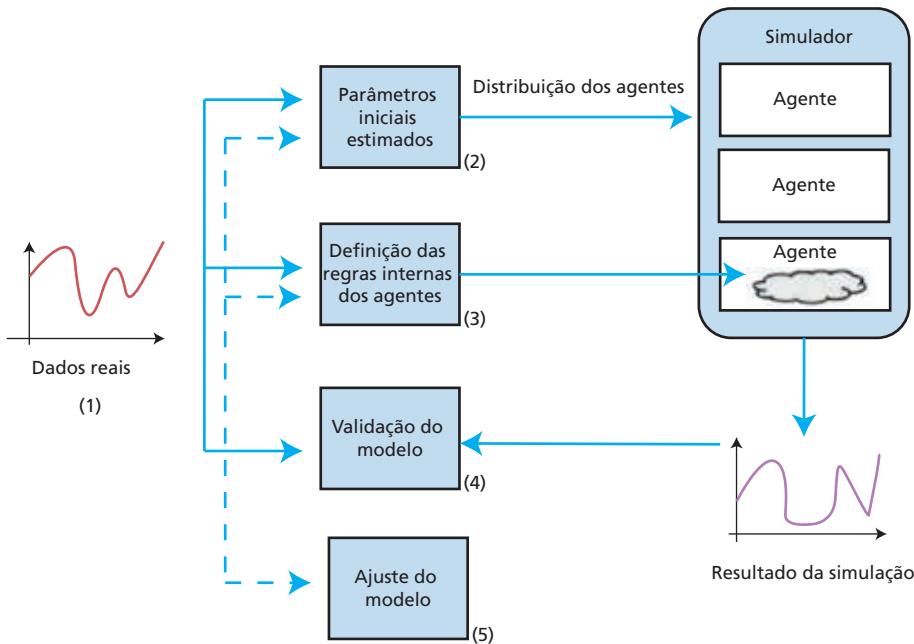
#### **3.1 Etapas de desenvolvimento**

Considerando-se a classe de modelos socioconcretos introduzida na seção 2.3, segundo Hassan, Pavon e Nigel (2008), os passos clássicos para desenvolver um MABS a partir de um fenômeno complexo são: *i*) coleta de dados no mundo real; *ii*) desenvolvimento de um modelo de agente e um de simulação conduzidos por uma teoria subjacente e por dados empíricos coletados; *iii*) definição de parâmetros iniciais, com base em pesquisas e censos; *iv*) implementação de simulação e geração de resultados; *v*) validação do modelo de simulação pela comparação dos resultados com os dados coletados, que devem ser necessariamente diferentes daqueles usados para construir o modelo.

A figura 2 ilustra essa sequência de passos. Na etapa 1, coletam-se dados do mundo real. Tradicionalmente, este tem sido um processo *ad hoc*, e basicamente os dados coletados permanecem estáticos. Como se tornou comum disseminar novas formas de interação humana fortemente baseadas na internet e fornecer milhares de opiniões e relações de indivíduos, tornou-se então possível capturar os fluxos de dados dinâmicos, que refletem a mudança no comportamento dos indivíduos ao longo de períodos de tempo. Tal cenário parece mais adequado para simulações sociais, visto que a sociedade é essencialmente um sistema complexo resultante de processos dinâmicos, o que implica que a simulação deve considerar que as pessoas têm a capacidade de identificar e responder aos fenômenos emergentes. Isto significa que é necessário que

os dados de entrada refletem as alterações na estrutura de comunicação e seu impacto sobre o comportamento humano. No entanto, atualmente, não existem técnicas bem estabelecidas que permitam incorporar fluxos de dados restritos a períodos específicos, ou seja, janelas de tempo em modelos de simulação social ainda estão na fronteira do estado da arte.

## FIGURA 2 Passos do desenvolvimento de um MABS



O passo 2 consiste na definição do comportamento dos agentes. Nesta etapa, as regras e as condições externas que orientam o comportamento dos agentes são definidas com base nos aspectos que são considerados relevantes no contexto da simulação. O enorme número de teorias desenvolvidas anteriormente ganha então uma importância considerável, uma vez que essas teorias indicam os fatores relevantes no processo de tomada de decisão humano. No entanto, este processo de modelagem torna-se quase um processo artesanal no momento de decidir quais aspectos são descartados e quais são incorporados ao processo de tomada de decisão do agente. Além disso, em situações em que MABS é usado para testar cenários possíveis, é necessário garantir um homomorfismo entre o modelo de simulação e o mundo real, isto é, deve haver um mapeamento entre os dados simulados e os reais. Ao analisar os dados coletados a partir do mundo real, deve haver um julgamento

sobre quais fatores no processo de tomada de decisão interno dos agentes são cruciais para a determinação do comportamento de todo o sistema. Sendo um fenômeno complexo, e considerando as não linearidades do sistema, tal tarefa está longe de ser trivial. No estado da arte, ainda não existe qualquer método formal para ajudar a definir estes fatores.

No passo 3, os dados obtidos a partir de pesquisas e censos são utilizados como insumos do MABS. Isso geralmente requer alguma definição dos parâmetros de simulação, tais como os valores das condições iniciais e dos fatores exógenos. Em geral, parâmetros como a porcentagem da distribuição de perfis de agente da sociedade são definidos de duas maneiras (Hassan, Pavon e Nigel, 2008).

- 1) Aleatoriamente, com base numa distribuição uniforme, que pode não representar o mundo real. Tipicamente, o resultado final da simulação é considerado como a agregação dos resultados parciais da simulação gerados a partir de vários ciclos, cada um deles inicializado com um valor aleatório diferente. Nesta abordagem, é considerado que o mundo real, provavelmente, tenha valores semelhantes aos obtidos em várias rodadas de simulação, o que não é necessariamente verdade.
- 2) Com base em dados empíricos coletados por meio de pesquisa. Neste caso, técnicas de microssimulações, como as usadas para orientar a escolha dos parâmetros de simulação (Gupta e Kapur, 2000). Esta abordagem foi muito bem-sucedida em simulações de trânsito, mas parece inadequada para simulações sociais, uma vez que as partes do sistema capturam componentes: *i*) individualmente, isto é, sem considerar a interação social e interferência das estruturas de comunicação sobre o comportamento dos agentes; e *ii*) estaticamente, refletindo assim uma imagem instantânea do sistema num dado instante de tempo.

Depois de executar a simulação, os resultados devem ser validados com os dados coletados no mundo real para estabelecer a sua confiabilidade. Esta atividade, representada na etapa 4, é extremamente importante, embora ainda muito controversa.

O passo 5 mostra o módulo de correção de simulação, que tenta calibrar o sistema sempre que um limite de erro predefinido é excedido. Pela aplicação de algumas técnicas, é possível identificar se a divergência dos dados é sistêmica, ou seja, as regras de decisão do agente devem ser mudadas, ou se é apenas uma discrepância normal, causada por diferentes condições aleatórias iniciais. Na figura 2, a saída representada pela linha pontilhada deste módulo indica que esta melhoria é opcional, e não precisa necessariamente ser executada, caso o desvio nos resultados

da simulação esteja nos limites aceitáveis. Essas duas últimas etapas são discutidas em detalhe na sequência.

### 3.2 Verificação, validação e calibração

Como mencionado por Nuno, Sichman e Coelho (2005), a primeira coisa que se deve ter em mente é que o significado dos termos *verificação* e *validação* em ciência da computação é bastante diferente do normalmente dado em ciências sociais. No entanto, ambos os termos são utilizados na simulação social, muitas vezes com semântica distinta.

Para a teoria clássica da computação, o papel da verificação de um programa é atestar a validade de certas saídas como uma função dos dados de entrada, independentemente de qualquer interpretação dada em termos de teorias ou fenômenos não estritamente computacionais. A execução de um programa é entendida, neste sentido, como um cálculo de inferência formal, que manipula símbolos sem levar em conta seu conteúdo.

Outro tipo de avaliação experimental, que pode ser confundida com a última, é chamada de validação de programa. O papel da validação é certificar que a execução de um programa se comporta de acordo com as expectativas relativamente arbitrárias dos usuários finais do programa.

Nigel e Troitzsch (2005) afirmam que, no caso de SocSim – e MABS –, a verificação é difícil, pois muitas simulações incluem geradores de números aleatórios; assim, cada execução é tipicamente diferente e apenas a distribuição de resultados pode ser teoricamente antecipada. É preciso, portanto, “depurar” a simulação com cuidado; isso pode ser feito usando um conjunto de casos de teste, por exemplo, os que correspondem com as condições e/ou valores limite, quando os valores de saída podem ser facilmente previstos. Uma boa prática é repetir estes casos de teste sempre que uma grande mudança no modelo for feita, para assegurar que os resultados ainda estejam corretos. Se possível, um mecanismo automático para executar o conjunto de testes e registrar os resultados é desejável; este mecanismo pode até destacar as diferenças que precisam de atenção, usando um sistema de controle de versão, conforme fornecido em alguns ambientes de programação, para identificar as versões responsáveis pelos resultados.

A validação tem como objetivo avaliar se a simulação é um bom modelo dos fenômenos-alvo: se for possível confiar que um modelo reflete o comportamento do alvo, então se pode dizer que ele é válido.

Geralmente, a validação é efetuada pela comparação de cada resultado de simulação, individualmente, com o valor real correspondente. Vários métodos estatísticos podem ser utilizados para este propósito, tais como R2 e erro médio

absoluto. Deve ser enfatizado, contudo, que este tipo de validação ponto a ponto raramente é obtido em cenários com variações aleatórias de suas condições; particularmente em sistemas caóticos, pequenas flutuações nas condições iniciais mudam drasticamente a trajetória final do sistema (Sterman, 2000). Assim, geralmente um modelo de simulação é considerado suficientemente fiel quando apresenta as mesmas variações observadas no mundo real na frequência, fase e amplitude das oscilações do sistema.

De acordo com Nigel e Troitzsch (2005), validação é extremamente difícil em SocSim, por diversas razões.

- 1) Às vezes, tanto o modelo quanto o alvo são provavelmente processos estocásticos, e consequentemente a validação dependeria da distribuição estatística esperada da medida das saídas. Infelizmente, em SocSim essas distribuições são raramente conhecidas com antecedência e não são fáceis de estimar.
- 2) Muitas simulações são dependentes do caminho, ou seja, seus resultados dependem nas condições iniciais, e estes podem ser muito sensíveis aos valores das premissas de alguns modelos.
- 3) Há sempre alguns aspectos do alvo que são irreproduzíveis pelo modelo.
- 4) Em certas vezes, o modelo pode ser correto, mas os dados sobre o alvo não o são, ou são o resultado de algumas suposições e estimativas.

Modelos sociais artificiais, como demonstrados na seção 2.3, não se referem a um objetivo concreto, e neste caso, verificação e validação dificilmente são distinguidas.

Uma vez que um modelo é verificado e validado, é preciso também realizar uma *análise de sensibilidade*, ou seja, tenta-se inferir o grau em que o comportamento da simulação é sensível aos pressupostos iniciais que foram adotados. O usuário deve alterar levemente as condições iniciais e os parâmetros do modelo, executar novamente a simulação, e observar eventuais diferenças sensíveis nos resultados. Isso é feito repetidamente, ao mudar de forma sistemática os parâmetros. Em SocSim, como o número de parâmetros é muito grande, isto leva a uma explosão combinatória. Uma técnica para evitar este problema é variar estes parâmetros aleatoriamente, gerando assim uma distribuição de resultados.

A calibração do modelo é outra questão importante em qualquer experimento de simulação. Ela consiste em ajustar um modelo existente para um sistema de referência. Em geral, isso é feito ao adaptar os parâmetros do modelo para um conjunto de dados de amostras do sistema de referência. A abordagem formal para a calibração de simulação é proposta por Hofmann (2005), nela o autor mostra que este problema é NP-completo.

Quanto à calibração de MABS, um bom trabalho é realizado por Fehler, Klügl e Puppe (2006). Eles afirmam que a calibração de modelos MABS apresentam grandes problemas para as técnicas de calibração padrão, devido aos grandes espaços de busca de parâmetros, longos tempos de execução das simulações, diferentes níveis de observação em que o modelo precisa ser calibrado e incertezas no projeto do modelo estrutural. Em relação a este último, às vezes, não é claro quais propriedades e comportamentos, ou seja, a estrutura modelada do agente no mundo real, que realmente leva aos valores agregados mensuráveis. Por conseguinte, isso conduz a uma elevada incerteza sobre uma estrutura válida do modelo e, consequentemente, sobre uma configuração de parâmetros válida. Em seu trabalho, os autores apresentam alguns métodos para melhorar o processo de calibração de simulações baseadas em agentes.

Outra abordagem interessante é apresentada por Windrum, Fagiolo e Moneta (2007). Nesta, os autores descrevem três alternativas metodológicas utilizadas em economia, fundamentadas em agentes para calibrar e validar empiricamente modelos baseados em agentes.

### 3.3 Legibilidade e repetibilidade

Uma crítica que os métodos MABS sofrem, quando comparados aos métodos analíticos tradicionais, é a questão da repetição de experimentos. Enquanto uma equação matemática gera a mesma solução todas as vezes que é resolvida, isso provavelmente não ocorre com uma simulação.

O protocolo ODD (acrônimo do termo em inglês overview, design concepts, and details) – visão geral, conceitos de projeto e detalhes – foi publicado em 2006 para padronizar as descrições publicadas de modelos baseados em indivíduos (acrônimo do termo em inglês individual-based model – IBM) e em agentes (acrônimo do termo em inglês agent-based model – ABM) (Grimm *et al.*, 2006). Os principais objetivos do ODD são produzir descrições de modelos mais compreensíveis e completas, tornando os ABMs menos sujeitos a críticas por serem irreproduzíveis. Segundo os autores, “A ideia básica do protocolo é sempre estruturar as informações sobre um ABM na mesma sequência”.

O protocolo é composto por sete elementos, que podem ser agrupados em três blocos.

- 1) O bloco visão geral consiste em três elementos: propósito, variáveis de estado e escalas e visão geral do processo e escalonamento. Tais elementos fornecem uma visão geral do objetivo global e estrutura do modelo.
- 2) O bloco conceitos de projeto fornece um arcabouço comum para a concepção e comunicação de ABMs. O protocolo também inclui algumas listas de verificação relacionadas a tais conceitos de projeto, que não são obrigatórios, mas dão uma melhor ideia da filosofia de projeto: emergência,

adaptação, adequação, previsão, detecção, interação, estocasticidade, coletivo e observação.

- 3) O bloco detalhes especifica informações sobre inicialização, entradas e eventuais submodelos.

Em 2010, o protocolo foi revisto e ganhou uma atualização, devido a algumas sugestões dadas pelos usuários do protocolo (Grimm *et al.*, 2010). O quadro 1 apresenta os elementos originais e atualizados do protocolo.

**QUADRO 1  
Os sete elementos do protocolo ODD original e atualizado**

|                            | Elementos do protocolo ODD original   | Elementos do protocolo ODD atualizado   |
|----------------------------|---|---|
| Visão geral                | 1. Propósito<br>2. Variáveis de estado e escala<br>3. Visão geral do processo e escalonamento   | 1. Propósito<br>2. Entidades, variáveis de estado e escalas<br>3. Visão geral do processo e escalonamento   |
| Conceitos de <i>design</i> | 4. Conceitos de <i>design</i><br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Emergência</li> <li>• Adaptação</li> <li>• Adequação</li> <li>• Previsão</li> <li>• Detecção</li> <li>• Intereração</li> <li>• Estocasticidade</li> <li>• Coletivo</li> <li>• Observação</li> </ul> | 4. Conceitos de <i>design</i><br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Princípios básicos</li> <li>• Emergência</li> <li>• Adaptação</li> <li>• Objetivos</li> <li>• Aprendizagem</li> <li>• Previsão</li> <li>• Detecção</li> <li>• Intereração</li> <li>• Estocasticidade</li> <li>• Coletivo</li> <li>• Observação</li> </ul> |
| Detalhes                   | 5. Inicialização<br>6. Entradas<br>7. Submodelos  | 5. Inicialização<br>6. Entradas<br>7. Submodelos  |

Fonte: Grimm *et al.* (2006).

## 4 PLATAFORMAS MABS

Nesta seção, são apresentadas as características principais de algumas das ferramentas computacionais mais utilizadas para implementar MABS. Começa-se caracterizando o padrão que o desenvolvimento destas plataformas tem seguido. Detalham-se em seguida seis plataformas, escolhidas por seus diferentes conceitos principais, linguagens de programação subjacentes e habilidades de programação exigidas dos usuários. Conclui-se então com a apresentação de uma análise comparativa dessas ferramentas.

### 4.1 Evolução histórica

Como apontado por Nigel e Bankes (2002), a evolução das plataformas MABS tem seguido o mesmo padrão previamente traçado pelo *software* estatístico.

Numa primeira fase, a partir do início da década de 1990, a maioria dos pesquisadores desenvolveu seus modelos *utilizando linguagens de programação*

*convencionais*, tais como C, Java e Smalltalk. Esta abordagem apresentava muitas desvantagens: modelos básicos e algoritmos tinham de ser continuamente reimplementados, bibliotecas gráficas não foram adaptadas à modelagem dinâmica, compreensão e acesso ao código eram tarefas limitadas aos especialistas na linguagem e/ou no compilador.

Em uma segunda fase, *bibliotecas de rotinas* foram projetadas e implementadas, de modo que pudessem ser mais facilmente incluídas nos programas. Apesar de obter uma grande vantagem em comparação com a tarefa de escrever – e validar – um programa próprio, ainda requeriam um conhecimento de programação adequado do desenvolvedor para usar, adaptar e melhorar o código da biblioteca.

Finalmente, a grande descoberta veio com o projeto e desenvolvimento de *pacotes*, ou seja, um conjunto de rotinas montadas e acessadas pela interface de usuário padronizada, cujos primeiros exemplos mais conhecidos são SPSS e SAS. Obviamente esta abordagem tem uma limitação: citando os autores do artigo, “no entanto, para garantir que eles são suficientemente simples e diretos para o público-alvo, alguns sacrifícios nas funcionalidades tiveram que ser feitos”.

Houve um grande avanço nos últimos dez anos, desde a publicação deste artigo. Várias plataformas MABS foram propostas neste período. Nas subseções seguintes, algumas destas plataformas serão descritas, destacando-se suas características principais. Esta descrição baseia-se na documentação das plataformas e em alguns levantamentos literários (Railsback, Lytinen e Jackson, 2006; Allan, 2010). Após a apresentação das plataformas, na seção 4.8, realiza-se uma análise comparativa das suas características.

## 4.2 Swarm

Swarm<sup>4</sup> foi a primeira plataforma de simulação lançada com uma modelagem baseada em agentes (Minar *et al.*, 1998). Foi criada no Instituto Santa Fé, em 1994, e especificamente planejada para a vida artificial e as aplicações de sistemas complexos. Recentemente, o desenvolvimento e a gestão do projeto mudou-se para o Grupo de Desenvolvimento Swarm.

A plataforma Swarm de simulação foi concebida como uma linguagem geral e um conjunto de ferramentas para MABS utilizados em diferentes domínios científicos. Em sua concepção, há uma separação conceitual clara entre os trechos de *software* que implementam um modelo e os outros voltados para a observação e a realização de experiências sobre o modelo. Diferentemente de outras plataformas, esta distinção entre o modelo atual e o *software* necessário para observar e coletar dados facilita na alteração de uma parte sem influenciar a outra.

4. Para mais informações, consultar: <<http://savannah.nongnu.org/projects/swam>>.

Outro conceito fundamental é a concepção de um modelo como uma hierarquia de *enxames*. Um enxame é composto por um conjunto de objetos e um escalonamento das ações que esses objetos executam. Enxames podem ser definidos hierarquicamente. Eles podem conter enxames de nível mais baixo e fazer parte de enxames de nível superior. Desta maneira, fenômenos emergentes podem ser facilmente modelados. Ao compor estes enxames, seus escalonamentos correspondentes são convenientemente integrados. Um modelo muito simples, por exemplo, pode ser formado por um único “enxame modelo” associado a um “enxame observador”, que serve para avaliar o comportamento do modelo.

Swarm foi concebida antes do domínio de Java como uma linguagem orientada a objetos padrão e implementado em Objective-C, uma vez que esta linguagem, diferentemente de C++, por exemplo, não é fortemente tipada, e, portanto, permite que um escalonamento modelo possa solicitar algumas ações a uma lista de objetos de tipos desconhecidos. Ao usar suas próprias estruturas de dados internas e gerenciamento de memória para implementar objetos modelo, o usuário é capaz de projetar enxames de observadores que implementam “sondas”, permitindo a usuários monitorarem e controlarem quaisquer objetos de simulação. Esses objetos podem fornecer tanto a apresentação de dados em tempo real como o armazenamento de dados para uma análise posterior.

Swarm fornece um conjunto de bibliotecas para a construção de modelos e análise, exibição e controle de experimentos com esses modelos. Uma vez que estas bibliotecas são codificadas em Objective-C, um usuário teria de programar nessa linguagem para modificar/melhorar essas bibliotecas. Recentemente, uma versão chamada Java Swarm foi projetada para fornecer, com o mínimo de alterações possíveis, acesso à biblioteca de Swarm Objective-C no Java. No entanto, esta não é uma versão Java da plataforma; ela simplesmente permite que um código Java envie mensagens para a biblioteca Objective-C com soluções alternativas para acomodar tipagem forte na linguagem Java.

Swarm ainda é, provavelmente, a mais poderosa e flexível plataforma MABS. No entanto, ela tem uma curva de aprendizado muito íngreme. Para usar eficientemente a plataforma, um modelador tem de ter pelo menos algumas competências anteriormente adquiridas em programação em Objective-C e, possivelmente, em Java, e deve estar também familiarizado com projetos orientados a objetos.

### 4.3 Repast

Recursive Porous Agent Simulation Toolkit (Repast)<sup>5</sup> é uma plataforma que foi desenvolvida no Social Science Computing Research Lab da Universidade de Chicago (North *et al.*, 2005).

5. Para mais informações, consultar: <<http://repast.sourceforge.net>>.

Aparentemente seu desenvolvimento teve diferentes objetivos: *i*) implementar em Java um sistema cuja funcionalidade seria equivalente ao Swarm; *ii*) proporcionar bibliotecas e ferramentas especificamente concebidos para o domínio das ciências sociais; e *iii*) entregar um sistema que permitisse aos usuários inexperientes construir modelos mais facilmente.

Repast não adotou todas as escolhas de projeto do Swarm, por exemplo, ele não implementa enxames. É uma plataforma baseada em Java, e, portanto, para o usuário desenvolver uma simulação idealmente é necessário ter habilidades para programar nesta linguagem.

North, Collier e Vos (2006) relatam três implementações para o sistema: *i*) Repast para Java (Repast J), a implementação original na linguagem Java da especificação do Repast; *ii*) Repast NET, uma implementação em Microsoft.NET da especificação do Repast escrita na linguagem C#; e *iii*) Repast para Python Scripting (Repast Py), ferramenta de desenvolvimento rápido de aplicações (RAD) para a produção de simulações Repast em que o comportamento do agente é roteirizado usando a linguagem de programação Python. Como uma ferramenta RAD, Repast Py difere significativamente do Repast J e Repast.NET. Em Repast Py, serviços ao usuário são apresentados de forma visual por uma aplicação separada, enquanto Repast J e Repast.NET são estruturas acessadas pelas linguagens de programação padrão, tais como Java ou C#. O Repast Py é bastante útil para os novatos quando precisam começar a construir um modelo de simulação.

Mais recentemente, uma nova versão foi entregue, a chamada Repast Simphony (Repast-S). Este *kit* de ferramentas de código livre e aberto foi desenvolvido no Argonne National Laboratory, e apresenta diversas ferramentas para o desenvolvimento e execução de modelos visuais, a conectividade de banco de dados automatizado, o registro automatizado de saídas e a visualização dos resultados. Finalmente, há também uma implementação baseada em C++, chamada Repast para Computação de Alta Performance (Repast-HPC), que se destina a simulações pesadas executadas em computadores distribuídos. Esta versão, no entanto, não apresenta todas as interfaces gráficas contidas nos outros lançamentos.

Segundo Railsback, Lytinen e Jackson (2006):

Repast-S, provavelmente, tem agora a maior funcionalidade de qualquer pacote AMBS. Ele suporta uma ampla gama de ferramentas externas para análise estatística e de rede, visualização, mineração de dados, planilhas etc. Modelagens do tipo “aponte e clique” em 2D e 3D são suportadas. Os modelos podem ser controlados em vários formatos, incluindo XML. O escalonador de eventos discretos é concorrente e multiprocessos, várias bibliotecas numéricas estão disponíveis, por exemplo, para números aleatórios e computação distribuída é suportada utilizando a Terracotta Enterprise Suite para Java.

#### 4.4 Mason

Mason<sup>6</sup> é uma plataforma livre e de código aberto baseada em Java, desenvolvida por um esforço conjunto de duas unidades da George Mason University: o Departamento de Ciência da Computação e o Center for Social Complexity (Luke *et al.*, 2005). Esta plataforma não se baseia em qualquer outro conjunto de ferramentas previamente desenvolvido. É uma plataforma de uso geral, que não se destina a um domínio específico.

O principal objetivo do sistema é oferecer uma opção de forma mais concisa e de alto desempenho – mais rápida – para Repast. O sistema tem foco em modelos cujas simulações levam um longo tempo para se executar, são computacionalmente exigentes e envolvem um grande número de agentes cujo número de interações é muito elevado. As escolhas no projeto parecem ter sido impulsionadas em grande parte pelo objetivo de maximizar a velocidade de execução e garantir reproduzibilidade completa entre *hardwares* distintos. Assim, a capacidade para ligar/desligar dinamicamente interfaces gráficas na simulação e retomar/parar uma simulação enquanto ela esteja sendo movida entre diferentes computadores foi considerada um requisito prioritário na sua concepção. Consequentemente, os modelos básicos são executados de forma independente dos módulos de visualização.

Em resumo, Mason é uma plataforma MABS de eventos discretos, rápida, facilmente expansível e escrita em Java. Foi projetada para servir de base para uma ampla gama de tarefas de MABS, que vão desde enxames robóticos a aprendizado de máquina e ambientes de complexidade social. Mason contém tanto uma biblioteca modelo como um conjunto de ferramentas de visualização opcional em 2D e 3D.

#### 4.5 NetLogo

NetLogo<sup>7</sup> é uma plataforma MABS originalmente concebida em 1999, por Uri Wilensky, desenvolvida no Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling da Universidade Northwestern (Wilensky, 1999).

Originalmente chamada de StarLogoT, trata-se de uma plataforma de alto nível que fornece uma linguagem de programação simples mas poderosa, além de interfaces gráficas embutidas e uma documentação abrangente.

A plataforma é baseada na linguagem Logo, que é um dialeto de Lisp; consequentemente, ela não apresenta todos os ricos controles e comandos de uma linguagem de programação padrão. NetLogo teve como objetivo desenvolver uma certa classe de modelos, ou seja, agentes que se movem e agem simultaneamente em uma grade espacial, e cujos comportamentos resultam de interações locais.

6. Para mais informações, consultar: <<http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason>>.

7. Para mais informações, consultar: <[http://ccl.northwestern.edu/netlogo](http://ccl.northwestern.edu/netlogo/)>.

Segundo Allan (2010), “NetLogo reflete claramente a sua herança do StarLogo como uma ferramenta educacional, já que seu objetivo primário de projeto é a facilidade de utilização. Sua linguagem de programação inclui muitas estruturas de alto nível e primitivas que reduzem bastante o nível de esforço para a programação”. Assim, a plataforma é ideal para modeladores que não têm habilidades de programação e iniciantes no campo.

NetLogo é uma plataforma realmente profissional, tanto na sua concepção de produto quanto na documentação associada. Ele também vem com uma biblioteca de modelos, contendo um enorme conjunto de simulações pré-escritas que abordam diferentes domínios das ciências naturais e sociais, incluindo biologia e medicina, física e química, matemática e ciência da computação, economia e psicologia social.

Um exemplo de utilização da plataforma NetLogo, no contexto de teoria dos jogos e de aprendizado de máquina, é apresentado na seção 6.2.

#### 4.6 Cormas

Desenvolvido pela equipe Green no CIRAD, França, cujo principal interesse é desenvolver e testar modelos de gestão de recursos naturais renováveis, Cormas<sup>8</sup> é uma plataforma poderosa quando se quer concentrar em interações entre partes interessadas no uso dos recursos naturais renováveis (Bousquet *et al.*, 1998).

De acordo com as informações disponíveis no *site* do projeto:

Cormas é uma plataforma de simulação com base no ambiente de programação VisualWorks que permite o desenvolvimento de aplicações na linguagem de programação orientada a objetos SmallTalk. Entidades pré-definidas em Cormas são classes genéricas de SmallTalk a partir das quais, por especialização e aperfeiçoamento, usuários podem criar entidades específicas para o seu próprio modelo.

A equipe Green é influenciada pelas ideias de duas associações de pesquisa distintas: a Sociedade Internacional de Economia Ecológica (ISEE) e a Associação Internacional para o Estudo da Propriedade Comum (IASCP). A primeira está interessada em integrar sistemas ecológicos dentro de estruturas econômicas, e seus modelos são muitas vezes baseados em modelagem de sistemas dinâmicos para representar o fluxo de energia, informação ou dinheiro. A segunda associação foca a gestão da propriedade comum, particularmente em recursos naturais renováveis, cujas técnicas são muitas vezes baseadas na teoria dos jogos em que os comportamentos individuais e as interações são consideradas. Por último, uma abordagem regional utiliza Sistemas de Informação Geográfica (GIS) como sua principal ferramenta de modelagem. Cormas foi, portanto, desenvolvido para lidar com essas diferentes influências.

8. Para mais informações, consultar: <<http://cormas.cirad.fr>>.

Particularmente, o grupo desenvolveu uma abordagem chamada *companion-modelling*, que possibilita às partes interessadas decidirem objetivos em longo prazo, com base em uma concepção compartilhada de como a situação atual deve evoluir (Barreteau, 2003). A abordagem de mediação pressupõe que estas partes interessadas estejam bem informadas sobre as questões e as divide, pois todos têm em comum o interesse em resolver o problema original. Do ponto de vista técnico, a abordagem utiliza conjuntamente MABS e jogos de RPG. Outros autores chamaram esta junção de tecnologias como *simulação participativa* (Guyot e Honiden, 2006).

Um exemplo de utilização da plataforma Cormas, no contexto de simulação participativa, é apresentado na seção 6.3.

#### 4.7 Gama

Gama<sup>9</sup> é uma plataforma MABS desenvolvida por várias equipes, sob a égide da unidade de investigação internacional da IRD/UPMC, UMMISCO, compreendendo a Universidade Nacional do Vietnã (Vietnã), CNRS/Universidade de Rouen (França), CNRS/Universidade de Toulouse 1 (França), Universidade de Can Tho (Vietnã) e CNRS/Universidade Paris Sul (França) (Grignard *et al.*, 2013). É uma das plataformas MABS mais bem desenvolvidas recentemente.

Duas das principais diferenças entre Gama e outras plataformas MABS são: *i*) melhor integração de vetores de dados geográficos – séries geométricas que definem coordenadas; e *ii*) possibilidade de definir modelos multinível. Usando uma linguagem de modelagem baseada em XML, chamada GAML, a plataforma facilita a definição de modelos bastante complexos, que integram agentes individuais, outras entidades de diferentes escalas e vetores de dados geográficos. Ao fornecer tal integração, a plataforma Gama permite a utilização de ferramentas mais potentes, como a análise espacial dos GIS, para gerir estes dados.

Segundo Grignard *et al.* (2013), existem três maneiras diferentes de integrar dados vetoriais geográficos em uma plataforma MABS, a partir de uma representação simples para uma representação mais rica.

- 1) Vetores geográficos podem simplesmente ser lidos/escritos de/para arquivos externos e bancos de dados, portanto, perfeitamente integrados à plataforma subjacente.
- 2) A plataforma pode representar esses dados como uma “camada de fundo”, constituída por objetos geográficos. Um agente pode, assim, mover-se, evoluir e interagir de acordo com as limitações definidas nesta camada.
- 3) Um processo de *agentificação* é realizado, o que significa que cada objeto geográfico é também considerado como um agente.

9. Para mais informações, consultar: <<http://doc.gama-platform.org/>>.

Em relação à representação multiescala, a plataforma permite modelar um *agente* para representar qualquer indivíduo ou estrutura/agregação de indivíduos do sistema de referência, em qualquer escala espacial e em diferentes horizontes temporais. Desta forma, o modelador pode escolher livremente as entidades de referência que serão representadas por agentes. A escolha depende exclusivamente do nível de abstração com que o modelador quer trabalhar.

Ainda segundo Grignard *et al.* (2013), falta apoio das plataformas MABS atuais à representação dessas estruturas multinível como entidades explícitas no modelo, bem como ferramentas para detectá-las. Consequentemente, quando modeladores precisam representar essas estruturas e seguir sua dinâmica durante a simulação, eles enfrentam algumas dificuldades. O desenvolvimento da plataforma Gama pretende cobrir esta lacuna.

#### 4.8 Análise comparativa

O conjunto de plataformas de ABS e MABS apresentado nas últimas subseções está longe de ser completo. De fato, nos últimos quinze anos, a comunidade tem desenvolvido um grande número de bibliotecas, *kits* de ferramentas e plataformas, cada uma com diferentes finalidades e características. Algumas são construídas para a modelagem de uso geral, outras se concentram em um determinado domínio; umas são de código aberto, outras de código fechado, e outros são proprietários. Algumas oferecem uma interface de usuário simples, enquanto outras exigem habilidades do usuário em técnicas de programação.

Como consequência, várias pesquisas foram produzidas para comparar ABS e plataformas MABS, a fim de tornar mais fácil para um modelador escolher qual seria a *melhor opção* para a modelagem de seu problema. Infelizmente, não há uma resposta fácil para esta pergunta, uma vez que se pode comparar essas plataformas ao longo de diferentes dimensões e com objetivos diferentes.

Talvez a pesquisa mais seminal seja a produzida por Railsback, Lytinen e Jackson (2006). Estes autores examinam em detalhe quatro plataformas: NetLogo, Mason, Repast e Swarm. Para ilustrar como é difícil comparar estes sistemas, estes pesquisadores mostraram que eles diferem mesmo na terminologia adotada, como demonstrado no quadro 2.

A fim de avaliar o quanto fácil seria para um modelador usar tais plataformas, eles criaram um modelo chamado *StupidModel*, composto de vários níveis. Os autores utilizaram sua experiência em simular este modelo para avaliar e comparar as plataformas. Em cada novo nível, mais recursos eram adicionados a fim de ver como as plataformas se comportavam ao lidar com questões mais complexas. No primeiro nível, por exemplo, era verificado apenas o ambiente fundamental e verificado como os agentes eram exibidos no ambiente. No nível 2, o agente tinha mais ações adicionadas ao seu repertório e eles examinaram como a programação

dessas ações foi implementada pelas diferentes plataformas. Eles terminaram por atingir quinze diferentes níveis, pelos quais eles examinaram características como questões de ambiente, estrutura do modelo, agendamento de agente, entrada e saída de arquivos, geração de números aleatórios e capacidades estatísticas.

A segunda pesquisa foi apresentada por Tobias e Hofmann (2004). Eles compararam quatro diferentes plataformas SimSoc baseadas em Java, utilizando três critérios diferentes e convenientemente ponderados para dar um resultado final: *i*) critério geral, composto por licença, documentação, suporte, base de usuários e viabilidade futura; *ii*) critério de modelagem e experimentação, composto por suporte para modelagem, suporte para controle de simulação, apoio à experimentação, apoio à organização do projeto, facilidade de utilização, suporte para comunicações e facilidade de instalação; e *iii*) critério de opções de modelagem, composto de um grande número de agentes complexos, comunicação interagente, geração de populações de agente, geração de redes, gestão de arranjo espacial e mudança dinâmica da estrutura. Ao combinar a ponderação desses critérios, a plataforma Repast foi a que obteve a nota mais elevada, tal como mostrado na tabela 1.

#### QUADRO 2

#### Diferença de terminologia entre as plataformas

| Conceito   | Termo            |                       |                 |                         |
|--|------------------|-----------------------|-----------------|-------------------------|
|  | Mason            | NetLogo               | Repast          | Swarm                   |
| Objeto que constrói e controla objetos de simulação      | Modelo           | Observador            | Modelo          | Swarm do modelo         |
| Objeto que representa espaço e controla gráficos da tela | Modelo com UI    | Interface             | Nenhum          | Swarm do observador     |
| Objeto que representa espaço e localização dos agentes   | Campo            | Mundo                 | Espaço          | Espaço                  |
| Apresentação gráfica de informações espaciais            | <i>Portrayal</i> | Visão                 | <i>Display</i>  | <i>Display</i>          |
| Apresentações abertas ao usuário do estado do agente     | Inspetor         | Monitor               | Prova           | <i>Display</i> da prova |
| Um comportamento de agente ou evento a ser executado     | <i>Steppable</i> | Procedimento          | Ação            | Ação                    |
| Lista de eventos executados repetidamente                | <i>Schedule</i>  | Procedimento infinito | <i>Schedule</i> | <i>Schedule</i>         |

Fonte: Railsback, Lytinen e Jackson (2006).

**TABELA 1**  
**Pontuação total ponderada das estruturas de simulação avaliadas**

| Critério                                      | RePast     | Swarm      | Quicksilver | VSEit      |
|---|------------|------------|-------------|------------|
| Geral (78)                                    | 71         | 62         | 48          | 44         |
| Suporte para modelagem e experimentação (186) | 113        | 95         | 94          | 80         |
| Opções de modelagem (168)                     | 127        | 109        | 99          | 103        |
| <b>Total</b>                                  | <b>311</b> | <b>266</b> | <b>241</b>  | <b>227</b> |

Fonte: Tobias e Hofmann (2004).

Castle e Crooks (2006) estavam interessados em encontrar princípios para MABS com o objetivo de desenvolver simulações geoespaciais, particularmente agregando GIS. No entanto, de acordo com eles, “GIS não são adequados para modelagem dinâmica (por exemplo, ABM). Em particular, os problemas de representação de tempo e mudança em GIS são destacados”. Tendo este objetivo em mente, eles analisaram várias plataformas MABS. O quadro 3 apresenta os resultados obtidos para alguns sistemas de simulação/modelagem *shareware/freeware*.

**QUADRO 3**  
**Comparação de sistemas de modelagem/simulação *shareware/freeware***

| Simulação Open Source/Sistemas de modelagem |   |   |   |
|---|---|---|---|
|   | Swarm   | Mason   | Repast  |
| Desenvolvedores                             | Santa Fe Institute/SWARM Development Group, USA   | Center for Social Complexity, George Mason University, USA  | University of Chicago, Department of Social Science Research Computing, USA   |
| Data de início                              | 1996  | 2003  | 2000  |
| Sítio                                       | < <a href="http://www.swarm.org">http://www.swarm.org</a> >   | < <a href="http://es.gmu.edu/~eelab/projects/mason">http://es.gmu.edu/~eelab/projects/mason</a> >                       | < <a href="http://repast.sourceforge.net">http://repast.sourceforge.net</a> >   |
| Lista de e-mail                             | < <a href="http://www.swarm.org/mai_lman/listinfo">http://www.swarm.org/mai_lman/listinfo</a> >                                   | < <a href="https://listserv.gmu.edu/archives/mason-interest-l">https://listserv.gmu.edu/archives/mason-interest-l</a> > | < <a href="https://lists.sourceforge.net/lists/listinfo/repast-interest">https://lists.sourceforge.net/lists/listinfo/repast-interest</a> >   |
| Linguagem de Implementação                  | Objective-C/Java  | Java  | Java/Python/Microsoft.Net   |
| Sistema operacional                         | Windows, UNIX, Linux, Mac OSX   | Windows, UNIX, Linux, Mac OSX   | Windows, UNIX, Linux, Mac OSX   |
| Experiência de programação necessária       | Forte   | Forte   | Forte   |
| Funcionalidade GIS integrada                | Sim (exemplo: biblioteca Kenge GIS para Raster data: < <a href="http://www.gis.usu.edu/swarm">http://www.gis.usu.edu/swarm</a> >) | Não   | Sim (exemplo: OpenMap, Java Topology Suite e GeoTools).<br>Simulação Repast também podem ser executadas dentro do ArcGIS com uma extensão chamada Agent Analyst   |
| Quadros, gráficos e estatísticas integradas | Sim (exemplo: pacotes estatísticos R e S-plus)  | Não   | Sim (exemplo: pacote estatístico Colt e funcionalidade básica Repast para estatísticas simples de rede)   |
| Disponibilidade de modelos de demonstração  | Sim   | Sim   | Sim   |
| Código fonte de modelos de demonstração     | Sim   | Sim   | Sim   |
| Tutoriais/documentação how-to               | Sim   | Sim   | Sim   |
| Informação adicional                        | Minar <i>et al.</i> (1996)  | Luke <i>et al.</i> (2004)   | Extensão Agent Analyst: < <a href="http://www.institute.redlan.ds.edu/agentanalyst">http://www.institute.redlan.ds.edu/agentanalyst</a> ><br>Weblog util: < <a href="http://www.gisagcnts.blogspot.pt.com">http://www.gisagcnts.blogspot.pt.com</a> > |

Fonte: Castle e Crooks (2006); Najlis, Janssen e Parker (2001); Parker (2001).

Recentemente, Nikolai e Madey (2009) realizaram uma espécie de compilação/extensão dessas pesquisas anteriores, considerando também critérios adicionais e outras plataformas. Estes autores analisaram 53 plataformas diferentes, examinando

cinco principais dimensões *i*): linguagem necessária para programar um modelo e executar uma simulação; *ii*) sistema operacional necessário para executar o *toolkit*; *iii*) tipo de licença que rege o *toolkit*; *iv*) domínio primário para o qual o *kit* de ferramentas se destina; e *v*) tipos de suporte disponíveis para o usuário.

Outra recente e excelente pesquisa é apresentada por Allan (2010). Nela o autor analisou 31 plataformas MABS e treze *frameworks* de sistemas multiagentes genéricos. O autor também apresenta algumas aplicações de MABS em diferentes áreas, como biologia, química, segurança e cadeia de abastecimento. Algumas questões sobre o desempenho de MABS em computadores de alto desempenho (HPCs) são também abordadas.

## 5 OUTRAS TÉCNICAS

Nesta seção, apresentam-se outras técnicas computacionais que podem ser usadas para modelar e analisar sistemas complexos. Em particular, duas técnicas serão abordadas: aprendizado de máquina e redes sociais. Estas técnicas possuem uma base teórica bastante extensa, assim, decidiu-se por apenas apresentar suas ideias principais em um nível de abstração muito alto e exibir algumas ferramentas computacionais que poderiam implementar algoritmos úteis para sistemas complexos.

### 5.1 Aprendizado de máquina

Na última década, a sociedade tem produzido enormes quantidades de dados. Curiosamente, a partir de um ponto de vista do utilizador, tanto a ausência de dados quanto uma grande quantidade de dados não processados (*raw data*) são quase equivalentes. Tais dados são inúteis, a menos que se consiga extrair informações a partir deles. Por informações, define-se a capacidade de encontrar padrões regulares nestes dados.

De acordo com Mitchell (1997) e Witten e Eibe (2011), o objetivo do aprendizado de máquina (ML – acrônimo do termo em inglês *machine learning*) é a construção de algoritmos eficientes que mudam o seu comportamento com a experiência, de maneira que os permita obter um melhor desempenho no futuro.

#### 5.1.1 Conceitos básicos

Existem, basicamente, três paradigmas de ML.

- 1) Aprendizado supervisionado, no qual exemplos corretos, ou seja, pares – entrada, saída – são apresentados ao sistema.
- 2) Aprendizado por reforço, no qual apenas um indicador de desempenho – bom, mau – é apresentado para o sistema.

- 3) Aprendizado não supervisionado, no qual nenhuma informação prévia é dada ao sistema, que procura regularidades e medidas estatísticas para aprender.

*Aprendizado indutivo* é um tipo de aprendizado supervisionado, no qual o sistema tenta encontrar uma descrição do conceito que se ajusta aos dados. Em outras palavras, o sistema tenta construir uma hipótese para mapear entradas para saídas, generalizando os exemplos de treinamento apresentados ao sistema.

*Clustering* é um tipo de aprendizado não supervisionado, no qual o sistema tenta agrupar casos semelhantes em aglomerados. Dependendo do modelo adotado, esses aglomerados podem ser separados/sobrepostos, determinísticos/probabilísticos e planos/hierárquicos.

Essas duas técnicas são as melhores candidatas para serem utilizadas em sistemas complexos e MABS. A primeira normalmente é usada para ajudar a projetar estereótipos de diferentes agentes, que representam verdadeiros agentes no ambiente simulado. A segunda técnica é usada para identificar padrões emergentes produzidos pela simulação nos níveis meso e macro.

Como mencionado por Witten e Eibe (2011), ML é implantado em várias aplicações práticas, como o processamento de pedidos de empréstimo, o rastreio de imagens para manchas de óleo, a previsão de fornecimento de electricidade e o diagnóstico de falhas de máquina, entre outros.

#### 5.1.2 Implementando o aprendizado de máquina

Algoritmos clássicos para aprendizado indutivo estão completamente descritos na literatura, como ID3 (simbólico) e redes neurais (não simbólico).

Esse é também o caso de *clustering*, incluindo o bem conhecido algoritmo *k-means*. Este algoritmo tenta agrupar dados em um número predefinido de *k* agrupamentos. O algoritmo considera que os agrupamentos sejam separados, determinísticos e planos. Basicamente, os passos são os seguintes.

- 1) Escolher inicialmente *k* centros de agrupamentos, por exemplo, de forma aleatória.
- 2) Atribuir instâncias aos agrupamentos, com base em sua distância para os centros de agrupamentos.
- 3) Computar as centroides dos agrupamentos.
- 4) Repetir os passos anteriores até obter a convergência.

O algoritmo basicamente minimiza a distância quadrada de uma instância para os centros de agrupamento. Os resultados podem ser muito sensíveis à escolha

inicial das sementes, e às vezes o algoritmo pode parar em um mínimo local. Uma boa técnica para aumentar a chance de encontrar o ótimo global é reiniciar o algoritmo com diferentes sementes aleatórias.

Um aspecto importante na utilização do *k-means* é escolher *o melhor k*. As possíveis técnicas incluem: *i*) escolher um valor *k* que minimiza a distância quadrada da avaliação cruzada para os centros de agrupamento; *ii*) usar a distância quadrada penalizada nos dados de treinamento; e *iii*) aplicar *k-means* de forma recursiva, começando com *k* = 2, e parar de aumentar seu valor com base em alguma avaliação de erro (Hall *et al.*, 2009).

Há outros algoritmos de agrupamento hierárquicos, aglomerativos e incrementais bem estabelecidos e disponíveis na literatura. Uma descrição mais detalhada destes algoritmos foi realizada por Mitchell (1997) e Witten e Eibe (2011).

### 5.1.3 Weka

Talvez o repositório mais conhecido de ML seja o Weka<sup>10</sup> (Hall *et al.*, 2009). De acordo com as informações disponíveis no *site*:

Weka é um conjunto de algoritmos de aprendizado de máquina para tarefas de mineração de dados. Os algoritmos podem ser aplicados diretamente a um conjunto de dados ou chamado a partir de seu próprio código Java. Weka contém ferramentas para pré-processamento de dados, classificação, regressão, *clustering*, regras de associação e visualização. É também bem adequado para desenvolvimento de novos sistemas de aprendizado de máquina.

Weka foi desenvolvido pelo Grupo de Aprendizado de Máquina da Universidade de Waikato, Nova Zelândia. O nome Weka vem de uma ave que não voa com uma natureza inquisitiva, encontrada apenas nas ilhas da Nova Zelândia.

Weka é um *software* de código aberto emitido sob a GNU General Public License. Ele pode ser usado para *Data Mining* e aplicado para processar *Big Data*. Recentemente, os autores forneceram um MOOC de cinco semanas, chamado *Data Mining com Weka*, que contém aulas em vídeo e outras informações úteis para utilizar o repositório.

## 5.2 Redes sociais

Wasserman e Faust (1994) caracterizaram a análise de redes sociais como:

A análise de redes sociais é baseada em uma suposição sobre a importância das relações entre as unidades que interagem. A perspectiva de rede social engloba teorias, modelos e aplicações que são expressos em termos de conceitos ou processos relacionais.

---

10. Para mais informações, consultar: <<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>>.

Junto com o crescente interesse e aumento do uso de análise de rede se chegou a um consenso sobre os princípios fundamentais subjacentes à perspectiva de rede. Além do uso de conceitos relacionais, observa-se o seguinte como importante:

- atores e suas ações são vistos como interdependentes, ao invés de unidades autônomas independentes;
- laços relacionais (vínculos) entre os atores são canais para transferir ou “fluir” os recursos (materiais ou imateriais);
- modelos de rede com foco em indivíduos veem o ambiente estrutural da rede como proporcionador de oportunidades para restrições sobre ações individuais; e
- modelos de rede conceituam a estrutura (social, econômica, política, e assim por diante) como padrões duradouros de relações entre atores.

A unidade de análise em análise de rede não é o indivíduo, mas uma entidade constituída por um conjunto de indivíduos e as ligações entre eles.

### 5.2.1 Conceitos básicos

De acordo com Gretzel (2001), vários tipos de relações sociais podem ser representadas por meio de dados de rede, como os papéis sociais (chefe de, professor de, amigo de), as relações afetivas (gosta, respeita, odeia), e as relações cognitivas (sabe, vê como semelhantes), entre outros.

De um ponto de vista formal, as redes sociais (SocNet – acrônimo do termo em inglês *social network*) podem ser representadas por grafos, em que os nós representam indivíduos e as arestas suas relações. Ao se adotar tal representação, pode-se aproveitar a quantidade enorme de algoritmos de grafos disponíveis para calcular algumas propriedades interessantes da rede. Do ponto de vista da implementação, devido a problemas de desempenho, grafos podem ser elaborados por matrizes.

De acordo com Wasserman e Faust (1994), os principais conceitos e níveis de análise no domínio serão expostos a seguir.

#### Conceitos principais

- ator/nó/ponto/agente: entidades sociais, como pessoas, organizações, cidades etc.;
- laço/conexão/aresta/linha/arco: representa as relações entre os atores;
- díade: consiste em um par de atores e da – possível – ligação entre eles;
- tríade: um subconjunto de três atores e as (possíveis) ligações entre eles;
- subgrupo: subconjunto de atores e todas as ligações entre eles;
- grupo: coleção de todos os atores sobre os quais os laços devem ser medidos;

- relação: coleção de ligações de um tipo específico entre os membros de um grupo; e
- rede social: conjunto finito ou conjuntos de atores e da relação ou relações definidas sobre eles.

#### Níveis de análise

- nível de ator: centralidade, prestígio e papéis isolados, ligações, pontes etc.;
- nível diádico: distância e alcance, estrutural e outras noções de equivalência e tendências para a reciprocidade;
- nível triádico: equilíbrio e transitividade;
- nível subconjunto: facções, subgrupos coesos e componentes; e
- nível de rede: conectividade, diâmetro, centralização, densidade, prestígio etc.

Outras referências interessantes para a análise de redes sociais são Borgatti, Everett e Freeman (2002), Hanneman e Riddle (2005), Carrington, Scott e Wasserman (2005). Um trabalho recente e interessante cujo foco está na análise e no uso de redes sociais para criar estratégias para acompanhar, desestabilizar e perturbar redes secretas e ilegais é descrito por Everton (2012).

#### 5.2.2 Implementando redes sociais

Kirschner (2008) apresenta uma visão geral das plataformas SocNet mais comuns. O relatório foi desenvolvido pela Philanthropy and Networks Exploration,<sup>11</sup> uma parceria entre a Fundação Packard e o Monitor Institute, cujo objetivo é investigar como as redes podem facilitar e aumentar a eficácia filantrópica.

As plataformas analisadas foram identificadas a partir de várias fontes, incluindo o levantamento literário apresentado por Huisman e Van Duijn (2006). Elas foram divididas em quatro grupos (Kirschner, 2008).

- 1) Plataformas acadêmicas avançadas: muitas vezes utilizadas em ambientes acadêmicos. Essas ferramentas têm como objetivo lidar com tipos sofisticados de análise de redes sociais, em geral, priorizando o desempenho em oposição à usabilidade. Manuais e arquivos de ajuda não são abrangentes ou são escritos para um público mais especializado. Exemplos: UciNet/NetDraw, Guess, Iknow, NetVis module, Otter, Pajek, SoNIA.
- 2) Plataformas acessíveis avançadas: usadas em configurações mais gerais, incluindo ambientes corporativos. Essas ferramentas tendem a ser mais intuitivas e fáceis de usar que as ferramentas para aplicações acadêmicas.

11. Para mais informações, consultar: <<http://www.philanthropyandnetworks.org>>.

Arquivos de ajuda do *software* são mais abrangentes e guias do usuário são escritos para um público geral. Exemplos: NetMiner, Visone, InFlow (Valdis Krebs), Network Evaluation Tool (Rob Cross), Sentinel Visualizer.

- 3) Plataformas simples e fáceis de usar: podem ser utilizadas por usuários menos familiarizados com a análise de redes sociais. Elas são construídas sem funcionalidades complexas e são muito fáceis de navegar e usar. Arquivos de ajuda são simples e claros. Um exemplo é a Smart Network Analyzer.
- 4) Ferramentas de visualização *on-line*: usadas para analisar os dados disponibilizados pelos usuários, e, na maioria das vezes, são simples de usar, com uma funcionalidade intuitiva. Exemplos: Xigi.net, TouchGraph, Network Genie.

Na sequência, serão detalhadas duas dessas plataformas.

#### 5.2.3 UciNet/NetDraw

UciNet<sup>12</sup> é um *software* que lê e grava arquivos de dados de redes sociais. NetDraw é empacotado com Ucinet e é usado para ler e exibir visualizações de rede. O Ucinet é amplamente utilizado na academia, pois seu formato de arquivo pode ser usado com um grande número de plataformas de análise e visualização.

Embora empregado principalmente em ambientes acadêmicos, o Ucinet também é utilizado por consultores que elaboraram versões personalizadas do *software* para atender a necessidades mais específicas. O Ucinet é gratuito para uso individual, mas tem um custo para uso comercial. Suas principais vantagens são: *i*) flexível e pode importar dados de diferentes formatos de arquivos, incluindo Excel; *ii*) suporta tipos mais complexos de análise de rede; e *iii*) compatível com várias plataformas de visualização diferentes.

As principais desvantagens do Ucinet são: *i*) dificuldade de uso nas tarefas de análise de redes sociais simples; *ii*) recursos de ajuda *on-line* se destinam a audiências mais sofisticadas; *iii*) dificuldade em filtrar os dados que estão sendo visualizados; e *iv*) visualização de NetDraw não permite a formatação de saída.

Um capítulo interessante descrevendo como começar a utilizar Ucinet/NetDraw, entre outras ferramentas, é apresentado por Everton (2012).

---

12. Para mais informações, consultar: <<http://www.analytictech.com>>.

#### 5.2.4 NetMine

NetMiner<sup>13</sup> é uma ferramenta de *software* para análise exploratória e visualização de dados da rede. Ela pode lidar com grandes quantidades de dados e permite ao usuário realizar tanto análises simples quanto mais avançadas, incluindo um número de procedimentos estatísticos. Os dados podem ser visualizados com base em vários tipos diferentes de algoritmos de visualização de rede, e os resultados estatísticos podem ser exibidos por meio de gráficos.

O NetMiner é adequado para uma variedade de públicos, incluindo acadêmicos, consumidores corporativos e público em geral. É uma plataforma própria, mas as licenças de uso de estudantes são bastante baratas. Suas principais vantagens são: *i*) apresenta uma interface com o usuário conveniente e intuitiva, de fácil uso para usuários menos avançados; *ii*) oferece um bom suporte ao usuário pelos arquivos de ajuda embutidos na plataforma, bem como documentação sobre a utilização do *software on-line*; e *iii*) oferece funcionalidades avançadas para conduzir vários tipos de análises estatísticas e visualizações.

Uma desvantagem do NetMiner é o fato de necessitar de um nível básico de sofisticação técnica e familiaridade com a análise de redes sociais.

## 6 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES MABS

Nesta seção, apresentam-se muito brevemente três exemplos de aplicações diferentes de MABS para ilustrar como esta técnica pode ser usada com eficiência em diferentes cenários de sistemas complexos. Estas aplicações foram escolhidas porque abordam distintos objetivos, como discutido na seção 2.3, e utilizam diferentes plataformas, como discutido na seção 4.

### 6.1 Redes sociais

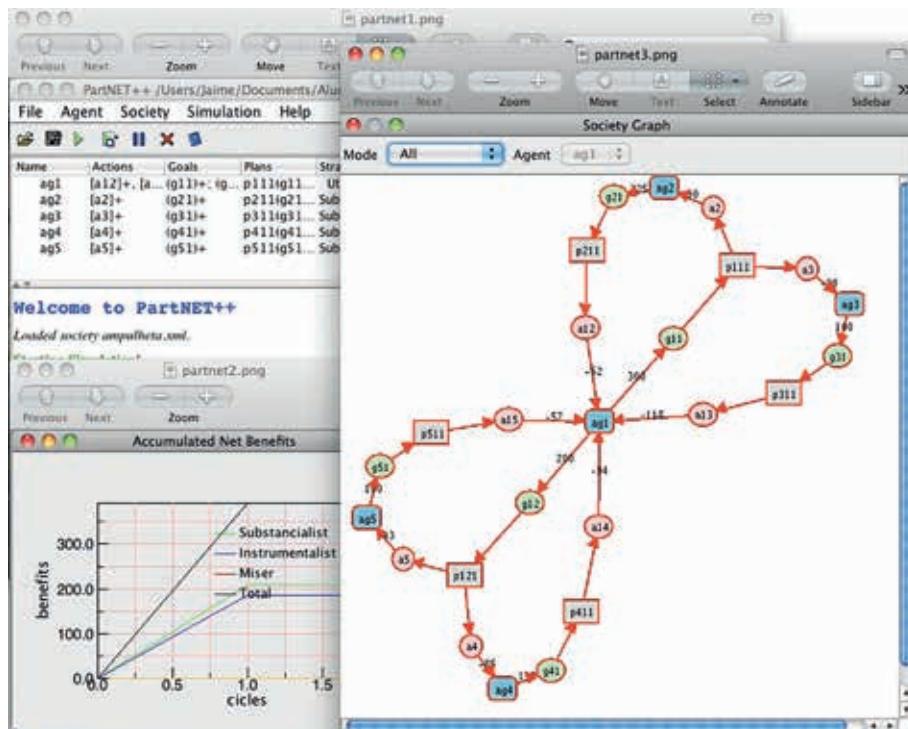
PartNet+ é uma ferramenta de simulação baseada em multiagentes, cujo objetivo é compreender a formação de parcerias entre agentes heterogêneos (Monteiro, 2004; Monteiro e Sichman, 2005). Ela é uma extensão de uma ferramenta anterior, chamada PartNet, desenvolvida por Conte e Pedone (1998).

O simulador implementa um mecanismo de raciocínio social baseado nas redes de dependência, desenvolvido por Sichman *et al.* (1994) e inspirado na teoria da dependência proposta por Castelfranchi, Micelli e Cesta (1992) e Conte e Castelfranchi (1992). Ao representar internamente objetivos, planos, ações e recursos uns dos outros, os agentes podem detectar a sua complementaridade em relação às ações e aos recursos de que necessitam, a fim de atingir seus objetivos. Também é possível calcular quais são os agentes dos quais dependem e quais são

13. Para mais informações, consultar: <[www.netminer.com](http://www.netminer.com)>.

os que estariam mais suscetíveis a cooperar, isto é, aqueles que também dependem deles. Com base neste cálculo, agentes interagem pelo envio de propostas uns para os outros, visando a estabelecer parcerias para atingir as metas de cada um.

**FIGURA 3**  
**Interface do PartNet+**



Fonte: Monteiro (2004).

Ao escolher parceiros preferenciais, cada agente em PartNet+ segue uma estratégia que dita o tipo de parceria a ser buscada. Existem três estratégias diferentes disponíveis, que cobrem a maior parte dos estereótipos de escolhas razoáveis que um agente pode ter ao escolher parcerias.

- 1) Utilitaristas: tentam maximizar a importância do objetivo conseguido minimizando o custo da ação utilizada.
- 2) Substancialistas: escolhem parcerias com os objetivos mais importantes, não importando seus custos.
- 3) Avarentos: buscam as parcerias com custo mínimo, não levando em conta a importância do objetivo.

Na figura 3, pode-se ver a interface do PartNet+. Na janela principal, podem ser definidos os parâmetros de simulação, como objetivos do agente, planos e ações, além disso a simulação pode ser controlada. Janelas de sobreposição adicionais mostram gráficos com os resultados da simulação, como o benefício líquido acumulado e o gráfico de dependência, possibilitando ao utilizador visualizar relações de dependência que foram utilizadas nas parcerias.

Como discutido na secção 4.1, pode-se utilizar diferentes abordagens para implementar MABS. No caso de PartNet+, o simulador foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Java. Esta escolha foi feita porque já havia uma versão do *software* original para calcular as relações de dependência e as redes disponíveis nesta linguagem. Assim, pode ser o caso de que uma peça de *software* legado possa determinar tal escolha.

Utilizando os tipos propostos na seção 2.3, o objetivo da simulação foi a implementação de um modelo sociocognitivo. A validação não foi abordada sobre o comportamento individual dos agentes, mas por alguns valores agregados. Um exemplo de hipótese testada e validada, tal como esperado por resultados anteriores em ciências sociais, é que substancialistas conseguem maiores benefícios líquidos acumulados quando existem mais objetivos na sociedade.

Essa aplicação é uma ilustração da utilização de técnicas de simulação baseadas em multiagentes no domínio de redes sociais, ou seja, para prever a formação de parcerias entre agentes em redes autocentradas.

## 6.2 Teoria dos jogos e aprendizado de máquina

Nardin e Sichman (2012) apresentam um modelo de simulação para um cenário de expropriação de terra. Este modelo integra ambos os conceitos de *coalizão* e *confiança*, permitindo a análise a propósito de como a confiança exerce influência sobre a formação de coalizões no caso de desapropriação de terras.

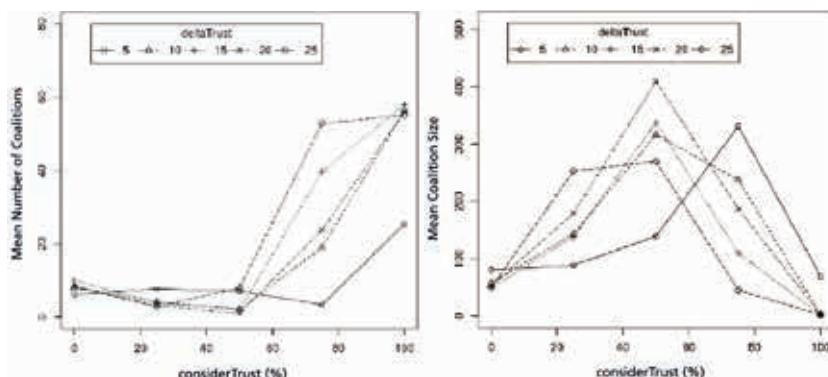
O ambiente é composto por uma população de agentes com interesses próprios, representando proprietários de terras, que estão posicionados em um reticulado quadrado que representa as propriedades de terras. Cada agente proprietário interage com seus vizinhos, jogando o dilema do prisioneiro, optando entre cooperar ou desertar.

Inicialmente, os agentes jogam independentemente uns dos outros, mas por meio da análise de seus resultados eles poderão decidir aderir – ou sair – de uma coalizão. Os membros de uma coalizão cooperam com os membros de outra coalizão, mas não com os agentes que não pertencem à coalizão. Além disso, um parâmetro de modelo *tax* representa a quantia que os membros da coalizão devem pagar para seu líder, a fim de ter o direito de permanecer na coalizão.

A decisão de ingressar, permanecer ou deixar uma coalizão é fortemente baseada no valor de confiança que o proprietário do terreno tem no líder da coalizão. Tal valor é atualizado em cada rodada, principalmente com base na recompensa recebida do líder da coligação. Esta variação depende de um parâmetro do modelo chamado *Delta Trust*, que representa a *volatilidade de confiança* dos agentes sobre seus líderes de coalizões. Assim, quando os agentes se juntam a uma coalizão, eles atribuem um valor de confiança inicial para o líder da coalizão, que pode aumentar ou diminuir dependendo do resultado de coalizão. Se este valor de confiança atinge um limiar mínimo, representado por um parâmetro de modelo chamado *trustThreshold*, o agente decide abandonar a coalizão.

O principal objetivo do trabalho é identificar a influência que a confiança exerce sobre a formação de coalizões de proprietários de terra, pela variação dos valores de confiança nos parâmetros de entrada e analisando a formação de padrões de coalizões macroscópicos, calculados considerando-se o valor médio de dez execuções para cada cenário de simulação. Um parâmetro *considerTrust* representa a porcentagem de agentes que levam a noção de confiança em conta para decidir juntar-se, permanecer ou deixar uma coalizão. O interesse deste estudo é avaliar três padrões macroscópicos ao final da simulação: o número de coalizões restantes, os seus tamanhos e o número de *agentes independentes*. Para isso, três diferentes níveis de intolerância da confiança dos agentes foram considerados, que correspondem, respectivamente, aos valores de 25 (liberal), 50 (moderada) e 75 (conservador) no parâmetro *trustThreshold*.

**GRÁFICO 1**  
**Número e tamanho das coalizões versus *considerTrust***



Fonte: Nardin e Sichman (2012).

Obs.: tax = 25% e *trustThreshold* = 75.

Resumidamente, os resultados mostraram que em altos valores de *tax* – acima de 50% – o sistema foi altamente dinâmico, com uma formação e dissolução rápida de pequenas coalizões, e um grande número de proprietários de terras independentes. No entanto, quando o valor de *tax* foi fixado em 25%, o comportamento macroscópico variou de acordo com a combinação dos parâmetros do modelo, em particular, do valor de *trustThreshold*. Isto pode ser observado no gráfico 1.

Em cenários totalmente heterogêneos, nos quais apenas metade dos agentes considera a confiança para decidir permanecer ou deixar uma coalizão, e quando o nível de intolerância de confiança e volatilidade de confiança são elevados, respectivamente, 75 e 20 (no gráfico 1), menos coalizões permaneceram, entretanto com um maior número de agentes. Estes valores indicam que, em cenários com latifundiários conservadores e de baixa tributação, o uso moderado de confiança é benéfico para a formação de maiores coalizões.

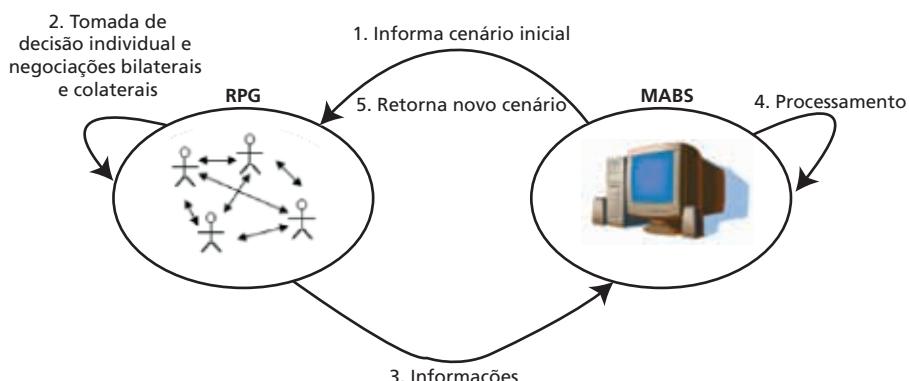
Nessa aplicação, as simulações foram realizadas utilizando NetLogo, descrito na seção 4.5 (Wilensky, 1999). A aplicação também implementou um modelo sociocognitivo, conforme mencionado na seção 2.3. A validação foi dirigida apenas comparando as saídas diferentes dos modelos, utilizando técnicas estatísticas, como apresentado anteriormente.

Essa aplicação é uma ilustração da utilização de técnicas MABS que combina abordagens de teoria dos jogos e de aprendizado de máquina para prever a estabilidade das coalizões dos agentes em um cenário de expropriação de terra.

### 6.3 Simulação participativa

Adamatti, Sichman e Coelho (2009) descrevem uma metodologia chamada Games and Multi-Agent-Based Simulation (GMABS) que integra técnicas de MABS e Role-Playing Games (RPG). Tal metodologia foi empregada num cenário de simulação participativa, cujo objetivo é avaliar o impacto das ações dos agentes no ambiente. Ela combina a capacidade dinâmica de MABS com a discussão e a capacidade de aprendizado de RPG. Esta metodologia é ilustrada na figura 4, e é composta por seis passos.

**FIGURA 4**  
**Metodologia GMABS**



Fonte: Adamatti, Sichman e Coelho (2009).

- 1) Os jogadores recebem todas as informações sobre o jogo. Os papéis que podem assumir, as ações e as regras disponíveis para esses papéis, seu ambiente comum e as restrições topológicas. Quando o jogo começa, cada jogador define o papel que ele/ela vai jogar. Neste momento, cada participante sabe quais ações ele/ela pode executar, e os benefícios e/ou danos que suas ações podem causar ao ambiente. O cenário inicial também define onde os participantes estão localizados fisicamente dentro do ambiente e quais as suas posses iniciais, como dinheiro, terrenos etc.
- 2) Neste passo, existem três diferentes atividades:
  - a) os jogadores podem raciocinar e decidir sobre as ações individuais que apenas dependem de si próprios. Por exemplo, no domínio dos recursos naturais, proprietários de terra podem alterar o seu uso da terra;
  - b) os jogadores têm todas as informações necessárias para iniciar negociações bilaterais uns com os outros. Para negociar, eles podem trocar informações e tomar as suas decisões, de acordo com as regras que devem ser seguidas pelos papéis que estão desempenhando. No domínio dos recursos naturais, por exemplo, os proprietários de terras podem vender seus terrenos. Normalmente, essas duas atividades (a e b) ocorrem simultaneamente, e sua duração é definida no início do jogo;
  - c) depois de decidir sobre suas ações individuais e concluir as negociações bilaterais, os jogadores podem negociar sobre as estratégias coletivas para as próximas rodadas. Estas estratégias coletivas devem beneficiar a todos ou apenas a um subgrupo de jogadores. Considerando uma vez mais o domínio dos recursos naturais, os jogadores são capazes de exigir melhorias na infraestrutura, mais postos de trabalho, valores de impostos mais baixos, e assim por diante. Este processo de negociação de estratégias coletivas é apenas uma “predisposição” para definir ações futuras. Os jogadores não são obrigados a manter a sua palavra e a realmente usar essas estratégias em novas rodadas. Este processo é muito importante para que cada jogador compreenda melhor os objetivos e as estratégias dos outros.
- 3) Jogadores informam a ferramenta MABS, possivelmente mediada por um operador humano, quais ações individuais foram escolhidas e quais negociações bilaterais foram concluídas.
- 4) A ferramenta MABS computa os dados, e como resultado, as ações dos jogadores podem modificar o cenário inicial. Por conseguinte, as propriedades do ambiente são modificadas, o que implica na modificação dos dados de cada jogador;

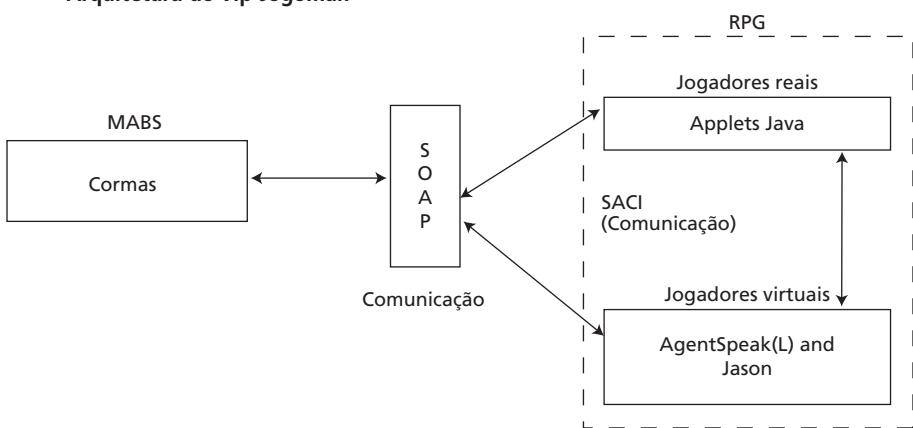
- 5) A ferramenta MABS envia o novo cenário de volta para os jogadores, novamente mediado pelo operador. Se o prazo de jogo não tiver sido atingido ou não tiver alcançado o número máximo de rodadas, o jogo retorna para o passo 2.
- 6) Se o jogo chegou ao fim, uma sessão de esclarecimento é realizada.

Usando GMABS, dois protótipos no domínio da gestão dos recursos naturais foram desenvolvidos. O primeiro protótipo, chamado JogoMan, é um jogo em papel. Todos os jogadores precisam estar fisicamente presentes ao mesmo tempo no mesmo local, e existe um número mínimo necessário de participantes para jogar.

A fim de evitar essa restrição, um segundo protótipo, chamado VIP-JogoMan, foi construído. Ele permite a inserção de *jogadores virtuais* que podem substituir alguns jogadores reais no jogo. Estes jogadores virtuais podem imitar parcialmente comportamentos reais e capturar autonomia, habilidades sociais, de reação e adaptação dos jogadores reais.

A arquitetura Belief-Desire-Intention (BDI) foi escolhida para modelar esses jogadores virtuais, uma vez que o seu paradigma baseia-se nos conceitos fundamentais que facilmente mapeiam a linguagem que as pessoas usam para descrever o seu raciocínio e as ações na vida cotidiana (Rao e Georgeff, 1991). VIP-JogoMan é um jogo baseado em computador, em que as pessoas jogam via *web*. Os jogadores podem estar em lugares diferentes e não existe uma limitação em relação ao número mínimo de jogadores reais. A arquitetura do Vip-JogoMan é apresentada na figura 5.

**FIGURA 5**  
**Arquitetura do Vip-Jogoman**



Fonte: Adamatti, Sichman e Coelho (2009).

Nessa aplicação, as simulações baseadas em agentes foram realizadas utilizando Cormas, descrito na seção 4.6 (Bousquet *et al.*, 1998). O objetivo da aplicação, conforme mencionado na seção 2.3, foi a implementação da simulação participativa. A validação foi abordada por questionários e pela comparação do número de negociações entre os agentes, em diferentes configurações, com ou sem a presença de agentes virtuais.

Em síntese, os resultados obtidos demonstraram que a utilização de perfis comportamentais baseados na arquitetura BDI para modelar e implementar jogadores virtuais parece estar bem adaptada para tornar suas decisões críveis, visto que a maioria dos jogadores reais não identificou os jogadores virtuais durante os testes. Além disso, em algumas situações particulares, a simples presença de jogadores virtuais aumentou o número de negociações entre os agentes.

Essa aplicação é uma ilustração de como a utilização de técnicas de MABS, combinada com RPG, pode ajudar a concertação de atores sociais com o objetivo de melhorar a qualidade da água em regiões metropolitanas, por exemplo.

## 7 CONCLUSÕES

Neste capítulo, abordou-se a questão de como construir modelos operacionais e implementações de sistemas complexos. Foram descritos vários instrumentos e técnicas que podem ser utilizados para este objetivo. Este estudo concentrou-se nas plataformas MABS por acreditar que elas são as ferramentas mais adequadas para implementar tais sistemas.

Sobre o importante papel da simulação na ciência, utilizou-se a influente opinião de Axelrod (1997) para concluir este capítulo:

A simulação é uma terceira forma de fazer ciência. Como dedução, ela começa com um conjunto de pressupostos explícitos. Mas, ao contrário de dedução, ela não prova teoremas. Em vez disso, uma simulação gera dados que podem ser analisados induitivamente. Ao contrário de indução típica, no entanto, os dados simulados vêm de um conjunto rigorosamente definido de regras, ao invés de uma medição direta do mundo real. Embora a indução possa ser usada para encontrar padrões em dados e a dedução possa ser usada para encontrar consequências de suposições, a modelagem por simulação pode ser usada como um auxílio à intuição.

## REFERÊNCIAS

- ADAMATTI, D. F.; SICHMAN, J. S.; COELHO, H. An analysis of the insertion of virtual players in GMABS methodology using the Vip-Jogo Man prototype. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 12, n. 3, 2009.
- ALLAN, R. J. **Survey of agent based modelling and simulation tools**. Swindon: Science and Technology Facilities Council, 2010.
- AMBLARD, F. Construire des sociétés artificielles pour comprendre les phénomènes sociaux réels. **Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales**, v. 5, n. 2, p. 69-77, 2010.
- AXELROD, R. Advancing the art of simulation in the social sciences. In: Conte, R.; Hegselmann, R.; Terna, P. **Simulating social phenomena**. Berlin, Springer 1997. v. 456. p. 21-40.
- BARRETEAU, O. The joint use of role-playing games and models regarding negotiation processes: characterization of associations. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 6, n. 2, 2003.
- BORGATTI, S. P.; EVERETT, M. G.; FREEMAN, L. C. **Ucinet for windows**: software for social network analysis. Massachusetts: Analytic Technologies, 2002.
- BOUSQUET, F. et al. Cormas: Common-pool resources and multi-agent systems. In: DEL POBIL, A. P.; MIRA, J.; MOONIS, A. (eds.). **Tasks and methods in applied artificial intelligence**. London, Springer 1998. p. 826-837.
- CARRINGTON, P. J.; SCOTT, J.; WASSERMAN, S. **Models and methods in social network analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- CASTELFRANCHI, C.; MICELLI, M.; CESTA, A. Dependence relations among autonomous agents. In: WERNER, E.; DEMAZEAU, Y. **Decentralized A. I. 3**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 1992. p. 215-227.
- CASTLE, C. J. E.; CROOKS, A. T. **Principles and concepts of agent-based modelling for developing geospatial simulations**. Technical report, Centre for Advanced Spatial Analysis. London: University College London, 2006.
- CONTE, R.; CASTELFRANCHI, C. **Mind is not enough**: precognitive bases of social interaction. In: NIGEL, G. (ed.). **PROCEEDINGS OF 1992 SYMPOSIUM ON SIMULATING SOCIETIES**, Guildford, UK, Apr. 1992, p. 93-110.
- CONTE, R.; PEDONE, R. Finding the best partner: the partnet system. In: SICHMAN, J. S.; CONTE, R.; GILBERT, N. **Multi-agent systems and agent-based simulation**. Berlin: Springer-Verlag, 1998. v. 1534 of lecture notes in artificial intelligence. p.156-168.

DAVID, N. *et al.* The structure and logic of interdisciplinary research in agent-based social simulation. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 7, n. 3, 2004. Disponível em: <<http://goo.gl/AMdzuC>>.

DAVIDSSON, P. Agent based social simulation: a computer science view. **Journal of artificial societies and social simulation**, v. 5, n. 1, 2002.

DORAN, J. Simulating collective misbelief. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 1, n. 2, 1998. Disponível em: <<http://goo.gl/UXVGyZ>>.

EPSTEIN, J. M.; AXTELL, R. **Growing artificial societies**: social science from the bottom up. Cambridge: MIT PRESS, 1996.

EVERTON, S. F. **Disrupting dark networks**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

FEHLER, M.; KLÜGL, F.; PUPPE, F. Approaches for resolving the dilemma between model structure refinement and parameter calibration in agent- based simulations. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON AUTONOMOUS AGENTS AND MULTIAGENT SYSTEMS, 5, 2006, Hakodate, Japan. Japan: ACM, 2006.

FERBER, J. **Les systèmes multi-agents**: vers une intelligence collective. Paris: InterEditions, 1995.

GRETZEL, U. **Social network analysis**: introduction and resources. Technology Studies in Education, 2001. Acesso em: 30 nov. 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/iIDNS>>.

GRIGNARD, A. *et al.* Gama 1.6: advancing the art of complex agent- based modeling and simulation. In: BOELLA, G. *et al.* CONFERENCE ON PRINCIPLES AND PRACTICE OF MULTI-AGENT SYSTEMS, Berlin Heidelberg, Springer 2013. p. 117-131. v. 8291.

GRIMM, V. *et al.* A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. **Ecological Modelling**, v. 198, n. 1-2, p. 115-126, 2006.

\_\_\_\_\_. The ODD protocol: a review and first update. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 23, p. 2760-2768, 2010.

GUPTA, A.; KAPUR, V. **Microsimulation in government policy and fore-casting**. New York: Elsevier Science Inc., 2000.

GUYOT, P.; HONIDEN, S. Agent-based participatory simulations: merging multi-agent systems and role-playing games. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 9, n. 4, p. 8, 2006.

HALL, M. *et al.* The weka data mining software: an update. **ACM SIGKDD explorations newsletter**, v. 11, n. 1, p. 10-18, 2009.

HANNEMAN, R. A.; RIDDLE, M. **Introduction to social network methods**. Riverside: University of California, 2005.

HASSAN, S.; PAVON, J.; NIGEL, N. **Injecting data into simulation**: can agent-based modelling learn from microsimulation. In: WORLD CONGRESS OF SOCIAL SIMULATION, George Mason University, Fairfax, 2008.

HEGSELMANN, R. Social science simulation: origin, prospects, purposes. In: CONTE, R.; HEGSELMANN, R.; TERNA, P. **Simulating social phenomena**. Berlin: Springer-Verlag, 1997.

HOFMANN, M. On the complexity of parameter calibration in simulation models. **The Journal of Defense Modeling and Simulation**, Applications, Methodology, Technology, v. 2, n. 4, p. 217-226, 2005.

HUISMAN, M.; VAN DUIJN, M. A. J. Software for social network analysis. In: CARRINGTON, P. J.; SCOTT, J.; WASSERMAN, S. **Models and Methods in Social Network Analysis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. p. 270-316.

KIRSCHNER, A. **Overview of common social network analysis software platforms**. San Francisco: Monitor Group, 2008. Acesso em: 30 nov. 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/gWLKFc>>.

LUKE, S. *et al.* Mason: a multiagent simulation environment. **Simulation**, v. 81, n. 7, p. 517-527, 2005.

MINAR, N. *et al.* **The swarm simulation system**: a toolkit for building multi-agent simulations. Santa Fe: Santa Fe Institute, 1996. Technical report.

MITCHELL, T. **Machine Learning**. London: McGraw-Hill Book Co., 1997.

MONTEIRO, J. L. R. **Simulação de parcerias entre agentes**: uma extensão do sistema Part-Net. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MONTEIRO, J. L. R.; SICHMAN, J. S. Partnet++: simulating multiple agent partnerships using dependence graphs. In: SICHMAN, J. S.; ANTUNES, L. **Multi-Agent-Based Simulation VI**. Berlin: Springer-Verlag, 2005. p. 14-25.

NAJLIS, R.; JANSEN, M. A.; PARKER, D. C. Software tools and communication issues. In: PARKER, D. C.; BERGER, T.; MANSON, S. M. **Meeting the Challenge of Complexity**: Proceedings of a Special Workshop on Land-Use - Land-Cover Change. California: Irvine, 2001.

NARDIN, L. G.; SICHMAN, J. S. **Trust-based coalition formation**: a multiagent-based simulation. In: WORLD CONGRESS ON SOCIAL SIMULATION, 4, Taipei, Taiwan, Sept. 2012.

NIGEL, G.; BANKES, S. Platforms and methods for agent-based modeling. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 99, Suppl. 3, p. 7197-7198, 2002.

NIGEL, G.; CONTE, R. **Artificial societies**: the computer simulation of social life. London: UCL Press, 1995.

NIGEL, G.; TROITZSCH, K. **Simulation for the social scientist**. New York: McGraw-Hill International, 2005.

NIKOLAI, C.; MADEY, G. Tools of the trade: a survey of various agent based modeling platforms. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 12, n. 2, p. 2, 2009.

NORTH, M. J.; COLLIER, N. T.; VOS, J. R. Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. **ACM**, v. 16, n. 1, p. 1-25, Jan. 2006.

NORTH, M. J. et al. **The repast symphony runtime system**. In: AGENT 2005 CONFERENCE ON GENERATIVE SOCIAL PROCESSES, MODELS, AND MECHANISMS. Argonne: Argonne National Laboratory, 2005.

NUNO, D.; SICHMAN, J. S.; COELHO, H. The logic of the method of agent-based simulation in the social sciences: empirical and intentional adequacy of computer programs. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 8, n. 4, p. 2, 2005.

NUNO, D. et al. The structure and logic of interdisciplinary research in agent-based social simulation. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 7, n. 3. 2004. Disponível em: <<http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/7/3/4.html>>.

PARKER, D. C. **Object oriented packages for agent-based modelling**. 2001. Disponível em: <<http://goo.gl/R3Fv0s>>. Acesso em: oct. 2005.

PARUNAK, H. V. D.; SAVIT, R.; RIOLO, R. L. Agent-based modeling vs. equation-based modeling: a case study and users' guide. In: SICHMAN, J. S.; CONTE, R.; GILBERT, N. Multi-agent systems and agent-based simulation. 1<sup>st</sup> International Workshop, Paris, France, July, 1998. **Proceedings**, v. 1534 of Lecture Notes in Computer Science, p. 10-25, Springer 1998.

RAILSBACK, S. F.; LYTTINEN, S. L.; JACKSON, S. K. Agent-based simulation platforms: review and development recommendations. **Simulation**, v. 82, n. 9, p. 609-623, 2006.

RAO, S. R.; GEORGEFF, M. P. **Modeling rational agents within a BDI-architecture.** In: FIKES, R.; SANDEWALL, E. INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRINCIPLES OF KNOWLEDGE REPRESENTATION AND REASONING, 3, San Mateo, United States 1991. California: Morgan Kaufmann Publishers, Inc. p. 473-484.

SICHMAN, J. S. Mabs celebrates its 10th anniversary! In: ANTUNES, L.; PAOLUCCI, M.; NORLING, E. **Multi-Agent-Based Simulation International Workshop**, 8, Honolulu, Estados Unidos, May 2007. Revised and Invited Papers, v. 5003 of Lecture Notes in Artificial Intelligence, Berlin, Springer-Verlag, 2008. p. 1-7.

SICHMAN, J. S. *et al.* **A social reasoning mechanism based on dependence networks.** In: COHN, T. EUROPEAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 11, Amsterdam, The Netherlands, Aug. 1994. New Jersey: John Wiley & Sons Ltd. p. 188-192.

STERMAN, J. D. **Business Dynamics- Systems thinking and modeling for a complex world.** United States: Irwin McGraw-Hill, 2000.

TOBIAS, R.; HOFMANN, C. Evaluation of free java-libraries for social-scientific agent based simulation. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 7, n. 1, p. 6, 2004.

WASSERMAN, S.; FAUST, K. **Social network analysis:** methods and applications. Cambridge: University Press, 1994.

WILENSKY, U. **Netlogo.** 1999. Acesso em: 30 nov. 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/XUCn5>>.

WINDRUM, P.; FAGIOLO, G.; MONETA, A. Empirical validation of agent-based models: Alternatives and prospects. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 10, n. 2, p. 8, 2007.

WITTEN, I. H.; EIBE, F. **Data mining:** practical machine learning tools and techniques. The Morgan Kaufmann series in data management systems, 3rd ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2011.

WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to multi-agent systems.** Baffins Lane: John Wiley & Sons Ltd., 2002.

The background image shows an aerial view of a city at night, with numerous streetlights and building lights creating a complex network of glowing lines and points against a dark sky.

## PARTE II

Objetos de Políticas Públicas e a  
Abordagem de Sistemas Complexos



## CAPÍTULO 6

# O AMBIENTE COMO SISTEMA SOCIONATURAL, DINÂMICO E COMPLEXO: OPORTUNIDADES E DESAFIOS DE POLÍTICAS PÚBLICAS NA PROMOÇÃO DA SUSTENTABILIDADE GLOBAL<sup>1</sup>

Masaru Yarime<sup>2</sup>  
Ali Kharrazi<sup>3</sup>

Os sistemas complexos são caracterizados pelas interações entre os agentes heterogêneos e o ambiente que os envolve, a emergência e a auto-organização, a importância da não linearidade e da escala, o uso de regras simples, a ênfase na dinâmica e no *feedback*, além de conceitos de adaptação, aprendizado e evolução (Furtado e Sakowski, 2014). Nesse sentido, o ambiente pode ser visto como um sistema complexo, no qual os insumos, tais como materiais, energia e espécies biológicas, passam por transformações complexas, envolvendo interações naturais e sociais e gerando produtos como resultado (Fath, 2015). É crucial que, durante este processo, o ambiente perdure e mantenha suas funções vitais na presença de vários tipos de flutuações e distúrbios, os quais envolvem um considerável grau de incerteza.

Os desafios ambientais atuais exigem novas abordagens de pesquisa, que incluem a dimensão humana como questão central ao se estudar o ambiente natural (Bodin e Tengo, 2012). Assim, é cada vez mais aceito que o ambiente deve ser entendido como um conjunto de sistemas humanos e naturais acoplados – sistemas socioecológicos – envolvendo diversos padrões e processos complexos (Ostrom, 2009). Dessa forma, uma análise adequada requer a integração efetiva dos conceitos e metodologias empregados em ciências naturais e sociais. Enquanto vários conceitos qualitativos foram recentemente desenvolvidos a fim de integrar a sociedade humana com a natureza, há espaço relevante para avançar no progresso em relação a abordagens teóricas e metodológicas para examinar quantitativamente as complexidades das interações e da interdependência entre sociedade e natureza.

1. Tradução de Nilo Saccaro Júnior, Patrícia A. M. Sakowski, Júlio César Roma e Bernardo Alves Furtado.

2. Graduate School of Public Policy (GraSPP), University of Tokyo, Japan; Department of Science, Technology, Engineering and Public Policy (STEaPP), University College London, United Kingdom. *E-mail*: <yarimemasa@gmail.com>.

3. Graduate School of Public Policy (GraSPP), University of Tokyo, Japan.

Estudos de caso recentes em diferentes partes do mundo revelam que o acoplamento entre sistemas humanos e sistemas naturais varia de acordo com o espaço, o tempo e as unidades organizacionais (Jianguo *et al.*, 2007). Ela exibe características fundamentais dos sistemas complexos, incluindo dinâmica não linear com limites, retroalimentação mútua, defasagens temporais, resiliência, heterogeneidade e surpresas. Sistemas humanos e naturais acoplados no passado também influenciam as condições presentes e as futuras possibilidades. Por isso é importante tratar o nosso meio ambiente como um sistema complexo adaptativo, sendo sua sustentabilidade um processo contínuo e dinâmico, não um estado estático do sistema. Isso tem implicações significativas para o desenho de políticas públicas.

A ciência da sustentabilidade ambiental tem sido proposta como um novo campo acadêmico, com o objetivo específico de compreender o caráter essencial das interações complexas entre sistemas naturais e sociais (Kates *et al.*, 2001; Clark e Dickson, 2003; Komiyama e Kazuhiro, 2006; Kajikawa *et al.*, 2007; Jerneck *et al.*, 2011; Yarime *et al.*, 2012). Os interesses primários da ciência da sustentabilidade incluem interações dinâmicas entre sistemas naturais, humanos e sociais; vulnerabilidade ou resiliência do sistema natureza-sociedade; o significado científico de fronteiras ou limites; estruturas de incentivo envolvendo mercados, regras, normas e informações científicas; e integração de sistemas operacionais para monitoramento das condições ambientais e sociais. Por isso, o desafio da sustentabilidade exige um uso adequado e eficaz de dados, informação e conhecimento sobre diversos aspectos, que vão desde o ambiente natural até a economia e a sociedade (Yarime *et al.*, 2010).

Como uma ampla gama de disciplinas acadêmicas – incluindo as ciências naturais, a engenharia e as ciências sociais – está envolvida na ciência da sustentabilidade, foram propostos até agora vários tipos de conceitos e metodologias. Apesar da diversidade de abordagens, o caráter sistêmico da sustentabilidade é enfatizado na maioria das vezes. Muitas questões relacionadas à sustentabilidade são mutuamente conectadas e interdependentes: alterações climáticas e perda de biodiversidade estão entre os principais exemplos de interações complexas, que exigem compreensão e intervenção sistêmicas. Reconhece-se também que horizontes temporais longos são fundamentais para a sustentabilidade. Como ela se refere aos impactos e às influências no futuro, processos dinâmicos de mudança e transformação são de importância crítica, com a questão da equidade entre diferentes gerações inherentemente envolvida. A dimensão da pesquisa orientada para a ação também é enfatizada. A implementação do conhecimento nas estratégias e políticas públicas é explicitamente esperada ao se tratar dos desafios ambientais que pressionam nossas sociedades.

A abordagem de sistemas, quando aplicada à sustentabilidade, nos obriga a levar em conta a relação entre a sustentabilidade do sistema e a renovação de componentes (Voinov e Farley, 2007; Voinov, 2008). Sistemas fazem parte de hierarquias, em que os níveis mais elevados são constituídos por subsistemas de níveis mais baixos, e a renovação de componentes é um fator importante de adaptação e evolução. Se um sistema é sustentado por muito tempo, ele empresta sustentabilidade de um nível hierárquico mais alto e sustenta, por sua vez, os sistemas de níveis mais baixos. Ao sustentar certos sistemas para além do seu ciclo de renovação, a sustentabilidade do sistema superior pode vir a ser comprometida. Isso fica bem ilustrado por organismos biológicos quando submetidos à contínua reposição de componentes ao nível celular. Do mesmo modo, o colapso e a renovação de empresas e indústrias seriam considerados necessários para manter a vitalidade do sistema econômico maior em uma economia capitalista, como discutido na teoria da destruição criativa de Schumpeter.

Para analisar sistematicamente a complexidade de sistemas naturais e sociais acoplados, é útil considerá-los como redes (Janssen *et al.*, 2006). Os ecossistemas, por exemplo, podem ser considerados como fluxos em redes de materiais ou energia, tais como cadeias alimentares ou troca de nutrientes (Ulanowicz, 1986). Para sistemas socionaturais, um referencial teórico baseado no rápido crescimento de pesquisa interdisciplinar em redes complexas tem sido desenvolvido para definir e formalizar maneiras pelas quais as sociedades e a natureza são interdependentes (Bodin e Tengo, 2012). Um conjunto de blocos de construção básicos, cada um dos quais representando uma relação socioecológica simplificada entre dois atores sociais e dois recursos ecológicos, pode mostrar todos os padrões possíveis para um sistema socionatural caracterizado por conectividade social e ecológica, com compartilhamento e substituição de recursos. Baseada nessa unidade de análise, um estudo de caso empírico foi realizado na rede de uma comunidade agrícola rural no sul de Madagascar, utilizando-se conhecimentos teóricos relacionados com a gestão dos recursos de acesso comum e dinâmicas de metapopulação.

A dinâmica de sistemas em rede pode ser representada por dois aspectos complementares: crescimento e desenvolvimento (Fath, 2015). Crescimento é uma mudança quantitativa na propriedade de um sistema medido por uma variável extensível, tal como o produto total do sistema, qual seja, a soma de todas as trocas internas ao sistema e entre o sistema e seu exterior. Desenvolvimento é uma mudança qualitativa medida por uma variável intensiva, tal como informação, conectividade da rede ou presença de ciclos. Assim como na física, a capacidade total de dada característica é a combinação de quanto e qual qualidade, uma variável extensiva vezes uma intensiva. Assim, quando tentamos entender a natureza de um sistema em rede, é importante considerar tanto o crescimento quanto o desenvolvimento, em outras palavras, dimensões quantitativas e qualitativas.

Nessa perspectiva, podemos distinguir duas dimensões na sustentabilidade de sistemas socionaturais acoplados, ou seja, uma dimensão quantitativa ou extensiva e uma qualitativa ou intensiva, que descreve a robustez ou a resiliência de um sistema de fluxos de recursos (Kharrazi *et al.*, 2013).

Um número de processos naturais e também sociais tende a acelerar seu próprio crescimento de um modo que ativamente drena o sistema mais amplo (Ulanowicz, 1995). É, portanto, relevante entender o mecanismo dinâmico de *feedback* positivo que pode erodir a sustentabilidade do sistema. Esses processos incluem as seguintes fases: seleção, uma tendência natural a aumentar os elementos que incrementam o fluxo pelo circuito do epicentro e a eliminar os elementos que não o fazem; aumento da eficiência decorrente dessa seleção e eliminação; crescimento autoamplificador criado pelo aumento da eficiência, influxo e tração; erosão da rede circunjacente causada pela atração massiva de recursos para o *hub* do epicentro; fragilidade, causada pela eliminação da reserva de resiliência; e rigidez, causada pelo aumento de restrições sobre as opções e os comportamentos. Há muitos exemplos que podem demonstrar o funcionamento dessa dinâmica de *feedback* positivo no ambiente natural (Goerner, Lietaer e Ulanowicz, 2009). A atual proliferação massiva de algas no Golfo do México mostra o que acontece quando o crescimento sem controle em um circuito cria um vórtice de concentração de recursos, que corrói ativamente a rede mais ampla da qual a saúde sistêmica depende em última instância. Fertilizantes e resíduos agrícolas fluindo no rio Mississippi desencadearam o crescimento massivo de algas que esgotou quase todo o oxigênio na água, causando morte também em massa da vida marinha, particularmente peixes, camarões e mariscos.

Portanto, em resposta ao desafio de estabelecer a sustentabilidade do nosso ambiente como sistemas humanos-naturais acoplados, envolvendo interações complexas e dinâmicas, é cada vez mais aceito que os tomadores de decisão, tanto no setor público quanto no privado, precisam tomar a questão do fortalecimento/reforço/aumento da resiliência a sério, particularmente no contexto de mudanças climáticas e redução de risco de desastres (PwC, 2013; World Bank, 2013). Apesar de não haver uma definição única desse importante conceito, que pode ser aplicado universalmente, e além de os métodos para quantificar e mensurar o progresso desse conceito ainda estarem em sua infância, aqui conceituamos resiliência como o balanço entre eficiência e redundância (Goerner, Lietaer e Ulanowicz, 2009; Lietaer, Ulanowicz e Goerner, 2009; Ulanowicz *et al.*, 2009). Eficiência, por sua vez, é definida como a capacidade de desempenho da rede, de maneira organizada e eficaz, para manter sua integridade ao longo do tempo. Redundância é a reserva de posições flexíveis e diversidade de ações que podem ser usadas em conjunto para atender às exigências de distúrbios novos e à inovação necessária para o desenvolvimento atual e sua evolução. Entender o *tradeoff* entre eficiência e redundância para

manter a resiliência contribuiria para desenhar políticas públicas para o ambiente de forma mais balanceada.

O estudo da resiliência se desenvolveu de forma bastante independente em áreas acadêmicas distintas, incluindo particularmente a ecologia e a engenharia (Folke, 2006). Nesse sentido, a literatura atual sobre resiliência pode ser agrupada em duas definições gerais: a resiliência de engenharia e a resiliência adaptativa ou evolucionária (Holling, 1996).

Na resiliência de engenharia, o objetivo é desenvolver a capacidade de resistir a um estresse e de retornar ao que é considerado como estado normal. A resiliência na engenharia pode ser facilmente compreendida na sua aplicação à infraestrutura de transporte. Por exemplo, sob o estresse de uma forte tempestade de neve, inundação, incêndio ou terremoto, infraestruturas como pontes, estradas e rodovias são projetadas para suportar vários níveis de tal estresse e retornar a um estado normal de funcionamento. Nessa definição de resiliência, a ideia principal é restabelecer as condições normais.

Essa definição, no entanto, tem as suas limitações. Os sistemas que estão sujeitos a estresse, na verdade, podem continuar a sobreviver, mas em um estado notadamente diferente e distante de suas condições normais. Em outras palavras, o conceito de resiliência também precisa incluir o elemento de adaptabilidade. Aqui, o objetivo torna-se garantir a resiliência de uma função que faria com que o sistema continuasse a operar sob a existência de mudanças e distúrbios.

Várias funções vitais em nosso dia a dia, tais como o recolhimento de lixo, atendimento médico de emergência e policiamento, por exemplo, dispensam a noção de estado normal concreto. Em vez de manter um estado idêntico, a resiliência dessas funções precisa ser medida de acordo com sua capacidade de manter a entrega do serviço e a operação após um estresse ou choque na função do sistema urbano. Neste contexto, a resiliência não é um retorno para o que é percebido como normal, mas, ao contrário, indica uma capacidade adaptativa de se reorganizar numa estrutura operacional diferente, mantendo a função.

A resiliência adaptiva ou evolucionária permite que um sistema mantenha distintas configurações. Em estudos ecológicos isso é conhecido como múltiplos atratores, onde um ecossistema pode passar de uma configuração resiliente para outra, cada uma das quais com um equilíbrio ecológico distinto. A existência de múltiplos atratores não se limita aos ecossistemas e pode estar relacionada a todos os sistemas. Ao definir os possíveis atratores de um sistema, é possível prever com mais precisão qual configuração o sistema assumirá após uma perturbação ou estresse ao seu sistema. Isso é extremamente útil para a quantificação do aspecto adaptativo da resiliência. Identificar os vários atratores de um sistema, no entanto, é uma tarefa desafiadora. Em primeiro lugar, os registros de longo prazo do comportamento do sistema podem não estar disponíveis. Em segundo, um determinado sistema pode

ser simplesmente demasiado complexo para se identificarem seus vários atratores ou pode até mesmo evoluir para novos atratores. Em terceiro lugar, a magnitude e a natureza do estresse a um sistema podem ser únicas e sem precedência alguma.

Na ausência de uma medida confiável de resiliência, especialmente de resiliência adaptativa, precisamos entender as dimensões que influenciam a resiliência geral de um sistema. Os princípios para a construção de resiliência em sistemas sociais-ecológicos sugerem manter a diversidade e a redundância, administrar a conectividade, gerenciar as variáveis e os *feedbacks* lentos, promover o pensamento/a abordagem (*thinking*) de sistemas complexo adaptativos, incentivar a aprendizagem, ampliar a participação e promover os sistemas de governança policentrícos (Biggs, Schlueter e Schoon, 2015). Um exame cuidadoso desses princípios permitirá que os formuladores de política avaliem se a resiliência de um sistema está devidamente gerida e mantida. Abordagens particularmente importantes incluiriam o aumento da diversidade e redundância dos componentes de um sistema, a gestão da modularidade e da conectividade no sistema e a melhoria dos *feedbacks* dentro do sistema para resposta regulatória. O conhecimento dessas abordagens para um determinado sistema permite que os formuladores de políticas munidos dessas ferramentas poderosas para gerenciamento da resiliência (dentro de um sistema) suportem um choque ou perturbação, reduzam os riscos, melhorem a recuperação e aprimorem o *feedback* regulatório.

Diversidade é um conceito importante, com fortes aplicações em várias disciplinas. Como definição básica, diversidade é o grau de variação em um sistema. Isso pode incluir o grau de variação em componentes com funções semelhantes, o que pode ser chamado de diversidade funcional, e o grau de variação nos componentes com diferentes respostas a perturbações. Isso é a diversidade de resposta (Folke *et al.*, 2004). A diversidade permite que um sistema seja mais flexível em suas opções quando confrontado com uma perturbação.

Por exemplo, ao promover a diversidade em sistemas de energia, tanto em termos de produção como de consumo de energia, a resiliência desses sistemas será aumentada. Isso pode ser conseguido por meio da promoção da diversidade tecnológica, em que, para além das fontes de energia tradicionais de petróleo, gás natural, carvão, bem como as energias nuclear e hidrelétrica, novas tecnologias – a maioria relacionada a fontes de energia renováveis – são desenvolvidas e difundidas. Esses novos tipos de tecnologia incluem energia solar, eólica, geotérmica, biomassa e tecnologias de energia do oceano (*oceans power technologies*) para a geração de energia. A diversidade pode ainda ser promovida por meio de uma variedade ampla de fontes de energia em múltiplas escalas, por exemplo, painéis solares em lares de famílias ou pequenas e médias empresas explorando um parque eólico. A diversidade tanto em termos de tecnologia, ou seja, diversidade funcional, quanto em termos de diferentes escalas, ou seja, diversidade de resposta, permitirá uma resposta mais flexível a perturbações.

Da perspectiva da ecologia, a biodiversidade pode ser considerada como geradora de redundância e de eficiência simultaneamente e, assim, contribuir para o aumento da resiliência do sistema.<sup>4</sup> A biodiversidade pode tornar um sistema mais resistente a impactos, isto é, mais resiliente, ao permitir diferentes respostas e redundâncias. Redundância pode ser considerada como a habilidade de diferentes espécies de manter posições relevantes; dadas suas diferenças bioquímicas, morfológicas ou comportamentais, espécies distintas sofrem impactos de forma diferenciada para dado choque exógeno. Por outro lado, a biodiversidade permite a colonização de diferentes nichos; em outras palavras, espécies diferentes podem utilizar-se de diferentes formas de matéria e energia. Os resíduos gerados por uma espécie, por sua vez, podem ser usados como insumos por outras espécies. Isso permite ganhos de eficiência, pelo menos em certa medida. Diversidade excessiva em espécies biológicas poderia fazer com que as interações entre elas no ecossistema fossem tão complexas que a eficiência na transferência e uso de matéria e energia se reduziria após alcançar dado patamar. Em relação à transferência de matéria e energia, geralmente é mais eficiente quando a estrutura da rede de interações é relativamente simples e direta (Ulanowicz, Bondavalli e Egnatovich, 1996; Goerner, Lietaer e Ulanowicz, 2009).

A conectividade dentro de um sistema pode ser bem compreendida por meio da introdução do conceito de modularidade. Modularidade refere-se ao grau em que os componentes de um sistema podem ser decompostos em unidades individuais separadas, mas também combinados e recombinação. A modularidade pode ajudar a conter a propagação de um choque ou uma perturbação através de um sistema. Por exemplo, a probabilidade de conter o surto de vírus mortal ou um incêndio é maior com a implementação de mecanismos modulares, como quarentenas e aceiros. Um sistema com muita modularidade e um sistema com pouca modularidade possuem *tradeoffs* fundamentais. Por um lado, um sistema com muita modularidade não se beneficiará de economias de escala associadas a sistemas de maior escala. Por outro lado, um sistema com pouca modularidade pode ser propenso a falhas em cascata, em que um choque ou perturbação pode se espalhar com alta velocidade ao longo do sistema. No contexto dos sistemas energéticos, sistemas de energia distribuídos, em que a eletricidade é gerada a partir de muitas fontes de energia pequenas, são muito modulares. Atualmente, a maioria dos países gera eletricidade em grande escala e numa localização centralizada, como plantas de gás ou energia nuclear por exemplo. Embora essas plantas mantenham os benefícios associados a economias de escala, elas também não são seguras, são frágeis e propensas à falha no caso de uma perturbação. Um conceito relacionado a modularidade e sistemas de energia distribuída é o *micro-grid*. O *micro-grid*, que

4. Agradecemos ao técnico de Planejamento e Pesquisa do Ipea Nilo Saccaro Júnior por apontar esse aspecto da biodiversidade.

tem recebido atenção especial desde o apagão no Norte da Índia em 2012, prevê centros locais de geração, armazenamento e transmissão de energia que, ainda que conectados à rede centralizada tradicional, destinam-se essencialmente a uma área geográfica específica. Na esteira de uma perturbação ou um choque na rede centralizada, a conexão com os *micro-grids* pode ser desligada, e, posteriormente, o *micro-grid* pode funcionar de forma autônoma por conta própria. *Micro-grids* e sistemas de energia distribuídos permitem maior modularidade e, consequentemente, fornecimento de energia mais confiável e sem interrupções.

*Feedback* refere-se à transferência de mudanças em uma parte do sistema para outras partes. Um sistema resiliente mantém fortes mecanismos de *feedback* para identificar limiares e regular a capacidade do sistema de mover-se de uma trajetória para outra. A retroalimentação é um fenômeno comum em sistemas naturais. Especialmente na biologia evolutiva e em flutuações ecológicas, mecanismos de *feedback* são fundamentais para a resiliência e a sobrevivência dos sistemas. *Feedbacks* levam à aprendizagem e auto-organização para diferentes soluções ou atratores, conforme surgem novas condições. Nos sistemas de energia tradicionais, há pouco *feedback* regulatório. Especificamente, há pouca informação em tempo real sobre o nível de oferta e demanda de energia. Essa falta de informação exige um constante excesso de oferta de eletricidade, incorrendo em altos custos. Além disso, sem informação dinâmica, há pouco controle regulatório do sistema para evitar colapso em caso de uma perturbação. Para atender à necessidade de *feedback* regulatório nos sistemas de energia, as assim chamadas tecnologias inteligentes atualmente são cada vez mais utilizadas para esse fim. Os contadores inteligentes envolvem sensores em tempo real que permitem a comunicação de duas vias entre o contador e o sistema central, funcionando como a chave do sistema de rede inteligente proposto. Nesse contexto, uma malha inteligente é uma rede elétrica modernizada que aproveita o *feedback* constante de informação de todos os seus medidores e sensores e concebe reação regulatória rápida ao comportamento tanto tecnológico como humano. Espera-se que essas tecnologias de energia inteligentes melhorem a resiliência dos sistemas de energia e contribuam para os três objetivos de energia sustentável, ou seja, o acesso à energia para todos, o aumento da eficiência energética e a promoção da energia renovável (UN, 2012b; 2014).

A abordagem baseada em informações ecológicas, derivada da teoria de probabilidades e da teoria dos grafos, pode ser utilizada para analisar quantitativamente a estrutura geral de um sistema em que os nós são conectados uns aos outros por meio de fluxos entre si em uma rede (Kharrazi *et al.*, 2013; 2014).

Essa abordagem adota um paradigma orientado a sistema que enfatiza propriedades holísticas de uma rede. Essas propriedades podem não ser evidentes ao se abordarem partes da rede de forma isolada, requerendo, em vez disso, que se

considerem as transferências entre os nós. Esta abordagem encontra-se bem estabelecida na ecologia, por exemplo, para o estudo de cadeias alimentares, para a comparação de ecossistemas e em medições de níveis de estresse em um ecossistema. Esta abordagem tem sido aplicada recentemente para se explorar quantitativamente a resiliência de sistemas em rede, a partir da perspectiva de suas relações estruturais e organizacionais (Goerner, Lietaer e Ulanowicz, 2009; Lietaer, Ulanowicz e Goerner, 2009; Ulanowicz *et al.*, 2009).

Embora a abordagem baseada em informações ecológicas tenha sido aplicada principalmente a sistemas ecológicos, até o momento houve escassas tentativas de aplicá-la a sistemas socionaturais acoplados (Bodini, Bondavalli e Stefano, 2012; Tumilba e Masaru, 2015). As características de sistemas socionaturais podem ser investigadas em detalhes ao se utilizar esta metodologia. Particularmente, seria muito útil explorar a aplicabilidade dos critérios normativos que derivaram de sistemas ecológicos sustentáveis para se avaliar a sustentabilidade de sistemas socio-naturais. As tendências nas medições ao nível do sistema também podem revelar as dimensões de eficiência e redundância da resiliência de tais sistemas complexos, a partir de uma perspectiva de longo prazo. Uma análise de sistemas socionaturais complexos por meio da abordagem baseada em informações ecológicas seria mais bem ilustrada no campo da rede de recursos.

Redes globais de recursos, com a natureza entrelaçada dos impactos ambientais da produção, comércio e consumo, apresentam lacunas significativas de conhecimentos relativos às complexas conexões e interações em sistemas socionaturais (Tukker e Bart, 2006). A contabilidade da pegada ecológica tem sido proposta como uma ferramenta abrangente de contabilidade de recursos, que compara a demanda por recursos e serviços naturais renováveis à capacidade da biosfera em gerá-los (Borucke *et al.*, 2013).

Como a pegada ecológica é uma medida do consumo que incorpora informações sobre a produção nacional e o comércio internacional, a comparação da demanda total, isto é, a pegada ecológica do consumo, com a demanda suprida pela produção nacional, que é a pegada ecológica da produção, e a capacidade regenerativa da biosfera nacional – a biocapacidade – permitem a classificação e a avaliação de risco em um país (Hill *et al.*, 2014).

A diferença entre as pegadas ecológicas do consumo e da produção representa o comércio líquido de recursos naturais e serviços renováveis de um país, que estariam sujeitos a riscos relacionados à disponibilidade e aos preços dos recursos nos mercados internacionais. Por sua vez, a diferença entre a pegada ecológica da produção e a biocapacidade representa ou um uso excessivo de áreas terrestres e marinhais bioprodutivas nacionais ou uma dependência de bens comuns globais para absorver resíduos sob a forma de emissões de dióxido de carbono.

Países diferentes apresentam uma grande variedade de perfis de recursos (UN, 2012a). Por exemplo, o Brasil possui a maior biocapacidade entre todos os países do mundo e, portanto, é um credor nestes termos. Em contraste, o Japão exige sete vezes mais biocapacidade do que possui em suas fronteiras. Há também contrastes significativos na forma como as situações de pegada ecológica e biocapacidade evoluíram entre os países. Enquanto a pegada ecológica do Japão manteve-se estável ao longo das últimas duas décadas, a biocapacidade do Brasil caiu para menos da metade daquela existente há vinte anos, devido aos seus crescentes consumo e exportações. Como o papel do comércio varia de um país para outro, o Brasil é um exportador líquido de *commodities* derivadas de recursos naturais, como medido por sua biocapacidade, ao passo que o Japão é um importador líquido.

Como ilustrado na abordagem da pegada ecológica, abordagens anteriores utilizadas para quantificar a sustentabilidade dos sistemas socionaturais acoplados tendiam a concentrar-se na contabilidade de vários tipos de volume, abordando primariamente a disponibilidade de recursos e a quantidade de consumo (Kharrazi *et al.*, 2014). Consequentemente, a atenção principal esteve em como aumentar o crescimento de um sistema, sem considerar suficientemente os efeitos negativos do crescimento excessivo. A sustentabilidade, no entanto, também requer resiliência como uma dimensão crítica para manter o funcionamento do sistema, por resistir a descontinuidades e perturbações. Como as origens da produção, rotas de comércio e destinos de consumo final dos recursos constituem uma rede muito complexa, a abordagem baseada em informações ecológicas pode oferecer uma estrutura útil para se examinar a resiliência dos sistemas globais de recursos com medidas quantitativas.

Os sistemas globais de recursos podem ser entendidos como redes com nós de países e fluxos de água, energia, biodiversidade e vários tipos de recursos naturais incorporados nos bens comercializados entre diferentes países do mundo. Uma melhor compreensão das redes globais destes recursos naturais, o que coletivamente pode ser chamado de capital natural, nos permite avaliar a resiliência do complexo sistema socioecológico. Embora pesquisadores tenham tradicionalmente utilizado análises *input-output* de uma única região para capturar os fluxos incorporados, a globalização acelerada de atividades econômicas tornou a produção e o consumo espacialmente separados. Apesar do aumento da conectividade econômica global, os consumidores não evoluíram alinhadamente à origem da produção, e as relações entre origem e destino tornaram-se obscuras e difíceis de observar. Estudos comparando análises insumo-produto (*input-output*) que abordaram múltiplas regiões àquelas de uma única região demonstraram que multiplicadores e concretizações entre estes dois métodos podem diferir substancialmente (Wiedmann *et al.*, 2007).

A abordagem baseada em informações ecológicas pode ser aplicada para se analisar a resiliência estrutural de sistemas em rede em que fluxos virtuais de recursos se conectem de maneiras complexas. A partir desta perspectiva, podemos considerar a possibilidade de absorver choques e perturbações nos sistemas globais de recursos por meio de redes de comércio conectando diferentes países e regiões com diferentes dotações e ambientes. Isto poderia ser considerado como uma analogia a centrais elétricas virtuais conectadas entre si em diferentes locais e com diferentes características. Devido à diversidade de características dos países e regiões no que diz respeito às condições econômicas, sociais e ambientais, a sustentabilidade dos sistemas globais de recursos pode ser promovida por meio de redes que envolvam diversas localizações geográficas.

De modo mais geral, essa abordagem de promover a sustentabilidade dos sistemas socionaturais por meio de redes de governança terá implicações significativas para políticas públicas em nível global. Essa governança pretende abordar o grande desafio da sustentabilidade global por meio da identificação de potenciais e problemas em diferentes locais nas redes, dependendo das disponibilidades e especificidades do capital natural, incluindo reservas de energia, escassez de água e biodiversidade. Ao buscar complementaridades entre pontos fortes e pontos fracos presentes nas redes a partir de uma perspectiva sistêmica, seria possível coordenar tecnologias, comportamentos e instituições de forma coletiva, de modo que melhore a sustentabilidade do sistema como um todo. As possibilidades e os desafios acarretam implicações para as políticas públicas na busca da sustentabilidade tanto em nível nacional como global.

A sustentabilidade do nosso ambiente como um sistema socionatural complexo requer que o sistema seja durável e estável por gerações, com uma capacidade suficiente de resiliência. Pesquisas recentes sobre mudança, perturbação, incerteza e adaptabilidade no campo da ciência da sustentabilidade enfatizam a capacidade de se reorganizar e de se recuperar a partir da mudança e da perturbação sem um colapso do sistema; em outras palavras, é preciso estabelecer um sistema que resista mesmo com a ocorrência de falhas (Ahern, 2011). Estratégias e políticas públicas para a construção de capacidade de resiliência incluiriam multifuncionalidade, redundância e modularização, bio e biodiversidade, redes multiescalares e conectividade, bem como planejamento e *design* adaptativos.

No contexto do estabelecimento de governança para a sustentabilidade, a governança do sistema Terra é entendida como “a soma dos sistemas de regras formais e informais e redes de atores em todos os níveis da sociedade humana, que são estabelecidas de modo a influenciar a coevolução dos sistemas humano e natural, de uma forma que assegure o desenvolvimento sustentável da sociedade humana” (Biermann, 2007). A governança para a sustentabilidade, portanto, pode

ser definida como redes formais e informais com interações entre atores e sistemas compostos por eles, que influenciam a sustentabilidade pela integração de várias dimensões (Shiroyama *et al.*, 2012). Consequentemente, a governança em rede para a sustentabilidade requer a integração de conhecimento como um meio de lidar com dimensões diversas e incertas da sustentabilidade, além da governança de múltiplos atores, envolvendo colaborações público-privadas e interações multiníveis. Isso é crucial para o consenso sobre ações concretas entre diferentes *stakeholders* na concepção e estabelecimento de sistemas sustentáveis. Como nosso ambiente é inherentemente imbuído em sistemas humano-naturais acoplados, com todas suas complexidades e incertezas, qualquer implementação de política que almeje alcançar a sustentabilidade desses sistemas requer engajamento sério e colaboração ativa dos *stakeholders*, que contribuirão para culminar nas transformações sociais necessárias.

## REFERÊNCIAS

- AHERN, J. From Fail-Safe to Safe-to-Fail: sustainability and resilience in the new urban world. **Landscape and Urban Planning**, v. 100, p. 341-343, 2011.
- BIERMANN, F. Earth system governance as a crosscutting theme of global change research. **Global Environmental Change**, v. 17, n. 3-4, p. 326-337, 2007.
- BIGGS, R.; SCHLUETER, M.; SCHOON, M. L. **Principles for building resilience**: sustaining ecosystem services in social-ecological systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- BODIN, Ö.; TENGÖ, M. Disentangling intangible social-ecological systems. **Global Environmental Change**, v. 22, n. 2, p. 430-439, 2012.
- BODINI, A.; BONDAVALLI, C.; STEFANO, A. Cities as ecosystems: growth, development and implications for sustainability. **Ecological Modelling**, v. 245, p.185-198, 2012.
- BORUCKE, M. *et al.* Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: the national footprint accounts underlying methodology and framework. **Ecological Indicators**, v. 24, n. 0, p. 518-533, 2013.
- CLARK, W. C.; DICKSON, N. M. Sustainability science: the emerging research program. **Proceedings of National Academy of Science**, v. 100, n. 14, p. 8059-8061, 2003.
- FATH, B. D. Quantifying economic and ecological sustainability. **Ocean & Coastal Management**, v. 108, p. 13-19, 2015.
- FOLKE, C. Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. **Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions**, v. 16, n. 3, p. 253-267, 2006.

- FOLKE, C. *et al.* Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 35, n. 1, p. 557-581, 2004.
- FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M. Complexity: a review of the classics. **Policy and Complex Systems**, v. 1, n. 2, p. 3-18, 2014.
- GOERNER, S. J.; LIETAER, B.; ULANOWICZ, R. E. Quantifying economic sustainability: implications for free-enterprise theory, policy and practice. **Ecological Economics**, v. 69, p. 76-81, 2009.
- HILL, C. *et al.* Towards a new framework to account for environmental risk in sovereign credit risk analysis. **Journal of Sustainable Finance & Investment**, v. 4, n. 2, p. 147-160, 2014.
- HOLLING, C. S. Engineering resilience versus ecological resilience. In: SCHULZE, P. (Ed). **Engineering within ecological constraints**. Washington: National Academy Press, 1996.
- JANSSEN, M. A. *et al.* Toward a network perspective of the study of resilience in social-ecological systems. **Ecology and Society**, v. 11, n.1, 2006.
- JERNECK, A. *et al.* Structuring sustainability science. **Sustainability Science**, v. 6, p. 69-82, 2011.
- KAJIKAWA, Y. *et al.* Creating an academic landscape of sustainability science: an analysis of the citation network. **Sustainability Science**, v. 2, p. 221-231, 2007.
- KATES, R. W. *et al.* Sustainability Science. **Science**, v. 292, n. 5517, p. 641-642, 2001.
- KHARRAZI, A. *et al.* Quantifying the sustainability of economic resource networks: an ecological information-based approach. **Ecological Economics**, v. 90, p. 177-186, 2013.
- \_\_\_\_\_. Advancing quantification methods of sustainability: a critical examination of emergy, exergy, ecological footprint, and ecological information-based approaches. **Ecological Indicators**, v. 37, p. 81-89, 2014.
- KOMIYAMA, H.; KAZUHIRO, T. Sustainability science: building a new discipline. **Sustainability Science**, v. 1, n. 1, p. 1-6, 2006.
- LIETAER, B.; ULANOWICZ, R. E.; GOERNER, S. J. Options for managing a systemic bank crisis. **Sapiens**, v. 2, n. 1, p. 1-15, 2009.
- JIANGUO, L. *et al.* Complexity of coupled human and natural systems. **Science**, v. 317, p. 1513-1516, Sep. 2007.

OSTROM, E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. **Science**, v. 325, n. 5939, p. 419-422, 2009.

PWC – PRICEWATERHOUSECOOPERS. **Stimulating private sector engagement and investment in building disaster resilience and climate change adaptation:** recommendations for public finance support. London: PwC and Department for International Development, 2013.

SHIROYAMA, H. Governance for sustainability: knowledge integration and multi-actor dimensions in risk management. **Sustainability Science**, v. 7, p. 45-55, 2012.

TUKKER, A.; BART, J. Environmental impacts of products: a detailed review of studies. **Journal of Industrial Ecology**, v. 10, n. 3, p. 159-182, 2006.

TUMILBA, V.; MASARU, Y. Ecological network metrics in assessing sustainability of the philippine milkfish economic resource system. **Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation**, v. 8, n. 2, 2015.

ULANOWICZ, R. E. **Growth and development:** ecosystems phenomenology. Berlin: Springer, 1986.

\_\_\_\_\_. Utricularia's secret: the advantage of positive feedback in oligotrophic environments. **Ecological Modeling**, v. 79, p. 49-57, 1995.

ULANOWICZ, R. E.; BONDAVALLI, C.; EGNOTOVICH, M. S. **Network analysis of trophic dynamics in South Florida ecosystems.** United States: United States Geological Service The Cypress Wetland Ecosystem, 1996. (Annual Report to the U.S. Geological Survey).

ULANOWICZ, R. E. *et al.* Quantifying sustainability: resilience, efficiency and the return of information theory. **Ecological complexity**, v. 6, p. 27-36, 2009.

UN – UNITED NATIONS. **A new angle on sovereign credit risk E-RISC:** environmental risk integration in sovereign credit analysis. New York: United Nations, 2012a.

\_\_\_\_\_. **Sustainable energy for all:** a global agenda – pathways for concerted action toward sustainable energy for all. New York: United Nations, Apr. 2012b.

\_\_\_\_\_. **Report of the open working group of the general assembly on sustainable development goals.** New York: General Assembly; United Nations, 12 Aug. 2014.

VOINOV, A. Systems science and modeling for ecological economics. London: Academic Press, 2008.

VOINOV, A.; FARLEY, J. Reconciling sustainability, systems theory and discounting. **Ecological Economics**, v. 63, p. 104-113, 2007.

WIEDMANN, T. *et al.* Examining the global environmental impact of regional consumption activities – Part 2: review of input-output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade. **Ecological Economics**, v. 61, n. 1, p. 15-26, 2007.

WORLD BANK. **Building resilience**: integrating climate and disaster risk into development - lessons from world bank group experience. Washington: The World Bank, 2013.

YARIME, M. *et al.* Towards institutional analysis of sustainability science: a quantitative examination of the patterns of research collaboration. **Sustainability Science**, v. 5, n. 1, p. 115-125, 2010.

\_\_\_\_\_. Establishing sustainability science in higher education institutions: towards an integration of academic development, institutionalization, and stakeholder collaborations. **Sustainability Science**, v. 7, supplement 1, p. 101-113, 2012.



## CAPÍTULO 7

# A NATUREZA COMPLEXA DOS SISTEMAS SOCIAIS<sup>1</sup>

Claudio J. Tessone<sup>2</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

Em muitos casos, sistemas sociais e econômicos são compostos de agentes (sejam eles indivíduos, empresas, países etc.) cujas ações não podem ser analisadas isoladamente. Ao invés disso, o estado de cada agente (opinião, escolha, estado de saúde, riqueza) e comportamento concomitante são influenciados pelo estado de outros agentes. Como resultado de interações, as propriedades globais desses sistemas não são apenas o agregado do comportamento individual, mas mais ricas. Quando isso ocorre, tal sistema é considerado *complexo*.

Alguns aspectos de sistemas sociais exibem regularidades de grande escala, tal como o surgimento de línguas, normas sociais e traços culturais. Eles também apresentam heterogeneidades persistentes, tais como segregação social e desigualdade de distribuição de riqueza. Em alguns casos, eles manifestam padrões evolutivos, como ondas de adoção de produtos, picos de atenção na mídia social, propagação de doenças, ou falências bancárias em cascata durante crises financeiras. Todos esses são exemplos paradigmáticos de sistemas que podem ser estudados pelo recurso a modelos estilizados, cujos componentes são simples, apesar de suas interações resultarem em um rico comportamento emergente. Neste capítulo, modelos de sistemas complexos que explicam o comportamento mencionado acima serão revistos.

O que se segue não é concebido como uma revisão abrangente das abordagens de sistemas sociais a partir do ponto de vista da ciência da complexidade. Isso seria impossível, dado que o tamanho do capítulo é limitado. Logo, este capítulo está estruturado de forma a servir como porta de entrada para estudos recentes que estão inseridos nessa relevante área de pesquisa. Nas seções seguintes, apresento o que pode ser considerado o conjunto da maioria das ideias e modelos paradigmáticos desse campo, algumas das principais conclusões que podem ser extraídas deles, e algumas extensões interessantes.

---

1. Traduzido por Marina Haddad Tóvolli.

2. Cátedra de Design de Sistemas, D-MTEC – ETH Zürich. URPP Redes Sociais, Universidade de Zurique, Suíça.

## 1.1 Modelos de sistemas complexos

Um modelo é uma abstrata, e até certo ponto idealizada, descrição da realidade que, ainda assim, captura um fenômeno específico. Um modelo é portanto limitado por construção. Isso é particularmente verdade na abordagem de sistemas complexos para sistemas sociais. Modelos nessa área de estudo não visam reproduzir a *sociedade* como um todo, mas sim clarear os mecanismos por trás de fenômenos sociais. Portanto, ao longo deste capítulo o objeto de estudo será referido como *sistemas sociais* ou, quando apropriado, *sistemas socioeconômicos*.

Por um lado, vários estudos têm analisado sistemas complexos a partir de pontos de vista teóricos e metodológicos na matemática e na física. Por exemplo, sistemas complexos aparecem tipicamente em mecânica estatística, um ramo da física que estuda as propriedades globais de sistemas compostos por vários elementos interativos. Esse tipo de pesquisa é correlato ao comportamento coletivo descrito nas ciências sociais e econômicas. Do ponto de vista epistemológico, no entanto, as ciências sociais e naturais têm uma abordagem de pesquisa diferente, e cada uma delas recorre a ferramentas e métodos geralmente utilizados e aceitos em sua própria disciplina. Enquanto em alguns casos é crucial para a disciplina de estudo que novas pesquisas estejam situadas em quadros lógicos já existentes, com o intuito de serem formalmente válidas no ambiente do que já é conhecido, em outros casos, os pesquisadores não contam com ferramentas quantitativas necessárias para estender a descrição qualitativa dos fenômenos em conhecimento quantitativo.

A pesquisa em sistemas sociais complexos deveria ser um esforço interdisciplinar, porém a regra, ao invés da exceção, tem sido a de dividir o conhecimento em disciplinas. É importante mencionar que, em alguns casos, diferentes disciplinas têm recorrido às mesmas ferramentas com o intuito de alcançar algum nível de descrição de sistemas variados. Esses avanços, infelizmente, têm sido quase que sistematicamente ignorados por outros campos do conhecimento, impedindo uma “polinização cruzada” (*cross-pollination*) entre eles. É importante que pesquisadores e profissionais da área tenham isso em mente enquanto se aprofundam no que já é conhecido.

Este capítulo é organizado da seguinte maneira. Na próxima seção, reviso os principais elementos dos sistemas sociais que fazem deles sistemas aptos para a abordagem de sistemas complexos: finitude, heterogeneidade e interação. Em seguida, a seção 3 revê alguns dos modelos mais paradigmáticos de sistemas sociais complexos e o campo de suas aplicações. A seção 4 traz um panorama das redes de interações nos sistemas sociais, os mecanismos envolvidos e algumas de suas propriedades topológicas. A seção final provê um prognóstico da abordagem de sistemas complexos em sistemas sociais.

## 2 CARACTERÍSTICAS COMUNS DE SISTEMAS SOCIAIS

Existem características comuns de sistemas socioeconômicos que fazem deles sistemas únicos. Uma dessas características é a profunda *heterogeneidade* de seus elementos, a qual pode ser intrínseca do sistema ou resultado da evolução dinâmica deste. Isto é fortemente contrário ao que é visto nos sistemas clássicos das ciências naturais, em que os elementos são idênticos (como átomos ou moléculas), ou podem ser descritos por um elemento representativo (como em modelos biológicos em que a heterogeneidade dos indivíduos da mesma espécie pode ser frequentemente ignorada). A depender do contexto, os componentes do sistema podem ser chamados de agentes, indivíduos, eleitores, nós etc. Usarei esses termos indistintamente no decorrer do capítulo. Outra importante característica foi brevemente apresentada acima: o estado corrente de um agente, a ação que este desempenha e o produto de tal ação dependem, direta ou indiretamente, das ações de outros agentes do sistema. Independentemente de quanto simples é o comportamento de cada componente do sistema, o comportamento complexo resulta da *interação* entre os componentes. Por fim, esses sistemas são *finitos*, e em alguns casos muito pequenos. Dessa forma, os resultados reais podem diferir enormemente dos resultados esperados ao se estudar (em alguns casos matematicamente possíveis) o limite de tamanho-infinito.

Uma importante questão tratada na modelagem de sistemas socioeconômicos é como eles reagem a influências externas. A partir disso, entende-se que os agentes sob estudo não atuam somente com base no seu estado interno e nas interações com outros agentes. Em muitos casos, os agentes estão sujeitos a influências comuns a todos os componentes do sistema. Essas influências são *sinais*, que podem ter diferentes origens. Do ponto de vista da modelagem, uma mudança na política pública é exatamente um sinal aplicado ao sistema social. Um sinal pode ser comum a todos os agentes, ou pode ter um efeito diferente em cada agente, porém é em geral exógeno ao sistema. Outro exemplo desses sinais é o papel da propaganda e/ou da mídia no comportamento do consumidor ou da opinião pública.

### 2.1 Tamanho finito

Pesquisadores de física estatística rotineiramente tiram o limite de tamanho-infinito (o que neste campo é chamado de *limite termodinâmico*), em que o número de componentes  $N$  tende ao infinito (Pathria, 1996). Quando métodos da física estatística são usados para explicar propriedades da matéria macroscópica, é evidente que o número  $N$  é sempre finito, mas muito grande (pense no número de Avogadro,  $6,023 \times 10^{23}$ ). Consequentemente, a simulação computacional de sistemas físicos largamente utilizada nos dias atuais batalha para alcançar sistemas cada vez maiores, com a contínua crescente demanda por recursos computacionais.

Quando se estudam problemas de interesse em ciências sociais (Ball, 2003; Castellano, Fortunato e Loreto, 2009; Weidlich, 2002), deve-se considerar o fato de que o número de agentes observados nunca pode ser tão grande. Na maioria dos casos, valores realísticos de  $N$  variam entre centenas ou milhares, alcançando no máximo poucos milhões. O limite termodinâmico pode não ser válido nesse caso, pois os resultados nesse limite podem variar em relação aos resultados de sistemas de tamanho-finito. Para sistemas infinitos, usualmente descrições determinísticas podem ser formuladas. Porém, se o sistema é finito, uma aleatoriedade intrínseca persiste, o que é comumente chamado de *ruido demográfico* (Nisbet e Gurney, 1982). Ademais, novos e interessantes fenômenos podem aparecer, dependendo do número de indivíduos e agentes considerados. Por exemplo, pode ser formada uma forte reação não linear a um pequeno sinal externo (Tessone e Toral, 2005) ou um comportamento oscilatório em modelos de cooperação (Bladon, Galla e Mckane, 2010).

## 2.2 Heterogeneidade

Outra propriedade que faz dos sistemas socioeconômicos um desafiador e interessante campo de pesquisa é a inerente heterogeneidade de seus componentes. Quando se analisam sistemas compostos de eleitores, investidores, empresas ou países, é evidente que todos os elementos não são idênticos, mas claramente diversos (Page, 2011). Essa heterogeneidade não pode ser ignorada, dado que ela é uma parte integrante dos agentes. Quando se modela quantitativamente esses sistemas, uma simples substituição das características de um agente por uma média ou por um valor representativo pode diminuir excessivamente o poder descritivo do modelo. De fato, em alguns casos, o tamanho dessa diversidade é tão grande que do ponto de vista conceitual tal substituição se torna dúbia.

As origens da heterogeneidade no nível do indivíduo podem diferir, a depender do sistema em investigação. Geralmente, a heterogeneidade resulta de uma propriedade intrínseca (ou previamente adquirida) do agente. Por exemplo, quando o sistema a ser analisado é um processo de formação de opinião, pessoas diferentes têm preferências distintas (baseadas em idiossincrasia, herança cultural etc.) (Castellano, Fortunato e Loreto, 2009); essa preferência pode ter um papel relevante no processo decisório do indivíduo (Schneider e Stoll, 1980). Em outros casos, a heterogeneidade se desenvolve durante a evolução do sistema. Por exemplo, em um contexto social, o número de contatos sociais (seja na vida real ou nas redes sociais *on-line*) abrange diversas *ordens de grandeza* (Newman, 2010), mesmo que, para todos os indivíduos, se inicie de um conjunto vazio.

Uma das ideias cruciais trazidas pela modelagem de sistemas complexos é a seguinte: em muitos sistemas sociais, a heterogeneidade não é algo que, enquanto presente, simplesmente distorce ou obscurece o resultado obtido

se agentes representativos idênticos substituem uma população diversa. Em vez disso, a heterogeneidade pode afetar significantemente as propriedades observadas do sistema e ser a origem de fenômenos *a priori* inesperados em sistemas socioeconômicos.

### 2.3 Rede de interação

Uma questão central dos sistemas sociais é que seus componentes não atuam isoladamente: os agentes interagem com outros agentes (Bavelas, 1948; Wasserman e Faust, 1994). Com quem os agentes interagem, como essas interações afetam as propriedades globais do sistema (Boccaletti *et al.*, 2006), como (Holme e Saramäki, 2012) e por que (Galeotti *et al.*, 2009) elas aparecem e desaparecem são questões que devem ser analisadas para se obter um entendimento adequado do sistema em investigação. Em alguns casos, é possível assumir que um agente interage com todos os outros agentes. Esse é o caso, por exemplo, da formação de preço em mercados abertos, onde a demanda de um indivíduo afeta o preço em geral. Em sistemas sociais, isso ocorre quando indivíduos reagem a informações agregadas no nível da população, como em pesquisas de opinião etc.

Na maioria dos sistemas, no entanto, os agentes interagem unicamente com um subgrupo de agentes, e essas interações podem ser decompostas em trocas diádicas.<sup>3</sup> Nesses casos, essas relações podem ser descritas como *redes*, cujos *nós* são agentes do sistema e as *ligações* (ou *arestas*) entre os agentes retratam as interações. Alguns exemplos simples são: em formação de opinião, um indivíduo pode discutir um assunto em questão com os seus conhecidos, os quais correspondem a um restrito subgrupo do sistema total. Outros exemplos de especial relevância são as redes de proximidade (para processo de formação de opinião) e os contatos sexuais (para o desdobramento de propagação de doenças).

## 3 SISTEMAS SOCIAIS COMPLEXOS

As opiniões e as decisões formadas pelos indivíduos não são apenas o resultado de suas próprias reflexões. Elas são, em certo grau, afetadas pelas opiniões e decisões presentes no ambiente, a chamada influência social. Influência social pode ser facilmente observada em processos comuns de decisão coletiva – por exemplo, pesquisas eleitorais (Mutz, 1992), ataques de pânico (Helbing, Farkas e Vicsek, 2000), mercados culturais (Salganik, Dodds e Watts, 2006), ou campanhas de ajuda (Schweitzer e Mach, 2008). Algumas dessas decisões coletivas podem fazer com que a população caia na armadilha de um estado subótimo, como é o caso de uma bolha financeira causada pelo comportamento de manada de atores financeiros (Prechter, 2001). Alternativamente, as decisões coletivas podem conduzir o sistema para direções

3. Referentes às interações que envolvem somente dois indivíduos ou agentes (de diáde, ou par).

positivas, como o aumento dos índices de conformidade fiscal (Wenzel, 2005). No entanto, para entender como são formadas as decisões coletivas, para avaliar seus benefícios para a população, e mesmo para direcionar os resultados, é necessária a mensuração de como as pessoas percebem e respondem à influência social.

Dado um ambiente de informação incompleta, como um agente toma sua decisão em um assunto particular? A estratégia de maximização de utilidade é impossível, porque em muitas situações sociais a utilidade individual não pode ser facilmente quantificada. Parece apropriado, como forma de reduzir o risco de se fazer uma avaliação errada, copiar as decisões dos outros. Essa estratégia de *imitação* é amplamente vista em evoluções culturais e conhecida há mais de um século (Tarde, 1903): os humanos imitam o comportamento dos outros para serem bem-sucedidos ou simplesmente para se adaptarem a uma comunidade existente (Dugatkin, 2000). Uma extensa literatura tem estudado os efeitos da imitação e do comportamento de manada em diversos contextos. A imitação é em geral um exemplo interessante de comportamento complexo. Por um lado, é uma regra local, mas ela pode de fato criar fenômenos coletivos, tais como consensos.

Os modelos a seguir explicam fenômenos sociais complexos que vão além deste exemplo.

### **3.1 Ciências sociais e fenômenos emergentes**

O fato de sistemas sociais exibirem um comportamento que, atualmente, seria denominado como “complexo” foi de fato reconhecido por cientistas sociais e economistas há muito tempo atrás. Na maioria das vezes, a representação das propriedades de tais sistemas permaneceu, no entanto, no nível descritivo. Há poucos contraexemplos que não seguem essa regra, e que fornecem conhecimentos sólidos dos mecanismos subjacentes dos fenômenos com considerações muito simples e elegantes. Esses modelos tornaram-se paradigmáticos no contexto dos sistemas sociais complexos e impulsionaram numerosas extensões. Apresento brevemente os modelos mais importantes, com o intuito de que o leitor interessado aprofunde as informações aqui fornecidas seguindo as referências relacionadas.

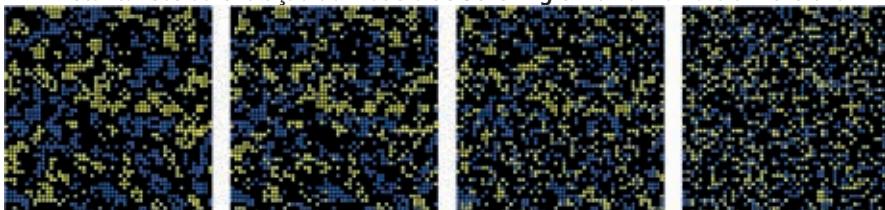
#### **3.1.1 O modelo de segregação de Schelling**

Nas sociedades modernas, não é incomum que pessoas se segreguem em bairros com outras pessoas que compartilham as mesmas características, como cor de pele, país de origem, religião etc. Esse efeito é, em alguns casos, o resultado de algum tipo de discriminação – por exemplo, quando existe uma correlação entre renda e pertencimento a um grupo racial. Além desses fatores externos, Thomas Schelling (1969; 1971) mostrou que um viés na preferência dos indivíduos em estarem cercados por outros indivíduos que pertencem ao mesmo grupo é suficiente para originar uma segregação em nível global (Schelling, 2006).

A preocupação original de Schelling era a segregação racial entre brancos e negros nos Estados Unidos da América, onde muitos bairros exibiam uma vasta maioria de um dos dois grupos.

FIGURA 1

Instantâneos da evolução do modelo de Schelling em uma malha bidimensional



Obs.: A população inicialmente distribuída em grande parte de maneira homogênea eventualmente se segregá em áreas bem definidas, onde uma maioria local claramente emerge.

Uma versão mais simples do modelo pode ser escrita como: os agentes estão espacialmente dispostos, por questão de simplicidade e como representação dos seus arranjos na cidade, em uma malha quadrada com tamanho longitudinal  $L$ . As densidades de pertencimento dos agentes em cada grupo são  $N_A/L^2$  e  $N_B/L^2$ ; e satisfazem  $N_A + N_B < L^2$ , isto é, existem espaços não ocupados. Ao redor de cada agente, um raio  $r$  define a *proximidade espacial* de cada agente. Cada agente  $i$  é dotado de um *limiar de satisfação*: se na proximidade espacial do agente  $i$ , a proporção de agentes pertencentes ao mesmo grupo do agente  $i$  é menor que o seu limiar de satisfação, então o agente  $i$  se deslocará para um espaço não ocupado.

Um *insight* crucial desse cenário é o que propõe Schelling (1969): “Localmente, em uma cidade ou bairro, em uma igreja ou escola, negros ou brancos podem ser uma maioria. Porém se cada um insiste em ser uma maioria local, somente uma mistura conceberá isso: uma segregação absoluta”. Quando a dinâmica é rodada no modelo, mesmo uma pequena preferência em estar cercado por outros agentes do mesmo grupo é suficiente para provocar uma situação em que os agentes formam aglomerados (*clusters*) segregados. Somente aqueles que estiverem perto de uma interface entre os dois grupos poderá ter um incentivo para descolar-se.

Esse é um modelo paradigmático do estudo de sistemas complexos que posteriormente invadiu outras áreas dos sistemas sociais: não é necessário entender todos os fatores que afetam o movimento das pessoas, muito menos ter uma descrição detalhada da configuração espacial, para compreender que uma simples decisão local é suficiente para produzir o comportamento macroscópico observado. Análises empíricas (Clark, 1991) demonstraram que o mecanismo básico realmente funciona. Posteriormente, foi percebido que a fenomenologia observada é relacionada com fenômenos de *coarsening* (embrutecimento) (Dall'Asta, Castellano e Marsili, 2008; Vinkovic e Kirman, 2006), mesmo quando criticada por seu difícil tratamento (Stauffer, 2012).

### 3.1.2 Modelo do limiar de Granovetter

O modelo de segregação discutido acima tem, em si, marcado o conceito de interações espaciais locais. Anos depois, Granovetter (1978) apresentou um renomado modelo de processos de tomada de decisão. No modelo, cada indivíduo tem um *limiar* idiossincrático; se o número de agentes no grupo, que decidiu o oposto do decidido pelo agente  $i$ , excede o limiar do agente  $i$ , então o agente  $i$  mudará a sua decisão em conformidade com a decisão oposta. O contexto original de aplicação do modelo abrangeu: *i*) difusão de técnicas de controle de natalidade (em que diferentes limiares podem existir devido a heranças culturais, posição na hierarquia local, preferências próprias etc.); *ii*) greves, em que trabalhadores comparecerão para identificar quantos trabalhadores já estão comprometidos em participar; *iii*) “migração em cadeia”; *iv*) desempenho educacional, em que a corte local condicionará a decisão de seguir níveis educacionais mais elevados; etc.

Os componentes do modelo são mínimos, de fato: considere um sistema composto de  $N$  agentes, cada um dotado de um limiar  $\theta_i$ . Os agentes devem tomar uma decisão, por exemplo, em participar (+) ou não (-) em uma manifestação. Inicialmente, todos os agentes estão no estado (-). A cada momento, cada agente compara a proporção de agentes que já decidiram participar na manifestação  $N_+/N$  com o seu limiar  $\theta_i$ . Se  $N_+/N \geq \theta_i$ , então o agente decide participar também.

É óbvio que, em um sistema homogêneo com  $\theta_i = \theta_0$ ,  $\forall i$  e  $\theta_0 > 0$ , ninguém participaria da manifestação. Em um segundo exemplo, considere-se a situação  $\theta_i = (i - 1)/N$ , isto é, uma distribuição uniforme do limiar no intervalo  $[0, (N - 1)/N]$ . Nesse caso, todos os agentes acabam participando. Como um terceiro exemplo, considere-se uma pequena modificação do segundo caso; a única alteração é que o agente  $i = 2$  tem um limiar de  $\theta_2 = 2/N$  (no segundo exemplo, o limiar era  $\theta_2 = 1/N$ ). Nesse último cenário, o número de agentes participando da manifestação é apenas um indivíduo, aquele com limiar igual a 0. De acordo com Granovetter, a mídia poderia reportar os dois últimos exemplos – compostos de forma mais prática por multidões idênticas – respectivamente, da seguinte maneira: “Uma multidão de radicais atuando de maneira desordeira”, e “Um encanqueiro desvairado quebrou uma janela enquanto um grupo de cidadãos decentes observava”. Essa enorme mudança macroscópica ocorre devido a minúsculas diferenças na composição dos indivíduos das duas multidões.

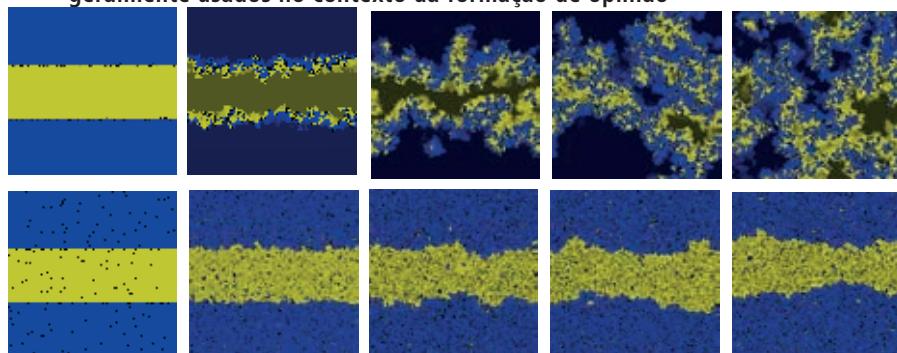
A solução formal desse modelo é muito simples. Deixe  $f(\theta)$  ser a distribuição dos limiares dos agentes. O número total de indivíduos unindo-se à manifestação será dada pelo menor limiar  $\theta'$  que satisfaça

$$\int_0^{\theta'} f(\vartheta) d\vartheta = \theta', \quad \text{e} \quad \int_0^{\theta''} f(\vartheta) d\vartheta > \theta'' \quad \forall \theta'' < \theta'.$$

A beleza da ideia de Granovetter vem do reconhecimento do enorme impacto que a heterogeneidade intrínseca ou adquirida em nível individual pode ter em nível agregado. O modelo também mostra que, fora da interação social, macroestados completamente divergentes podem emergir.

FIGURA 2

**Evolução temporal de dois modelos que exibem comportamento complexo – geralmente usados no contexto da formação de opinião**



Obs.: As duas opiniões estão representadas em azul e amarelo, sendo que quanto mais tempo um agente mantém uma opinião, mais escuro o quadrado é. A fileira superior mostra o tempo de evolução do modelo do eleitor quando a rede de interações é uma malha quadrada. É visível que a nítida interface que sinaliza a condição inicial se desfaz, dando origem a uma interface entre dois estados que aumenta ao longo do tempo. A fileira inferior apresenta os resultados do modelo de Ising (cuja interpretação também é discutida no texto), o qual exibe uma fenomenologia diferente.

### 3.2 Modelos de formação de opinião

A fim de entender as propriedades intrínsecas de sistemas abrangidos por muitos indivíduos, vários modelos têm sido desenvolvidos para descrever a difusão de opinião no contexto social. É importante destacar que muitos desses modelos foram propostos *ad hoc*, sem qualquer visão sociológica precedente. Isso não desmerece, no entanto, os conhecimentos que eles forneceram sobre os principais mecanismos de formação de opinião.

#### 3.2.1 O modelo do eleitor

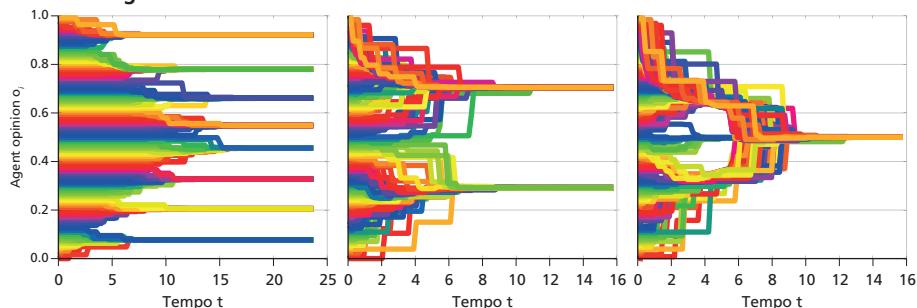
Abordagens iniciais nas ciências sociais mostraram que a existência de influência social positiva (comportamento de imitação) tende a estabelecer homogeneidade (consenso) entre os indivíduos (Abelson, 1964; French, 1956). O “modelo do eleitor” (Liggett, 1995), também demonstra esse comportamento. Do ponto de vista dos sistemas complexos, o modelo do eleitor tem sido um paradigma no estudo das dinâmicas de opinião (Holyst, Kacperski e Schweitzer, 2001), fenômenos de *coarsening* (Dornic *et al.*, 2001) e vidros de *spin* (*spin-glasses*) (Fontes *et al.*, 2001; Liggett, 1995).

As dinâmicas do modelo do eleitor podem seguramente ser consideradas as mais simples implementações de um processo de imitação: considere um sistema composto de  $N$  agentes que podem ter uma de duas opiniões  $s_i \in \{-1, 1\}$ . Os agentes estão conectados por uma rede de interações  $N$ . A cada período de tempo, um agente é escolhido aleatoriamente e o agente imita a opinião de um de seus vizinhos (também aleatoriamente selecionado).

A simplicidade do modelo permite muitos cálculos analíticos (Liggett, 1995; Redner, 2001). Por exemplo, para redes regulares (aqueles em que todos os agentes possuem o mesmo número de conexões com outros agentes), esse modelo tem a propriedade de *conservação de magnetização* (*magnetisation conservation*) (Castellano, Vilone e Vespignani, 2003; Frachebourg, Krapivsky e Ben-Naim, 1996), que significa que – quando se calcula a média das múltiplas transformações da evolução – a proporção relativa dos indivíduos que mantêm cada opinião não muda com o tempo. Um corolário dessa propriedade é que um sistema de densidade  $N_1/N$  de agentes com opinião 1 alcançará o consenso de tal opinião com uma probabilidade de  $N_1/N$ . Quando rodado em um sistema finito, este alcança consenso em um tempo finito. Foi amplamente estudado como o tempo para consenso depende da rede subjacente (Castellano, Vilone e Vespignani, 2003; Sucheki, Eguíluz e San Miguel, 2005; Wu *et al.*, 2004). Para redes heterogêneas (Sucheki, Eguíluz e San Miguel, 2005), o comportamento da regra exata de dinâmica se altera fundamentalmente, e a topologia da rede pode diminuir as dinâmicas de ordenação (*ordering dynamics*) e pode até levar a um sistema desordenado em que nenhum consenso é alcançado (Sood e Redner, 2005).

FIGURA 3

**Resultados da evolução das opiniões dos agentes para o modelo de confiança limitada de Hegselmann-Krause**



Fonte: Hegselmann e Krause (2002).

Obs.: Os três painéis apresentam a evolução para diferentes valores do limiar  $\mathcal{E} = 0,05$  (painel esquerdo),  $0,18$  (painel central), e  $0,25$  (painel direito). O número de agentes no sistema é  $N = 128$ .

### 3.2.2 Modelo de Ising e formação de opinião

O modelo do eleitor corresponde a uma variedade de modelos em que os indivíduos enfrentam uma dicotomia. Esse cenário é o arranjo mais simples de uma tomada de decisão, e proporciona uma abundância de fenômenos. Em física, em um contexto diferente, o renomado *modelo de Ising* (Brush, 1967) foi estudado durante décadas como uma fonte de comportamentos emergentes, em particular a existência de uma transição de estados macroscópicos desordenados (os chamados *paramagnéticos*) para ordenados (*ferromagnéticos*), a depender do nível de aleatoriedade no sistema (que funciona como um parâmetro de controle). Esse modelo recorre à representação dos componentes como dois estados, e esses elementos estão conectados por meio de uma rede que define as interações. A depender da aleatoriedade, nós conectados têm maior probabilidade de acabar em uma configuração em que eles tenham o mesmo estado. Em que medida/o quanto esse estado coeso se estende no sistema determina fundamentalmente o grau de ordem global. Quando a decisão não é entre duas escolhas, mas entre várias, o cenário é conhecido como *modelo de Potts* (Wu, 1982).

O conhecimento proveniente desse modelo permitiu abordagens complementares sobre as dinâmicas de formação de opinião, no formato do *modelo de Weidlich* (1991). Nesse formato, a descrição não é baseada no estado de elemento único, mas nas densidades dos componentes em cada um. Ele é, portanto, equivalente às abordagens de equação mestre<sup>4</sup> e às dinâmicas de nível populacional.

Mesmo que acometido como uma *abordagem típica de físicos* aos sistemas sociais, o modelo de Ising (e suas aplicações em sistemas sociais) demonstra um problema frequentemente enfrentado: diferentes terminologias usadas para descrever os mesmos sistemas em diferentes disciplinas. Considere-se um jogo de coordenação jogado por agentes racionalmente limitados, em que a probabilidade de selecionar uma das duas (indistinguíveis) estratégias segue uma dinâmica logit dos retornos (*pay-off*) esperados. Formalmente, esse modelo é exatamente o mesmo de Ising.

### 3.2.3 Difusão da opinião da minoria

O modelo exposto por Galam (2002; Galam e Zucker, 2000) para descrever a difusão da opinião da minoria incorpora mecanismos básicos da inércia social, o que resulta em uma rejeição democrática de reformas sociais inicialmente favoráveis a uma maioria.<sup>5</sup> Nesse modelo, os indivíduos se reúnem ao longo de sua

4. Equação mestre é uma descrição matemática muito comum na literatura de física, em que a dinâmica de um sistema composto por vários elementos é escrita em termos da proporção dos elementos existentes em um dado estado. Um exemplo simples seria, em um modelo discreto de formação de opinião, uma formulação em termos da razão de indivíduos que detêm cada opinião. Nesse nível macroscópico, a dinâmica pode ser escrita como uma função das probabilidades de transição de um estado para outro.

5. Para uma revisão dessa família de modelos, o leitor interessado pode consultar Galam (2004b; 2008; 2012).

vida social em *células de encontro* (*meeting cells*) de diferentes tamanhos, onde eles discutem sobre um assunto até que uma decisão final, a favor ou contra, é tomada pelo grupo inteiro. A decisão é baseada na *regra da maioria*, de modo que todos os indivíduos reunidos na célula de encontro adotam a opinião da maioria. Galam introduz a ideia de “inércia social” na forma de um viés correspondendo a uma resistência às reformas (Galam, 2004a) ou ao favorecimento de preconceitos (Galam, 2003). Portanto, no caso de empate dentro de um grupo, uma das decisões é sistematicamente adotada.

A dinâmica do modelo é a seguinte: existe uma população de  $N$  indivíduos que aleatoriamente se reúnem em “células de encontro”, definida basicamente pelo número de indivíduos que podem se encontrar em uma dada célula;  $a_k$  é então a probabilidade de uma determinada pessoa ser encontrada em uma célula de tamanho  $k$ . As pessoas detêm uma opinião binária –(+) ou –(–) sobre certo tópico. No momento  $t = 0$ , se estabelece um valor arbitrário para  $N_+(0)/N$ . Os agentes então são aleatoriamente distribuídos entre as diferentes células. A premissa básica do modelo é que todas as pessoas dentro de uma célula adotam a opinião da maioria reunida na célula. Ademais, no caso de empate (o que somente pode ocorrer se o tamanho da célula  $k$  é um número par), uma das opiniões é sistematicamente adotada. Uma vez que é tomada uma opinião dentro de cada célula, o tempo  $t$  aumenta e os indivíduos se rearranjam, distribuindo-se de novo aleatoriamente entre as diferentes células.

Para uma ampla variedade de distribuições  $\{a_k\}$ , esse modelo tem três pontos fixos: dois estáveis em  $N_+ = N$  e  $N_+ = 0$ , e um instável, o ponto de fé (*faith point*), em  $N_+ = p_c < 1/2$ . Logo, a dinâmica é tal que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} N_+(t) = \begin{cases} N & \text{if } N_+(0)/N > p_c \\ N & \text{if } N_+(0)/N < p_c \end{cases}. \quad (1)$$

Portanto, o principal resultado desse modelo é que uma opinião inicialmente minoritária, correspondente a  $N_+(0)/N < 1/2$ , pode vencer no longo prazo.

### 3.2.4 A reação a sinais comuns

No que concerne ao efeito de sinais (que podem representar propagandas ou mudanças em políticas) em sistemas sociais, é importante lembrar que eles são heterogêneos. Em um ambiente usual, foi mostrado que sistemas heterogêneos exibem uma reação máxima a um sinal externo comum, como função do grau de diversidade dos componentes (Tessone *et al.*, 2006). Esse fenômeno ocorre em

diferentes modelos de formação de opinião (Galam, 1997; Tessone e Toral, 2009; Vaz Martins, Pineda e Toral, 2010). O mesmo fenômeno ocorre se, ao invés da heterogeneidade idiosincrática, a fonte de desordem é uma diferente, como a existência de interações repelentes dentro do sistema. Em um contexto social, essas interações repelentes representariam contrariantes, isto é, indivíduos que se opõem a qualquer tipo de consenso (Galam, 2004a; Stauffer e Sá Martins, 2004) ou que pretendem desestabilizar o próprio sistema, como jogadores coringas estudados no contexto de dilemas sociais (Arenas *et al.*, 2011).

### 3.2.5 Modelos contínuos de opinião

Em alguns casos, a opinião individual tem que ser modelada não como uma escolha discreta, mas em termos de uma variável contínua. Esse é o caso, por exemplo, quando indivíduos precisam responder a questões quantitativas que eles não sabem a resposta e podem somente formular um palpite. Quando expostos às opiniões dos outros, em média, a mudança de opinião de um indivíduo é proporcional à distância da opinião média dos outros (Mavrodiev, Tessone e Schweitzer, 2012).

Muito antes desses estudos empíricos, diferentes modelos foram propostos no estudo desse cenário. Um exemplo ideal é o modelo de confiança limitada de Hegselmann-Krause (2002). Ele funciona da seguinte forma: existem  $N$  agentes com opinião  $o_i \in [0,1]$ . Em cada momento, um agente é aleatoriamente escolhido e sua opinião é atualizada de acordo com a regra

$$o_i(t + \delta t) = \sum_j \Theta(\varepsilon - |o_j - o_i|) o_j, \quad (2)$$

em que  $\Theta$  é a função de Heaviside (função de degrau). Dito de forma simples, os agentes se deslocarão em direção à opinião média de todos os outros agentes cujas opiniões não estão a uma distância maior que  $\varepsilon$  das suas opiniões.  $\varepsilon$  representa o que os autores chamam de *nível de confiança* dos agentes. A racionalidade por trás do modelo é que os indivíduos não consideram as opiniões de outros indivíduos que estejam muito distantes das suas próprias opiniões.

Alguma intuição da fenomenologia desse modelo pode ser obtida pela observação da figura 3. Se o nível de confiança é pequeno (painel esquerdo), os indivíduos raramente mudam suas opiniões, e eles interagem com os poucos indivíduos que têm uma opinião perto o bastante; nesse caso, múltiplas opiniões sobrevivem, em um regime similar à *pluralidade*. Para valores crescentes de  $\varepsilon$ , o número de grupos diminui, passando para um regime em que somente duas incompatíveis opiniões, com apoio similar, sobrevivem. Para valores ainda maiores de nível de confiança, os agentes são influenciados por um conjunto maior de agentes, com opiniões mais diversas, e então um consenso é alcançado (painel direito). Perto da transição em

direção ao consenso, um fenômeno interessante é observado (paineis do meio): os agentes primeiramente criam dois grupos centrais, e os indivíduos com opinião perto de 1/2 podem até se separar, dependendo de que lado das separatrizes eles estejam. Então, depois de os dois grupos serem formados, eles convergem novamente em direção a um estado final de consenso total.

Outro modelo renomado dessa classe é o modelo de Deffuant (*Deffuant et al.*, 2000; *Weisbuch et al.*, 2002), que exibe comportamento similar. Para uma visão completa dos modelos contínuos de dinâmica de opinião, o leitor interessado pode consultar Lorenz (2007).

### 3.2.6 Dinâmicas de linguagem e traços culturais

Robert Axelrod (1984, 1997) apresentou um modelo de geração e diversificação de diferentes culturas. O modelo surgiu da observação de que as diferenças entre culturas não desaparecem de modo algum, apesar do fato de que as pessoas tendem a tornar-se mais parecidas em suas crenças, atitudes e comportamentos quando elas interagem.

Especificamente, no modelo de Axelrod, cada agente é caracterizado por um conjunto de  $F$  características culturais, e cada um dos agentes pode adotar qualquer um dos  $q$  traços diferentes. O estado do agente  $i$  é definido pelas  $F$  variáveis  $(\sigma_{i,1}, \dots, \sigma_{i,F})$ . Os agentes interagem por meio de uma rede de interações. Então, a dinâmica é a seguinte: dois agentes vizinhos  $i$  e  $j$  são aleatoriamente escolhidos. A sobreposição deles  $l_{ij}$  é o número de características comuns,  $l_{ij} = \sum_k \delta_{\sigma_{ik}, \sigma_{jk}}$ . Com probabilidade de  $l_{ij}/F$ , o valor de uma das características ainda não comum é transferido de um agente para outro, aumentando a sobreposição em um. Esse processo é então repetido. Eventualmente, é alcançado um estado de congelamento (*frozen state*) em que nenhuma evolução é possível. Em tal estado de congelamento, espaços vizinhos têm uma sobreposição igual a 0 ou a  $F$ . O tamanho relativo do maior grupo de agentes que compartilham todas as características culturais  $S_{\max}/N$  é uma medida da diversidade cultural.  $S_{\max} = N$  representa um estado *monocultural* ou *globalizado*. Por outro lado, se  $S_{\max} = O(1)$ , o estado pode ser qualificado como culturalmente diverso ou *polarizado*.

Esse modelo foi amplamente estudado, mostrando-se a existência de uma transição entre dois estados culturais (Castellano, Marsili e Vespignani, 2000; Vilone, Vespignani e Castellano, 2002), em que na presença de uma deriva cultural – flutuações nos traços culturais –, o estado multicultural desaparece em sistemas extremamente grandes (Klemm *et al.*, 2003; 2005), e também na presença de meios de comunicação (González-Avella *et al.*, 2007).

### 3.3 Comportamento estratégico

Cooperação é um fenômeno que ocorre abundantemente em sistemas sociais, porém, na maioria das abordagens teóricas de jogos, a *deserção* deveria ser a estratégia racional a ser escolhida (Axelrod, 1984; 1997; Axelrod e Dion, 1988; Huberman e Glance, 1993; May, 1987). Com o intuito de solucionar esse paradoxo, uma vasta literatura tem proposto alterações na abordagem clássica. A metodologia usual para se estudar esse fenômeno é a análise de jogos, em que os agentes têm de escolher uma estratégia; a depender das escolhas dos outros agentes, eles recebem um dado *pay-off* ou prêmio. Grande parte dos estudos envolvem jogos 2 x 2, isto é, dois agentes jogam o jogo em que eles têm que decidir entre duas opções (Camerer, 2003; Gintis, 2009; Myerson, 1991), em alguns casos elucidadas como cooperação ou deserção. Com base nas estratégias, a estrutura de *pay-off* determina essencialmente o tipo de jogo em consideração (Stark, 2010). O modelo mais estudado é o chamado “dilema do prisioneiro”, em que o equilíbrio de Nash é um equilíbrio puro de deserção.

Outro interessante exemplo é o de jogos de bens públicos (Kagel e Roth, 1995), em que uma população de  $N$  agentes tem de escolher uma entre duas possíveis ações  $\sigma_i \in \{0,1\}$  (cooperação e deserção, respectivamente). A função de utilidade do agente  $i$  é definida por

$$\pi(\sigma_i) \equiv -c\sigma_i + r/N \sum_{j=1}^N \sigma_j, \quad (3)$$

em que  $c$  é a contribuição para o bem público,  $r > 1$  é o fator de ganho pelo bem público. Se  $c > r/N$ , a estratégia ótima é a *carona (free riding)*, porque os custos são maiores que os eventuais ganhos. Como provocar cooperação em tal situação tem sido uma pergunta persistente nessa área de pesquisa.

Em geral, a emergência de cooperação pode ser o resultado de mudanças na estrutura de *pay-off*, interações repetidas, distribuição espacial dos agentes, migração do agente etc. (Hauert e Szabó, 2005; Nowak, 2006; Szabó e Fath, 2007). Ademais, descobriu-se que as pessoas frequentemente condicionam o seu comportamento à cooperação dos outros agentes ou a suas crenças sobre as ações dos outros agentes, em um fenômeno denominado *cooperação condicional* (Fischbacher, Gächter e Fehr, 2001; Keser, 2002).

## 4 REDE DE INTERAÇÕES

Observa-se que algumas propriedades são bem disseminadas nas interações sociais e econômicas (Boccaletti *et al.*, 2014). Um exemplo é a propriedade de *graus*, o número de conexões que cada nó tem, como definido pela rede, isto é, o tamanho

da *vizinhança* de determinado nó. Uma das propriedades típicas das redes analisadas é que o grau geralmente não tem uma magnitude específica, porém é muito diverso, abrangendo várias ordens de magnitude. Em redes do mundo real, isso comumente se traduz em amplas distribuições de graus. Outra propriedade difundida é a de que, dentro de uma rede, qualquer par de agentes é separado por uma distância muito pequena em relação ao tamanho da rede, e, independentemente ao aumento da rede, essas distâncias raramente mudam. É interessante notar que, com o advento do uso generalizado de redes sociais *on-line*, as pessoas adquiriram consciência (pelo menos de um ponto de vista intuitivo) desses conceitos: atualmente, o fato de que alguns indivíduos têm pouquíssimos contatos sociais, enquanto outros têm milhares, não é de grande surpresa; algo similar ocorre com os *seis graus de separação*, originados nos trabalhos iniciais de Milgram (1967; Watts e Strogatz, 1998).

Essas e outras propriedades relacionadas com as estruturas de redes alteram completamente as propriedades globais dos sistemas em investigação (Dorogovtsev, Goltsev e Mendes, 2008). Em geral, as ciências sociais têm restringido as suas análises à descrição das propriedades das redes do mundo real, e desenvolvido um grande campo de conhecimento das características topológicas que permitem a descrição e mensuração dessas e de outras propriedades existentes nas redes do mundo real (Bollobás, 2001; Wasserman e Faust, 1994). Por outro lado, a literatura de redes complexas tem se concentrado na compreensão das propriedades de modelos altamente estilizados. Entretanto, em geral, somente argumentos plausíveis têm sido usados, excessivamente, para justificá-los (sem microfundamentos ou conexão com dados do mundo real).

#### 4.1 Efeito *small-world*

O efeito *small-world* (efeito mundo pequeno) é a propriedade das redes de interações sociais (entre outras) pela qual os seus diâmetros (a distância máxima entre dois nós quaisquer) são muito pequenos, quando comparados com o número de nós da rede. A ideia básica vem do estudo empírico original de Stanley Milgram (1967). Ele distribuiu cartas em estados centrais dos Estados Unidos com instruções de que elas deveriam alcançar uma determinada pessoa em Boston (Nordeste). Em princípio, os indivíduos que estivessem com as cartas não conheciam os destinatários finais, porém eles eram instruídos a direcioná-las a algum conhecido que poderia saber como entregá-las. Dois importantes fatos ocorreram: primeiro, cerca de um quinto das cartas chegaram; essas que chegaram passaram (em média) por cerca de seis indivíduos intermediários. Segundo, em vários casos, o penúltimo destinatário (antes da chegada) era a mesma pessoa (existem muitos indivíduos bem relacionados na rede social).

Com uma simples sentença matemática, Watts e Strogatz (1998) demonstraram como a propriedade de *small-world* pode emergir. A partir de uma topologia

arbitrária, a inserção de poucas conexões aleatórias ligando nós distantes é suficiente para diminuir dramaticamente a distância média da rede.

#### 4.2 Distribuições de graus sem escala (*Scale-free degree distributions*)

No contexto da evolução biológica, o trabalho inovador de G. Udny Yule (1925) mostrou que uma distribuição heterogênea de cauda longa pode emergir de um simples processo estocástico. O modelo de Yule é similar ao modelo de urna,<sup>6</sup> relacionado ao processo de Pólya,<sup>7</sup> e pode ser simplificado como: primeiramente, *espécies* são agrupadas em gêneros. A uma taxa constante  $\lambda_Y$ , esse processo de especiação gera uma nova espécie pertencente ao mesmo gênero da espécie dos *pais*. Por outro lado, a uma taxa  $\mu_Y$ , o evento de especiação gera uma nova espécie pertencente a um novo gênero.

O modelo de Yule é *multiplicativo*, no sentido de que a probabilidade de uma nova espécie pertencer a um novo gênero é proporcional ao número de espécies contidas no gênero. Em outras palavras e em outro contexto, esse modelo exemplifica o conceito do efeito “o rico fica mais rico”. Seja  $k_i$  o número de espécies que pertencem ao gênero  $i$ , e  $p(k)$  a probabilidade de um gênero ter o tamanho  $k$ , Yule demonstrou (Yule, 1925; Aldous, 2001) que, para períodos muito grandes, a distribuição se dá por

$$p(k) = \frac{\Gamma(1 + \rho_Y^{-1})}{\rho_Y} \frac{\Gamma(k)}{\Gamma(k + 1 + \rho_Y^{-1})}, \quad (4)$$

em que  $\rho_Y = \lambda_Y / \mu_Y$ . Esta solução significa que para grandes valores de  $k$ , assintoticamente, a distribuição segue uma *distribuição sem escalas (scale-free)* (Caldarelli, 2007; Sornette, 2006),  $p(k) \propto k^{-(1+1/\rho_Y)}$ . Essa distribuição é sem escalas no sentido de que ao reescalonar a variável  $k$  pelo fator  $\lambda > 1$ , ela resulta em

$$p(\lambda k) \propto (\lambda k)^{-(1+1/\rho_Y)} \propto k^{-(1+1/\rho_Y)} \propto p(k). \quad (5)$$

Essa propriedade também é usualmente referida como *invariância de escala*.

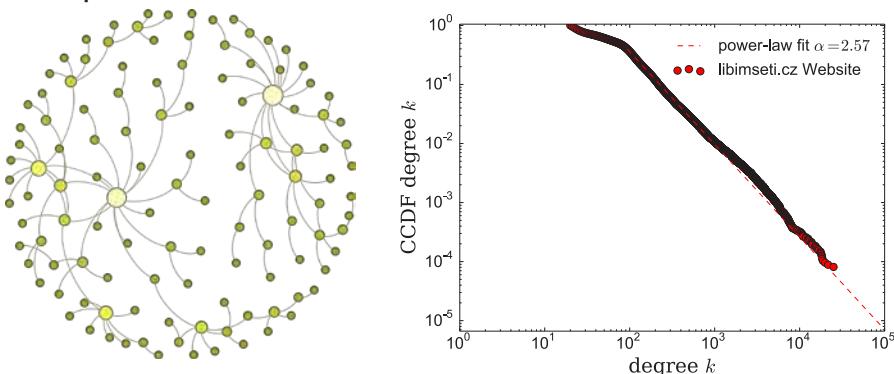
O mecanismo intrínseco do modelo de Yule foi redescoberto no contexto do que hoje seria chamado de *cienciometria*, e denominado de *efeito de Matthew*

6. Em geral, o modelo de urna (*urn model*) refere-se a uma construção matemática que pode ser extraída para um cenário em que bolas de gude são sequencialmente removidas de uma urna. As regras, que definem o mecanismo pelo qual novas bolas de gude são adicionadas na urna entre sucessivas remoções, essencialmente determinam as propriedades estatísticas da sequência de bolinhas obtidas.

7. O processo de Pólya (Sprott, 1978) é um modelo de urna simples assim definido: uma urna contém bolinhas de gude de duas cores diferentes. A cada momento, uma bolinha é removida e uma nova bolinha de mesma cor é adicionada na urna. Isso resulta em um processo em que quanto mais bolinhas da mesma cor forem removidas, maior a probabilidade de bolinhas sucessivas serem da mesma cor.

(Merton, 1968). Nesse trabalho, Robert Merton escreve: “O efeito de Matthew consiste no acúmulo de maiores incrementos no reconhecimento por contribuições científicas específicas a cientistas de considerável reputação, e na manutenção de tal reconhecimento por cientistas que ainda não fizeram a sua marca” (*op. cit.*).<sup>8</sup>

**FIGURA 4**  
**Típica rede sem escalas**



- Obs.: 1. *Hubs* – nós que são fortemente conectados com o resto da rede – podem ser vistos em cor clara.  
 2. A rede consiste em 220.970 usuários (nós) e 17.359.346 ligações (arestas).  
 3. A linha tracejada representa um ajuste da lei de potência equivalente a  $p(k)\alpha k^{-\alpha}$ ; segundo Newman (2005), acha-se  $\alpha = 2.57$  e  $k_{\min} = 93$ .

A ligação preferencial (*preferential attachment*) (Barabási e Albert, 1999) segue uma ideia similar. Consideremos uma rede que cresce em uma escala de tempo discreta. Inicialmente, a rede tem  $m_0$  nós com uma topologia arbitrária. A cada momento de tempo, um novo nó é adicionado na rede e  $m$  conexões são geradas aos nós existentes; a probabilidade  $p(i \leftrightarrow j)$  de um novo nó  $i$  se conectar a outro nó  $j$  é dado por:

$$p(i \leftrightarrow j) = \frac{k_j + a}{\sum_{j'=1}^{i-1} (k_{j'} + a)}. \quad (6)$$

O parâmetro  $a$  reflete a *atratividade* inicial dos nós, mesmo se não conectado com qualquer outro. Como no modelo de Yule, quanto mais ligações (o que previamente eram espécies) um nó (gênero) tem, maior é a probabilidade de o nó reunir novas ligações (espécies). Neste cenário, a distribuição de graus obedece

8. No original: “The Matthew effect consists in the accruing of greater increments of recognition for particular scientific contributions to scientists of considerable repute and the withholding of such recognition from scientists who have not yet made their mark”.

$$p(k) \propto \frac{\Gamma(k+a)}{\Gamma(3+a/m+k+a)}. \quad (7)$$

O caso estudado no trabalho original de Barabási e Albert tem  $a = 0$ , o que significa que a distribuição de graus para graus grandes é simplificada em  $p(k)\alpha k^{-3}$ . As redes produzidas pelo último modelo têm uma pequena aglomeração e um comprimento médio de trajetória  $\bar{l}$  que cresce com o tamanho  $N$  da rede como (Barrat, Barthélémy e Vespignani, 2008),  $\bar{l} = \ln(N)/\ln(\ln(N))$ .

É importante ressaltar que o modelo de ligação preferencial não é um modelo realista de crescimento de redes. Argumentar que indivíduos entrem, a título de exemplo, um de cada vez em uma rede social *on-line* e estabeleçam ligações com usuários existentes, e sem outra qualquer dinâmica de ligação, não é uma descrição acurada da realidade. Porém, reconhecer isso nos permite identificar algo crucial da modelagem de sistemas complexos. A ligação preferencial capta um *mecanismo*: a probabilidade de os usuários serem conhecidos (ou serem *atraentes* para outros usuários) é maior quanto mais conhecidos eles já têm. Isso pode ser consequência de: *i*) novos usuários têm chances maiores de conhecer alguém que tem vários conhecidos; *ii*) uma pessoa extrovertida será apontada por uma grande vizinhança social e terá mais chances de aumentá-la ainda mais. Logo, a propriedade emergente desse modelo (a distribuição de graus sem escalas) é uma característica provável de ser encontrada em qualquer rede em que uma propriedade como a ligação preferencial esteja presente.

O modelo de ligação preferencial foi estendido para englobar cenários diferentes e mais realistas (Allard e Marceau, 2011; Dorogovtsev e Mendes, 2001; 2002; Dorogovtsev, Mendes e Samukhin, 2000; Tessone, Geipel e Schweitzer, 2011). O modelo também foi analisado e validado em contextos como colaborações (Barzel e Barabási, 2013; Capocci *et al.*, 2006; Vespignani, 2011), rede de contato sexual (Jones e Handcock, 2003; Liljeros *et al.*, 2001) etc.

Do ponto de vista processual, é importante ressaltar que a validação empírica das distribuições sem escalas é ela mesma uma linha de pesquisa. Originalmente, herdadas da literatura de física, regressões simples foram realizadas, e aceitas como padrão. Infelizmente, não são inéditos trabalhos em que o conhecido comportamento sem escalas inclui de fato muito pouco *data points*. O leitor reconhecerá que fazer isso está em absoluta contradição com a equação 5. Atualmente, é amplamente aceito que esta abordagem pode levar a conclusões errôneas (Newman, 2010), e, portanto, ferramentas mais sofisticadas devem ser desenvolvidas (Newman, 2005).

### 4.3 Redes temporais

Em muitos casos de interesse, a rede de interações não é estática, mas muda ao longo do tempo. Um exemplo muito simples é encontrado na rede de interações sociais: uma pessoa, independentemente da quantidade de seus conhecidos, não mantém uma interação contínua com todos eles. Pelo contrário, a qualquer momento no tempo ela pode ser isolada, ou interagir com um reduzido subgrupo de sua vizinhança social. Se ela está falando com um amigo, tem um único contato ativo. Outro exemplo é o de colaborações científicas: mesmo cientistas muito produtivos somente podem manter um conjunto bem limitado de projetos de pesquisa simultâneos com outros cientistas. Nesses casos, os agentes têm uma quantidade limitada de recursos que eles podem alocar nas ligações, seja por causa de uma capacidade limitada, ou por habilidades cognitivas limitadas.

Apesar desse fato, a maioria das abordagens de modelagem ou considera que a rede subjacente de interações não evolui, ou que a sua evolução ocorre em uma escala de tempo muito menor que a de um processo dinâmico que ocorre na rede estudada. Nos últimos casos, a rede exibe uma evolução lenta que pode ser considerada uma simples perturbação quando em relação com a estrutura total. Isso também se aplica a uma linha de pesquisa que tem focado a coevolução das redes, em que os estados dos componentes da rede determinam as mudanças na topologia, até que um tipo de topologia estacionária (e um estado macroscópico concomitante) seja alcançado.

Quando a evolução da rede é observada, muitos sistemas exibem padrões de interação amplamente *dispersos e voláteis*. Dispersão é uma característica comum na imediata concretização da rede se as ligações são custosas, ou quando os nós têm algum tipo de restrição de capacidade. Volatilidade refere-se ao fato de que, nas redes temporais do mundo real, as arestas tendem a ter uma baixa resistência quando comparadas com o período de observação da evolução da rede. Isso significa que, se é possível definir um *período de deterioração* a partir do qual a topologia observada da rede difere largamente da observada previamente, a rede é volátil.

A compreensão de que a rede não é uma estrutura estática, mas evolutiva, tem profundas implicações sobre as propriedades do sistema em investigação (Holme e Saramäki, 2012). Um simples exemplo é suficiente para fornecer uma intuição dos efeitos que podem ser encontrados nesse cenário: o processo de propagação de doenças em que o vetor de transmissão é o contato físico entre um indivíduo infectado e um indivíduo saudável. Dado que a infecção só pode ocorrer quando houver contatos ativos, se os ciclos típicos de infecção-recuperação forem muito mais rápidos que as dinâmicas da rede, qualquer infecção não se propagará por toda a população e morrerá após algum tempo, propagando-se somente sobre essa rede tênue, efetivamente estática (Tessone e Zanette, 2012; Zanette e Risau-Gusmán, 2008).

#### 4.4 Redes múltiplas e interconectadas

Nas descrições feitas até agora, é importante notar que os nós representam um tipo ímpar de componente e um único tipo de conexão existe entre eles, correspondendo às arestas. Principalmente ao longo dos últimos cinco anos, o estudo das chamadas redes de *múltiplas camadas* (*multi-layer networks*) (Kivelä *et al.*, 2014) recebeu um tremendo impulso. Consideremos como um exemplo básico a rede social; nesse ambiente, conhecidos podem surgir de diferentes canais de comunicação, não exclusivos, mas ao mesmo tempo não aparentados: *e-mail*, contatos de redes sociais *on-line*, ligações telefônicas, contatos face a face, são todos diferentes formas da comunicação. Todas essas facetas não podem ser consideradas como equivalentes, a depender da questão estudada na mencionada rede social multifacetada. Por exemplo, o fluxo de informação em tal rede pode requerer uma modelagem apropriada, em que diferentes canais de comunicação tenham suas próprias características intrínsecas.

Outro exemplo de sistema que pode ser representado como uma rede de múltiplas camadas é o sistema de mobilidade humana por transporte público em cidades grandes, em que os nós representam as paradas de transporte público. Nessa rede, é possível viajar entre os nós com o uso de diferentes meios de transporte: metrô subterrâneo, trem ou ônibus. Todos esses são *arestas* intrinsecamente diferentes, e um estudo adequado exige a consideração desse fato. Nos dois exemplos prévios, as redes em investigação têm uma propriedade adicional: os nós em todas as camadas são *os mesmos*; nesse caso, o sistema é chamado de rede *múltipla* (*multiplex network*) (Boccaletti *et al.*, 2014).

Em outras situações, as redes nas diferentes camadas são compostas de nós de diferentes naturezas. Temos como exemplo as transações econômicas (as quais podem ser consideradas como arestas) e os indivíduos (como um tipo de nó) e seus locais de trabalho (como outro tipo de nó). As arestas existirão entre diferentes indivíduos, entre indivíduos e seus locais de trabalho, e entre os nós representando as firmas e o setor público. Este é um simples exemplo de uma rede interconectada.

A fenomenologia de todas essas famílias de sistemas é muito rica: quando redes interconectadas se comportam como uma única rede, ou independentemente (Radicchi e Arenas, 2013)? Como modelos de dinâmica de opinião se comportam nessas redes? Quão robustos ou frágeis são tais sistemas para a remoção dos nós? Todas essas questões têm sido centrais na literatura e constituem importantes referências na compreensão da fenomenologia das redes interconectadas.

### 5 PERSPECTIVA

Vários sistemas sociais são intrinsecamente complexos. Ao mesmo tempo, eles têm uma abundância de detalhes que fazem de suas descrições completas uma tarefa inatingível. Os trabalhos resumidos neste capítulo ressaltam o fato de que modelos estilizados podem capturar mecanismos por trás de algumas de suas propriedades observadas.

Uma questão importante é que, quando esses mecanismos estão ativos, os detalhes microscópicos se tornam insignificantes para o entendimento qualitativo do assunto em investigação. Essas percepções são cruciais para a compreensão de que uma abordagem parcimoniosa é valiosa para esse tipo de sistema. Profissionais e formuladores de políticas devem sempre ter em mente a natureza complexa essencial dos sistemas que eles enfrentam. A compreensão desses fenômenos é de suma importância, porém isso não implica utilizar unicamente modelos simples como uma descrição completa da realidade. Esta não é, como explicado ao longo do capítulo, a intenção da abordagem de sistemas complexos.

Como já escrito, existe uma transição quase completa para o armazenamento digital de informações e, ao mesmo tempo, mais facetas da atividade humana ocorrem *on-line*. Esse fato produz desafios dos mais diversos pontos de vista (social, econômico, legal), mas se constitui uma enorme possibilidade de ganhar maior entendimento dos mecanismos subjacentes aos processos socioeconômicos. Com o acesso contínuo a dados, isso pode ser alcançado em dois níveis: primeiro, do ponto de vista qualitativo, os diferentes mecanismos podem ser primeiramente individualizados e formalizados; segundo, depois de esse conhecimento ser consolidado, uma abordagem mais quantitativa (com a vantagem adicional de estar baseada em teoria) pode ser feita com grandes implicações para diferentes atores da nossa sociedade, da elaboração de políticas por agentes do governo à oportunidades de desenvolvimento para empresários (como em parcerias e campanhas de *marketing*).

A pesquisa nesse campo é largamente interdisciplinar. No entanto, um esforço crucial deve ser feito pela comunidade científica e por profissionais para não desprezar o conhecimento das diferentes áreas. Isso requer uma atenção adicional, porém é uma forma eficiente de facilitar uma *polinização cruzada* das ideias entre as disciplinas envolvidas. Parte do problema encontra-se nas diversas terminologias usadas nas diferentes áreas, com ideias distintas para se obterem conceitos similares. Ademais, é necessário que uma maior parcela das pesquisas nessa área seja resultado de colaborações interdisciplinares. Dessa forma, diferentes disciplinas enriqueceriam a pesquisa de sistemas sociais complexos com abordagens diversas, ainda que complementares. Diferentes ameaças existem – por exemplo o perigo de pesquisas que sejam voltadas somente para uma das disciplinas envolvidas, tornando-se efetivamente compartmentadas. Isso limita enormemente o alcance em outras comunidades, e também, por construção, o interesse será limitado se a pesquisa for voltada somente para a própria disciplina.

Para um entendimento quantitativo dos fenômenos observados em sistemas sociais, ferramentas complementares – além da minimalista abordagem de sistemas complexos – são necessárias. Mesmo nessa configuração, é de suma importância não encher os modelos com detalhes desnecessários, que não levem informação ou poder preditivo aos modelos.

## REFERÊNCIAS

- ABELSON, R. P. Mathematical models of the distribution of attitudes under controversy. In: FREDERICKSEN, N.; GULLICKSEN, H. **Contributions to mathematical psychology**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1964.
- ALDOUS, D. J. Stochastic models and descriptive statistics for phylogenetic trees, from Yule to today. **Statistical Science**, v. 16, n. 1, p. 23-34, 2001.
- ALLARD, A.; MARCEAU, V. Structural preferential attachment: network organization beyond the link. **Physical Review Letters**, v. 107, Oct. 2011.
- ARENAS, A. *et al.* The joker effect: cooperation driven by destructive agents. **Journal of Theoretical Biology**, v. 279, n. 1, p. 113-119, 2011.
- AXELROD, R. **The evolution of cooperation**. New York: Basic Books, 1984.
- \_\_\_\_\_. **The complexity of cooperation**. Princeton: Princeton University Press, 1997.
- AXELROD, R.; DION, D. The further evolution of cooperation. **Science**, v. 242, n. 4884, p. 1385-1385, Dec. 1988.
- BALL, P. Utopia theory. **Physics World**. Oct. 2003.
- BARABÁSI, A.-L.; ALBERT, R. Emergence of scaling in random networks. **Science**, New York, v. 286, n. 5439, p. 509-512, 1999.
- BARRAT, A.; BARTHÉLÉEMY, M.; VESPIGNANI, A. **Dynamical processes on complex networks**. 1st ed. New York: Cambridge University Press, 2008.
- BARZEL, B.; BARABÁSI, A.-L. Universality in network dynamics. **Nature Physics**, v. 9, n. 10, p. 673-681, 2013.
- BAVELAS, A. A mathematical model for group structures. **Human Organization**, v. 7, p. 16-30, 1948.
- BLADON, A. J.; GALLA, T.; MCKANE, A. J. Evolutionary dynamics, intrinsic noise, and cycles of cooperation. **Physical Review E**, v. 81, n. 6, June 2010.
- BOCCALETTI, S. *et al.* The structure and dynamics of multilayer networks. **Physics Reports**, v. 544, n. 1, p. 1-122, 2014.
- \_\_\_\_\_. Complex networks: structure and dynamics. **Physics Reports**, v. 424, n. 4-5, p. 175-308, 2006.
- BOLLOBÁS, B. **Random Graphs**. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2001.
- BRUSH, S. G. History of the lenz-ising model. **Review of Modern Physics**, v. 39, p. 883-893, 1967.

- CALDARELLI, G. **Scale-free networks:** complex webs in nature and technology. Oxford: Oxford University Press, 2007.
- CAMERER, C. F. **Behavioral game theory.** Princeton: Princeton University Press, 2003.
- CAPOCCI, A. *et al.* Preferential attachment in the growth of social networks: the internet encyclopedia Wikipedia. **Physical Review E**, v. 74, n. 3, 2006.
- CASTELLANO, C.; FORTUNATO, S.; LORETO, V. Statistical physics of social dynamics. **Reviews of Modern Physics**, v. 81, n. 2, 2009.
- CASTELLANO, C.; MARSILI, M.; VESPIGNANI, A. Nonequilibrium phase transition in a model for social influence. **Physical Review Letters**, v. 85, p. 3536, 2000.
- CASTELLANO, C.; VILONE, D.; VESPIGNANI, A. Incomplete ordering of the voter model on small-world networks. **Europhysics Letters**, v. 63, n. 1, p. 153-158, 2003.
- CLARK, W. Residential preferences and neighborhood racial segregation: a test of the Schelling segregation model. **Demography**, v. 28, p. 1-19, 1991.
- DALL'ASTA, L.; CASTELLANO, C.; MARSILI, M. Statistical physics of the Schelling model of segregation. **Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment**, n. 7, 2008.
- DEFFUANT, G. *et al.* Mixing beliefs among interacting agents. **Advances in Complex Systems**, v. 3, p. 87-98, 2000.
- DORNIC, I. *et al.* Critical coarsening without surface tension: the universality class of the voter model. **Physical Review Letters**, v. 87, n. 4, 2001.
- DOROGOVSEV, S.; GOLTSEV, A. V.; MENDES, J. Critical phenomena in complex networks. **Reviews of Modern Physics**, v. 80, n. 4, p. 1275-1335, 2008.
- DOROGOVSEV, S.; MENDES, J. Scaling properties of scale-free evolving networks: continuous approach. **Physical Review E**, v. 63, n. 5, 2001.
- \_\_\_\_\_. Evolution of networks. **Advances in Physics**, v. 51, n. 4, p. 1079-1187, 2002.
- DOROGOVSEV, S.; MENDES, J.; SAMUKHIN, A. Structure of growing networks with preferential linking. **Physical Review Letters**, v. 85, n. 21, p. 4633-4636, 2000.
- DUGATKIN, L. A. **The imitation factor:** evolution beyond the gene. New York: Free Press, 2000.

- FISCHBACHER, U.; GÄCHTER, S.; FEHR, E. Are people conditionally cooperative? Evidence from a public goods experiment. **Economics Letters**, v. 71, n. 3, p. 397-404, 2001.
- FONTES, L. R. *et al.* Aging in 1d discrete spin models and equivalent systems. **Physical Review Letters**, v. 87, n. 11, 2001.
- FRACHEBOURG, L.; KRAPIVSKY, P. L.; BEN-NAIM, E. Segregation in a one-dimensional model of interacting species. **Physical Review Letters**, v. 77, n. 10, p. 2125-2128, 1996.
- FRENCH, J. R. P. A formal theory of social power. **Psychological Review**, v. 63, n. 3, p. 181-194, 1956.
- GALAM, S. Rational group decision making: a random field ising model at T=0. **Physica A: Statistical and Theoretical Physics**, v. 238, n. 1-4, p. 66-80, 1997.
- \_\_\_\_\_. Minority opinion spreading in random geometry. **European Physical Journal B**, v. 25, n. 4, p. 403-406, 2002.
- \_\_\_\_\_. Modelling rumors: the no plane Pentagon French hoax case. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 320, p. 571-580, 2003.
- \_\_\_\_\_. Contrarian deterministic effects on opinion dynamics: “the hung elections scenario”. **Physica A: Statistical and Theoretical Physics**, v. 333, p. 453-460, 2004a.
- \_\_\_\_\_. Sociophysics: a personal testimony. **Physica A: Statistical and Theoretical Physics**, v. 336, n. 1-2, p. 49-55, 2004b.
- \_\_\_\_\_. Sociophysics: a review of galam models. **International Journal of Modern Physics C**, v. 19, n. 3, p. 409-440, 2008.
- \_\_\_\_\_. **Sociophysics**: an overview of emblematic founding models. In: ABARBA-NEL, A. *et al.* (Eds.). **Understanding complex systems**. New York: Springer, 2012.
- GALAM, S.; ZUCKER, J.-D. From individual choice to group decision-making. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 287, n. 3-4, p. 644-659, 2000.
- GALEOTTI, A. *et al.* Network games. **Review of Economic Studies**, v. 77, n. 1, p. 218-244, 2009.
- GINTIS, H. **Game theory evolving**. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press, 2009.
- GONZÁLEZ-AVELLA, J. C. *et al.* Information feedback and mass media effects in cultural dynamics. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 10, n. 3, p. 9, 2007.

- GRANOVETTER, M. S. Threshold models of collective behavior. **The American Journal of Sociology**, v. 83, n. 6, p. 1420-1443, 1978.
- HAUERT, C.; SZABÓ, G. Game theory and physics. **American Journal of Physics**, v. 73, n. 5, p. 405, 2005.
- HEGSELMANN, R. KRAUSE, U. Opinion dynamics and bounded confidence models, analysis, and simulation. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 5, n. 3, p. 2, 2002.
- HELBING, D.; FARKAS, I.; VICSEK, T. Simulating dynamical features of escape panic. **Nature**, v. 407, n. 6803, p. 487-490, 2000.
- HOLME, P.; SARAMÄKI, J. Temporal networks. **Physics Reports**, v. 519, n. 3, p. 97-125, 2012.
- HOLYST, J. A.; KACPERSKI, K.; SCHWEITZER, F. Social impact models of opinion dynamics. In: STAUFFER, D. **Annual reviews of computational physics**. Singapore: World Scientific, 2001. v. 9.
- HUBERMAN, B. A.; GLANCE, N. S. Evolutionary games and computer simulations. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 90, n. 16, p. 7716-7718, 1993.
- JONES, J. H.; HANDCOCK, M. S. An assessment of preferential attachment as a mechanism for human sexual network formation. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 270, n. 1520, p. 1123-1128, 2003.
- KAGEL, J. H.; ROTH, A. E. **The handbook of experimental economics**. Princeton: Princeton University Press, 1995.
- KESER, C. **Cooperation in public goods experiments**. New York: Springer, 2002.
- KIVELÄ, M. *et al.* Multilayer networks. **Journal of Complex Networks**, v. 2, p. 203-271, 2014.
- KLEMM, K. *et al.* Global culture: a noise-induced transition in finite systems. **Physical Review E**, v. 67, 2003.
- \_\_\_\_\_. Globalization, polarization and cultural drift. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 29, p. 321, 2005.
- KUNEGIS, J.; GRÖNER, G.; GOTTRON, T. **Online dating recommender systems**: the split-complex number approach. In: WORKSHOP ON RECOMMENDER SYSTEMS AND THE SOCIAL WEB, 4. Dublin: RecSys, 2012. p. 37-44.
- LIGGETT, T. M. **Interacting particle systems**. New York: Springer, 1995.

- LILJEROS, F. *et al.* The web of human sexual contacts. **Nature**, v. 411, n. 6840, p. 907-908, 2001.
- LORENZ, J. Continuous opinion dynamics under bounded confidence: a survey. **International Journal of Modern Physics C**, v. 18, n. 12, p. 1819-1838, 2007.
- MAVRODIEV, P.; TESSONE, C. J.; SCHWEITZER, F. **Effects of social influence on the wisdom of the crowds.** In: **COLLECTIVE INTELLIGENCE**, 61. Cambridge: MIT Press, 2012.
- MAY, R. M. More evolution of cooperation. **Nature**, v.327, n.15, 1987.
- MERTON, R. K. The Matthew effect in science: the reward and communication systems of science are considered. **Science**, New York, v. 159, n. 3810, p. 56-63, 1968.
- MILGRAM, S. The small world problem. **Psychology Today**, v. 2, n. 1, p. 60-67, 1967.
- MUTZ, D. Impersonal influence: effects of representations of public opinion on political attitudes. **Political Behavior**, v. 14, n. 89, p. 122, 1992.
- MYERSON, R. B. **Game theory:** analysis of conflict. Cambridge: Harvard University Press, 1991.
- NEWMAN, M. E. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. **Contemporary Physics**, v. 46, n. 5, p. 323-351, 2005.
- \_\_\_\_\_. **Networks:** an Introduction. New York: Oxford University Press, 2010.
- NISBET, R.; GURNEY, W. **Modeling fluctuating populations.** New York: Wiley, 1982.
- NOWAK, M. Five rules for the evolution of cooperation. **Science**, v. 314, n. 5805, p. 1560-1563, 2006.
- PAGE, S. E. **Diversity and complexity.** Princeton: Princeton University Press, 2011.
- PATHRIA, R. **Statistical mechanics.** 2nd ed. Oxford: Butterworth-Geinemann, 1996.
- PRECHTER, R. Unconscious herding behavior as the psychological basis of financial market trends and patterns. **Journal of Psychology and Financial Markets**, v. 2, n. 3, p. 120-125, 2001.
- RADICCHI, F.; ARENAS, A. Abrupt transition in the structural formation of interconnected networks. **Nature Physics**, v. 9, n. 11, p. 1-4, 2013.
- REDNER, S. **A guide to first-passage processes.** Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

- SALGANIK, M. J.; DODDS, P. S.; WATTS, D. J. Experimental study of inequality and unpredictability in an artificial cultural market. **Science**, v. 311, n. 5762, p. 854-856, 2006.
- SCHELLING, T. C. Models of segregation. **The American Economic Review**, v. 59, n. 2, p. 488-493, 1969.
- \_\_\_\_\_. Dynamic models of Segregation. **Journal of Mathematical Sociology**, v. 1, p. 143-186, 1971.
- \_\_\_\_\_. **Micromotives and macrobehavior**. New York: W. W. Norton & Company, 2006.
- SCHNEIDER, T.; STOLL, E. Classical statistical mechanics of the sine-Gordon and  $\phi^4$  chains. Static properties. **Physical Review B**, v. 22, n. 11, p. 5317-5338, 1980.
- SCHWEITZER, F.; MACH, R. The epidemics of donations: logistic growth and power-laws. **Plos One**, v. 3, n. 1, 2008.
- SOOD, V.; REDNER, S. Voter model on heterogeneous graphs. **Physical Review Letters**, v. 94, n. 17, 2005.
- SORNETTE, D. **Critical phenomena in natural sciences**. New York: Springer, 2006.
- SPROTT, D. Urn models and their application – an approach to modern discrete probability theory. **Technometrics**, v. 20, n. 4, p. 501-501, 1978.
- STARK, H.-U. Dilemmas of partial cooperation. **Evolution**, v. 64, n. 8, p. 2458-2465, 2010.
- STAUFFER, D. A biased review of sociophysics. **Journal of Statistical Physics**, v. 151, n. 1-2, p. 9-20, 2012.
- STAUFFER, D.; SÁ MARTINS, J. Simulation of Galam's contrarian opinions on percolative lattices. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 334, n. 3-4, p. 558-565, 2004.
- SUCHECKI, K.; EGUILUZ, V. M.; SAN MIGUEL, M. Conservation laws for the voter model in complex networks. **Europhysics Letters**, v. 69, n. 2, p. 228-234, 2005.
- SZABÓ, G.; FATH, G. Evolutionary games on graphs. **Physics Reports**, v. 446, n. 4-6, p. 97-216, 2007.
- TARDE, G. **The laws of imitation**. New York: Henry Holt and Co., 1903.

- TESSONE, C. J.; GEIPEL, M. M.; SCHWEITZER, F. Sustainable growth in complex networks. **Europhysics Letters**, v. 96, n. 5, 2011.
- TESSONE, C. J. *et al.* Diversity-induced resonance. **Physical Review Letters**, v. 97, n. 19, 2006.
- TESSONE, C. J.; TORAL, R. System size stochastic resonance in a model for opinion formation. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 351, p. 106-116, 2005.
- \_\_\_\_\_. Diversity-induced resonance in a model for opinion formation. **The European Physical Journal B**, v. 71, n. 4, p. 549-555, 2009.
- TESSONE, C. J.; ZANETTE, D. H. Synchronised firing induced by network dynamics in excitable systems. **Europhysics Letters**, v. 99, n. 6, 2012.
- VAZ MARTINS, T.; PINEDA, M.; TORAL, R. Mass media and repulsive interactions in continuous-opinion dynamics. **Europhysics Letters**, v. 91, n. 4, 2010.
- VESPIGNANI, A. Modelling dynamical processes in complex socio-technical systems. **Nature Physics**, v. 8, n. 1, p. 32-39, 2011.
- VILONE, D.; VESPIGNANI, A.; CASTELLANO, C. Ordering phase transition in the one-dimensional Axelrod model. **European Physical Journal B**, v. 30, p. 399, 2002.
- VINKOVIC, D.; KIRMAN, A. A physical analogue of the Schelling model. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 51, p. 19261-19265, 2006.
- WASSERMAN, S.; FAUST, K. **Social network analysis**: methods and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- WATTS, D. J.; STORGATZ, S. H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. **Nature**, v. 393, p. 440-442, June 1998.
- WEIDLICH, W. Physics and social science – the approach of synergetics. **Physics Reports**, v. 204, n. 1, p. 1-163, 1991.
- \_\_\_\_\_. **Sociodynamics** – a systematic approach to mathematical modelling in social sciences. London: Taylor & Francis, 2002.
- WEISBUCH, G. *et al.* Meet, discuss, and segregate. **Complexity**, v. 7, n. 3, p. 55-63, 2002.
- WENZEL, M. Misperceptions of social norms about tax compliance: from theory to intervention. **Journal of Economic Psychology**, v. 26, n. 6, p. 862-883, 2005.
- WU, F. *et al.* Information flow in social groups. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 337, n. 1-2, p. 327-335, 2004.

- WU, F. Y. The potts model. **Reviews of Modern Physics**, v. 54, n. 1, p. 235-268, 1982.
- YULE, G. U. A mathematical theory of evolution based on the conclusions of Dr. J. C. Willis, F. R. S. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 213, n. 402-410, p. 21-87, 1925.
- ZANETTE, D. H.; RISAU-GUSMÁN, S. Infection spreading in a population with evolving contacts. **Journal of biological physics**, v. 34, n. 1-2, p. 135-48, 2008.

#### BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- GARDINER, C. **Handbook of stochastic methods for physics, chemistry and the natural sciences**. New York: Springer, 1983.
- JOHNSON, N.; KOTZ, S. **Urn models and their application**. New York: John Wiley, 1977.

## CAPÍTULO 8

# A ECONOMIA COMO OBJETO COMPLEXO

Orlando Manuel da Costa Gomes<sup>1</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

Todos os dias, milhões de empresas e milhões de famílias em todo o mundo selecionam, entre muitas opções disponíveis, as ações a serem desenvolvidas que permitam melhor cumprir os respetivos objetivos de natureza econômica. Qualquer tentativa de compreender e explicar um tão amplo e grandemente interligado sistema de relações humanas é uma tarefa desafiante que a ciência econômica vem perseguindo desde as suas origens no século XVIII.

A racionalidade perfeita é o pressuposto central da ciência econômica; este é, efetivamente, o elemento que permite distinguir este campo científico de qualquer outro igualmente associado ao comportamento do ser humano ou de quaisquer outros organismos vivos. Os agentes econômicos são racionais nas suas decisões e também na forma como preveem o futuro. O *Homo-Economicus* formula expectativas racionais, no sentido em que esta entidade é capaz de utilizar eficientemente toda a informação disponível de modo a evitar incorrer em erros sistemáticos quando prevê o futuro. Tomar como principal premissa da análise econômica a capacidade ilimitada dos agentes de apreender a realidade pode ser, de algum modo, interpretada como simplista. Contudo, é precisamente esta premissa que tem guiado a ciência econômica nas últimas décadas, permitindo-lhe abordar muitas questões importantes e paradoxais que emergem da observação empírica.

Há um corolário imediato do pressuposto da racionalidade: agentes que perseguem idênticos objetivos irão atuar exatamente da mesma forma e, consequentemente, a economia agregada pode ser percebida através da análise do comportamento de um agente representativo. A empresa representativa irá maximizar os seus lucros dadas as receitas esperadas e a sua estrutura de custos; a família representativa irá formular um plano de consumo de modo a maximizar a utilidade intertemporal; a agência governamental representativa irá estabelecer objetivos de política e irá usar

1. Professor e pesquisador do Instituto Superior de Contabilidade e Administração de Lisboa, do Instituto Politécnico de Lisboa (Iscal-IPL) e da Unidade de Investigação em Desenvolvimento Empresarial do Instituto Universitário de Lisboa (BRU-IUL).

os recursos disponíveis para os atingir. O paradigma do agente representativo serviu como a principal referência para uma geração inteira de economistas brilhantes que lançaram as ideias que constituem hoje os fundamentos da análise econômica. Neste grupo de cientistas, podemos incluir o nome de importantes e influentes pensadores, como Paul Samuelson, John Hicks, Kenneth Arrow, Gerard Debreu, Franco Modigliani, Robert Solow, Milton Friedman e Robert Lucas.

A ciência econômica progrediu substancialmente: mecanismos sofisticados da economia real foram reduzidos a simples modelos matemáticos, que, por sua vez, se tornaram ferramentas poderosas para abordar muitos temas econômicos relevantes. O principal contributo da ciência econômica moderna foi, assim, a sua habilidade em explicar como um agente típico, dotado de recursos materiais e de conhecimentos, é capaz de avaliar os custos e benefícios de qualquer decisão e de escolher a opção que envolve um menor custo de oportunidade; sabendo como esse agente efetivamente age, podemos então extrapolar tal comportamento para a economia global. Por conseguinte, ao tomar agentes completamente racionais com características idênticas, a ciência econômica teria aparentemente descoberto uma fórmula adequada para perceber muitos dos fenômenos relevantes observáveis no mundo real.

Apesar dos importantes progressos alcançados pela ciência econômica no passado, por esta altura é relativamente consensual que é necessário começar a olhar para além da estrutura de análise que toma um agente representativo completamente racional. Alguns autores, como Colander, Holt e Rosser (2004), Gatti, Gaffeo e Gallegati (2010), Holt, Rosser e Colander (2011) e Kirman (2012), acreditam que uma nova era de pensamento econômico está emergindo; uma era onde a ciência econômica neoclássica convencional começa a dar lugar a uma interpretação do comportamento humano na qual há espaço para a diversidade, a heterogeneidade, a adaptabilidade e a complexidade. A economia deverá ser interpretada como um sistema complexo, um sistema onde agentes com diferentes capacidades, diferentes dotações de recursos e diferentes preferências interagem para gerar um resultado que não é conhecido *a priori* e que é consequência direta do modo como o processo de interação se desenrola.

Neste capítulo, as razões pelas quais devemos interpretar a economia como um sistema complexo são dissecadas. É demonstrado que a ciência econômica está afetando uma transição gradual para uma ciência de complexidade, que os eventos macro são necessariamente o resultado da forma como as unidades micro interagem em um nível local e que uma abordagem de complexidade é suficientemente flexível para explicar muitos fenômenos agregados de relevo, como, por exemplo, longos períodos de afastamento das principais variáveis macro relativamente aos respectivos valores de equilíbrio. O resto do capítulo encontra-se organizado como

indicado em seguida. A seção 2 faz uma revisão da literatura contemporânea sobre a economia da complexidade. A seção 3 explica por que razão se deve interpretar a macroeconomia como um sistema complexo. Na seção 4, um instrumento poderoso que permite abordar a economia como um sistema complexo é referenciado, nomeadamente as redes complexas, as quais podem ser analisadas no contexto de modelos *agent-based*, ou modelos baseados na interação entre agentes. A seção 5 ilustra como um modelo relativamente simples que envolve interação local entre agentes heterogêneos se pode reduzir a um resultado de longo prazo que poderá ser classificado como um resultado de complexidade. A seção 6 conclui.

## 2 COMPLEXIDADE NA ECONOMIA: A EMERGÊNCIA DE UM NOVO PARADIGMA

De acordo com Tesfatsion (2006), a economia pode ser classificada como um sistema complexo por duas razões complementares: primeiro, porque um grande número de unidades individuais enceta relações sistemáticas a um nível micro; segundo, porque as interações locais geram regularidades globais que envolvem propriedades emergentes, isto é, propriedades que são únicas no que respeita ao padrão de interação estabelecido e que, consequentemente, não dependem somente das características intrínsecas das unidades individuais envolvidas na relação.

O conceito de complexidade envolve muitas dimensões e necessita ser cuidadosamente dissecado. No que se refere à ciência econômica, e de modo a ser rigoroso na definição da economia enquanto sistema complexo, as propriedades a seguir emergem como sendo relevantes (Arthur, Durlauf e Lane, 1997; Martin e Sunley, 2007; Fontana, 2008).

- Heterogeneidade: a heterogeneidade é o principal motor das relações econômicas; estas relações – por exemplo, as relações de troca – simplesmente não teriam lugar se todos os indivíduos partilhassem as mesmas preferências, a mesma dotação de recursos e as mesmas competências. A economia é um sistema constituído por um grande número de componentes, com cada componente detendo as suas próprias características.

A tentativa da teoria econômica em construir o seu raciocínio em torno da explicação do comportamento de um agente representativo racional, como argumentado na introdução, desta forma negligenciando todas as possíveis fontes de heterogeneidade, é até certo ponto uma fragilidade relevante. Conforme salientado por Bouchaud (2009), há uma impossibilidade na abordagem reductionista: o comportamento da multidão é, na sua essência, diferente do comportamento do indivíduo; a ação coletiva tem uma lógica que lhe é própria, uma lógica que só pode ser entendida quando se considera heterogeneidade entre agentes.

- Descentralização: a economia é um sistema auto-organizado e descentralizado. O resultado agregado advém da livre iniciativa de cada agente individual que atua com o propósito de servir o seu próprio interesse, e isto ocorre sem que haja necessidade de intervenção de qualquer entidade exterior ou de qualquer planeador central. A ideia de equilíbrio descentralizado é um conceito antigo da ciência econômica que muitos dos seus cientistas mais proeminentes recorrentemente foram recuperando. Por exemplo, Friedrich von Hayek (1967) referiu-se à existência de uma ordem espontânea, de acordo com a qual as leis de movimento observadas são o resultado da interação estabelecida entre agentes que prosseguem o seu próprio interesse. Do ponto de vista de Hayek, a economia é entendida como uma teia complexa de relações e transações num ambiente que é semelhante àquilo que se pode definir como uma rede complexa ou como um objeto complexo.

Abordagens contemporâneas sobre a questão da complexidade continuam a destacar a natureza da economia como uma rede descentralizada. É o caso de Ashraf, Gerszman e Howitt (2012), que interpretam as relações de mercado como o produto do comportamento das empresas que individualmente procuram potenciar os seus lucros. Cada empresa individual irá agir com o propósito de servir os seus objetivos próprios; no entanto, ao fazê-lo irá emergir um padrão coerente de transações ao nível macro. As regularidades globais não são o resultado de coordenação central; pelo contrário, ninguém isoladamente irá abarcar a capacidade de reunir o imenso conhecimento e poder que são requeridos para controlar as relações de mercado; em consequência, os padrões agregados que eventualmente emergem estão muitas vezes para além da compreensão de cada agente individual.

- Evolução: a economia é um sistema dinâmico no interior do qual os indivíduos vão aprendendo e adaptando os seus comportamentos. O processo de interação molda o modo como os agentes atuam, uma vez que eles evoluem à medida que as relações entre eles se desenrolam. Um sistema complexo é necessariamente formado através de um processo de evolução. Os organismos simples dão origem a entidades mais sofisticadas por via de adaptação no contexto de um ambiente em constante mutação. Um processo darwiniano de sobrevivência dos mais aptos tem lugar na economia da mesma forma que ocorre em muitos outros contextos. O processo evolutivo é um processo moroso que acrescenta camadas sucessivas de complexidade à teia de interações previamente existentes.

As instituições de mercado, as instituições financeiras e as entidades reguladoras, que assumem um elevado nível de sofisticação na economia contemporânea, são o resultado de uma evolução gradual e incremental. Hodgson e Knudsen (2010) designam o processo de evolução dos sistemas que conduz à sofisticação das redes complexas como replicação generativa. O termo replicação relaciona-se com a ideia de que, de uma etapa para a etapa seguinte, alguma informação é passada, ou seja, um novo sistema possui sempre algumas características dos sistemas anteriores que lhe deram origem. Todavia, um novo sistema raramente se limita a replicar o sistema precedente, normalmente acrescenta-lhe algo novo. Um processo generativo é um processo que se constrói sobre gerações passadas de modo a apresentar uma nova e melhorada versão da realidade; é um processo que é capaz de introduzir inovação, é um processo de destruição criativa. Sob esta perspectiva, pode-se afirmar que a economia é um sistema crescentemente complexo que chegou ao estado atual de complexidade após milhões de anos de evolução.

- Dependência em face do passado e dinâmica fora do equilíbrio: como implicitamente mencionado no ponto anterior, o sistema econômico é historicamente determinado. O atual estado de um sistema tem particularidades próprias, que são resultado dos acontecimentos específicos que o promoveram. A história não se repete necessariamente, e, por conseguinte, não haverá razões para crer que um dado cenário econômico observado no passado irá ocorrer no futuro exatamente com as mesmas características. É o conjunto de condições específicas associadas ao caráter dos agentes, ao contexto institucional, à dinâmica de interação e ao ambiente onde a interação tem lugar que irá determinar o desempenho da economia, e é de fato pouco plausível que uma tão grande quantidade de requisitos específicos se reúna de forma recorrente.

Em virtude do anteriormente referido e porque os agentes se adaptam, aprendem e evoluem, a economia não tem tendência a permanecer numa posição de equilíbrio ou de se estabilizar num estado estacionário. A interação em ambientes complexos raramente irá produzir um estado de equilíbrio. Mesmo modelos aparentemente simples construídos sobre a noção de interação local entre agentes heterogêneos pode gerar, de acordo com Bruun (2003), um comportamento dinâmico complexo e irregular, onde o valor das variáveis de interesse flutua para sempre sem que haja qualquer convergência para um estado estacionário. Adicionalmente, em ambientes complexos, novos padrões de interação podem emergir após milhares de períodos depois de iniciar uma simulação numérica de um destes modelos, mesmo quando nenhum acontecimento externo perturba o sistema.

Note-se que as observações efetuadas nos parágrafos precedentes contrariam os mais básicos fundamentos da economia neoclássica do agente representativo, que acredita que os equilíbrios são inerentes às relações econômicas e que as trajetórias das variáveis são exclusivamente determinadas pelas condições iniciais e por regras de movimento simples, as quais possibilitam, desde o ponto inicial, prever com precisão como essas trajetórias evoluem e onde o sistema irá permanecer no designado estado de equilíbrio de longo prazo.

As características referidas, nomeadamente as quatro propriedades que foram destacadas acima, claramente qualificam a economia como um objeto complexo. Com base nestas propriedades, diversos autores, como Markose (2005), McCauley (2005), Velupillai (2005) ou Rosser (2010), procuraram estabelecer uma noção de complexidade capaz de se assumir como apropriada para abordar os temas da economia. Esta noção envolve a consideração de três categorias diferentes: a complexidade conectiva, a complexidade dinâmica e a complexidade computacional.

O primeiro conceito, complexidade conectiva, destaca que o que verdadeiramente molda o comportamento dos elementos de um sistema são as relações que se estabelecem entre estes elementos e que a evolução do sistema é o resultado direto das ligações que emergem e desaparecem no seio de uma determinada rede de relações a cada período de tempo. Mais do que as características individuais de cada elemento, é a lógica de interação que interessa. Esta interpretação de sistema complexo é a originalmente proposta por Simon (1962), autor que também refletiu sobre os limites do pensamento racional; a noção de racionalidade limitada abre a porta para a heterogeneidade entre agentes e, consequentemente, atribui significado às formas distintas de contato entre diferentes indivíduos.

A complexidade dinâmica relaciona-se com as propriedades das equações dinâmicas que se consideram para descrever a evolução do sistema econômico. A economia enquanto ciência recorre fortemente a sistemas dinâmicos para interpretar a realidade. Estes sistemas são normalmente simples, envolvem relações lineares e implicam a convergência para um estado estacionário de ponto fixo. No entanto, quando se escapa ao colete de forças do comportamento homogêneo e da racionalidade estrita, podem encontrar-se relações dinâmicas não lineares intrincadas entre variáveis econômicas, o que conduz a sistemas onde os resultados de longo prazo são não convencionais, nomeadamente adquirem a forma de aperiodicidade e movimento caótico. Conforme Day (1994) destaca, um sistema dinâmico pode ser interpretado como complexo quando gera, para as suas variáveis endógenas, um padrão de movimento que não é regular, isto é, que não é um ponto fixo ou um ciclo periódico. O caos está associado à complexidade porque ele reflete um resultado de longo prazo de instabilidade não explosiva e irregular que é determinado pelas condições iniciais do sistema. Os sistemas caóticos caracterizam-se pela dependência

sensitiva em relação às condições iniciais, o que significa que dois diferentes estados iniciais, independentemente da proximidade entre eles, irão gerar flutuações irregulares de longo prazo respeitantes a trajetórias completamente distintas.

Uma terceira noção relaciona-se com a complexidade computacional. O trabalho nesta área remonta à influente contribuição de Shannon e Weaver (1949) à teoria da informação. Neste contexto, a complexidade é associada ao conceito de entropia. A entropia, por sua vez, está ligada à dificuldade que existe em processar informação. Quanto mais elevado o nível de entropia, mais complexo o respectivo sistema será. Dado que trata com a capacidade de processar informação, a complexidade computacional levanta uma questão pertinente relacionada com o modo como a teoria econômica convencional enfrenta os seus desafios: se os agentes são racionais e otimizam o seu comportamento, eles irão empregar todo o seu esforço e recursos na procura por solução ótima. Num sistema complexo que envolve entropia, o esforço computacional requerido para atingir a solução ótima pode ser tão grande que se torna pouco razoável, numa perspectiva de custo-benefício, procurar encontrar tal solução. Deste modo, no contexto de um ambiente complexo, o decisivo enfrenta um *trade-off* entre encontrar a melhor solução e o emprego de recursos que é necessário para a alcançar.

Os argumentos apresentados acima apontam para a ideia inequívoca de que a economia deve ser estudada sob uma perspectiva de complexidade. No entanto, como já antes salientado, o pensamento econômico convencional tem evitado esta abordagem. Uma das razões pelas quais a ciência econômica ortodoxa se distancia da perspectiva da complexidade relaciona-se com a atitude conservadora dos economistas e com a sua dificuldade em aceitar as técnicas e os instrumentos que outras ciências desenvolveram e têm para oferecer. A ciência econômica é hoje a ciência dos modelos lógicos e coerentes, modelos estes que são rigorosos de um ponto de vista conceitual e onde as noções de racionalidade, equilíbrio, otimização e eficiência são dominantes. Para ir além deste paradigma, a busca obsessiva pelo comportamento otimizador tem de ser descartada em favor de uma abordagem multidisciplinar que atribua relevância à experimentação e à análise cuidadosa dos fatores de natureza institucional.

Um dos campos científicos que melhor pode prestar auxílio à ciência econômica na procura por um paradigma de complexidade é a física, onde já há muito a visão mecanicista do mundo que a ciência econômica continua a adotar foi substituída por uma interpretação baseada na interação entre agentes. Um novo campo de conhecimento, designado econofísica, emergiu com o propósito de oferecer novos pormenores sobre o modo como as questões econômicas devem ser discutidas. Um raciocínio indutivo é adotado, o qual se baseia fortemente na observação e mensuração do comportamento coletivo. A ciência da econofísica nasceu

e desenvolveu-se com as contribuições de Mantegna e Stanley (2000), Gallegati *et al.* (2006), Rosser (2008) e Yakovenko (2009), entre outros. A introdução da física na economia é útil para um melhor entendimento de como ordens espontâneas eclodem nos mercados; a física tem uma longa tradição no que concerne à análise de sistemas auto-organizados, adaptativos e evolutivos, e as suas ferramentas podem facilmente ser adaptadas para entender e interpretar o comportamento humano sob um cenário de interação.

Despoletar uma mudança de paradigma num campo científico é, certamente, uma tarefa árdua e de grandes proporções. Os economistas estão bloqueados nas suas próprias metodologia e técnicas e irão provavelmente oferecer resistência à adoção de novas abordagens. Felizmente, a percepção do mundo como uma entidade complexa é algo que muitos outros campos de conhecimento (não apenas a física, mas também, por exemplo, a biologia ou a psicologia) já aceitaram, tendo desenvolvido um conjunto significativo de instrumentos de análise que estão agora disponíveis para que a ciência econômica possa abordar e explorar os seus próprios assuntos sob o cenário no qual eles verdadeiramente surgem, nomeadamente um cenário complexo constituído por múltiplas componentes heterogêneas e que interagem entre si.

Adicionalmente, há uma questão metodológica envolvendo a ciência econômica convencional que tem impedido a sua evolução para uma ciência da complexidade. A ciência econômica é normalmente tida como uma ciência dedutiva, isto é, uma ciência que começa por estabelecer hipóteses, sobre as quais um modelo é construído e onde, no final, o modelo é confrontado com a realidade. Preocupações de natureza empírica apenas surgem no último passo deste processo, no sentido de confirmar os pressupostos que foram estabelecidos no início. Sob este processo, a realidade é forçada sobre o modelo e a ciência econômica a transformar-se na ciência que explica aquilo que queremos, desde o ponto de partida, efetivamente observar, em alternativa a ser a ciência que começa por observar fatos e que constrói modelos para explicar esses fatos.

Uma inversão de paradigma é necessária, ou seja, a ciência econômica necessita de adotar uma metodologia indutiva, começando pela observação e exploração de fatos reais, prosseguindo em seguida para a sua explicação. Interpretar a economia como um objeto complexo exige esta mudança metodológica.

### 3 A MACROECONOMIA COMO SISTEMA COMPLEXO

Desde os seus primórdios, o pensamento econômico preocupou-se sempre com a evidente complexidade das estruturas de mercado e das relações de mercado.<sup>2</sup> De fato, vários dos mais proeminentes economistas clássicos, como é o caso de

2. Para um estudo detalhado sobre o modo como os cientistas da economia abordaram, em múltiplas ocasiões, assuntos relacionados à complexidade, ver Colander (2008).

Adam Smith, David Ricardo ou Alfred Marshall, encararam a economia como uma entidade governada pela interação, pela evolução, pela aprendizagem, pela adaptação e pela dependência em face do passado. Mas eles também argumentaram em favor de se estabelecerem alguns pressupostos simplificadores com o objetivo de discernir uma ordem onde apenas uma multidão descoordenada de relações era aparente.

Não devemos esquecer, no entanto, como sublinhado por Colander e Rothschild (2010), que aqueles que mais contribuíram para a teoria econômica, incluindo os que publicaram o seu trabalho ao longo do século XX, nomeadamente John Maynard Keynes ou Milton Friedman, nunca se esconderam por detrás de simples modelos mecânicos para disfarçar a complexidade do sistema econômico. A contribuição desses autores corresponde a avaliações críticas profundas acerca do funcionamento do sistema econômico, que foram, posteriormente, transformadas pelos seus sucessores em modelos de análise básicos e estilizados que puderam ser trazidos para a sala de aula e usados para a implementação de políticas. O modelo Keynesiano IS-LM é um bom exemplo de como uma análise detalhada sobre o funcionamento da economia agregada foi reduzida a um par de relações simples que são úteis para uma análise de conjunto, mas onde muitas questões sobre o comportamento dos agentes que as geraram foram esquecidas.

A macroeconomia acabou por ficar fortemente associada ao conceito tradicional dos modelos de equilíbrio geral nos quais a heterogeneidade e a adaptabilidade dos agentes está ausente. No entanto, este é o campo em que a análise da complexidade é mais urgente. A macroeconomia é o resultado de múltiplas interações que são agregadas no sentido de explicar o comportamento da economia como uma única entidade. Um exercício rigoroso de agregação requer perceber com detalhe o que verdadeiramente significa a expressão fundamentos microeconômicos. Numa perspectiva da complexidade, tais fundamentos relacionam-se com a identificação de diferentes grupos que se comportam de forma distinta entre eles e das interações que se estabelecem no seio de cada grupo e entre grupos.

A macroeconomia tem de ser uma ciência aplicada para a qual a observação da estrutura das relações econômicas e dos padrões de interação deve preceder a construção de um modelo de base empírica, que pode ser empregado para avaliação e implementação de políticas. Acima de tudo, deve-se evitar incorrer numa falácia da composição: na macroeconomia, o todo está longe de ser a soma das partes; quando os agentes estabelecem relações econômicas, estão criando uma realidade única que vai além das características de cada entidade individual.

Progressivamente, as simulações numéricas de modelos baseados na interação entre agentes e os modelos estilizados da física têm substituído, como ferramentas analíticas, os modelos macroeconômicos tradicionais nos quais os agentes são dotados de capacidades computacionais ilimitadas e onde a agregação é apenas um

processo *naïve* de aumento de escala da análise. As novas técnicas encontram-se bem apetrechadas para lidar com a heterogeneidade e a interação, permitindo destacar um fato fundamental: o comportamento do todo do sistema econômico não pode ser inferido a partir do comportamento de um único agente. Wagner (2012) vê a relação entre fenômenos micro e macro como não dimensionáveis, isto é, os acontecimentos macro não podem ser inferidos a partir do comportamento das unidades micro, uma vez que eles correspondem a uma ordem superior de complexidade. Este autor considera que a macroeconomia é uma ecologia complexa de planos, onde as unidades micro podem gerar diferentes padrões macro em resposta a diferentes processos de interação.

Em Lengnick (2013), um modelo macroeconômico baseado na interação entre agentes é construído com o objetivo de comparar as consequências agregadas da interação local com os resultados de um problema convencional de equilíbrio geral dinâmico e estocástico. Ao correr o modelo, o autor descobre que falhas de coordenação podem desviar a economia de uma posição de equilíbrio, apesar de o equilíbrio poder também ser formado a partir de uma ordem espontânea. De qualquer modo, a ideia importante é que o equilíbrio ao nível macro não é imposto pela estrutura da economia; se ele emerge, será o resultado natural de uma série de processos de interação.

Outras tentativas de abordar a macroeconomia como um sistema complexo têm focado a atenção nos mercados financeiros e de crédito. A flexibilidade dos modelos macro baseados na interação entre agentes em introduzir dinâmicas inesperadas de desvio em face do equilíbrio sobre estruturas teóricas simples os tornou o cenário ideal para analisar e estudar circunstâncias financeiras extremas, como os *crashes* de mercado, as bolhas especulativas ou as corridas aos depósitos bancários. Assim, não será surpresa que vários autores tenham tentado dissecar cuidadosamente a anatomia das redes de crédito e financeiras, redes estas onde pululam múltiplas unidades em interação. É o caso de Gallegati, Giulioni e Kichiji (2003), Iyetomi *et al.* (2009), Bargigli e Gallegati (2011) e Grilli, Tedeschi e Gallegati (2014), os quais investigaram as fontes de instabilidade nos mercados financeiros e de crédito e os canais que ligam o sistema de crédito à macroeconomia, de modo a explicar as flutuações observadas, tanto em períodos de normalidade econômica como, com especial ênfase, em fases de recessão profunda.

Grande parte do esforço na macroeconomia teórica, ao longo das últimas décadas, relacionou-se com a procura dos microfundamentos do comportamento macro. Os modelos que integram características de complexidade aparentemente fornecem um ponto de partida relevante para essa missão. Os sistemas complexos são intrinsecamente modelos construídos sobre a observação de padrões de interação entre agentes individuais. São também modelos equipados com a capacidade

de gerar uma visão integrada do sistema e de pesquisar padrões coletivos. É neste sentido que a macroeconomia emerge e evolui. Não se trata de a forçar a partir do exterior; ela é gerada à medida que as relações individuais se transformam em padrões coletivos de interação no âmbito da estrutura de análise que é erigida.

#### 4 MODELOS BASEADOS NA INTERAÇÃO ENTRE AGENTES E REDES COMPLEXAS

A análise da economia como uma entidade complexa em permanente evolução requer o uso de técnicas específicas que vão para além das ferramentas convencionais a que esta ciência normalmente recorre. Muitos autores, como, por exemplo, Tesfatsion (2003), Gaffeo *et al.* (2008), Farmer e Foley (2009) e Fagiolo e Roventini (2012), destacam que os modelos baseados na interação entre agentes são o cenário ideal para colocar em perspectiva relações econômicas complexas. Os modelos baseados na interação entre agentes são coleções de algoritmos ou procedimentos que fornecem estruturas flexíveis que permitem explorar como a interação local origina um *feedback* de dois sentidos entre a microestrutura e as regularidades a nível macro.

Esses modelos são implementados como experiências computacionais que criam mundos virtuais flexíveis, os quais, uma vez gerados, evoluem ao longo do tempo com completa autonomia, isto é, a sua dinâmica é comandada exclusivamente pela interação entre os habitantes do sistema, sem qualquer necessidade de coordenação externa ou central. O modelizador é chamado apenas para fixar as condições iniciais, não sendo necessária qualquer intervenção posterior da sua parte. Ao se fixar o estado inicial, os agentes são dotados de um conjunto de características que permitem classificá-los como agentes econômicos: eles serão guiados pelo seu próprio interesse; eles vão decidir racionalmente; eles serão capazes de se comunicar com aqueles que os rodeiam; e eles serão capazes de se adaptar ao ambiente e de agir estratégicamente. Nestes modelos, os agentes não são otimizadores, eles encontram-se constrangidos por conjuntos de informação local e selecionam a melhor opção possível tendo em conta um pequeno conjunto de linhas de ação que podem tomar.

Nos modelos baseados na interação entre agentes, mesmo estruturas de análise muito simples podem conduzir a dinâmicas complexas. A interação cria uma história única e irrepetível, e os modelos podem ser simulados perpetuamente, sem que se atinja um estado de equilíbrio (a dinâmica fora do equilíbrio persiste); é frequentemente possível encontrar períodos relativamente longos com grandes desvios em relação ao equilíbrio de ponto fixo de referência – o que é útil, por exemplo, para explicar a ocorrência de recessões na economia agregada. Contudo, padrões de larga escala regulares também podem emergir neste tipo de modelo, isto é, é eventualmente possível discernir a existência de um determinado grau de coordenação resultante da interação numa estrutura de mercado complexa.

Em Helbing e Balietti (2012), é enfatizado que uma das características mais salientes dos modelos baseados na interação entre agentes é a sua versatilidade. Esta abordagem pode ser aplicada a uma grande variedade de assuntos de natureza econômica e social onde a complexidade está necessariamente presente – por exemplo, os mercados financeiros, o conflito social, as decisões empresariais, o desenvolvimento urbano, a globalização – e pode também utilizar diferentes estratégias de modelização; por exemplo, sistemas automatizados podem ser criados a partir de um conjunto de regras lógicas independentemente de qualquer estrutura subjacente ou, alternativamente, o ambiente baseado na interação entre agentes pode ser suportado numa rede de relações. Por conseguinte, uma parte significativa da modelização baseada na interação entre agentes, no contexto da análise da complexidade, relaciona-se com a formação e evolução de redes de contatos. As redes econômicas são particularmente relevantes, uma vez que, para efetivamente entender as relações econômicas, se exige uma capacidade de pôr em perspectiva como cada agente está relacionado com todos os outros e como é conduzida a formação e dissolução de ligações entre os sujeitos da interação.

No que segue, debate-se a relevância das redes complexas, sob a perspectiva de que elas constituem uma ferramenta importante para a análise da complexidade. Elas encontram-se bem apetrechadas para lidar com interações locais entre agentes heterogêneos e, portanto, para abordar o sistema econômico como um objeto complexo. Basicamente, as redes complexas são constituídas por um grande número de pontos ou nós, os quais representam as entidades relevantes ou os agentes, os quais se encontram ligados por conexões que traduzem a natureza das relações entre pontos. Bargigli e Tedeschi (2014) salientam a relevância de construir redes para explicar as interligações na economia. A ideia mais substantiva que se deverá ter em conta quando se modeliza a economia como uma rede complexa é que a estrutura topológica dessa rede se encontra em sistemática mutação à medida que as ligações que associam os agentes entre si estão constantemente formando-se e quebrando-se.

O que distingue as redes da economia de redes noutras áreas do conhecimento é que as ligações entre nós existem ou não como consequência de uma análise de custo-benefício que agentes que prosseguem o próprio interesse executam dadas as suas próprias expectativas acerca dos acontecimentos futuros. As redes evoluem de modo endógeno à medida que se desenrola a interação local entre agentes que são racionais, embora não necessariamente hiper-racionais. A questão central no que concerne às redes econômicas é que forças subjazem ao estabelecimento de ligações entre quaisquer dois indivíduos? Que afinidades podem ser encontradas entre aqueles que escolhem estar em contato com outros ou são postos em contato com outros por mera aleatoriedade?

Do ponto de vista técnico, uma rede complexa corresponde a um grafo  $G=(N,L)$ , onde  $N$  e  $L$  são dois conjuntos. O conjunto  $N$  contém nós, vértices ou pontos na rede e  $L$  corresponde às ligações ou arestas que põem em contato os nós. Assim, os elementos de  $L$  irão corresponder a pares de elementos de  $N$ . O primeiro conjunto contém  $N$  elementos:  $N=\{n_1,n_2,\dots,n_N\}$ ; e o segundo conjunto é de ordem  $L$ , isto é, detém  $L$  elementos:  $L=\{l_1,l_2,\dots,l_L\}$ . De acordo com Boccaletti *et al.* (2006), o que distingue uma rede complexa de um simples grafo é o conjunto de propriedades específicas da sua estrutura topológica. Uma rede complexa é composta por milhares ou milhões de nós e ligações e tem uma estrutura irregular que se encontra em constante evolução. Analisar uma rede deste gênero é uma tarefa complicada, mas este é precisamente o desafio que vale a pena encetar, porque essas são precisamente as propriedades que definem a economia como um objeto complexo.

Nas redes da economia, os nós representam famílias, empresas, instituições financeiras e agências e departamentos governamentais; as ligações são os fluxos reais e monetários que põem em contato os agentes. Esta descrição encontra-se aparentemente próxima daquilo que é conhecido como o circuito econômico através do qual os princípios da economia são introduzidos aos estudantes. Efetivamente, uma representação em rede da economia é um circuito econômico, mas um circuito extremamente detalhado, onde, em princípio, um elevado grau de heterogeneidade entre cada classe de agentes é permitido. Esta falta de homogeneidade não se restringe à natureza dos nós, está também relacionada com a especificidade das ligações. Uma rede econômica é uma teia não homogênea de relações, no sentido em que o grau de um nó, isto é, o número de conexões diretas com outros vértices, varia entre nós.

As redes da economia partilham muitas das propriedades de outras redes que encontramos no mundo real e que fazem a ligação entre seres humanos e entre as convenções institucionais por eles criadas. Uma destas propriedades é que a distribuição do grau, ou seja, a fração de nós que partilham um mesmo grau, tem a forma de uma distribuição *power-law*. Isto significa que, nas redes observadas na prática, raramente se encontra uma distribuição de ligações aleatória e relativamente homogênea; haverá um conjunto de nós que irá dominar, concentrando um grande número de arestas que se ligam a outros pontos na rede, enquanto que a larga maioria dos nós tem associadas apenas algumas ligações. Uma rede que envolve uma distribuição *power-law* designa-se rede livre de escala (*scale-free*); as redes da economia são, sem dúvida, redes livres de escala. Outra característica importante das redes da economia, comum a outras estruturas de interação na sociedade, é que, não obstante a dimensão da rede, é frequentemente possível encontrar caminhos relativamente curtos entre cada par de nós; esta propriedade é conhecida como a propriedade do mundo pequeno (*small-world*). As redes da economia são, efetivamente, redes *small-world*.

A estrutura da economia deve ainda ser interpretada como uma rede ponderada. Isto significa que as ligações entre nós variam na sua intensidade e relevância. Há ligações fortes e fracas entre agentes, e a análise da rede deve ser capaz de abranger esta diversidade. Para além disso, nas redes da economia, há uma tendência para a formação de comunidades, aglomerações e subgrupos coesos, ou seja, grupos relativamente pequenos que partilham laços fortes entre os seus membros. Um grupo de nós fortemente conectados é provável que desenvolva algumas características próprias, como modas ou novos hábitos, que podem, numa segunda fase, ser disseminados pelo resto da rede. A força das ligações e a sua distribuição de grau não são elementos estáticos da rede da economia; a intensidade das conexões pode ser reforçada ou desvanecer com a passagem do tempo; as ligações existentes podem desaparecer completamente; e novas ligações poderão surgir. Deste modo, a economia não é apenas uma rede complexa, é um organismo em permanente evolução que pode mudar decisivamente de forma num número reduzido de períodos de tempo.

Analisar uma rede com as propriedades que foram enumeradas nos parágrafos anteriores é aparentemente uma tarefa extremamente exigente. Um compromisso entre abrangência e tratabilidade é exigido de forma a reduzir a diversidade das características dos nós e das propriedades das ligações para um pequeno número de regularidades inteligíveis. Na próxima seção, um cenário de rede complexa é tomado para ilustrar o comportamento dos agentes econômicos. Os agentes serão classificados em termos da sua confiança ou sentimento relativamente ao desempenho futuro da economia, e esse sentimento pode alterar-se como resultado de interações ao nível local. Apesar de essa estrutura de análise ser relativamente minimalista, ela é suficientemente abrangente no sentido em que consegue cobrir grande parte das características da complexidade que foram previamente mencionadas, nomeadamente heterogeneidade entre agentes, interação local e decisões descentralizadas, adaptabilidade e evolução e dinâmica fora do equilíbrio.

## 5 UMA ILUSTRAÇÃO: DINÂMICA COMPLEXA NUM MODELO SIMPLES SOBRE SENTIMENTOS DE AGENTES

A complexidade na economia pode ser analisada através da construção de redes em larga escala que contemplem uma grande porção dos mais relevantes processos de interação observáveis. Normalmente, estas relações em rede só podem ser sujeitas a análise mediante simulações em computador, nas quais o modelo é corrido de modo a identificar regularidades com significado. Contudo, complexo não é sinônimo de complicado; não é necessário estar na posse de um conjunto imensamente vasto de relações para abordar os fenômenos econômicos como sendo fenômenos complexos.

Esta seção propõe um modelo simples dirigido à análise de transição entre sentimentos sob uma perspectiva de complexidade. Os agentes econômicos mudam a sua perspectiva sobre os acontecimentos econômicos futuros como resultado de

interações locais, apesar de, em determinadas circunstâncias, o resultado global ter retorno sobre as decisões dos agentes. Apesar de muito simples e estilizado, argumentar-se-á que o modelo contém os pressupostos e conduz aos resultados que correspondem às características dos sistemas complexos que foram descritos até o momento. Este modelo é inspirado na literatura sobre disseminação de rumores em redes complexas, uma literatura que foi iniciada por Daley e Kendall (1965) e Maki e Thompson (1973) e que tem contado com muitas contribuições importantes nos últimos anos, por exemplo, Zanette (2002), Nekovee *et al.* (2007), Huo, Huang e Guo (2012) ou Wang *et al.* (2013).

Considere-se uma rede com um número não especificado mas grande de nós. Cada nó contém um agente. Os agentes serão heterogêneos no sentido em que vão deter diferentes sentimentos a propósito do estado futuro da economia – por exemplo, acerca do crescimento futuro do produto ou da inflação futura. Os agentes estão disseminados por cinco categorias: neutrais, fracamente otimistas, fortemente otimistas, fracamente pessimistas e fortemente pessimistas. Em cada data  $t$ , cada agente irá assumir uma das posições mencionadas e as seguintes frações irão corresponder à porcentagem de indivíduos em cada uma delas:  $x_t^\omega$  (neutrais),  $z_t^\omega$  (fracamente otimistas),  $y_t^\omega$  (fortemente otimistas),  $z_t^\zeta$  (fracamente pessimistas) e  $y_t^\zeta$  (fortemente pessimistas). Naturalmente,  $x_t^\omega + z_t^\omega + y_t^\omega + z_t^\zeta + y_t^\zeta = 1$ . Também definimos a fração de otimistas como  $\omega_t \equiv z_t^\omega + y_t^\omega$  e a fração de pessimistas como  $\zeta_t \equiv z_t^\zeta + y_t^\zeta$ .

Essa é uma rede de autômatos celulares, onde cada ponto se encontra num dos cinco possíveis estados na data  $t$  mas onde o contato entre agentes em diferentes pontos da rede pode induzir a uma mudança de categoria ou estado para o período seguinte. No que segue, uma série de regras para a transição entre sentimentos através de interação local são aplicadas. Estas serão necessariamente regras estilizadas que servem ao propósito ilustrativo do nosso exercício, mas que poderiam ser tornadas mais realistas, por exemplo, através da implementação de um inquérito empírico rigoroso de como os sentimentos se modificam quando dois indivíduos com diferentes sentimentos se encontram. As regras que serão adotadas são as seguintes.

- Quando dois agentes em pontos adjacentes,  $i$  e  $j$ , estão no mesmo estado e se encontram, eles permanecem nessa categoria específica com uma probabilidade de 100%:

$$\begin{aligned} x(i) + x(j) &\xrightarrow{1} x(i) + x(j); \\ z^\omega(i) + z^\omega(j) &\xrightarrow{1} z^\omega(i) + z^\omega(j); \\ y^\omega(i) + y^\omega(j) &\xrightarrow{1} y^\omega(i) + y^\omega(j); \end{aligned}$$

$$z^\zeta(i) + z^\zeta(j) \xrightarrow{1} z^\zeta(i) + z^\zeta(j); \text{ e}$$

$$y^\zeta(i) + y^\zeta(j) \xrightarrow{1} y^\zeta(i) + y^\zeta(j).$$

- Quando um de dois agentes em pontos adjacentes,  $i$  e  $j$ , é fortemente otimista ou fortemente pessimista e entra em contato com um indivíduo no sentimento oposto, eles permanecem na classe do sentimento original, com probabilidade 1:

$$y^\omega(i) + y^\zeta(j) \xrightarrow{1} y^\omega(i) + y^\zeta(j);$$

$$y^\omega(i) + z^\zeta(j) \xrightarrow{1} y^\omega(i) + z^\zeta(j); \text{ e}$$

$$z^\omega(i) + y^\zeta(j) \xrightarrow{1} z^\omega(i) + y^\zeta(j).$$

- Quando dois agentes em pontos adjacentes,  $i$  e  $j$ , se encontram, sendo um deles neutral e tendo o outro um sentimento fraco de pessimismo ou otimismo, o sentimento neutral torna-se dominante, com probabilidade  $\theta \in (0,1)$ :

$$x(i) + z^\omega(j) \xrightarrow{\theta} x(i) + x(j); \quad x(i) + z^\omega(j) \xrightarrow{1-\theta} x(i) + z^\omega(j); \text{ e}$$

$$x(i) + z^\zeta(j) \xrightarrow{\theta} x(i) + x(j); \quad x(i) + z^\zeta(j) \xrightarrow{1-\theta} x(i) + z^\zeta(j).$$

Quando dois agentes em pontos adjacentes,  $i$  e  $j$ , na mesma categoria de sentimento, interagem e um deles tem um sentimento forte e o outro um sentimento fraco, o sentimento do primeiro irá enfraquecer, com uma probabilidade  $\sigma \in (0,1)$ :

$$y^\omega(i) + z^\omega(j) \xrightarrow{\sigma} z^\omega(i) + z^\omega(j); \quad y^\omega(i) + z^\omega(j) \xrightarrow{1-\sigma} y^\omega(i) + z^\omega(j)$$

$$y^\zeta(i) + z^\zeta(j) \xrightarrow{\sigma} z^\zeta(i) + z^\zeta(j); \quad y^\zeta(i) + z^\zeta(j) \xrightarrow{1-\sigma} y^\zeta(i) + z^\zeta(j)$$

5) Quando um de dois agentes em pontos adjacentes,  $i$  e  $j$ , é fortemente otimista ou fortemente pessimista, e se encontra com um indivíduo com sentimento neutral, o primeiro é potencialmente capaz de converter o segundo naquela categoria de sentimento, isto é, o segundo agente transforma-se num forte crente do sentimento em causa; isto ocorre com uma probabilidade  $\lambda \in (0,1)$ :

$$y^\omega(i) + x(j) \xrightarrow{\lambda} y^\omega(i) + y^\omega(j); \quad y^\omega(i) + x(j) \xrightarrow{1-\lambda} y^\omega(i) + x(j); \text{ e}$$

$$y^\zeta(i) + x(j) \xrightarrow{\lambda} y^\zeta(i) + y^\zeta(j); \quad y^\zeta(i) + x(j) \xrightarrow{1-\lambda} y^\zeta(i) + x(j).$$

- A regra mais sofisticada a ser adotada diz respeito ao encontro entre agentes  $i$  e  $j$  quando eles estão em lados opostos da barricada dos sentimentos e

são ambos fracos crentes. Neste caso, eles podem ser convertidos para a categoria de sentimento do agente na sua vizinhança, com uma probabilidade  $\rho \in (0,1)$ , se um conjunto específico de condições for cumprido. Em particular, neste caso considera-se um processo de *feedback* do nível macro para o nível micro que se traduz nas seguintes condições: se, simultaneamente, a fração global de otimistas está aumentando e a fração global de pessimistas está diminuindo, o agente otimista será capaz de transformar o pessimista num otimista; o contrário ocorre quando a fração global de otimistas está diminuindo e a fração global de pessimistas está aumentando. Os indivíduos manter-se-ão nas posições originais se nenhuma das duas referidas condições for satisfeita. Simbolicamente:

$$\omega_t > \omega_{t-1} \wedge \zeta_t < \zeta_{t-1}: \\ z^\omega(i) + z^\zeta(j) \xrightarrow{\rho} z^\omega(i) + z^\omega(j); z^\omega(i) + z^\zeta(j) \xrightarrow{1-\rho} z^\omega(i) + z^\zeta(j);$$

$$\omega_t < \omega_{t-1} \wedge \zeta_t > \zeta_{t-1}: \\ z^\omega(i) + z^\zeta(j) \xrightarrow{\rho} z^\zeta(i) + z^\zeta(j); z^\omega(i) + z^\zeta(j) \xrightarrow{1-\rho} z^\omega(i) + z^\zeta(j); \text{ e} \\ (\omega_t \geq \omega_{t-1} \wedge \zeta_t \geq \zeta_{t-1}) \vee (\omega_t \leq \omega_{t-1} \wedge \zeta_t \leq \zeta_{t-1}): \\ z^\omega(i) + z^\zeta(j) \xrightarrow{1} z^\omega(i) + z^\zeta(j).$$

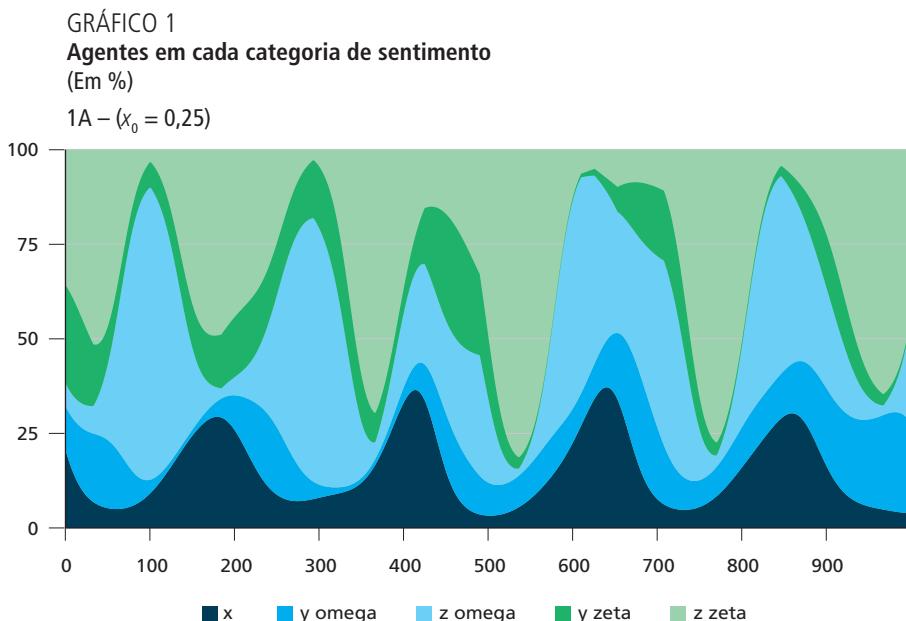
Tomando a hipótese de interação homogênea, isto é, a hipótese de que os encontros ocorrem aleatoriamente através da população, e normalizando o número de contatos por unidade de tempo para 1, a informação acima pode ser transformada num sistema relativamente simples de equações às diferenças que diz respeito à evolução das densidades de agentes nas diversas categorias. No caso corrente, o sistema sob avaliação será

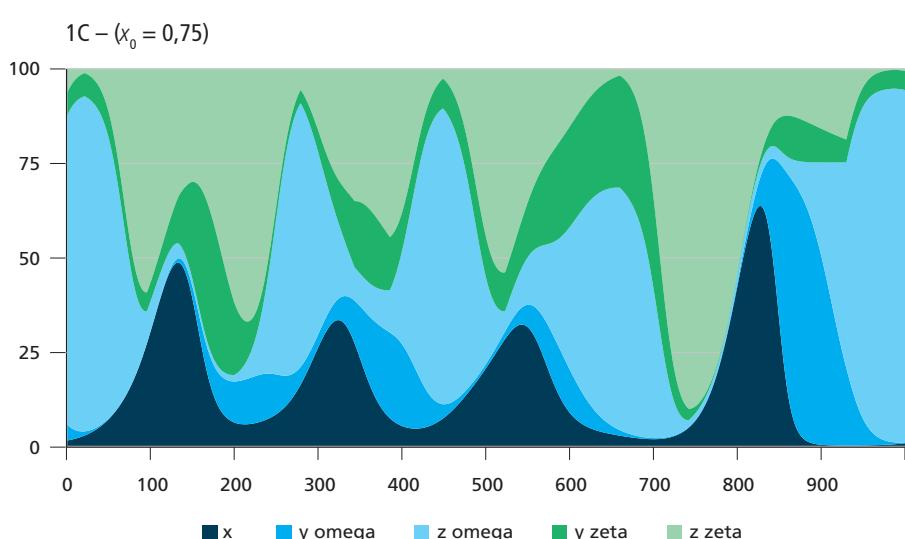
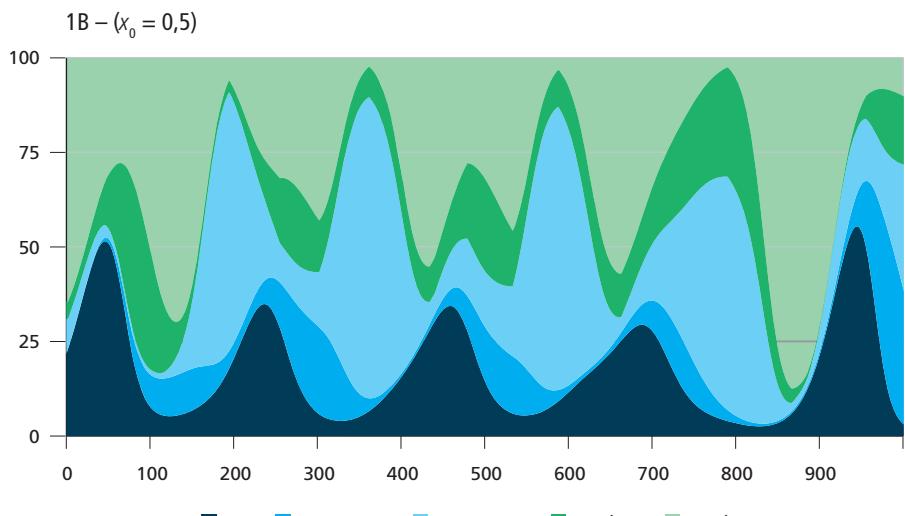
$$\begin{aligned} x_{t+1} - x_t &= [\theta(z_t^\omega + z_t^\zeta) - \lambda(y_t^\omega + y_t^\zeta)] x_t \\ y_{t+1}^\omega - y_t^\omega &= (\lambda x_t - \sigma z_t^\omega) y_t^\omega \\ z_{t+1}^\omega - z_t^\omega &= (\sigma y_t^\omega - \theta x_t \pm \rho z_t^\zeta) z_t^\omega \\ y_{t+1}^\zeta - y_t^\zeta &= (\lambda x_t - \sigma z_t^\zeta) y_t^\zeta \\ z_{t+1}^\zeta - z_t^\zeta &= (\sigma y_t^\zeta - \theta x_t \mp \rho z_t^\omega) z_t^\zeta. \end{aligned}$$

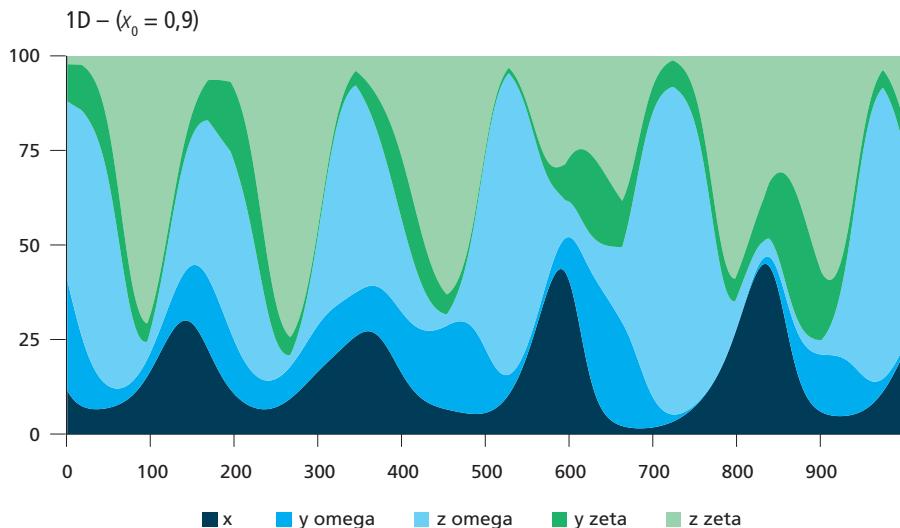
Nesse conjunto de equações, o sinal de mais/menos na terceira e quinta equação obedece às condições previamente impostas à interação entre agentes

com sentimentos fracos opostos. Para abordar a dinâmica do modelo, poder-se-ia proceder a um estudo analítico convencional sobre a existência e a estabilidade do respectivo equilíbrio de longo prazo. Todavia, dadas as particularidades do processo de interação estabelecido, esse equilíbrio será irrelevante, uma vez que o sistema não permanecerá nele. Irá dominar um resultado de dinâmica fora do equilíbrio, como alguns exemplos numéricos permitirão ilustrar.

Para visualizar a dinâmica do modelo de interação em rede proposto, é necessário especificar valores para os parâmetros e valores iniciais para as variáveis endógenas do sistema. Considere o seguinte vetor de parâmetros:  $(\theta, \sigma, \lambda, \rho) = (0,05; 0,075; 0,15; 0,1)$ . Para este, como para a larga maioria de combinações de valores de parâmetros admissíveis, o sistema irá permanecer numa posição de não equilíbrio, com ciclos irregulares persistentes ao longo do tempo. Ondas de otimismo e pessimismo emergem, desta forma, como o resultado da mera interação entre vizinhos combinada com um efeito localizado de *feedback* da economia global sobre as decisões micro. Os gráficos 1A a 1D apresentam o resultado do modelo para mil observações obtidas após a exclusão da fase de transição inicial. Cada gráfico é obtido a partir de um diferente conjunto de condições iniciais. São todos tais que  $y_0^\omega = z_0^\omega = (1 - x_0)/3$  e  $y_0^\zeta = z_0^\zeta = (1 - x_0)/6$ , com  $x_0 = 0,25; x_0 = 0,5; x_0 = 0,75; x_0 = 0,9$  para cada caso.







Elaboração do autor.

Esse exemplo ilustrativo de como um sistema complexo pode funcionar atingiu os objetivos pretendidos. Partindo de uma estrutura complexa mínima com heterogeneidade entre agentes e interação local, observou-se a emergência de uma rede evolutiva. Nesta rede os agentes aprendem, adaptam-se e evoluem à medida que vão estabelecendo relações uns com os outros, e não há qualquer tendência para que o sistema permaneça numa posição de equilíbrio, uma vez que os agentes podem sempre voltar a uma posição de sentimento anterior, dependendo de com quem vão interagir em seguida. Este resultado de ausência de equilíbrio demonstra como a complexidade pode emergir a partir de um pequeno conjunto de regras de interação.

As implicações de um modelo como o caracterizado são imensas. Ao focar a atenção na transição entre sentimentos, ele indica que períodos de otimismo e pessimismo não são apenas o resultado de condições econômicas observáveis e de probabilidades sobre o modo como estas vão evoluir no futuro. É a estrutura dos contatos entre agentes que irá determinar os seus níveis de confiança. Ondas de otimismo e pessimismo são recorrentes porque os agentes estão permanentemente em contato e podem ser influenciados por outros. Os *animal spirits* estão, assim, presentes na economia e podem ajudar a explicar o desempenho macroeconômico de curto prazo.

## 6 CONCLUSÃO

Este capítulo colocou em perspectiva as razões pelas quais se deve interpretar a economia como um sistema complexo e discutiu a forma como a ciência econômica pode adquirir o estatuto de ciência da complexidade. Em Arthur (2013),

o estatuto de complexidade da ciência econômica é sintetizado na ideia de que a economia se encontra permanentemente em movimento e perpetuamente sob construção e renovação. As relações econômicas não estão relacionadas com determinismo, equilíbrio, ordem ou resultados estáticos, ao contrário daquilo que a abordagem tradicional da ciência econômica sugere; a economia é orgânica, contingente em eventos passados, evolutiva e aberta à inovação. Numa palavra, a economia é complexa.

A abordagem da complexidade está progressivamente ganhando o seu merecido lugar no pensamento econômico. Tal se deve ao seu realismo, isto é, à capacidade de explicar como regularidades globais são geradas por ações estratégicas locais e como tais regularidades têm retorno sobre o comportamento dos agentes individuais, criando um ambiente competitivo e evolutivo, onde a ausência de equilíbrio é a norma, novas estruturas estão persistentemente sendo criadas e fenômenos emergentes surgem de forma recorrente. As palavras-chave corretas para descrever o que uma economia efetivamente é são mudança, criação e evolução. Estes são todos conceitos que só uma visão de complexidade pode abranger.

O realismo mencionado acarreta necessariamente um custo. Trazer a complexidade para a ciência econômica implica analisar as regularidades de estruturas de interação que normalmente são de grande dimensão e que, em muitas ocasiões, não podem ser abordadas com recurso a modelos analíticos; a simulação computacional é a única forma viável de estudar as redes complexas que estão em causa. Isto não é forçosamente um problema; felizmente, hoje existem computadores e estes constituem uma ferramenta adicional poderosa que os cientistas têm à sua disposição não apenas para processar dados mas também para explorar novas ideias e gerar e testar novas teorias. Tal está ocorrendo em muitos campos científicos, e a ciência econômica não tem de ser a exceção. Contudo, a sofisticação das estruturas de análise consideradas não exclui a possibilidade de abordar as ideias fortes da complexidade – heterogeneidade, descentralização, evolução e dependência em face do passado – sob uma estrutura de análise relativamente simples; isto foi feito na seção 5 do capítulo, onde as referidas ideias foram exemplificadas tomando em consideração um modelo simples de transição entre sentimentos, o qual foi construído em torno de um pequeno conjunto de equações às diferenças.

## REFERÊNCIAS

- ARTHUR, W. B. **Complexity economics**: a different framework for economic thought. Santa Fe: Santa Fe Institute, 2013. (Working Paper, n. 12).
- ARTHUR, W. B.; DURLAUF, S. N.; LANE, D. A. Introduction. In: \_\_\_\_\_. (Eds.). **The economy as an evolving complex system II**. Redwood City: Addison-Wesley, 1997. p. 1-14.

- ASHRAF, Q.; GERSHMAN, B.; HOWITT, P. Macroeconomics in a self-organizing economy. *Revue de l'OFCE*, v. 124, n. 5, p. 43-65, 2012.
- BARGIGLI, L.; GALLEGATI, M. Random digraphs with given expected degree sequences: a model for economic networks. **Journal of Economic Behavior and Organization**, v. 78, n. 3, p. 396-411, 2011.
- BARGIGLI, L.; TEDESCHI, G. Interaction in agent-based economics: a survey on the network approach. **Physica A**, v. 399, p. 1-15, 2014.
- BOCCALETTI, S. *et al.* Complex networks: structure and dynamics. **Physics Reports**, v. 424, n. 4-5, p. 175-308, 2006.
- BOUCHAUD, J. P. The (unfortunate) complexity of the economy. **Physics World**, p. 28-32, 2009.
- BRUUN, C. The economy as an agent-based whole – simulating Schumpeterian dynamics. **Industry and Innovation**, v. 10, n. 4, p. 475-491, 2003.
- COLANDER, D. **Complexity and the history of economic thought**. Vermont: Middlebury College, 2008. (Working Paper, n. 4).
- COLANDER, D.; HOLT, R. P. F.; ROSSER, J. B. The changing face of mainstream economics. **Review of Political Economy**, v. 16, n. 4, p. 485-499, 2004.
- COLANDER, D.; ROTHSCHILD, C. Sins of the sons of Samuelson: vision, pedagogy, and the zig-zag windings of complex dynamics. **Journal of Economic Behavior and Organization**, v. 74, n. 3, p. 277-290, 2010.
- DALEY, D. J.; KENDALL, D. G. Stochastic rumours. **Journal of Applied Mathematics**, v. 1, n. 1, p. 42-55, 1965.
- DAY, R. H. **Complex economic dynamics**: an introduction to dynamical systems and market mechanisms. Cambridge: MIT Press, 1994. v. 1.
- FAGIOLO, G.; ROVENTINI, A. On the scientific status of economic policy: a tale of alternative paradigms. **Knowledge Engineering Review**, v. 27, n. 2, p. 163-185, 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/YnJgmJ>>.
- FARMER, J. D.; FOLEY, D. The economy needs agent-based modelling. **Nature**, n. 460, p. 685-686, 2009.
- FONTANA, M. **The complexity approach to economics**: a paradigm shift. Turin: Cesmep, 2008. (Working Paper, n. 1).
- GAFFEO, E. *et al.* Adaptive microfoundations for emergent macroeconomics. **Eastern Economic Journal**, Basingstoke, v. 34, p. 441-463, 2008.
- GALLEGATI, M. *et al.* Worrying trends in econophysics. **Physica A: statistical mechanics and its applications**, v. 370, n. 1, p. 1-6, 2006. Disponível em: <<http://goo.gl/YnJgmJ>>.

GALLEGATI, M.; GIULIONI, G.; KICHIJI, N. Complex dynamics and financial fragility in an agent-based model. **Advances in Complex Systems**, v. 6, n. 3, p. 267-282, 2003.

GATTI, D.; GAFFEO, E.; GALLEGATI, M. Complex agent-based macroeconomics: a manifesto for a new paradigm. **Journal of Economic Interaction and Coordination**, v. 5, n. 2, p. 111-135, 2010.

GRILLI, R.; TEDESCHI, G.; GALLEGATI, M. Markets connectivity and financial contagion. **Journal of Economic Interaction and Coordination**, Mar. 2014.

HAYEK, F. A. The theory of Complex Phenomena. In: \_\_\_\_\_. **Studies in philosophy, politics and economics**. London: Routledge and Kegan Paul, 1967. p. 71-104.

HELBING, D.; BALIETTI, S. Agent-based modeling. In: HELBING, D. (Ed.). **Social self-organization**: agent-based simulations and experiments to study emergent social behavior. Berlin: Springer-Verlag, 2012. p. 25-70.

HODGSON, G. M.; KNUDSEN, T. Generative replication and the evolution of complexity. **Journal of Economic Behavior and Organization**, v. 75, n. 1, p. 12-24, 2010.

HOLT, R. P. F.; ROSSER, J. B.; COLANDER, D. The complexity era in economics. **Review of Political Economy**, v. 23, n. 3, p. 357-369, 2011.

HUO, L.; HUANG, P.; GUO, C. X. Analyzing the dynamics of a rumor transmission model with incubation. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, v. 2012, 2012.

IYETOMI, H. et al. Agent-based model approach to complex phenomena in real economy. **Progress of Theoretical Physics Supplement**, v. 179, p. 123-133, 2009.

KIRMAN, A. P. Can artificial economies help us understand real economies? **Revue de l'OFCE**, n. 124, p. 15-41, 2012.

LEGNICK, M. Agent-based macroeconomics: a baseline model. **Journal of Economic Behavior and Organization**, v. 86, p. 102-120, 2013.

MAKI, D. P.; THOMPSON, M. **Mathematical models and applications, with emphasis on social, life, and management sciences**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1973.

MANTEGNA, R.; STANLEY, H. E. **Introduction to econophysics**. New York: Cambridge University Press, 2000.

MARKOSE, S. Computability and evolutionary complexity: markets as complex adaptive systems (CAS). **Economic Journal**, v. 115, n. 504, p. 159-192, 2005.

- MARTIN, R.; SUNLEY, P. Complexity thinking and evolutionary economic geography. **Journal of Economic Geography**, v. 7, n. 5, p. 573-601, 2007.
- MCCAULEY, J. L. Making mathematics effective in economics. In: VELUPILLAI, K. V. (Ed.). **Computability, complexity and constructivity in economic analysis**. Victoria: Blackwell, 2005. p. 51-84.
- NEKOVEE, M. *et al.* Theory of rumour spreading in complex social networks. **Physica A**, v. 374, p. 457-470, 2007.
- ROSSER, J. B. Econophysics and the economic complexity. **Advances in Complex Systems**, v. 11, n. 5, p. 745-760, 2008.
- \_\_\_\_\_. Is a transdisciplinary perspective on economic complexity possible? **Journal of Economic Behavior and Organization**, v. 75, n. 1, p. 3-11, 2010.
- SHANNON, C.; WEAVER, W. **The mathematical theory of communication**. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- SIMON, H. A. The architecture of complexity. **Proceedings of the American Philosophical Society**, v. 106, n. 6, p. 467-482, 1962.
- TESFATSION, L. Agent-based computational economics: modeling economies as complex adaptive systems. **Information Sciences**, v. 149, p. 262-268, 2003.
- \_\_\_\_\_. Agent-based computational economics: a constructive approach to economic theory. In: TESFATSION, L.; JUDD, K. L. (Eds.). **Handbook of Computational Economics**. Amsterdam: Elsevier, 2006. v. 2, p. 831-880.
- VELUPILLAI, K. V. A primer on the tools and concepts of computable economics. In: \_\_\_\_\_. (Ed.). **Computability, complexity and constructivity in economic analysis**. Victoria: Blackwell, 2005. p. 148-197.
- WAGNER, R. E. A macro economy as an ecology of plans. **Journal of Economic Behavior and Organization**, v. 82, n. 2-3, p. 433-444, 2012.
- WANG, Y. Q. *et al.* Rumor spreading model with trust mechanism in complex social networks. **Communications in Theoretical Physics**, v. 59, n. 4, p. 510-516, 2013.
- YAKOVENKO, V. M. Statistical mechanics approaches to econophysics. In: MEYERS, R. A. (Ed.). **Encyclopedia of complexity and systems science**. Berlin: Springer, 2009.
- ZANETTE, D. H. Dynamics of rumor propagation on small-world networks. **Physical Review E**, v. 65, 2002.

## CAPÍTULO 9

# MODELAGEM DA ECONOMIA COMO UM SISTEMA COMPLEXO<sup>1,2</sup>

Herbert Dawid<sup>3</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

A maioria dos sistemas econômicos de interesse, tais como firmas, mercados e, mais ainda, economias inteiras, são caracterizados pela interação de um grande número de indivíduos heterogêneos, que tomam uma infinidade de decisões de diferentes tipos para produzir e trocar uma grande variedade de bens, assim como de informações. Essas transações são governadas por regras institucionais, as quais podem variar significativamente entre diferentes regiões, indústrias, períodos de tempo e outros contextos. Com base nisso, sistemas econômicos devem ser vistos certamente como sistemas muito complexos, o que torna extremamente difícil derivar qualquer *insight* de validade geral sobre as dinâmicas (futuras) de variáveis econômicas chave ou o efeito de algumas medidas de política econômica. Tais *insights* são, no entanto, de crucial importância para o provimento ao público de previsões confiáveis, pelo menos de natureza qualitativa, sobre o conjunto de futuros desenvolvimentos econômicos que parecem possíveis e, talvez ainda mais importante, para o fornecimento aos formuladores de políticas de previsões razoáveis sobre o impacto esperado das diferentes medidas políticas disponíveis. De modo geral, tais *insights* podem ser obtidos de maneira indutiva a partir da generalização de resultados obtidos de evidências empíricas (passadas) ou a partir da construção de modelos que tentam captar as características cruciais do sistema em investigação. Neste capítulo, o foco está inteiramente nessa segunda opção – isto é, na análise de dinâmicas econômicas baseada em modelos.

Modelos econômicos são construídos a partir de suposições de inúmeras questões centrais. Deve-se deixar claro quais tipos de agentes são incluídos no modelo (firmas, famílias, bancos etc.), quais propriedades caracterizam os diferentes tipos de agentes (e as diferenças entre agentes individuais do mesmo tipo), quais tipos de produtos (incluindo trabalho, informação etc.) são trocados entre os

1. O autor é grato a Simon Gemkow, Philipp Harting, Michael Neugart e Sander van der Hoog pelas inúmeras discussões frutíferas e por suas cooperações no desenvolvimento do modelo Eurace@Unibi, o qual será discutido ao longo deste trabalho.

2. Traduzido por Marina Haddad Tóvolli.

3. Departamento de Administração de Empresas e Economia e Centro de Economia Matemática (IMW), da Universidade de Bielefeld. *E-mail*: <hdawid@wiwi.uni-bielefeld.de>.

indivíduos, quais tipos de regras governam essas trocas e, por fim, como os agentes individuais determinam suas ações. Apesar de os modelos econômicos variarem muito em relação à primeira dessas questões (a depender da área de aplicação), a maioria dos modelos tradicionais na literatura econômica se baseia em suposições similares em relação às outras questões. Em grande parte da literatura, assume-se que agentes do mesmo tipo são idênticos (os chamados “agentes representativos”) ou diferem apenas em relação a um parâmetro único (por exemplo, dotação inicial, produtividade e atitude perante ao risco); que eles trocam produtos em mercados à vista sem fricção que sempre se ajustam; e, mais importante, que o comportamento deles é determinado a partir de algum conceito de equilíbrio. Comportamento de equilíbrio requer que todo agente maximize alguma função objetivo (intertemporal), dadas as suas expectativas racionais. Ou seja, cada agente é capaz de prever corretamente as estratégias de todos os outros indivíduos na economia.<sup>4</sup> Essas suposições permitem a construção de modelos que tratam de questões econômicas complicadas, que podem ser analisadas por meio da solução de um conjunto relativamente pequeno de condições (intertemporais) de primeira ordem, de restrições orçamentárias e de condições de *market clearing*.<sup>5</sup> Dada a imensa complexidade dos sistemas econômicos, tal abordagem parcimoniosa é muito tentadora, pois ela permite identificar claramente os principais mecanismos responsáveis por certos fenômenos econômicos. Geralmente, o foco da análise está em estados estacionários de longo prazo ou em trajetórias de crescimento balanceado, e, em muitos casos, o comportamento de longo prazo pode ser descrito analiticamente ou por meio de métodos numéricos eficazes. Ademais, ter como base um pequeno núcleo comum de suposições centrais permite comparações relativamente fáceis entre modelos e diminui barreiras de entrada para trabalhar com diferentes modelos, uma vez compreendidos a ideia básica dos conceitos de equilíbrio e os métodos de otimização dinâmica.

Um ótimo exemplo é o uso de modelos dinâmicos estocásticos de equilíbrio geral (DSGE) como modelo-base para análises econômicas em geral e análises de políticas em particular, para uma variedade extensa de assuntos econômicos. Para essa classe de modelos, não somente uma estrutura de modelo comum e central foi adotada, mas também existem calibrações padrões do modelo, baseadas no objetivo de acompanhar algumas regularidades (macroeconômicas) empíricas, as quais podem ser usadas como base para extensões e variações do modelo. No entanto, conforme tem sido repetidamente argumentado (Kirman, 1992; Colander *et al.*, 2009; Fagiolo e Roventini, 2012), o núcleo das suposições padrões

4. Obviamente, existem importantes e amplas correntes da literatura que relaxam várias dessas suposições listadas aqui, tal como a literatura da teoria do ajuste (que relaxa a suposição de mercados à vista sem fricção), a qual é, até os dias atuais, a abordagem tradicional para análise teórica de mercados de trabalho.

5. Suposição de que os preços se ajustam de tal forma que a quantidade ofertada ao preço de mercado equivale à quantidade demandada ao preço de mercado.

é forte e, em muitos casos, parece ser contrário às observações empíricas no nível micro. Isso se aplica particularmente à suposição de que todo comportamento individual é determinado pela otimização dinâmica (de horizonte infinito), sob informação perfeita da estrutura do sistema econômico circundante e previsão perfeita das estratégias de todos os agentes na economia que determinam seus comportamentos correntes e futuros. Ademais, em várias áreas, os modelos centrais tiveram que ser ajustados por extensões, a exemplo da rigidez de preços (modelo de fixação de preços de Calvo) ou de consumidores míopes que seguem regras de dedo, para que os modelos pudessem gerar dinâmicas qualitativamente consistentes com evidências empíricas no nível macro. Essas extensões, no entanto, parecem ser *ad hoc*, com nenhuma fundamentação empírica no nível micro, e parecem ser inconsistentes com o paradigma de equilíbrio sem fricção que fundamenta esses modelos. Finalmente, tem-se criticado o fato de que oscilações, expansões e contrações geralmente podem ser produzidas nesses modelos somente pela introdução de persistente fluxo de choques externos. Portanto, entende-se que essa classe de modelos consegue contribuir pouco com o entendimento dos mecanismos que geram as flutuações econômicas. Contudo, uma melhor compreensão desses mecanismos seria importante para a avaliação de potenciais implicações de medidas políticas ou de ajustes institucionais para a estabilização da economia. Em particular, como consequência da crise econômica e financeira iniciada em 2008, vários formuladores de políticas expressaram preocupação na capacidade dos modelos tradicionais disponíveis em lhes dar suporte para enfrentar a crise e ajustar as políticas de modo a prevenir crises futuras.<sup>6</sup>

Nos últimos anos, uma crescente comunidade de economistas tem desenvolvido abordagens de modelagem que consideram mais explicitamente a complexidade dos sistemas econômicos e tentam derivar *insights* das dinâmicas econômicas emergentes no nível de mercado, da indústria e da macroeconomia, por meio da agregação explícita da mudança dinâmica de comportamento das populações de agentes (heterogêneos) de diferentes tipos. Trabalhos pioneiros com tal agenda são

6. A esse respeito, a declaração de maior destaque é do ex-presidente do Banco Central Europeu, Jean-Claude Trichet, que (quando ainda em exercício) afirmou na ECB Central Banking Conference, em novembro de 2010: "Quando a crise veio, as sérias limitações dos modelos econômicos e financeiros existentes se tornaram imediatamente aparentes. (...) Os modelos macro falharam em prever a crise e pareciam incapazes de explicar de maneira convincente o que estava acontecendo com a economia. Como um formulador de política durante a crise, eu achei os modelos disponíveis de ajuda limitada. Na verdade, eu diria mais: diante da crise, nós nos sentimos abandonados pelas ferramentas convencionais. (...) Nós precisamos lidar melhor com a heterogeneidade entre os agentes e as interações entre aqueles agentes heterogêneos. Nós precisamos considerar motivações alternativas para escolhas econômicas. (...) A modelagem baseada em agentes prescinde a suposição de otimização e permite interações mais complexas entre os agentes. Tais abordagens merecem nossa atenção". No original: "*When the crisis came, the serious limitations of existing economic and financial models immediately became apparent. (...) Macro models failed to predict the crisis and seemed incapable of explaining what was happening to the economy in a convincing manner. As a policy-maker during the crisis, I found the available models of limited help. In fact, I would go further: in the face of the crisis, we felt abandoned by conventional tools. (...) We need to deal better with heterogeneity across agents and the interaction among those heterogeneous agents. We need to entertain alternative motivations for economic choices. (...) Agent-based modelling dispenses with the optimization assumption and allows for more complex interactions between agents. Such approaches are worthy of our attention*". Disponível em: <<http://goo.gl/Hzti2p>>.

os modelos evolucionários de dinâmica industrial de Nelson e Winter (1982) ou os trabalhos iniciais do Instituto Santa Fe (Arrow, Anderson e Pines, 1988; Arthur *et al.*, 1997; Fontana, 2010). Ao seguir tal abordagem, é possível captar explicitamente os canais e as regras institucionais por meio dos quais os agentes individuais interagem, e é dada ao modelador uma maior liberdade no que tange à modelagem do comportamento individual. Essa liberdade não é necessariamente uma bênção, dado que ela suscita a questão de *wilderness* ou mesmo de arbitrariedade das suposições do modelo. Será discutido na próxima seção como a literatura tem lidado com essa séria questão. O foco nessa classe de modelos não está restrito a considerações dos estados de equilíbrio de longo prazo; é dada atenção explícita às dinâmicas econômicas emergentes, incluindo as fases de transição. Um tratamento analítico de tais sistemas dinâmicos complexos é, em geral, um grande desafio, o que implica que simulações computacionais e análises numéricas desempenham um importante papel no exame de tais modelos. Da perspectiva da avaliação e do dese-  
nho das medidas de política econômica, as propriedades da abordagem de sistemas complexos descritas anteriormente são particularmente atrativas por várias razões.

- 1) Em muitos casos, efeitos de curto e médio prazo de políticas são tão relevantes quanto os de longo prazo, o que torna importante ser capaz de avaliar efeitos políticos com diferentes horizontes de tempo. Ademais, efeitos políticos são geralmente mais relevantes em situações fora do equilíbrio de longo prazo, tais como em crises.
- 2) Entender os efeitos das políticas no comportamento individual pode ser um preditor ruim para implicações das políticas no nível agregado. É importante capturar as heterogeneidades entre os indivíduos, assim como os *feedbacks* entre o comportamento micro e os resultados macro, e as redes entre os agentes econômicos.
- 3) As propriedades de longo prazo das dinâmicas econômicas emergentes podem ser crucialmente afetadas por desequilíbrios temporários, potenciais *lock-in* e *path-dependencies* (histereses). Portanto, dinâmicas transitórias devem ser explicitamente consideradas para uma análise completa de política.
- 4) Os efeitos das políticas geralmente dependem crucialmente das características do arranjo institucional no qual elas estão inseridas. Logo, requer-se uma representação explícita da estrutura institucional (regras de mercado etc.).
- 5) Se os tomadores de decisões econômicas reagem de forma racionalmente limitada ao ambiente econômico e às medidas de políticas econômicas (usando regras comportamentais), então os modelos de políticas, que de uma perspectiva política são normativos, devem capturar tais reações (ao invés da reação “em equilíbrio”).

Essa breve discussão destaca o potencial de uma abordagem de modelagem que trata a economia como um sistema complexo. Na próxima seção, discutirei em maior detalhe várias questões importantes associadas ao uso de modelos desse tipo. O foco aqui será em modelos computacionais, os quais representam a grande maioria da literatura nessa área. Por razões de tratabilidade, abordagens analíticas poderiam, até agora, ser aplicadas somente a versões simples de modelos de agentes heterogêneos. Essas análises empregam a teoria de Markov (Dawid, 1999), métodos desenvolvidos em física estatística que permitem derivar as dinâmicas de certos momentos das distribuições de variáveis-chave (Alfarano, Lux e Wagner, 2008; Delli Gatti *et al.*, 2012), ou métodos desenvolvidos para um tipo particular de abordagem, tal como modelos de redes (Newman, 2010; Jackson, 2010).

## 2 MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA A MODELAGEM DE INTERAÇÕES ECONÔMICAS COMPLEXAS

A maioria dos modelos que descrevem a economia como um sistema complexo com dinâmicas emergentes se baseia em modelos computacionais calcados em agentes. Abstenho-me aqui de uma extensa discussão geral das diferentes interpretações das propriedades dos modelos baseados em agentes na literatura; ao invés disso, forneço uma lista básica das principais características destes modelos, como são entendidas neste capítulo.

- 1) Cada ator econômico relevante é representado por um agente, o que significa que, em geral, existem vários agentes de cada tipo no modelo. Os agentes são potencialmente heterogêneos, no que se refere às dotações iniciais, às características e às regras de decisão.
- 2) A tomada de decisão pelos agentes é determinada pelas regras de comportamento, as quais podem ser ajustadas ao longo do tempo por aprendizagem.
- 3) Os agentes interagem por meio de protocolos de interação explicitamente apresentados (regras de mercado, canais de fluxo de informação etc.).
- 4) Dinâmicas no nível *meso* (mercado/indústria) e macro são geradas pela agregação de ações/estoques de todos os agentes do modelo.

De modo geral, modelos computacionais baseados em agentes são estruturados pela determinação das características e das regras de decisão dos agentes e dos protocolos de interação. Para rodar os modelos, uma constelação de parâmetros tem de ser escolhida, assim como os valores iniciais de todas as variáveis endógenas do modelo. Dado essa condição inicial, o modelo é então simulado, e as séries temporais das variáveis relevantes são armazenadas, quando for possível fazer isso para todo o conjunto de agentes individuais, ou de forma reduzida, armazenando somente as dinâmicas da distribuição da variável entre os agentes, ou alguns

momentos dessa distribuição.<sup>7</sup> Como discutido, por exemplo, em LeBaron e Tesfatsion (2008) ou em Farmer e Foley (2009), modelos baseados em agentes têm de fato o potencial de abordar várias questões problemáticas da modelagem econômica discutidas na seção anterior. No entanto, como qualquer abordagem de modelagem, o desenho e a análise de tais modelos requerem um alto grau de rigor e atenção, de forma a conseguir gerar resultados confiáveis e *insights* de interesse geral. No que se segue, destaco alguns aspectos-chave da construção de modelos baseados em agentes e forneço algumas indicações para abordagens desenvolvidas na literatura.

## 2.1 Mercados e transações econômicas

A primeira questão-chave no desenho de um modelo baseado em agentes é como as interações destes nos mercados e ambientes similares deveriam ser capturadas. Uma abordagem de baixo para cima microfundamentada pura exigiria do modelador a definição de protocolos explícitos, segundo os quais os potenciais encontros entre compradores e vendedores e os termos das interações (por exemplo, preços e quantidades) são determinados. Se tal abordagem de cima para baixo é seguida, então a necessidade de uma fundamentação empírica da análise (a qual será melhor elaborada a seguir) requer que o modelo capture as principais características institucionais do mercado em investigação. Obviamente, tais características variam substancialmente entre os diferentes tipos de mercados, e, de fato, os modeladores desenvolveram abordagens variadas para capturar características típicas dos mercados financeiros (LeBaron, 2006), mercados de trabalho (Neugart e Richiardi, 2014), mercados de energia (Li, Sun e Tesfatsion, 2011) ou mercados para consumo padrão (armazenável) e bens de investimento (Dawid *et al.*, 2014). Esses modelos, entre outras abordagens, incorporam leilões de diferentes tipos, lista de pedidos ou modelos de busca com informação limitada e barganha, assim como *outlets*, com preços fixados, visitados constantemente por consumidores.

Ao incorporar tais representações detalhadas da estrutura de interação no mercado em um modelo baseado em agentes, geralmente se introduz no modelo fricções e potencial racionamento em ambos os lados do mercado. Logo, tal abordagem tipicamente requer que os agentes armazenem estoques dos produtos comercializados (que evoluem ao longo do tempo) e uma descrição clara de como os agentes reagem ao racionamento. A última parte é particularmente relevante para as firmas caso haja racionamento nos mercados de fatores, que os force a ajustar os seus processos de produção. Ademais, a quantidade de fricções que surgem no mercado pode depender bastante do protocolo de interação. Por exemplo, as fricções que surgem em um modelo de mercado de trabalho, em que desempregados procurando por emprego aplicam para vagas de inúmeras firmas,

7. Ver Tesfatsion (2006), para abrangentes introdução e discussão da modelagem baseada em agentes em economia.

dependem do número de aplicações simultâneas, da heterogeneidade da informação sobre as vagas entre os trabalhadores, da heterogeneidade das firmas quanto à sua classificação dos candidatos e de outros aspectos, dos quais obter uma evidência empírica é um grande desafio.

Apesar do requisito de correspondência com fatos empíricos estilizados (como a média geral das fricções em um mercado) fornecer algum direcionamento de como essas características do modelo devem ser escolhidas, a abordagem de baixo para cima pura claramente gera um considerável grau de complexidade na modelagem das interações de mercado. Se a introdução de tal complexidade é adequada e necessária, depende do contexto e do objetivo da análise. Existem vários exemplos de trabalhos baseados em agentes nos quais representações de forma reduzida, como suposições padrões de *market clearing*, ao invés de modelos explícitos de mercado, são usadas para determinar os resultados do mercado, dado que o foco dos estudos é tal que uma descrição detalhada das interações do mercado não parece adicionar *insights* relevantes (Nelson e Winter, 1982; Arthur *et al.*, 1997; Dawid e Reimann, 2011). Claramente, a escolha da modelagem apropriada depende crucialmente das perguntas de pesquisa a serem respondidas pelo modelo.

## 2.2 Comportamento do agente individual e aprendizagem

Como discutido na subseção anterior, um aspecto importante de qualquer modelo econômico é a forma que a tomada de decisão individual é capturada. Em modelos dinâmicos de equilíbrio, supõe-se que o comportamento de todos os atores é determinado pela maximização da própria função objetivo (intertemporal), com o uso de expectativas corretas sobre o comportamento dos outros atores. É discutível o quanto tal análise dinâmica de equilíbrio fornece uma teoria descritiva do comportamento individual. Primeiramente, o equilíbrio dinâmico requer que todos os agentes tenham informação suficiente sobre o sistema econômico todo, para serem capazes de entender completamente não apenas o seu próprio problema de decisão dinâmica, como também o de todos os outros agentes na economia. Indiscutivelmente, nos cenários econômicos mais relevantes, tal informação não está disponível para os tomadores de decisão individuais. Em segundo lugar, existe evidência empírica sugerindo que os indivíduos não se apoiam em otimização dinâmica de longo prazo (Noussair e Matheny, 2000) e não possuem expectativas racionais (Hommes *et al.*, 2005). Dado que o uso de modelos que buscam ser descritivos também no nível micro faz parte da agenda da abordagem baseada em agentes, essas considerações indicam a busca por alternativas. Ademais, em um cenário em que os agentes diferem em várias dimensões e interagem em ambientes complexos, o cálculo do comportamento do equilíbrio dinâmico é geralmente impossível, mesmo se métodos numéricos atuais forem empregados.<sup>8</sup>

8. Essa observação pode ser ilustrada ao considerar o modelo Eurace@Unib, discutido na subseção 3.2. Ver nota de rodapé 17.

Na literatura de modelos baseados em agentes, o comportamento individual é determinado por regras de comportamento, em que esse termo deveria ser interpretado em um sentido amplo. Particularmente, o termo regra de comportamento não desconsidera a otimização do tomador de decisão. Na verdade, existem vários exemplos de heurísticas usadas como regras de comportamento, as quais se baseiam na otimização de alguma função objetivo dentro de um “modelo interno” simplificado do ambiente econômico construído pelo tomador de decisão usando dados disponíveis. A determinação de uma abordagem adequada para o desenho das regras comportamentais é uma grande questão da modelagem, e a “selvageria da racionalidade limitada” (*wilderness of bounded rationality*) (Sims, 1980), uma séria preocupação. Diferentes abordagens para modelar o comportamento racional limitado e sua adaptação têm sido expostas na literatura de modelos baseados em agentes. A maioria dessas abordagens é baseada na convicção de que as regras de comportamento usadas em modelos baseados em agentes deveriam ter algum tipo de fundamentação empírica, no sentido de tentar capturar aspectos-chave do comportamento de agentes correspondentes no mundo real. Várias das abordagens desenvolvidas na literatura, apesar de não todas, também consideram que as regras devem ser adaptadas ao longo do tempo e fornecem modelos de como os agentes ajustam suas regras de decisão.

A abordagem mais apropriada para fornecer fundamentação empírica e teórica para certos tipos de regras depende fortemente do tipo de agente que será modelado. Descrever a regra de decisão de um indivíduo escolhendo um produto de consumo é muito diferente de capturar a regra que determina as decisões da taxa de juros do banco central. De fato, a decisão de um banco central sobre a taxa de juros é um dos poucos tipos de decisões em que existem regras de decisão publicamente documentadas (como a regra de Taylor), as quais têm sido empregadas, pelo menos em alguma extensão, por tomadores de decisão (bancos centrais) e têm sido introduzidas em uma ampla variedade de modelos econômicos.<sup>9</sup> Tais regras podem ser facilmente implementadas em um modelo baseado em agentes. Se considerarmos as decisões tomadas pelos indivíduos, ao invés de uma instituição como o banco central, falta tal documentação de regras ou processos levando a uma decisão.

Um candidato óbvio para se obter *insights* fundamentados empiricamente dos processos de decisão dos indivíduos em diferentes estruturas econômicas é a consideração de evidência experimental. Trabalhos iniciais nessa área são mapeados em Duffy (2006), e esforços recentes têm sido intensificados para sistematicamente usar experimentos como forma de obter *insights* sobre as regras em acordo, com as quais os indivíduos tomam decisões e formam expectativas.

9. A extensão na qual a regra de Taylor tem sido usada ou é atualmente utilizada por bancos centrais é, no entanto, uma questão em debate. Ver Taylor (2014).

Por exemplo, Arifovic e Ledyard (2010; 2012) apresentam o aprendizado evolucionário individual (do inglês *individual evolutionary learning*) como um modelo computacional de aprendizado adaptativo, o qual, sob calibração adequada, se ajusta bem aos dados experimentais sobre o comportamento em diferentes contextos de desenho de mecanismos. A investigação empiricamente direcionada das heurísticas da decisão do indivíduo também tem sido, nos últimos anos, um campo de pesquisa ativo na psicologia (Gigerenzer e Gaißmaier, 2011), mas até agora os *insights* obtidos têm sido pouco incorporados aos modelos baseados em agentes em economia. Em relação à formação de expectativas, um extensivo trabalho experimental tem sido desenvolvido, com o intuito de identificar um conjunto de regras de formação de expectativas empregadas pelos indivíduos em contextos diferentes (Hommes), e esses *insights* têm sido usados no desenho de modelos baseados em agentes com foco nas dinâmicas das expectativas.

Uma abordagem alternativa para fornecer fundamentação empírica para regras de decisão do indivíduo incorporadas em modelos baseados em agentes é a interação constante entre o modelador e *stakeholders* do mundo real durante o processo de desenho do modelo. Como destacado, por exemplo, por Janssen e Ostrom (2006), tal abordagem é adequada principalmente se o modelo é desenvolvido em um contexto bem específico, com um número relativamente pequeno de *stakeholders* relevantes que podem ser consultados. Exemplos de modelos baseados em agentes que foram desenvolvidos com tal estreita cooperação de *stakeholders* podem ser encontrados em D'Aquino *et al.* (2003) ou em Gaillard, Barreteau e Richard-Ferroudji (2014).

Ademais, a descrição do comportamento das firmas em modelos baseados em agentes fundamenta-se tipicamente em uma abordagem baseada em regras. Nesse sentido, a literatura segue argumentos descritos, por exemplo, em Nelson e Winter (1982), os quais dependem que, em muitas instituições, incluindo firmas, as regras de decisão evoluem ao longo do tempo,<sup>10</sup> as quais foram bem-sucedidas no passado e, portanto, são empregadas e talvez ajustadas ao longo do tempo, para determinar as ações das firmas em um ambiente complexo e dinâmico. Há variância substancial na forma em que essa ideia geral tem sido implementada em modelos concretos. Vários modelos usam regras fixas de comportamento, as quais são baseadas em evidências casuais e considerações plausíveis (Delli Gatti *et al.*, 2008; Ashraf, Gershman e Howitt, 2011), enquanto, em outras contribuições, somente a estrutura básica das regras de comportamento são consideradas, e algum algoritmo inteligente é usado para ajustar as regras ao longo do tempo.<sup>11</sup> Por exemplo, Dosi *et al.* (1999) ou Midgley, Marks e Cooper (1997) demonstram que tal abordagem

10. Nelson e Winter (1982), estritamente falando, descrevem a evolução de "rotinas".

11. O conjunto de algoritmos que tem sido usado para descrever a atualização das regras inclui algoritmos genéticos (Dawid, 1999), sistemas classificadores (Arthur *et al.*, 1997) e programação genética (Chen e Yeh, 2002).

pode gerar um comportamento da firma que parece estar bem adequado ao modo de comportar-se das firmas observado nos mercados. Uma abordagem um pouco diferente para modelar o comportamento da firma em modelos baseados em agentes é exposta em Dawid e Reimann (2004; 2011) e detalhada em Dawid e Harting (2012). Essa abordagem, chamada de abordagem da ciência da gestão (*management science approach*) incorpora, em modelos baseados em agentes, regras de decisão relativamente simples que correspondem a procedimentos padrões das firmas do mundo real. Existe uma rica literatura em regras (heurísticas) de decisão gerencial em muitas áreas da ciência da gestão, incluindo fixação de preços, planejamento de produção, ou seleção de mercado; e a ideia é usar essas heurísticas no modelo das firmas. Um exemplo concreto de uma regra de comportamento determinada de acordo com a abordagem da ciência da gestão será discutido na subseção 3.2, no âmbito da descrição do modelo Eurace@Unibi. Embora certamente não se pode assumir que todas as firmas na economia se baseiam em heurísticas gerenciais padrão, capturar as principais características de tais heurísticas na modelagem das firmas agrupa uma forte microfundamentação empírica à abordagem de modelagem baseada em agentes. Como mostrado em Dawid *et al.* (2014), no contexto do modelo Eurace@Unibi (discutido em maiores detalhes a seguir), a microfundamentação empírica da abordagem é complementada por uma boa combinação de vários fatores empíricos estilizados sobre as dinâmicas da indústria e da firma, assim como as propriedades de distribuição.

### 2.3 Parametrização, calibração e adequação a dados empíricos

Modelos baseados em agentes são geralmente caracterizados por um conjunto relativamente grande de parâmetros do modelo e, frequentemente, exibem dinâmicas complexas não lineares. Ambas as características tornam notoriamente difícil definir o conjunto de valores dos parâmetros que fornecem uma compatibilidade entre o comportamento do modelo e o sistema do mundo real que é modelado. A fim de reduzir o número de “parâmetros livres”, frequentemente um determinado subconjunto de parâmetros, para os quais estão disponíveis medidas empíricas precisas (taxas de depreciação, taxas de impostos etc.), é estimado precisamente com o uso de dados empíricos. Em relação à determinação dos parâmetros restantes do modelo, várias questões aparecem. Primeiramente, uma definição clara deve ser fornecida sobre o significado de uma “boa combinação” entre o resultado do modelo e as séries temporárias empíricas. Diferentes abordagens têm sido desenvolvidas a este respeito.<sup>12</sup> Em uma série de trabalhos, em que são expostos “modelos amigáveis da história”, um contexto particular, como a evolução da indústria biotecnológica ou da indústria de computadores pessoais, é considerado,

---

12. Para uma discussão mais abrangente, ver Windrum, Fagiolo e Moneta (2007).

e o objetivo é desenvolver um modelo que reproduza os padrões qualitativos da evolução da indústria observados nesse contexto (Malerba *et al.*, 2001; Malerba e Orsenigo, 2002). No entanto, tipicamente não é exatamente quantificado o que define uma “boa reprodução”.

Para modelos baseados em agentes de escopo mais geral, como macroeconomia ou mercados financeiros, a abordagem mais comum para definir os parâmetros é a *calibragem indireta* (Windrum, Fagiolo e Moneta, 2007). Um conjunto de fatos empíricos estilizados é escolhido, os quais o modelo supostamente reproduz, e então os limites dos parâmetros são identificados onde o resultado do modelo alcança esse objetivo.<sup>13</sup> Um problema dessa abordagem é que nesse momento não há um consenso claro em relação ao conjunto de fatos estilizados a ser considerado em diferentes áreas de aplicações. Alguns poucos fatos estilizados se tornaram requisitos padrões em algumas áreas (propriedades de ciclos de negócios, distribuições do tamanho das firmas e agregação de volatilidade em mercados financeiros); porém, existe uma enorme liberdade de escolha para o modelador, que talvez seja instigado a colocar o principal foco em fatos estilizados que o próprio modelo seja particularmente bom em reproduzir. Por outro lado, a verificação de que alguns dos modelos baseados em agentes já desenvolvidos são capazes de reproduzir um amplo conjunto de fatos empíricos estilizados em diferentes níveis de agregação (Dosi, Fagiolo e Roventini, 2010; Dawid *et al.*, 2014), certamente é um dos fatores que contribui fortemente para a credibilidade não somente do conjunto de parâmetros escolhido em particular, mas também do desenho do modelo e da abordagem de modelagem em geral.

No entanto, deve ser reconhecido que, também na abordagem de calibragem indireta, critérios quantificáveis comuns – sob dadas circunstâncias em que é suposto que determinado fato estilizado seja reproduzido por um modelo – estão, em grande medida, ausentes. Além do desafio de quantificar similaridades entre as séries temporais simuladas e os dados empíricos (Marks, 2013), existem questões de comparabilidade entre as unidades de tempo nas simulações e o mundo real, e de seleção do intervalo de tempo da simulação a ser usado para comparar os dados – dinâmicas transitórias *versus* propriedades de longo prazo (ergódicas). Ademais, geralmente o requisito de produzir fatos estilizados ainda permite um grande conjunto de valores potenciais dos parâmetros. Idealmente, afirmações qualitativas derivadas do uso do modelo – por exemplo, sobre os efeitos de determinadas políticas – devem ser testadas quanto à robustez desse conjunto de potenciais valores dos parâmetros. Porém, tais testes de robustez abrangentes são frequentemente impraticáveis. Alternativamente, métodos de estimação poderiam ser usados para determinar o valor do parâmetro que mais se

13. Um exercício criterioso desse tipo em particular foi desenvolvido, por exemplo, por Ashraf, Gershman e Howitt (2011), com o uso de dados dos Estados Unidos.

ajusta aos dados, de forma a fornecer um único valor de parâmetro- padrão. Dadas as propriedades particulares dos modelos baseados em agentes (muitos parâmetros, dinâmicas complexas talvez não ergódicas e falta de representações analíticas das dinâmicas), isto é, no entanto, uma tarefa muito desafiadora e computacionalmente intensiva. O primeiro passo para o desenvolvimento de métodos de estimação para modelos baseados em agentes foi elaborado em Grazzini e Richiardi (2014); porém, não está claro o quanto esses métodos podem ser aplicados em maiores modelos baseados em agentes.

Em geral, a atenção dada para conectar modelos baseados em agentes aos dados cresceu fortemente nos últimos anos, e embora as sistemáticas estimações dos modelos expostos na literatura estejam, até o momento, em grande parte ausentes, o campo de pesquisa parece estar caminhando para o estabelecimento de uma forte fundamentação empírica para os modelos empregados.

#### **2.4 O uso de modelos economia computacional baseada em agentes (ACE) para análise de política e desenho de mercado**

Muitos dos modelos baseados em agentes na literatura foram desenvolvidos com o objetivo de investigar os efeitos de determinadas medidas de políticas ou mudanças no desenho e na estrutura regulatória de certos mercados. Estabelecer resultados sólidos e transparentes dos efeitos de tais medidas em um modelo geralmente estocástico complexo não é uma questão trivial. Os dois principais desafios são determinar de maneira estatisticamente rigorosa o efeito das medidas consideradas sob as variáveis de interesse chaves e fornecer um entendimento claro dos mecanismos econômicos responsáveis pelos efeitos da política, de tal forma que os resultados não pareçam emergir de uma “caixa preta”, não permitindo uma compreensão intuitiva do que está influenciando os resultados.

Dado que, em geral, os modelos baseados em agentes descrevem processos dinâmicos estocásticos, em que uma mudança na política é frequentemente capturada por alguma variação no parâmetro, a mensuração dos efeitos de uma política se resume a mostrar que as mudanças do parâmetro considerado têm efeitos estatisticamente significativos em determinados indicadores relevantes. Geralmente, na literatura, alguns indicadores agregados – tais como a taxa de crescimento médio ou valores médios de uma variável em um intervalo de tempo pequeno – são considerados no final do período. Tais abordagens concentram as informações sobre um único período em uma variável unidimensional. Pacotes de simulações com e sem política são desenvolvidos, e testes padrões (não paramétricos) podem então ser usados para examinar se o indicador considerado é influenciado por determinada política de maneira estatisticamente significativa. Enquanto esse procedimento é bem claro, uma questão mais controversa, relacionada aos aspectos da calibragem discutidos anteriormente, é se é suficiente fornecer tais testes para

um determinado valor de parâmetro ou se os pacotes de simulações com ou sem política deveriam, ao contrário, ser baseados em diferentes valores de parâmetro tomados do espaço de constelações de parâmetros “plausíveis”.

Uma maneira alternativa de medir os efeitos de uma política, que tem sido adotada em vários trabalhos, é apresentar graficamente as trajetórias médias das principais variáveis de interesse conjuntamente com faixas de confiança para pacotes de simulações com e sem a política, de modo a indicar para quais políticas as dinâmicas do modelo se alteram de maneira significativa. Em Dawid, Harting e Neugart (2013; 2014), um modelo estatístico dinâmico baseado em *splines* penalizados é introduzido como ferramenta para capturar de maneira estatisticamente rigorosa a dinâmica dos efeitos das políticas. Sob essa abordagem, funções *splines* são estimadas com base em um conjunto de rodadas de simulação executadas sob diferentes cenários da política. Elas capturam os (tamanhos dos) efeitos da dinâmica de cada medida de política considerada. Intervalos de confiança podem ser fornecidos para cada função *spline*, e isso permite a obtenção de *insights* sobre o tamanho e a significância estatística dos diferentes efeitos das políticas em cada dado ponto no tempo.

O segundo desafio para uma análise de política baseada em agentes é a determinação dos principais mecanismos econômicos responsáveis pelos estabelecidos efeitos agregados da política. Tipicamente, enfrenta-se esse desafio por meio do estabelecimento de cadeias de efeitos desencadeadas pela política sob um conjunto de variáveis de nível micro e *meso*. Tais cadeias de efeitos são construídas a partir da consideração de medidas e testes estatísticos, tais como funções (defasadas) de correlação cruzada, ou representações gráficas de séries temporais. No entanto, abordagens gerais e sistêmicas para estabelecer tais cadeias causais no âmbito de modelos baseados em agentes estão, em grande medida, ausentes.<sup>14</sup>

### 3 EXEMPLOS DE ANÁLISES BASEADAS EM AGENTES

#### 3.1 Efeitos de políticas específicas e medidas regulatórias em determinados mercados e indústrias

Como discutido anteriormente, modelos baseados em agentes são, por sua natureza, bem adequados para capturar estruturas específicas e características institucionais de determinados mercados. Por isso, essa abordagem de modelagem tem sido usada para estudar desenho de mercado e questões de políticas em uma variedade de mercados e indústrias específicas. Nesta subseção, eu revejo brevemente dois exemplos recentes de tais análises. O primeiro exemplo (Geanakoplos *et al.*, 2012) examina

14. Existem algumas poucas tentativas na literatura, tais como a abordagem de *regression tree* (Vallee e Yildizoglu, 2006); porém, nenhum método amplamente aceito surgiu até agora.

os fatores que poderiam ter evitado a bolha e a crise no mercado imobiliário, e o segundo exemplo fornece uma descrição detalhada de um mercado específico de energia, como um ensaio para medidas potenciais de reforma regulatória. Exemplos adicionais de estudos de mercado detalhados não revistos aqui incluem diferentes aspectos dos mercados financeiros (LeBaron, 2006), segmentos especiais do mercado de trabalho (Haruvy, Roth e Unver, 2006), a indústria de computadores (Malerba *et al.*, 1999; 2001) e a indústria biotecnológica (Malerba e Orsenigo, 2002) ou mercados de loteria (Chen e Chie, 2008).

Geanakoplos *et al.* (2012) apresentam um modelo baseado em agentes relativamente simples do mercado imobiliário da área de Washington D.C., capaz de reproduzir um substancial conjunto de fatos estilizados nesse mercado, incluindo as expansões e as contrações entre 2000 e 2010. Os autores estimulam o uso de uma abordagem baseada em agentes para modelar o mercado imobiliário, ao observarem que, por muitos anos, os modelos baseados em agentes superaram abordagens alternativas quanto à previsão das taxas hipotecárias de pagamento antecipado. O modelo de mercado imobiliário foca na venda e na compra de casas, em que a demanda e a oferta são determinadas pela formação de novos domicílios e pela mudança de domicílios existentes, respectivamente, assim como por decisões de alugar e vender. As regras determinando os pedidos e as ofertas (*bids and asks*) no mercado têm uma estrutura muito simples e são fortemente baseadas em microdados empíricos de renda, riqueza e comportamento na área de Washington D.C. Ademais, o financiamento das casas é modelado de maneira simples, empiricamente fundamentada, em que também é capturado o racionamento potencial dos domicílios. O modelo não somente é capaz de reproduzir endogenamente as dinâmicas de expansão e contração entre 2000 e 2010, mas também observações empíricas adicionais, tais como as unidades vendidas, o momento do mercado, ou a razão entre o preço vendido e o preço de tabela original. Com base no modelo, os autores argumentam que o fator primordial subjacente à bolha imobiliária foi o grau de alavancagem, e não as dinâmicas das taxas de juros.

Leigh Tesfatsion, juntamente com vários coautores, tem desenvolvido o modelo modelagem baseada em agentes dos sistemas de energia (Ames), baseado em agentes de um mercado atacadista de energia que captura muitos elementos-chaves dos mercados de energia elétrica em várias regiões dos Estados Unidos.<sup>15</sup> Particularmente, as recomendações para o mercado atacadista de energia esboçadas pela Comissão Federal Reguladora de Energia (Ferc) dos Estados Unidos são consideradas, assim como o fato de que existem capacidades limitadas de abastecimento em um dado local (chamadas de *grid bus*) e capacidades limitadas na malha que conecta os ônibus, o que pode acarretar congestionamento. Os agentes no modelo são os *operadores de sistemas independentes*, cujo objetivo é maximizar o

---

15. Ver Li e Tesfatsion (2011) ou Li, Sun e Tesfatsion (2011).

excedente líquido total do mercado, assim como o número de geradores de energia, com custo e estrutura de capacidade heterogêneos e que colocam as ofertas de abastecimento no mercado diário. Finalmente, existem os negociadores, que colocam as propostas de demanda no mercado diário e vendem aos consumidores. Ademais, existe uma demanda exógena variável no tempo nos diferentes locais (que pode ser ou não sensível ao preço). Segundo as recomendações da Ferc, o mercado diário é operado com o uso de preços marginais locais, o que significa que o preço em um determinado local e momento no tempo é o menor custo de prover uma unidade adicional de energia nesse local e nesse momento. Os geradores aprendem e ajustam seus comportamentos (ofertam preço e quantidade) de acordo com um algoritmo similar ao *simulated annealing* (arrefecimento simulado), onde o impacto da adequação corrente (chamada de *propensity score*) de uma ação sob a probabilidade de ser escolhida aumenta ao longo do tempo. A área de aplicação bem específica do modelo permite que os autores calibrem o modelo com valores empiricamente relevantes dos parâmetros.

Li, Sun e Tesfatsion (2011) mostram que a capacidade estratégica de retenção dos geradores aparece nesse arranjo e, também, demonstram que existe uma correlação positiva dos preços com os custos marginais entre os locais. Isso implica particularmente que a capacidade estratégica de retenção tem efeitos de transbordamento (*spillover effects*) nos preços em outros locais. Os autores argumentam que tais transbordamentos apresentam importantes implicações no desenho de políticas que mitigam o poder de mercado. O modelo Ames também tem sido usado em vários outros trabalhos como um ensaio para o estudo de variadas questões concretas de desenho de mercado para mercados atacadistas de energia.<sup>16</sup>

### **3.2 Efeitos de (combinações de) políticas na estrutura de (macro)modelos fechados**

A maioria dos recentes trabalhos baseados em agentes que abordam questões de política econômica foi desenvolvida em um contexto macroeconômico. Ambas as questões levantadas neste trabalho e a complexidade dos modelos subjacentes variam substancialmente entre as diferentes contribuições.

Em uma contribuição que se baseia em um modelo macroeconômico relativamente minimalista, Arifovic, Bullard e Kostyshyna (2013) analisam o efeito da aprendizagem social na política monetária. Eles examinam um modelo neokeynesiano padrão, incluindo a regra de Taylor com a extensão de que domicílios-firmas são heterogêneos em relação às suas previsões sobre as leis de movimento percebidas da economia. Eles atualizam as previsões com base em um algoritmo evolucionário social inteligente. O trabalho mostra sob quais circunstâncias, em tal cenário de

---

16. Material abrangente sobre o modelo Ames e suas aplicações está disponível em: <<http://goo.gl/hKBYSZ>>.

aprendizagem social, equilíbrios das expectativas racionais e equilíbrios de eventos não fundamentais (*sunspot*) podem ser conhecidos. Similar em espírito é o trabalho de Arifovic *et al.* (2010), em que a questão da credibilidade de anúncios de políticas é estudada em uma extensão da estrutura básica de Kydland-Prescott. Domicílios/trabalhadores individuais têm atitudes heterogêneas em relação aos anúncios de políticas (alguns acreditam, outros não) e ajustam essas atitudes com base na imitação de agentes relativamente mais bem-sucedidos da população. É mostrado que, em tal cenário, um formulador de política com racionalidade limitada, que tem que se basear na informação imperfeita sobre a evolução da credibilidade de seus anúncios, é capaz de induzir resultados de Pareto que dominam o único resultado de equilíbrio de Nash da versão estática do modelo. Abordagens de alguma forma relacionadas, Anufriev *et al.* (2013) ou DeGrauwe (2012) introduzem dinâmicas de expectativas heterogêneas em modelos dinâmicos de equilíbrio padrões para estudar as implicações de tais expectativas na estabilidade e nas dinâmicas econômicas.

Enquanto nessas contribuições a heterogeneidade e a modelagem baseada em agentes têm sido inseridas em um modelo da macroeconomia simples na forma reduzida, vários estudos recentes têm desenvolvido análises de política na estrutura de modelos macroeconômicos, em que todos os setores da economia considerada são modelados de baixo para cima e baseados em agentes. Dosi, Fagiolo e Roventini (2010) e Dosi *et al.* (2013; 2014) desenvolvem análises das medidas de política fiscal e monetária dentro de uma família de modelos fechados baseados em agentes, conhecidos como modelos *Schumpeter meeting Keynes (K+S)*. A estrutura básica da economia considerada é que firmas que produzem bens de capital e realizam pesquisa e desenvolvimento (P&D) oferecem uma variedade heterogênea de máquinas-ferramentas para firmas de bens de consumo, as quais usam capital e trabalho como insumos para produzir um bem de consumo homogêneo. As firmas financiam as suas escolhas de investimento e de produção empregando fundos internos, assim como crédito fornecido pelo setor bancário. Os gastos do governo (seguro-desemprego, resgate financeiro de bancos e juros da dívida pública) são financiados pelos impostos coletados de domicílios, firmas e bancos. Em cada um dos trabalhos mencionados anteriormente, os autores demonstram que o modelo pode replicar um grande conjunto de fatos empíricos estilizados em diferentes níveis de agregação, tais como as típicas trajetórias de crescimento, as propriedades do ciclo de negócios, as correlações macroeconômicas e as distribuições *cross-sectional*. Em Dosi, Fagiolo e Roventini (2010), uma forte complementariedade entre políticas fiscais demanda orientadas e a efetividade de políticas schumpeterianas que facilitam a adoção de novas tecnologias é adotada. Um *insight* central em Dosi *et al.* (2013) é que políticas fiscais amortecem ciclos de negócios e reduzem o desemprego e a probabilidade de experimentar crises de grande magnitude.

Também é mostrado que o crescimento de longo prazo pode ser positivamente afetado por uma política fiscal, na qual esse efeito é particularmente forte se a distribuição de renda é distorcida em direção aos lucros. Dosi *et al.* (2014) expandem essa análise, investigando os efeitos de combinações de políticas fiscais e monetárias. Eles descobrem que misturas de políticas, associando uma política fiscal anticíclica sem restrição com uma política monetária *dual mandate*, são particularmente adequadas para a estabilização da economia.

Delli Gatti *et al.* (2008), em um livro e também em uma série de trabalhos relacionados (Riccetti, Russo e Gallegati, 2013; Delli Gatti *et al.*, 2010), usam modelos baseados em agentes, caracterizando um mercado de crédito e um de bens, para abordar questões relacionadas com a interação entre as instabilidades reais e financeiras do mercado. Em Riccetti, Russo e Gallegati (2013), o lado real do modelo é mantido bem simples, baseado na suposição-chave de que a escala de atividade de uma firma – em particular, o nível de produção – é uma função crescente do seu “patrimônio líquido”. As firmas têm metas de alavancagem, com base nas quais elas determinam os seus investimentos. Elas tomam empréstimos de bancos para financiar (parte de) seus investimentos, nos quais a estrutura da rede do banco-firma se desenvolve endogenamente ao longo do tempo. Supõe-se que o ambiente de mercado é arriscado (preços estocásticos) e, portanto, as firmas são constantemente atingidas por choques (positivos ou negativos). As taxas de juros cobradas pelos bancos dependem da situação financeira do banco e da empresa que está pedindo crédito. O modelo gera um acelerador financeiro e prevê potenciais falências em firmas interconectadas. Riccetti, Russo e Gallegati (2013) estudam, entre outras questões, o impacto de metas pró-cíclicas de alavancagem, em comparação com metas fixas de alavancagem, e analisam os efeitos da política monetária. Uma importante implicação da análise é que o banco central deveria considerar também o efeito da alavancagem das firmas no momento de decisão de mudanças na política monetária. Em Mandel *et al.* (2014), a arquitetura financeira de Delli Gatti *et al.* (2010) é integrada em um modelo padrão de ciclos reais de negócios. Eles retratam os cenários em que é observada a convergência dos preços de equilíbrio em sua estrutura baseada em agentes e mostram que, quando as restrições financeiras estão vinculadas, um ciclo de retroalimentação positiva entre o desequilíbrio e a fragilidade financeira emerge, em conformidade com a hipótese de instabilidade financeira de Minsky. Pequenas variações de preços podem provocar desequilíbrios financeiros, que podem se ampliar com um acelerador financeiro. Ademais, eles demonstram que a estrutura da rede financeira afeta a volatilidade agregada, pois ela impacta a velocidade de convergência para o equilíbrio e a estabilidade deste.

Ashraf, Gershman e Howitt (2011) usam um modelo macroeconômico baseado em agentes cuidadosamente calibrado para investigar as implicações de

diferentes planos de regulação bancária. Eles destacam a importância do papel dos bancos no desempenho econômico e mostram que a regulação bancária em tempos normais praticamente não afeta a estabilidade macroeconômica, enquanto, em períodos difíceis, uma regulação mais rígida tem um efeito prejudicial na economia, dado que ela reprime os empréstimos para firmas com necessidades. Questões relacionadas também foram analisadas em uma abordagem baseada em agentes por Teglio, Raberto e Cincotti (2012), que enfatizam principalmente os efeitos macroeconômicos de regulações financeiras. Klimek *et al.* (2014) propõem um simples modelo baseado em agentes, que incorpora domicílios, um único setor produtivo e bancos. Com o uso desse modelo, eles analisam os efeitos de três diferentes mecanismos de resolução de crises em dinâmicas econômicas e financeiras. Nesse cenário, um banco insolvente pode tanto ser encerrado por meio de uma suposta transação de compra, quanto ser resgatado financeiramente com o uso do dinheiro de contribuintes, ou ainda pode ser socorrido pela conversão da dívida em participação no capital social. A análise dos autores implica que, enquanto em economias fortes (com alta produtividade e baixo desemprego), bancos falidos devem ser fechados, no caso de um prognóstico econômico mais fraco, o mecanismo de socorro parece ser mais atraente. O resgate financeiro financiado por contribuintes deveria, de acordo com a análise dos autores, nunca ser aplicado.

Um modelo macroeconômico baseado em agentes desenvolvido com o objetivo de investigar questões de políticas ambientais é o modelo Lagom (Wolf *et al.*, 2012). No modelo Lagom, a escolha tecnológica, o consumo por domicílio, os *mark-ups* das firmas e os salários são determinados com uso de algoritmos genéticos. Os diferentes setores do modelo são conectados por tabelas de *input-output*, as quais são baseadas inicialmente por dados do mundo real. A inclusão de uma representação das emissões locais induzidas pela atividade econômica abre a possibilidade de considerar diferentes tipos de medidas de política econômica também a partir de uma perspectiva ambiental.

### 3.2.1 Um exemplo ilustrativo de um modelo de (proposição de) política baseado em agentes: Eurace@Unibi

O modelo Eurace@Unibi<sup>17</sup> também se enquadra na categoria de modelos macroeconômicos baseados em agentes e tem sido desenvolvido com o objetivo específico de fornecer uma estrutura unificada, a qual permite a análise de uma ampla variedade de questões políticas, incluindo políticas fiscais, políticas de inovações, políticas para o mercado de trabalho, ou políticas de coesão. Além disso, regulações dos mercados financeiro e de crédito podem ser estudadas dentro dessa estrutura. O foco encontra-se na interação entre os mercados de trabalho, as dinâmicas da indústria, as mudanças

17. Para mais informações, ver Dawid *et al.* (2012; 2014).

tecnológicas e o crescimento. O modelo descreve uma economia que contém trabalho, bens de consumo, bens de capital e mercados financeiros e de crédito em um contexto regional. A economia é habitada por vários casos de diferentes tipos de agentes: firmas (produtores de bens de consumo e de bens de capital), domicílios e bancos. Cada um desses agentes está localizado em uma das regiões. Ademais, existe um único banco central em um governo que coleta impostos e financia benefícios sociais, bem como potencialmente algumas medidas de políticas econômicas, em que as políticas podem diferir entre as regiões. Finalmente, existe um escritório estatístico (*Eurostat*) que coleta dados de todos os agentes individuais na economia e gera indicadores agregados de acordo com procedimentos padrões. Esses indicadores são distribuídos para os agentes na economia (os quais podem usá-los, por exemplo, como *input* para as suas regras de decisão) e são, também, armazenados para facilitar a análise dos resultados da simulação.

Firmas do setor de bens de consumo utilizam bens de capital combinados com o fator trabalho para produzir bens de consumo. Esses últimos são fornecidos em diferentes qualidades (*vintages*) por produtores de bens de capital, em que a fronteira tecnológica (a mais *vintage* disponível) se move de maneira estocástica para cima ao longo do tempo. O mercado de trabalho é povoado por trabalhadores que têm um número finito de níveis de habilidades gerais e que adquirem habilidades específicas no trabalho, as quais eles precisam para explorar plenamente as vantagens tecnológicas do capital empregado no processo de produção. Toda vez que um produtor de bens de consumo investe em novos bens de capital, ele decide qual qualidade dos bens de capital escolher, implicando a determinação da velocidade em que novas tecnologias se espalham na economia. Dessa maneira, o modelo captura, de forma simples, as relações entre as dinâmicas de habilidades, as dinâmicas do mercado de trabalho e a difusão tecnológica em uma economia.

Bens de consumo são vendidos em plataformas de mercado local (chamados de centros de compra), em que as firmas estocam e oferecem os seus produtos a preços fixados e os consumidores compram os produtos. A interação no mercado de trabalho é descrita por um simples procedimento de múltipla-rodada de “procura-e-combina” (*search-and-matching*). Os salários dos trabalhadores são determinados, de um lado, pela expectativa do empregador no momento da contratação em relação ao nível de habilidades específicas do trabalhador e, de outro lado, por uma variável de salário base, que é influenciada pela rigidez (passada) do mercado de trabalho e determina o nível geral dos salários pagos por um determinado empregador. Os bancos captam os depósitos dos domicílios e das firmas e fornecem empréstimos a estas últimas. Existe um mercado financeiro em que as ações de um único ativo são negociadas, ou seja, um índice de títulos que contém todas as firmas da economia. Os dividendos pagos por cada ação em um dado momento do tempo são determinados pela soma

dos dividendos correntemente pagos por todas as firmas. Essa simples representação de um mercado financeiro não é adequada para descrever bolhas especulativas no mercado financeiro; porém, ela captura importantes *feedbacks* entre os lucros das firmas e a renda dos domicílios, no sentido de que variações dos dividendos somente afetam a renda de um subgrupo particular de domicílios; a saber, os proprietários de ações do índice de títulos. O banco central fornece facilidades permanentes para os bancos a uma determinada taxa-base, paga juros sobre os depósitos *overnight* (de 24 horas) dos bancos e pode fornecer moeda fiduciária para o governo.

Os tamanhos (espaciais) dos mercados diferem. O mercado de bens de capital é global, o que significa que as firmas em todas as regiões compram do mesmo produtor global de bens de capital e, portanto, têm acesso às mesmas tecnologias. No mercado de bens de consumo, a demanda de mercado é determinada localmente, no sentido de que todos os consumidores compram no centro de compras localizado em suas regiões, porém a oferta é global, pois toda firma pode vender seus produtos em todos os mercados regionais da economia. Os mercados de trabalho são caracterizados por fricções espaciais determinadas por custos de deslocamento que surgem se os trabalhadores aceitam trabalho fora da sua própria região. Supõe-se que as firmas têm acesso a todos os bancos na economia, e, portanto, os mercados de crédito operam globalmente.

Seguindo a abordagem da ciência da gestão apresentada na seção 2, as regras de decisão das firmas e dos domicílios no modelo Eurace@Unibi são baseadas em heurísticas empiricamente fundamentadas descritas na literatura relevante.<sup>18</sup> Isso inclui particularmente a determinação de preço e quantidade e a seleção de mercado das firmas, ou as decisões de consumo e poupança dos domicílios. Para ilustrar a abordagem da ciência da gestão, eu esboço brevemente a regra de comportamento que determina a decisão de precificação das firmas. No modelo, firmas de bens de consumo ajustam os seus preços uma vez ao ano, o que está de acordo com dados empíricos. Como forma de determinar o novo preço, elas seguem uma heurística descrita na literatura gerencial sobre estratégia de precificação, por exemplo, em Nagle *et al.* (2011, capítulo 6). Cada firma realiza “pesquisas de compra simuladas” entre uma amostra aleatória de domicílios para obter uma estimativa de como a

18. Voltando à discussão da seção 2 sobre os problemas associados com a suposição de comportamento de equilíbrio (dinâmico), deve-se observar que, nesse modelo, tal suposição daria origem a problemas de otimização dinâmica extremamente complexos e intratáveis. Considere, por exemplo, a escolha de investimento (tamanho e *vintage*) das firmas em um determinado momento do tempo. Cada firma teria que considerar as dinâmicas futuras da distribuição das habilidades na força de trabalho, assim como a distribuição de futuras possibilidades de investimentos de todas as firmas (que em geral diferiria entre as firmas, dado que elas são heterogêneas em relação à corrente estrutura de capital e força de trabalho), e também os correspondentes desenvolvimentos das decisões de precificação pelos competidores e a evolução da demanda (que é endógena). Mesmo que uma única firma soubesse as estratégias de todos os outros agentes (o que claramente seria uma suposição irreal), a dimensão do espaço de estado e a complexidade das dinâmicas induzidas impediriam a determinação da estratégia ótima intertemporal para esse problema de horizonte infinito.

demandas por seu produto responderia a mudanças de preços. Ela combina essa estimativa com uma previsão das mudanças nos custos totais associadas a diferentes ajustes na produção, como forma de calcular os lucros esperados sobre um horizonte de planejamento fixo, para um conjunto de potenciais mudanças de preço. Este último é escolhido de tal maneira que ele maximize os lucros descontados ao longo do horizonte de planejamento.

O modelo Eurace@Unibi gera endogenamente (sem choques externos agregados) flutuações econômicas que estão em consonância com fatos empíricos estilizados, em relação às características do ciclo de negócios, assim como em relação à correlação serial e às razões de amplitude entre a produção e as variáveis-chave, tais como consumo e investimento. As distribuições do tamanho das firmas que resultam do modelo assemelham-se àquelas encontradas em estudos empíricos, assim como as características do nível da firma, tais como a persistente dispersão de preço combinada com *mark-ups* anticíclicos e a persistência de parcelas de mercado da firma, e são encontradas nos dados de simulação gerados com o modelo Eurace@Unibi, de acordo com a literatura empírica. Isto ocorre para fatos estilizados nos mercados de trabalho, tal como a curva de Beveridge.<sup>19</sup> Finalmente, em Dawid, Harting e Neugart (2013), é mostrado que uma calibragem padrão do modelo também gera padrões de comparações de renda-desigualdade entre economias que correspondem àquelas observadas em diferentes partes da União Europeia. O fato de que todos esses diferentes tipos de fatos estilizados podem ser reproduzidos pelo modelo sugere fortemente que a abordagem para construir um modelo econômico com fortes microfundamentos empíricos foi bem-sucedida em capturar os mecanismos-chave que influenciam as dinâmicas das economias do mundo real.

Uma ampla variedade de questões de políticas relacionadas com o desenho do mercado de trabalho, com a formação de habilidades e com a desigualdade de renda tem sido estudada usando o modelo Eurace@Unibi.<sup>20</sup> Para fornecer um exemplo, eu discuto brevemente a investigação da efetividade de diferentes tipos de políticas de coesão, no que se refere à convergência de regiões, em Dawid, Harting e Neugart (2014). Motivado pelos principais instrumentos usados pela União Europeia (Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional e Fundo Social Europeu), os efeitos de dois tipos de políticas são comparados: política tecnológica, fornecendo subsídios para as firmas em uma região economicamente atrasada, que investe em tecnologias na fronteira tecnológica; e política de capital humano, provocando uma melhora da distribuição de habilidades gerais na força de trabalho na região-alvo.

19. Ver Dawid et al. (2012; 2014), para uma discussão dessas questões.

20. Ver Dawid et al. (2014) para uma survey.

Duas configurações são consideradas: na primeira, os mercados de trabalho são plenamente integrados, de tal forma que existem pequenas fricções e todos os trabalhadores têm acesso quase irrestrito aos dois mercados de trabalho local. Na segunda configuração, os mercados de trabalho são completamente separados e os trabalhadores somente podem trabalhar em sua região de origem.

Empregando no trabalho a abordagem de *spline* penalizada apresentada na seção 2, primeiramente são apresentados os efeitos dinâmicos estimados das políticas nas variáveis-chave, tais como o produto *per capita* regional. Com base nisso, os mecanismos que conduzem esses resultados são construídos a partir do estudo dos efeitos das políticas sobre um conjunto de variáveis de nível micro e meso, tais como as escolhas tecnológicas, as ofertas de salário-base e os preços relativos das diferentes firmas, assim como a evolução de habilidade, a escolha da firma e a decisão de consumo dos consumidores. O principal resultado da análise é que a política de capital humano somente é efetiva, em termos de promover coesão, se os mercados de trabalho são separados. Se os mercados de trabalho são integrados, a produção de fato cai na região atrasada para a qual a política se destina. Políticas tecnológicas aceleram a convergência para mercados de trabalho integrados e separados. As implicações negativas da política de capital humano sobre os mercados de trabalho abertos aparecem mesmo embora o objetivo explícito de melhorar o nível das habilidades específicas e da escolha *vintage* na região atrasada seja alcançado. Os efeitos negativos da política para a região-alvo se devem às mudanças induzidas na rigidez do mercado de trabalho nesta região, o que tem implicações para as dinâmicas de salário, preços (relativos) dos bens, mudanças de demanda e investimentos.

Essa análise é estendida em Dawid, Harting e Neugart (2013), na qual a efetividade das políticas tecnológicas é estudada em maiores detalhes. Em particular, é mostrado nesse trabalho que os efeitos positivos de convergência da política tecnológica surgem somente se a escolha de tecnologia de uma fração de firmas, que recebem subsídios para realização de investimentos, pode de fato ser positivamente influenciada. Se uma grande parcela das firmas recebe os subsídios, embora elas não invistam na fronteira (isto é, escolhem a melhor *vintage* disponível), então a efetividade da política encontrada em Dawid, Harting e Neugart (2014) desaparece. Além disso, em Dawid, Harting e Neugart (2013), as implicações da política não são somente estudadas em relação ao produto *per capita* médio na região, mas também no que concerne à desigualdade de renda nas regiões. Isso destaca o potencial de modelos de políticas baseados em agentes em considerar simultaneamente diferentes aspectos dos efeitos de políticas e, em particular, em examinar questões distributivas que não podem ser estudadas em modelos de agentes representativos.

#### 4 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A discussão neste capítulo se baseia no *insight* de que a economia e seus principais componentes, tais como mercados e indústrias, são sistemas complexos e na questão central de quanto dessa complexidade deveríamos tentar capturar nos modelos quando investigamos questões econômicas. Particularmente, as seções 2 e 3 discutiram uma abordagem de modelagem de baixo para cima baseada em agentes, em que se deu grande atenção ao comportamento de atores econômicos individuais e suas interações. A seção 2 deixou claro que vários desafios importantes têm de ser encarados quando se desenvolvem modelos desse tipo. Esses se referem aos fundamentos para a representação do comportamento individual, assim como à calibragem empírica e à análise sistemática de tais modelos. A revisão das análises baseadas em agentes existentes em economia na seção 3 mostrou que, apesar do fato de que esses modelos compartilham a mesma abordagem de modelagem, o real grau de complexidade varia substancialmente entre os diferentes modelos baseados em agentes. A depender de o foco de análise ser em um fenômeno econômico particular em um mercado específico, ou em um melhor entendimento dos *feedbacks* emergentes entre os setores reais e financeiros, modelos com diferentes graus de granularidade parecem apropriados. A discussão na seção 3 destaca a utilidade de uma abordagem computacional baseada em agentes em várias áreas de aplicação. Indiscutivelmente, modelos consolidados da literatura muito mais simples apresentariam uma maior dificuldade em abordar várias das questões discutidas nos exemplos apresentados. Eu não concluiria necessariamente desse argumento que os modelos computacionais mais complexos são em geral mais apropriados para análises de política econômica que os modelos consolidados da literatura. Em vez disso, chego à conclusão de que parecem haver importantes questões econômicas em que novos *insights* relevantes podem ser obtidos com o uso de uma abordagem de modelagem que trata a economia como um sistema complexo interativo.

Os exemplos apresentados na seção 3 fornecem algumas indicações do tipo de questões econômicas em que a aplicação de modelos baseados em agentes parece particularmente promissora. Em primeiro lugar, a área de desenho de mercado deveria ser mencionada. A capacidade de modelos baseados em agentes em capturar com algum detalhe as características institucionais de mercados específicos, e também em potencialmente envolver *stakeholders* no desenho dos modelos comportamentais dos participantes do mercado, faz dos modelos baseados em agentes um instrumento particularmente apropriado para explorar implicações de mudanças esperadas no desenho do mercado, ou nas regras de regulação, e para comunicar tais implicações esperadas aos formuladores de políticas. De fato, modelos baseados em agentes têm sido aplicados com substancial sucesso nessa área. Em segundo lugar, modelos baseados em agentes, que representam de maneira explícita a heterogeneidade dos agentes no que se refere a suas diferentes características,

são candidatos naturais para abordar questões distributivas. A obtenção de um melhor entendimento do processo responsável por desigualdades de diferentes tipos intra e inter-regiões tem sido durante anos um tema central da pesquisa econômica, e parece que a importância desse tema ainda está crescendo. Os modelos baseados em agentes deveriam ser capazes de ter um papel importante nesse discurso. Eles permitem capturar mecanismos -chave, que são responsáveis pela emergência de diferenças entre firmas ou domicílios, bem como pela evolução de padrões específicos de relações e interações, e pela ocorrência de *lock-ins* e *path dependencies*. Os trabalhos brevemente revistos na seção 3 fornecem uma indicação do potencial dos modelos baseados em agentes a esse respeito; porém, parece que esse potencial, até o momento, não foi plenamente explorado.

## REFERÊNCIAS

- ALFARANO, S.; LUX, T.; WAGNER, F. Time-variation of higher moments in financial markets with heterogeneous agents: an analytical approach. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 32, n.1, p. 101-136, Jan. 2008.
- ANUFRIEV, M. *et al.* Interest rate rules and macroeconomic stability under heterogeneous expectations. **Macroeconomic Dynamics**, v. 17, n. 8, p. 1574-1604, 2013.
- ARIFOVIC, J.; BULLARD, J.; KOSTYSHyna, O. Social learning and monetary policy rules. **Economic Journal**, v. 123, n. 567, p. 38-76, Mar. 2013.
- ARIFOVIC, J. *et al.* Learning benevolent leadership in a heterogenous agents economy. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 34, n. 9, p. 1768-1790, Sept. 2010.
- ARIFOVIC, J.; LEDYARD, J. A behavioral model for mechanism design: individual evolutionary learning. **Journal of Economic Behavior and Organization**, v. 78, n. 3, p. 374-395, May 2010.
- \_\_\_\_\_. Individual evolutionary learning, other regarding preferences, and the voluntary contribution mechanism. **Journal of Public Economics**, v. 96, n. 9-10, p. 808-823, Oct. 2012.
- ARROW, K.; ANDERSON, P.; PINES, D. **The economy as an evolving complex system**. Reading: Addison-Wesley, 1988.
- ARTHUR, W. B. *et al.* Asset pricing and endogeneous expectations in an artificial stock market. In: ARTHUR, W. B.; DURLAUF, S.; LANE, D. (Eds.). **The economy as an evolving complex system II**. Reading: Addison-Wesley, 1997.

- ASHRAF, Q.; GERSHMAN, B.; HOWITT, P. **Banks, market organization, and macroeconomic performance:** an agent-based computational analysis. Cambridge: NBER, 2011. (Working Paper, n. 17102).
- CHEN, S. H.; YEH, C. H. On the emergent properties of artificial stock markets: the efficient market hypothesis and the rational expectations hypothesis. **Journal of Economic Behavior and Organization**, v. 49, n. 2, p. 217-239, Oct. 2002.
- CHEN, S. H.; CHIE, B. C. Lottery markets design, micro-structure, and macro-behavior: an ACE approach. **Journal of Economic Behavior and Organization**, v. 67, n. 2, p. 463-480, Aug. 2008.
- COLANDER, D. *et al.* **Financial crisis and the systemic failure of academic economics.** Düsternbrooker: Kiel Institute for the World Economy, 2009. (Working Paper, n. 1489).
- D'AQUINO, P. *et al.* Using self-designed role-playing games and a multi-agent system to empower a local decision-making process for land use management: the selfcormas experiment in Senegal. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 6, n. 3, 2003.
- DAWID, H. **Adaptive learning by genetic algorithms:** analytical results and applications to economic models. Berlin, Springer, 1999.
- DAWID, H. *et al.* **The Eurace@Unibi model:** an agent-based macroeconomic model for economic policy analysis. Bielefeld: SSRN, 2012. (Working Paper, n. 5).
- \_\_\_\_\_. Agent-based macroeconomic modeling and policy analysis: The Eurace@Unibi model. In: CHEN, S. H.; KABOUDAN, M. (Eds.). **Handbook on computational economics and finance.** Oxford: Oxford University Press, 2014.
- DAWID, H.; HARTING, P. Capturing firm behavior in agent-based models of industry evolution and macroeconomic dynamics. In: BÜNSTORF, G. (Ed.). **Evolution, organization and economic behavior.** Edward-Elgar, 2012. p.103-130.
- DAWID, H.; HARTING, P.; NEUGART, M. **Cohesion policy and inequality dynamics:** insights from a heterogeneous agents macroeconomic model. Bielefeld: SSRN, 2013. (Working Paper, n. 26).
- \_\_\_\_\_. Economic convergence: policy implications from a heterogeneous agent model. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 44, p. 54-80, July 2014.
- DAWID, H.; REIMANN, M. Evaluating market attractiveness: individual incentives vs. industry profitability. **Computational Economics**, v. 24, n. 4, p. 321-355, Nov. 2004.
- \_\_\_\_\_. Diversification: a road to inefficiency in product innovations? **Journal of Evolutionary Economics**, v. 21, n. 2, p. 191-229, 2011.

- DE GRAUWE, P. **Lectures on behavioral macroeconomics.** Princeton: Princeton University Press, 2012.
- DELLI GATTI, D. *et al.* **Emergent macroeconomics:** an agent-based approach to business fluctuations. Berlin: Springer, 2008.
- \_\_\_\_\_. The financial accelerator in an evolving credit network. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 34, n. 9, p. 1627-1650, Sept. 2010.
- \_\_\_\_\_. Reconstructing aggregate dynamics in heterogeneous agents models: a Markovian approach. **Revue del l'Ofce**, n. 124, p. 117-146, Sept. 2012.
- DOSI, G. *et al.* Norms as emergent properties of adaptive learning: the case of economic routines. **Journal of Evolutionary Economics**, v. 9, n. 1, p. 5-26, 1999.
- \_\_\_\_\_. Income distribution, credit and fiscal policies in an agent-based Keynesian model. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 37, n. 8, p. 1598-1625, Aug. 2013.
- \_\_\_\_\_. **Fiscal and monetary policies in complex evolving economies.** Pisa: LEM, 2014. (Working Paper, n. 7).
- DOSI, G.; FAGIOLO, G.; ROVENTINI, A. Schumpeter meeting Keynes: a policy-friendly model of endogenous growth and business cycle. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 34, n. 9, p. 1748-1767, Sept. 2010.
- DUFFY, J. Agent-based models and human subject experiments. In: TESFATSION, L.; JUDD, K. (Eds.). **Handbook of computational economics.** North-Holland, 2006. p. 949-1011, v. 2.
- FAGIOLO, G.; ROVENTINI, A. Macroeconomic policy in DSGE and agent-based models. **Revue de l'Ofce**, n. 124, p. 67-116, 2012.
- FARMER, D. J.; FOLEY, D. The economy needs agent-based modelling. **Nature**, v. 460, p. 685-686, Aug. 2009.
- FONTANA, M. The Santa Fe perspective on economics. **History of Economic Ideas**, v. 18, n. 2, p. 167-96, 2010.
- GAILLARD, N.; BARRETEAU, O.; RICHARD-FERROUDJI, A. Participatory policy making in practice: simulating boundary work in water governance. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v. 229, p. 333-342, 2014.
- GEANAKOPLOS, J. *et al.* Getting at systemic risk via an agent-based model of the housing market. **American Economic Review Papers and Proceedings**, v. 102, n. 3, p. 53-58, May 2012.
- GIGERENZER, G.; GAISSMAIER, W. Heuristic decision making. **Annual Review of Psychology**, v. 62, p. 451-482, Jan. 2011.

- GRAZZINI, J.; RICHIARDI, M. Consistent estimation of agent-based models by simulated minimum distance. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 51, p. 148-165, 2014.
- HARUVY, E.; ROTH, A.; UNVER, U. The dynamics of law clerk matching: an experimental and computational investigation of proposals for reform of the market. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 30, n. 3, p. 457-486, 2006.
- HOMMES, C. The heterogeneous expectations hypothesis: some evidence from the lab. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 35, p. 1-24, 2011.
- HOMMES, C. *et al.* Coordination of expectations in asset pricing experiments. **The Review of Financial Studies**, v. 18, n. 3, p. 955-980, 2005.
- JACKSON, M. O. **Social and economic networks**. New Jersey: Princeton University Press, 2010.
- JANSSEN, M. A.; OSTROM, E. Empirically based agent-based models. **Ecology and Society**, v. 11, n. 2, p. 37, 2006.
- KIRMAN, A. P. Whom or what does the representative individual represent? **Journal of Economic Perspectives**, v. 6, n. 3, p. 117-136, 1992.
- KLIMEK, P. *et al.* To bail-out or to bail-in? Answers from an agent-based model. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 50, p. 144-154, Jan. 2014.
- LEBARON, B. Agent-based computational finance. In: TESFATSION, L.; JUDD, K. (Eds.). **Handbook of computational economics**. Amsterdam: North-Holland, 2006. v. 2, p. 1187-1232.
- LEBARON, B.; TESFATSION, L. Modeling macroeconomies as open-ended dynamic systems of interacting agents. **American Economic Review**, v. 98, n. 2, p. 246-250, 2008. (Papers & Proceedings).
- LI, H.; SUN, J.; TESFATSION, L. Testing institutional arrangements via agent-based modeling: a U.S. electricity market application. In: DAWID, H.; SEMMLER, W. (Eds.). **Computational methods in economic dynamics**. Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. p. 135-158.
- LI, H.; TESFATSION, L. ISO net surplus collection and allocation in wholesale power markets under locational marginal pricing. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 26, n. 2, p. 627-641, 2011.
- MALERBA, F. *et al.* History-friendly models of industry evolution: the computer industry. **Industrial and Corporate Change**, v. 8, n. 1, p. 3-40, 1999.

\_\_\_\_\_. Competition and industrial policies in a ‘history friendly’ model of the evolution of the computer industry. **International Journal of Industrial Organization**, v. 19, p. 635-664, 2001.

MALERBA, F.; ORSENIGO, L. Innovation and market structure in the dynamics of the pharmaceutical industry and biotechnology: towards a history-friendly model. **Industrial and Corporate Change**, v. 11, n. 4, p. 667-703, 2002.

MANDEL, A. *et al.* Price dynamics, financial fragility and aggregate volatility. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 51, p. 257-277, Feb. 2014.

MARKS, R. Validation and model selection: three similarity measures compared. **Complexity Economics**, v. 2, p. 41-61, 2013.

MIDGLEY, D. F.; MARKS, R. E.; COOPER, L. G. Breeding competitive strategies. **Management Science**, v. 43, n. 3, p. 257-275, Mar. 1997.

NAGLE, T. *et al.* **The strategy and tactics of pricing:** a guide to growing more profitably. 5<sup>th</sup> edition. International edition. Boston: Pearson, 2011.

NELSON, R. R.; WINTER, S. G. **An evolutionary theory of economic change.** Cambridge: Harvard University Press, 1982.

NEUGART, M.; RICHIARDI, M. G. Agent-based models of the labor market. In: CHEN S. H.; KABOUDAN, M. (Eds.). **Handbook on computational economics and finance.** Oxford: Oxford University Press, 2014.

NEWMAN, M. E. J. **Networks:** an introduction. Oxford: Oxford University Press, 2010.

NOUSSAIR, C. N.; MATHENY, K. J. An experimental study of decisions in dynamic optimization problems. **Economic Theory**, v. 15, n. 2, p. 389-419, Mar. 2000.

RICCETTI, L.; RUSSO, A.; GALLEGATI, M. Leveraged network-based financial accelerator. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 37, n. 8, p. 1626-1640, Aug. 2013.

SIMS, C. Macroeconomics and reality. **Econometrica**, v. 48, n. 1, p. 1-48, 1980.

TAYLOR, J. The role of policy in the great recession and the weak recovery. **American Economic Review**, v. 104, n. 5, p. 61-66, 2014. (Papers & Proceedings).

TEGLIO, A.; RABERTO, M.; CINCOTTI, S. The impact of bank’s capital adequacy regulation on the economic system: an agent-based approach. **Advances in Complex Systems**, v. 15, n. 2, p. 1-27, 2012.

TESFATSION, L. Agent-Based computational economics: a constructive approach to Economic Theory. In: TESFATSION, L.; JUDD, K. L. (Eds.). **Handbook of computational economics**: agent-based computational economics. Amsterdam: North-Holland, 2006. v. 2, p. 831-880.

WINDRUM, P.; FAGIOLO, G.; MONETA, A. Empirical validation of agent-based models: alternatives and prospects. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 10, n. 2, p. 8, 2007. Disponível em: <<http://goo.gl/eLQyu1>>.

WOLF, S. *et al.* A multi-agent model of several economic regions. **Environmental Modeling and Software**, v. 44, p. 25-43, 2012.

VALLEE, T.; YILDIZOGLU, M. Social and technological efficiency of patent systems. **Journal of Evolutionary Economics**, v. 16, p. 189-206, 2006.

### BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

ARTHUR, B. **Complexity economics**: a different framework for economic thought. Santa Fe: SFI, 2013. (Working Paper, n. 12).

ARTHUR, W. B.; DURLAUF, S.; LANE, D. (Eds.). **The economy as an evolving complex system II**. Reading: Addison-Wesley, 1997.

KIRMAN, A. P. **Complex economics**: individual and collective rationality. London: Taylor & Francis, 2010.



## CAPÍTULO 10

# CIDADES COMO SISTEMAS COMPLEXOS<sup>1</sup>

Luís M. A. Bettencourt<sup>2</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

As cidades e a urbanização representam desafios relevantes para o entendimento de sistemas sociais humanos e para a consecução de políticas efetivas (UN-Habitat, 2009). As raízes dessas dificuldades encontram-se na natureza das cidades como objetos complexos. As cidades são sistemas de interação de pessoas e organizações sociais distribuídas em espaços densamente construídos, servidos por infraestruturas e administrados por organizações políticas e sociais (Bettencourt, 2013a). Tentativas de melhorar o gerenciamento das cidades, em apenas algumas dessas facetas, têm-se mostrado frustrantes. Um entendimento mais holístico das cidades, no qual todos os aspectos da vida urbana são considerados, está surgindo; e as principais constatações, assim como, suas implicações para as políticas públicas, são o foco deste estudo.

A maior parte da história do planejamento urbano refere-se à identificação da natureza fundamental das cidades (Lynch, 1981; Mumford, 1961). Por sua vez, cidades – pelo menos na concepção moderna – são tratadas como vastos sistemas de uso do solo a ser planejado e gerido de acordo com as melhores práticas de engenharia e economia aplicada. Isto significa que a política e o planejamento urbano são primariamente definidos em termos de alocação da terra. O planejamento de sistemas de transportes e de desenvolvimento de serviços urbanos é decidido de acordo com a melhor tecnologia disponível e perante restrições físicas, políticas e orçamentárias. Como apresentado neste estudo, muitas das questões operacionais podem ser definidas conceitualmente como *simples* problemas, sendo resolvidos com a utilização de estratégias de engenharia conhecidas, que são passíveis de serem implementadas de forma padronizada, graças à utilização de tecnologias de informação e comunicação em desenvolvimento.

Enquanto essa abordagem mentalmente prática é endereçada para a maior parte das atividades de curto prazo da administração das cidades, há muito mais a considerar a respeito das cidades no médio e longo prazo. Isto se torna

---

1. Traduzido por Rosane dos Santos Lourenço.

2. Professor no Instituto Santa Fé, Estados Unidos.

mais crítico para questões urbanas em longos horizontes de tempo e em lugares onde as práticas de engenharia falham (Bettencourt, 2014b). Então, a ênfase muda para diferentes tipos de problemas que lidam com dinâmicas socioeconômicas típicas, como: pobreza urbana, desemprego, crime e violência, crescimento econômico e sustentabilidade ambiental. Nem é preciso dizer que estes problemas são *complexos*, exigindo entendimento do histórico e do contexto, pois as receitas prontas inexistem. A maior parte das cidades, as sociedades civis, os agentes econômicos e as organizações políticas enfrentam problemas complexos. Falhas em lidar com estas questões minam o desenvolvimento futuro de qualquer cidade, bem como, a administração do seu dia a dia. Enfrentar problemas complexos requer um conjunto de abordagens diferentes, com base no reconhecimento do caráter massivamente interconectado das redes sociais urbanas, das redes de infraestrutura e suas dinâmicas no tempo. Problemas complexos enfatizam a dinâmica social e econômica da auto-organização, tais como o livre mercado e a vida cívica, sem hierarquia *top-down* (de cima para baixo).

A observação das cidades como sistemas complexos evidencia as conexões entre os vários componentes da cidade para identificar novas relações importantes na organização urbana e na dinâmica que pode também habilitar soluções mais bem-sucedidas e sustentáveis (Bettencourt, 2013b). Os objetivos de abordar as cidades como sistemas complexos são, portanto, mais ambiciosos que as práticas de planejamento urbano, devido à criação de uma teoria sobre o papel das áreas urbanas nas sociedades, salientando a intermediação humana e a habilidade para aprender, ser criativa e tomar parte em organizações sociais (Bettencourt, 2013a; 2013b). Busca-se, também, entender melhor como o espaço físico urbano e o fornecimento de serviço influenciam e facilitam a dinâmica social e, por seu turno, definem o êxito da mensuração. Embora a estratégia de sistemas complexos de criar uma visão holística da cidade vá além de outras disciplinas urbanas (sociologia, economia, engenharia etc.), o seu objetivo é criar uma síntese quantitativa simples da natureza das cidades, por exemplo, potencializando restrições físicas e operacionais em modelos econômicos e sociais subespecificados e vice-versa. Progressos consideráveis no esforço de entender cidades como sistemas complexos – empiricamente e teoricamente – têm sido feitos ao longo das últimas décadas, sendo descritos a seguir (Bettencourt, 2013a; 2013b). Estas novas visões permitem debater como lidar com problemas complexos em geral e em que circunstâncias específicas tais questões podem se tornar *simples*.

Em termos práticos, este estudo analisa o problema de conceptualização e gestão de cidades pelo ponto de vista de duas diferentes perspectivas: os desafios mais simples, de curto prazo; e os mais complexos, de longo prazo (Bettencourt, 2014b). Essas visões são articuladas começando por um resumo histórico de como as cidades têm sido percebidas pela política e pelo planejamento urbano. Em seguida, detalham-se como as cidades são percebidas como sistemas complexos.

Isto inclui um entendimento teórico empírico e emergente das características da cidade e suas consequências, assim como áreas urbanas de diferentes tamanhos impõem distintos desafios ao planejador. Finalmente, a tensão entre as abordagens de soluções de engenharia e de sistemas complexos é retomada para mostrar quando cada uma é necessária e como os sistemas complexos podem se transformar em sistemas simples e vice-versa.

## 2 BREVE HISTÓRICO DOS CONCEITOS DE CIDADE

As cidades são unidades fundamentais das sociedades humanas. Historicamente, a cidade surgiu, como unidade política, bem anteriormente ao aparecimento das nações. As cidades primitivas eram importantes centros religiosos, bem como de defesa (Mumford, 1961). Atualmente, predomina a ideia de que as cidades são unidades socioeconômicas.<sup>3</sup> Elas concentram e aceleram a produção social e econômica das nações modernas, incluindo o produto interno bruto (PIB), de forma mais extensa do que concentram a população (Bettencourt, 2013a; Bettencourt *et al.*, 2007; Bettencourt e West, 2010). Elas também criam as condições para o desenvolvimento humano mais abrangente, na medida em que a proximidade espacial é facilitada pelo fornecimento de serviços modernos e a evolução de organizações sociais e políticas atuam na resolução de problemas difíceis (Holston, 2008).

Apesar do papel fundamental na história da humanidade e no desenvolvimento contemporâneo, as cidades têm desafiado o entendimento integrado, capaz de identificar soluções sistemáticas para problemas de governança urbana. Por exemplo, não se sabe em detalhes qual a infraestrutura necessária para o bom funcionamento das cidades ou como computar os custos e benefícios completos dos serviços urbanos. Também se desconhece como os serviços deveriam ser modificados, ajustando-se ao crescimento econômico e populacional. Respostas para essas questões contam mais com as experiências passadas do que com o entendimento aprofundado dos processos em curso nas cidades.

Historicamente, várias metáforas foram utilizadas para entender as funções essenciais das cidades. No começo do século IV AC, Aristóteles e Platão debateram as propriedades da cidade política à luz das analogias com famílias ou com colônias de insetos (Aristotle, 1885). Normalmente, os planejadores urbanos enxergam as cidades como vastos problemas de engenharia e adotam princípios similares àqueles usados para estabilizar complicados maquinários em funcionamento, como aviões e estações de energia (Lynch, 1981). Essa é uma alusão a Kevin Lynch, que via a cidade como uma *máquina*. A metáfora da máquina para a cidade foi central

3. As cidades, definidas como áreas urbanas funcionais – definição implícita utilizada neste estudo –, são unidades socioeconômicas integradas em termos de mercado de trabalho, no sentido de que a área espacial e as populações são circunscritas por um conjunto de fluxos de deslocamentos quotidianos, a exemplo do que ocorre nas áreas metropolitanas nos Estados Unidos.

para a arquitetura modernista e o planejamento, mas, onde implementada, tem levado a projetos sociais disfuncionais que também resultaram em uso do solo sem efetividade e vultosos custos de transportes, poluição e congestionamentos.

Outra tradição em planejamento e arquitetura destaca o caráter orgânico das cidades em analogia com organismos ou ecossistemas (Lynch, 1981; Sitte, 1965; Geddes, 1915; Jacobs, 1970). Finalmente, na era da difusão das telecomunicações, pode-se pensar nas cidades como redes de troca de informações, talvez análogas a sistemas nervosos (Castells, 1989).

A cidade é todas essas coisas, mas nenhuma delas em particular (Bettencourt, 2013a, Lynch, 1981). Como um sistema complexo, ela tem sua própria organização e dinâmica. Além da função que a coloca à parte dos outros sistemas complexos, como será discutido a seguir. Metáforas simplistas mal aplicadas implicam muitos equívocos de planejamento, em termos de produtos certamente, assim como de custos de oportunidades para uma melhoria do desenvolvimento de ambientes urbanos. O desafio para a ciência moderna das cidades é definir questões urbanas meritórias e buscar soluções integradas que joguem com a dinâmica natural das cidades em termos de desenvolvimento humano e crescimento econômico, enquanto evita consequências negativas não intencionais, tais como violência, exclusão ou poluição (Bettencourt, 2013a).

A visão moderna das cidades como sistemas complexos começa a emergir na década de 1960 nos Estados Unidos e em países em desenvolvimento, especialmente na América Latina. Grandes desafios urbanos surgiram por todo o mundo. Nos Estados Unidos, as cidades sofreram massivas intervenções de infraestrutura sob o epítome de *renovação urbana*. Em muitas outras nações, particularmente na Europa e na América Latina, foi a vez do rápido crescimento urbano que, em muitos casos, levou a informalização do trabalho e da moradia urbanos, frequentemente na forma de vastas favelas. Muitos dos maiores debates nas cidades de hoje têm suas raízes nas transformações ocorridas durante esse período e seu legado de disparidades e segregações social e econômica (Wilson, 1990).

Nos Estados Unidos, a concepção de cidades como sistemas complexos cresce parcialmente como uma reação às soluções pura e simplesmente de infraestruturas do movimento de renovação urbana. Ao mesmo tempo, a concepção de *complexidade organizada* foi cunhada por Warren Weaver, no famoso relatório da Fundação Rockefeller, em 1958 (Weaver, 1958), e apropriado por Jane Jacobs no seu livro histórico *The death and life of great american cities*, em 1961 (Jacobs, 1961). Para Jacobs, a complexidade organizada foi a pedra angular capaz de dar sentido ao tecido social e espacial das grandes cidades. A estrutura e a dinâmica deste tecido, proposto por Jane, formam a base do sucesso da economia urbana e do civismo. Essas ideias têm sido o ponto de partida para uma nova geração de urbanistas e planejadores, o que leva a referência de cidades como *sistemas adaptativos complexos*.

Em cidades em desenvolvimento, o conceito de sistemas complexos leva em consideração questões práticas, tais como lidar com o crescimento alastrado das favelas em lugares como a Cidade do México (Sudra, 1976) ou Mumbai (SPARC, 1985). Segundo alguns dos poucos e primeiros estudos empíricos, John F. C. Turner escreveu textos influentes sobre habitação para os pobres como um mecanismo de desenvolvimento humano e enfatizou as suas conexões com outros aspectos da vida diária, cunhando a ideia de habitação como se fosse um verbo – o habitar (*housing as a verb*) (Turner, 1977). Dessa forma, as ideias de que vidas urbanas confundem-se com todos os aspectos da cidade, desde educação e saúde até serviços e transportes, começaram a ser encaradas seriamente, pelo menos em princípio, na formulação de políticas urbanas.

Como prescrição política, essas novas abordagens foram dirigidas para a evolução urbana das vizinhanças (pobres), em vez das práticas antigas tais como despejos forçados, que tendiam a causar problemas recorrentes (Rogler, 1967). Muitas formalizações dessas políticas tais como *sites and services* (locais e serviços) (Mayo e Gross, 1987), bem como políticas de habitações públicas melhor desenhadas para a modernização de favelas (*slum-upgrading*) tornaram-se prática comum, sendo a norma geral nos dias de hoje.

Apesar disso, observando os trinta anos de produtos diversos em termos de políticas formais para habitações sociais, locais e serviços (Mayo e Gross, 1987), levantam-se questões fundamentais sobre a viabilidade e sustentabilidade financeira. Como os países de renda média, tais como o Brasil e a África do Sul, embarcam em alguns dos grandes projetos para habitação social no mundo? Estas questões são motivo de grande preocupação. Por exemplo, por que a habitação pública é tão difícil de *dar certo*? Por que tantos projetos, especialmente nos Estados Unidos e na Europa, falharam, enquanto as habitações sociais são um sucesso em muitas nações asiáticas?

Respostas para essas questões requerem um melhor entendimento da natureza das cidades como sistemas complexos e as muitas interdependências entre a cidade física, sua infraestrutura e seus serviços, incluindo a vida socioeconômica das pessoas nessas áreas urbanas (Bettencourt, 2013a). Isto também requer formalização de modos para aprender a partir das intervenções urbanas, um tópico que será retomado adiante.

### 3 POR QUE AS CIDADES SÃO SISTEMAS COMPLEXOS?

Sistemas adaptativos complexos e cidades, em particular, têm numerosas propriedades que os distinguem dos sistemas físicos simples e tornam sua administração por métodos convencionais especialmente difíceis. Essas propriedades podem ser sumarizadas em termos de cinco propriedades gerais (Bettencourt, 2013a; 2013b;

Jacobs, 1961): *i*) heterogeneidade; *ii*) interconectividade; *iii*) escalabilidade; *iv*) causalidade circular; e *v*) desenvolvimento.

Primeiramente, heterogeneidade refere-se ao fato de que as cidades grandes são muito diversas. Essa realidade tem um lado positivo e outro negativo: heterogeneidade relaciona-se à capacidade econômica, tais como tipos de profissão ou negócios, e às disparidades (desigualdade) de renda, de raça e etnia etc. Por exemplo, grandes cidades atraem, desproporcionalmente, estrangeiros e migrantes e, portanto, tendem a ter uma composição cultural e étnica mais diversa. Cidades são também espacialmente muito diferenciadas de lugar para lugar e de pessoa para pessoa. Há também vizinhanças pobres e ricas, partes comerciais e residenciais na cidade. Os espaços públicos são utilizados mais intensivamente que os demais (Whyte, 2001) e por diferentes grupos de pessoas. Isto faz com que as abordagens padronizadas para planejamento e política sejam muito problemáticas, resultando em potenciais desperdícios. Existe o risco de falha na geração de soluções apropriadas, porque essas focam em uma situação intermediária rara e que descharacteriza lugares específicos e grupos sociais. Como se poderá observar, há uma necessidade pelo detalhamento das informações sobre as pessoas e vizinhanças a serem afetadas pelas intervenções urbanas. A obtenção de tal informação tem sido tradicionalmente difícil e demorada. Talvez, por essa razão, raramente tem sido feita. Entretanto, graças à nova tecnologia de informação e comunicação, a situação está mudando.

Segundo, tudo na cidade é sutilmente interconectado em rede. Assuntos de desenvolvimento econômico e saúde são conectados a lugares físicos e a serviços urbanos, e esses, por sua vez, aos orçamentos nos níveis municipal e individual. No entanto, surge o desafio: como desembaraçar alguns desses problemas de forma a desenvolver soluções práticas sem que sejam excessivamente complicadas?

Terceiro, o caráter das cidades muda com a escala, usualmente mensurada pelo tamanho da população: grandes cidades são, na média, espacialmente mais densas e fazem uso mais intenso das suas infraestruturas – por exemplo, mais carros por estradas –, levando a diferentes estruturas de benefícios sociais e de custos. Grandes cidades são mais produtivas economicamente e mais dispendiosas em termos de custo de vida. Assim, lidar com assuntos pertencentes ou relativos às cidades é, em geral, um problema que depende da escala. Planejar, com essa visão, requer o conhecimento de como o espaço urbano e a infraestrutura são utilizados, adaptando-os às diferentes intensidades de uso, administrando os custos conforme os ciclos de vida das soluções e alterando-as conforme o crescimento da cidade.

Quarto, muito provavelmente os assuntos da cidade, como outros sistemas complexos, apresentam causalidade circular. Por exemplo, uma cidade é mais rica porque tem uma melhor infraestrutura? Ou tem uma melhor infraestrutura por ser mais rica? Uma cidade é mais violenta porque é mais desigual? Ou seria

o inverso? Esse é um desafio importante para o desenho de intervenções políticas. É difícil obter resultados ao longo de uma dimensão única sem gerar consequências não intencionais em outros aspectos da vida urbana. Este problema clama por um planejamento mais atencioso, criando ciclos virtuosos de mudança. Por exemplo, à medida que a sociedade se desenvolve, há um intercâmbio entre qualidade e custo de serviços urbanos e desenvolvimento<sup>4</sup> socioeconômico da cidade, em que mudanças positivas, quanto aos aspectos da infraestrutura física das cidades, são necessárias para suportar sua dinâmica socioeconômica e vice-versa. O planejamento urbano que captura e entende este tipo de causalidade circular tem maior tendência de ser bem-sucedido e sustentável financeiramente.

Finalmente, pessoas, negócios e cidades, por si só, evoluem no tempo, de forma que qualquer política atualizada deve promover uma combinação de antigos e novos usos, para forjar uma mudança positiva em direção ao futuro. Isso é desafiador porque é preciso imaginar o futuro do uso do solo, das organizações sociais e das tecnologias que não foram ainda concebidas no presente. Isso evidencia a ideia de ver a cidade como um processo, mais do que como um objeto. Para o planejamento e a política urbanos, que abraçam a ideia de desenvolvimento contínuo e aberto, existe o reconhecimento da natureza humana do indivíduo e da mudança que esse provoca na cidade, atuando para reforçar os aspectos positivos, enquanto desencoraja as consequências negativas. Isto é bem diferente de criar um desenho estático e requer do planejador a busca pela informação acessível a respeito de detalhes das vidas dos cidadãos, das vizinhanças e dos negócios.

#### 4 CARACTERÍSTICAS DAS CIDADES COMO SISTEMAS COMPLEXOS

As cidades não apenas compartilham, com outros sistemas complexos, todos os atributos descritos anteriormente, como os expressam de formas específicas, de acordo com o exposto a seguir.

As áreas urbanas abrigam uma grande variedade de populações, que vão desde pequenas cidades, com poucas dezenas de habitantes, até megacidades com dezenas de milhões. Há décadas, é de amplo conhecimento entre os geógrafos e economistas regionais que as cidades de diferentes tamanhos de população possuem distintas propriedades, em termos de atuação política e econômica. Essas ideias são frequentemente descritas sob o conceito de hierarquia urbana (Berry, 1967). As hierarquias urbanas capturam a observação que as grandes cidades constituem-se como um sistema urbano (a nação) e, ao mesmo tempo, são portadoras de todas

4. Em alguns casos, tais ciclos virtuosos de desenvolvimento também funcionam em direção oposta, conduzindo a ciclos viciados de despreocupação e decadência. Este tipo de dinâmica tem sido invocado para explicar a crise pós-industrial, como em Detroit (Wilson, 1990), onde custos irrecuperáveis de serviços têm levado à degradação de qualidade via cortes, incluindo, essencialmente, justiça equitativa e aplicação da lei, que conduzem a perdas populacionais e desemprego que, por sua vez, erodem os serviços remunerados por taxas e assim por diante.

as funções que as pequenas cidades possuem, sendo que o contrário não é verdadeiro. Em outras palavras, a probabilidade de se encontrar um hospital, um teatro ou uma bolsa de valores é maior na grande cidade, onde um pouco de agricultura será encontrada também. Grandes cidades fornecem serviços para pequenas cidades, assim como seus territórios trocam seus serviços por aqueles que se tornaram menos relevantes, à medida que houve o crescimento em setores como o de alimentos, produção de energia e algumas formas de manufaturas.

Dessa forma, as questões de escala da cidade e de heterogeneidade são intimamente correlacionadas. Essa diferenciação gradual de funções, ligada ao tamanho da população, demanda um entendimento sistemático das cidades não apenas com relação às diferenças em sua estrutura interna, mas também com relação às mudanças na sua organização, que variam proporcionalmente ao tamanho.

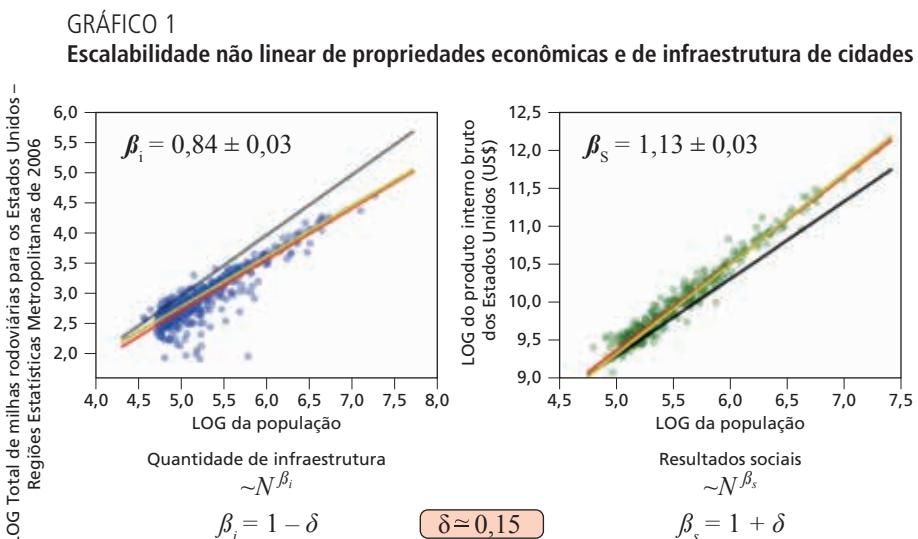
O estudo de como as características e a estrutura das cidades mudam com o tamanho, propriedade escalar, é conhecido como *scaling* (escalabilidade). A escalabilidade é uma ferramenta analítica de sistemas complexos que pode ser aplicada em todos os diferentes tipos de problemas, desde que sejam fornecidos dados suficientes. Por exemplo, a análise de escalabilidade tem sido frequentemente aplicada a problemas de física, tais como estados da matéria – líquido e gasoso – ou a sistemas mais complicados, como estrelas, organismos, ecossistemas ou, de fato, cidades. Todos estes sistemas apresentam propriedade escalar, assim, análises empíricas mostram que os atributos medianos são funções contínuas do tamanho do sistema. Sistemas físicos mais simples, como um gás ideal, demonstram propriedades abrangentes (energia, entropia) que são simplesmente proporcionais ao tamanho do sistema (Bettencourt *et al.*, 2014). Entretanto, os sistemas complexos típicos mostram comportamentos diferentes (não abrangentes), com propriedades variando não linearmente com o tamanho, à medida que aumentam. Isto será importante para as cidades, como demonstrado a seguir, porque é a justificativa para haver áreas urbanas menores, qualitativamente diferentes de grandes cidades, o que requer uma abordagem diferente para seus problemas.

Quando um sistema é escalável, este manifesta propriedades consistentes pela variação de tamanhos que pode tomar. Isso demonstra dois fatos: primeiro, todos os exemplos de tipos de sistemas expressam a mesma dinâmica local subjacente. Então, a escalabilidade, tal como é demonstrado no gráfico 1, revela que é possível abordar o problema da cidade observando os assentamentos de todos os tamanhos, buscando o mesmo tipo de processo que acontece em todos eles. Isso é importante porque pequenas cidades são frequentemente mais simples de se analisar. O mesmo pode ser dito para organismos, ecossistemas etc. Para as cidades, as unidades mais básicas têm comportamento similar em todas as instâncias, especificamente na vida social e nos lugares físicos, tomando a mesma forma para pequenas e grandes cidades. As diferenças que aparecem entre grandes metrópoles e pequenas cidades

são, então, o resultado de como essas dinâmicas elementares são elaboradas e compostas por meio das escalas.

A segunda consequência da escalabilidade demonstra acumulação, capturando a natureza coletiva das cidades. Pois, diferentes tipos de sistemas complexos têm propriedades coletivas emergentes distintas. A escalabilidade também mostra o que é diferente a respeito deles, embora todos sejam escaláveis. Por exemplo, a forma diferenciada com que cidades e organismos fazem uso da energia, à medida que seus tamanhos mudam, aponta para o fato de que eles apresentam dinâmicas distintas (Bettencourt, 2013a; Bettencourt *et al.*, 2007).

A principal vantagem da análise de escalabilidade de sistemas de cidades está na sua capacidade de prover um conjunto simples de ferramentas analíticas que revela muitos aspectos não triviais de áreas urbanas que são gerais para todos os lugares. Depois de identificar as propriedades comuns a todas as cidades do sistema, esta análise também fornece um procedimento para isolar o que é único e especial a respeito de cada lugar (gráfico 1).



Elaboração do autor.

O painel esquerdo mostra que a superfície das rodovias das áreas metropolitanas dos Estados Unidos são sublinearmente escalares ( $\beta < 1$ ), de acordo com a relação  $Y(N) = Y_0 N^\beta$ . Analogamente, os PIBs das áreas metropolitanas dos Estados Unidos crescem superlinearmente, na média, com tamanho populacional, com expoente  $\beta > 1$ . Ambos os expoentes, para a dimensão infraestrutura e para a produção, desviam da unidade (linear, na linha preta) na mesma quantidade  $\delta$ ; 1/6, nas direções positiva e negativa (linha amarela), respectivamente. Os desvios do valor  $\beta$

(mostrado no painel) da linha vermelha (melhor ajuste) seguem aproximadamente a distribuição normal, mas seus valores são muito persistentes ao longo do tempo com características de escalas de tempo da ordem de décadas.

Alguns dos principais resultados da análise de escalabilidade, aplicada a cidades, têm suas propriedades explicadas pela teoria a seguir. Por exemplo, a análise do produto socioeconômico das cidades, como função de seu tamanho, mostra aumento *per capita* com o tamanho da população, crescendo de 10% a 20%, conforme o tamanho da cidade é duplicado (Bettencourt, 2013a; Bettencourt *et al.*, 2007). Isto inclui quantidades, tais como: o tamanho da economia urbana (PIB), a produtividade do trabalho (salários), os índices de crimes violentos e medidas de inovação, como patentes ou empregabilidade em determinadas profissões.

Por sua vez, observa-se que o volume de espaço construído e a infraestrutura *per capita* diminuem em quantidade similar (Bettencourt, 2013a; Bettencourt *et al.*, 2007). Por exemplo, a quantidade de rodovias *per capita* decresce de 10% a 20% a cada duplicação no tamanho da cidade. A área total de rodovias e infraestrutura é também conectada ao espaço construído (Bettencourt, 2013a; Angel *et al.*, 2011), que varia com o tamanho da cidade de forma semelhante, como mensurado pelas imagens de satélite ao redor do mundo. Essas características aparecem como propriedades gerais das cidades e se aplicam igualmente bem a China, aos Estados Unidos, a Alemanha e ao Brasil, embora os níveis nacionais de riqueza e infraestrutura (gráfico 1) variem e mudem no tempo (Bettencourt, 2013a; Bettencourt *et al.*, 2014). Estes dois parâmetros sobem com o desenvolvimento, enquanto crime e outras consequências negativas de socialização de larga escala descem.

Isso explica porque os principais desafios das pequenas cidades são diferentes das grandes. As grandes cidades precisam ser capazes de controlar altos níveis de criminalidade *per capita* e gerir, de forma mais intensificada, a infraestrutura e os serviços, frequentemente com novas tecnologias para acompanhar o aumento das taxas de utilização. Pequenas cidades, por seu turno, não têm esses problemas na mesma extensão e, com isso, buscam aumentar o valor adicionado das atividades socioeconômicas e os resultados da baixa densidade no uso do solo.

O efeito composto de mais alto bem-estar médio *per capita* e menos espaço é que o aluguel da terra aumenta mais rápido que os rendimentos do trabalho (Bettencourt, 2013a). Geralmente, isto tem um conjunto de importantes consequências para o planejamento urbano e para a forma espacial da cidade. A resposta para a renda da terra, que cresce mais rápido com o tamanho da cidade, é tipicamente de dois tipos: primeiro, as pessoas podem viver em menores espaços; segundo, mais níveis podem ser adicionados em uma mesma unidade de área de terreno, com edifícios de múltiplos andares e com custos de construções mais acessíveis. Essas são as características típicas das grandes cidades, que levam a usos mais intensos dos espaços.

As consequências para a administração das cidades (e empreendimentos imobiliários) são que a capitalização da terra é um meio efetivo para recuperar custos. Com a apreciação dos imóveis mais rápida do que a dos salários e com o crescimento da cidade, as receitas permitem sustentar uma administração maior e mais profissional e desenvolver melhores serviços.

Os desvios das relações de escalabilidades (resíduos do ajustamento log-log, gráfico 1) são também interessantes, pois expressam efeitos locais característicos de cada cidade, afastados da expectativa de seu tamanho populacional. Tais resíduos não são números randômicos, apesar de obedecerem a estatísticas simples bem descritas pela distribuição Gaussiana<sup>5</sup> (Gomez-Lievano, Youn e Bettencourt, 2012; Bettencourt *et al.*, 2010). Ao invés disso, os resíduos mostram a independência entre o tamanho da cidade e o desempenho urbano para cada cidade relativamente a todas as outras em um mesmo sistema urbano (Bettencourt *et al.*, 2010). Ademais, com o tempo, tais desvios mudam muito lentamente, de forma que a cidade mais rica ou mais pobre que o esperado para o seu tamanho hoje, provavelmente, continuará a sê-lo por talvez algumas décadas (Bettencourt, 2013a; Bettencourt *et al.*, 2010). Isto significa que a mudança urbana fundamental é lenta e acontece na escala de tempo de muitos ciclos eleitorais. Assim, a consistência de certas políticas urbanas no longo prazo é um importante ingrediente para conduzir mudanças na direção correta.

É interessante resumir os resultados empíricos, à luz da nova teoria para a natureza das cidades como sistemas complexos, para as cinco propriedades das cidades descritas na seção anterior. A teoria proposta recentemente (Bettencourt, 2013a) descreve cidades em termos de modelos de rede para interações socioeconômicas e de infraestrutura, além de prognosticar os valores de expoentes escalonáveis (elasticidade)  $b$ .

Neste estudo, será desenvolvido um tratamento matemático detalhado dessas ideias e informações mais complexas a esse respeito poderão ser consultadas nas fontes originais (Bettencourt, 2013a). Basicamente, os atributos escalares das cidades podem ser obtidos assumindo quatro propriedades simples, comuns a todas as cidades: *i*) as populações das cidades são misturadas, significando que há possibilidade, em princípio, de se encontrar alguém conhecido; *ii*) o espaço construído na cidade é estabelecido por redes de infraestruturas descentralizadas que crescem com a cidade; *iii*) o esforço humano é conservado conforme o tamanho da cidade; e *iv*) os produtos socioeconômicos das cidades são proporcionais às taxas globais de interações sociais nestes espaços.

5. Essa é uma distribuição log-normal nas variáveis originais (Bettencourt *et al.*, 2014; Gomez-Lievano, Youn e Bettencourt, 2012; Bettencourt *et al.*, 2010; Schläpfer *et al.*, 2014).

Essas ideias podem também ser estabelecidas de modos ligeiramente diferentes. Se os humanos se beneficiam, na média, na interação com os outros, então o problema a ser resolvido é como criar um conjunto de procedimentos no espaço que faça tal interação possível com um custo proporcional aos seus benefícios. Este é o problema geral que as cidades têm de solucionar: a estruturação do espaço e da distribuição espacial das densidades humanas ocorre de forma que os custos de funcionamento da cidade – especialmente o transporte de pessoas, mercadorias, energia e informação – são escalares, e o mesmo acontece com as taxas das interações sociais, enquanto preservadoras dos esforços humanos (Bettencourt, 2013a). Essas ideias propõem, em particular, que as propriedades escalares das cidades são o resultado de taxas crescentes de interações sociais *per capita* com o tamanho das cidades. Esta hipótese é testada utilizando redes de telefones celulares, nas quais cada contato pessoal pode ser mensurado diretamente, sendo que os resultados estão de acordo com a teoria (Schläpfer *et al.* 2014; Andris e Bettencourt, 2014).

O ingrediente final é o que acontece com as redes sociais à medida que as taxas de interação (grau de rede) crescem. Aqui, em geral, pode-se recorrer às ideias que fundamentaram a economia e a sociologia; e, especificamente, aos conceitos de divisão de trabalho (Smith, 1776), que em termos modernos é pensada como uma divisão de conhecimento (Arrow, 1962). De acordo com ideias mais qualitativas de hierarquia urbana mencionada antes, em cidades grandes, há maior diversidade de profissões, tipos de negócios etc. (Bettencourt, Samaniego e Youn, 2014; Youn *et al.*, 2014). A presença de vasto capital humano é frequentemente alegada pelos economistas urbanos como a causa imediata das grandes cidades mostrarem maiores níveis de produtividade no trabalho. Mas, a ideia é que isto se deve a uma possibilidade de contato social com mais pessoas, que encoraja cada indivíduo a especializar-se, aprender e tornar-se mais interdependente de outros. Neste processo, um novo conhecimento é criado, podendo levar a novo crescimento econômico (Bettencourt, Samaniego e Youn, 2014; Bettencourt, 2014a).

Sendo assim, as cidades criam condições para maiores taxas de interação socioeconômica com outros (grandes mercados, entre outras coisas) e encoraja a geração de novo conhecimento e suas recombinações, por meio de especialização e interdependência entre indivíduos e organizações (firmas, organizações sem fins lucrativos, agências governamentais etc.).

Observa-se como as cinco propriedades das cidades introduzidas anteriormente são interdependentes: o tamanho da cidade (escala) permite, em princípio, maior interconectividade entre pessoas, ao longo de um grande número de dimensões possíveis pelo aprendizado e pela especialização (heterogeneidade). A causalidade entre estes processos é circular na medida em que a interdependência (conectividade social) é necessariamente para permitir especialização e esta,

por sua vez, leva a mais conhecimento avançado, com maior valor econômico que pode estimular a infraestrutura física e social. Com a iteração e o aprofundamento dos processos ao longo do tempo, mais conhecimento pode ser criado e incorporado aos indivíduos e às redes socioeconômicas, conduzindo ao crescimento econômico e ao desenvolvimento humano, não apenas no nível de cidades individuais, mas também de sistemas urbanos por meio da estruturação de hierarquias urbanas.

Esses efeitos, na média, derivam da teoria de escalabilidade das cidades (Bettencourt, Samaniego e Youn, 2014; Bettencourt, 2014a). Entretanto, os processos estocásticos detalhados, pelos quais vidas individuais são tecidas em cidades e podem levar aos resultados agregados, permanecem por serem investigados em maiores detalhes. Em particular, é importante que um melhor entendimento do por que, apesar da possibilidade de maiores taxas de interação, muitas cidades de nações em desenvolvimento permanecem mais pobres que suas contrapartes desenvolvidas. Isto é devido, em parte, à consequência de limitações dos processos descritos aqui. Como resultado, muitos indivíduos em cidades desenvolvidas pensam ser difícil mudar suas vidas, além da própria sobrevivência, em algo mais empreendedor e em atividades mais criativas que podem acumular conhecimento e levar a alterações sistemáticas em termos de desenvolvimento humano e crescimento econômico.

Dessa forma, a interação entre infraestrutura, serviços urbanos, criatividade humana e agenciamentos volta a ser focada. Em particular, a habilidade, que as cidades têm para identificar os problemas que elas podem resolver com soluções de engenharia, é essencial para dar fluidez ao potencial socioeconômico dos seus indivíduos. Este, então, é o papel da estratégia de longo prazo de planejamento e de política urbanos que será abordado a seguir.

## 5 IMPLICAÇÕES PARA O PLANEJAMENTO E A POLÍTICA URBANA

As implicações práticas das cidades, entendidas como sistemas complexos para planejamento e política, são agora consideradas de forma estratégica. Uma vez que cada projeto e cada política naturalmente requerem intervenções feitas sob medida para as condições ou informações do local, considerando as restrições de orçamento, contexto político etc.<sup>6</sup>

Especificamente, três questões são respondidas nesta seção, que são as causas das principais dificuldades para gerir as cidades e promover mudanças positivas: *i)* como desenhar projetos que levem em conta a dinâmica de interconexão e heterogeneidade das cidades?; *ii)* quando seria apropriado utilizar as práticas de

6. Esse é o sentimento de que a teoria científica nunca determina totalmente as soluções de engenharia ou políticas. Embora, a concepção científica seja essencial para reduzir o espaço de possíveis políticas e projetos de engenharia e, frequentemente, para a concepção de soluções técnicas totalmente novas, que tinham sido descartadas no passado por serem intratáveis. Considere-se, por exemplo, a tentativa de ir para a lua sem o conhecimento das leis de movimento e de gravidade.

engenharia e política convencionais para enfrentar os desafios urbanos?; e *iii)* como lidar com *problemas complexos* que caracterizam fortemente o tecido social e econômico das cidades?

A segunda e a terceira questões são fáceis de responder. Definindo: *i) problemas simples* – aqueles que podem ser resolvidos usando metodologias de engenharia; e *ii) problemas complexos* – aqueles que requerem métodos provenientes de sistemas complexos. A descrição que se segue esclarece quando um problema é classificado como simples ou complexo, permitindo escolher a melhor estratégia para resolver cada tipo.

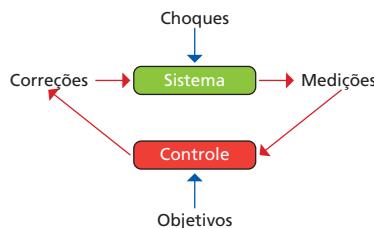
Problemas simples nem sempre são fáceis de solucionar, sendo assim descritos porque sua estrutura é clara e agradável de resolver, pois seguem a lógica da engenharia teórica, que é familiar aos formuladores de políticas e planejadores urbanos (Bettencourt, 2014b). Tais problemas podem ser endereçados de forma padronizada que são minimamente sensíveis culturalmente. Exemplos: fazer funcionar o sistema de ônibus ou a coleta de resíduos.

Pode-se identificar quando um problema é simples por meio de três propriedades necessárias (Bettencourt, 2014b): *i)* a existência de mensurações bem definidas, desempenho métrico, sem a qual a solução seria reavaliada frequentemente; *ii)* os meios de tratar o sistema são direcionados para o desempenho mensurável; e *iii)* a habilidade de agir rápido o suficiente, de forma a manter a solução simples. O que foi descrito pode ser formalizado em termos de ciclos de controle de retroalimentação (Åström e Murray, 2008), que pode ser implementado por um algoritmo, por uma pessoa ou por uma organização dedicada.

Como exemplo, no funcionamento do sistema de ônibus urbano, cita-se o tempo de espera na parada de ônibus, que é uma métrica de desempenho. Considera-se desejável que uma permanência não ultrapasse os cinco minutos. Pode-se mensurar a média de tempo entre estações de um *bus rapid transit* (BRT) com a localização e hora de ingresso da pessoa na plataforma, o ajuste da velocidade do ônibus e a sua frequência (por meio de comunicação e despacho), alimentando a base de dados com informações de forma contínua. Caso o tempo de espera torne-se muito longo ou irregular, o despacho e ajustamento de velocidade do ônibus tornar-se-á mais difícil. Os viajantes podem ficar mais insatisfeitos com os serviços, devido aos longos tempos de espera, mas também por causa da grande incerteza, tornando-se um sistema de difícil gestão e financeiramente insustentável. Assim, para se obter uma operação efetiva, levando à qualidade de serviço sustentável e previsível, é necessário um gerenciamento ativo do sistema com uma escala de tempo em minutos ou em segundos. De outra forma, pode ocorrer o descontrole do sistema, tornando-o inadministrável.

Outro importante e diferente exemplo de política de ciclos de controle de retroalimentação é a monetária, por meio da qual os bancos centrais ajustam as taxas de juros para combater a inflação e estimular o desenvolvimento econômico. Este é um exemplo de política nacional (não urbana), pela qual uma questão complexa – controlar a inflação – pode tornar-se simples.

FIGURA 1

**A estrutura da política como um ciclo de controle de retroalimentação**

Elaboração do autor.

Tais soluções refletem a teoria da engenharia sobre como operacionalizar sistemas complicados de forma simples. Essencialmente, requer a mensuração clara de propriedades do sistema e comparações com metas desejáveis. A capacidade do controlador de agir sobre o sistema para corrigi-lo, conduzindo para o objetivo, e a habilidade de atuar de forma rápida o suficiente, mantém simples a resposta dada pelo sistema.

O aspecto crítico dessas soluções, que não foi explicitada na figura 1, é a importância da resposta rápida no devido tempo por parte do planejador. Como será discutido a seguir, todos os sistemas *simples* são complexos no longo prazo e tipicamente mostram instabilidades até mesmo em curtos espaços de tempo. A competência em acionar o sistema antes que tais instabilidades ocorram é crucial. Por exemplo, a política monetária que permite o crescimento da inflação pode exagerar nas medidas corretivas, levando o sistema à recessão e eventualmente à deflação, pela qual um ato (diminuição das taxas de juros) torna-se inócuo. Como resultado, uma boa política, quando aplicada de forma rápida o suficiente, torna-se absolutamente sem efeito se empregada em uma escala temporal em que o sistema não responde mais ao controle simplificado.

As políticas do tipo engenharia, onde funcionam, permitem a resolução de problemas de forma extremamente efetiva, e são uma redenção para a sobrevivência de sistemas essenciais, tais como transportes, abastecimento de água, energia, remoção de resíduos, controle do clima etc. Isto é crucial para permitir à sociedade dedicar seu tempo a atividades com grande valor socioeconômico, possibilitando assim o próprio crescimento e desenvolvimento (Bettencourt, 2014a).

Todos os problemas simples são complexos no início e tornam-se complexos novamente ao longo do tempo. Para explicar isso, será considerado o problema do sistema de ônibus mais uma vez. Os projetos de BRTs, famosos em Curitiba e Bogotá, são bons exemplos. Antes de este recente sistema ser concebido, uma linha de ônibus consistia em um conjunto de veículos correndo pelas vias, parando nos pontos estabelecidos ao longo das rotas, tentando permanecer na programação e nos horários pré-definidos. Mas as deficiências dos sistemas tradicionais, em termos de altos custos e de baixa velocidade, especialmente em cidades grandemente congestionadas, levam a soluções inovadoras, como os ônibus em faixas dedicadas e plataformas elevadas que funcionam mais como um metrô. Primeiramente, o problema de funcionamento efetivo a baixo custo de sistema de ônibus em cidades congestionadas foi complexo porque dependia do comportamento e da cooperação dos viajantes de ônibus, carros particulares e muitos outros fatores. Mas, por meio da experimentação e invenção, estes problemas foram superados. Como resultado, a questão do funcionamento do BRT tornou-se mais simples. Uma vez que o sistema se estabelece, pode-se implementar o processo de despacho do ônibus e ajuste de velocidade para minimizar as esperas e os tempos de viagem descritos antes. Uma vez que o sistema é simplificado e, certamente, menos exposto a incertezas do comportamento humano, as técnicas computacionais, que são a simulação e os modelos com base em agente, também se tornam úteis no desenvolvimento e na testagem de métodos de gerenciamento. Tudo isto unido permite um virtuoso ciclo de aperfeiçoamentos e exploração das demais eficiências.

No longo curso, o problema de operacionalização do sistema de trânsito torna-se complexo novamente: com expectativas crescentes do público, atrelado ao crescimento econômico e ao desenvolvimento humano. Isto vai requerer soluções de maior rapidez, conforto e número de paradas. Atualmente, isto significa que os táxis, carros e até helicópteros tornam-se preferíveis para os mais ricos ao passo que mais tempo é liberado para a população conscientizada. Como desenvolver um sistema de transporte público mais sustentável financeiramente, em que tempo e conforto são primordiais, permanece ainda como um problema aberto e leva adiante a pesquisa de maiores eficiências dos sistemas BRT. As tendências recentes de aumento da frota de veículos privados em cidades orientadas pelo uso do transporte público, tais como Cingapura ou Curitiba, que têm problemas evidentes (Marques, 2010; Mahbubani, 2014); e cidades de renda média, como Pequim e São Paulo, levam essas cidades a baterem recordes mundiais de congestionamentos.

Caso os problemas *complexos* sejam inevitáveis, como se deve lidar com eles?

Essa questão remete aos anos 1970, quando o termo *problemas perversos* foi cunhado para descrever muitos dos difíceis problemas socioeconômicos enfrentados pelas cidades (Rittel e Webber, 1973). Problemas perversos foram originalmente definidos como aqueles de causalidade reversa ou causação circular e

grandes (combinatorial) problemas espaciais. Assim, pode parecer, à primeira vista, que estes problemas são impossíveis de resolver. Com isso, como os estudos de sistemas complexos auxiliam na prática?

De forma breve, esses problemas são resolvidos por meio de auto-organização (Bettencourt, 2014b). Esta é também uma resposta da economia, embora em um contexto mais limitado (Hayek, 1945). O papel dos mercados ou, mais generalizadamente, das redes de indivíduos e organizações que integram e utilizam a informação disponível para eles, mas não para qualquer pessoa na sua totalidade (como os planejadores), é o modo pelo qual problemas perversos são enfrentados na prática. Isto não garante soluções ótimas em geral, mas resulta em uma forma robusta e distributiva de lidar com os problemas.

A auto-organização coloca ênfase sobre a promoção humana, a criatividade e a organização social efetiva. Ela é capaz de coordenar o conhecimento e a ação por meio de sinalizações, como preços. Como na ideia de falha de mercados em economia, isto nem sempre é possível e precisa de custos de transações reduzidos e coordenados.<sup>7</sup>

Desse ponto de vista, há dois principais desafios para a auto-organização efetiva: *i) o problema de informação*, necessário para projetar e priorizar as intervenções urbanas; e *ii) o problema de aprender com as políticas* como são implementadas ou à medida que vão sendo implementadas.

Ambos os problemas funcionam mais profundamente do que podem aparentar sob o ponto de vista prático. Algum pensamento a respeito das dificuldades envolvidas transforma a prática de política urbana, de longe, em um problema de projeto estático, para o qual é essencial fazer com que haja coordenação da informação e a ação pelos níveis da organização: do indivíduo e da vizinhança para o governo municipal, além de outras esferas administrativas. Isto também significa que as condições locais (cultural, tecnológica e orçamentária) são muito relevantes neste estágio da resolução do problema (Brennan e Sanchez, 2012). Por exemplo, em baixo desenvolvimento, é comum que serviços urbanos escassos sejam compartilhados entre grande número de domicílios. Considerar, por exemplo, pontos de tomada de água: quantos deveriam haver em uma vizinhança? A resposta, do ponto de vista da utilidade, depende dos recursos e dos custos de manutenção do serviço. Mas, do ponto de vista dos usuários, o tempo de espera, a distância e a confiabilidade (manutenção) são essenciais. Pode ser que mais pontos de água desenvolvidos a um alto custo de capital venham a prover um serviço e uma manutenção melhores, porque cada um requer menor tempo de utilização e grupos menores de usuários podem conferir maior senso de responsabilidade

7. Para informações mais detalhadas, consultar: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Market\\_failure](http://en.wikipedia.org/wiki/Market_failure)>.

e propriedade.<sup>8</sup> Como é possível para o planejador saber isso com antecedência? Na prática, algo dessa informação para o projeto inicial está para ser descoberto pela comunidade a ser servida, e então está para ser aprendido por meio de avaliação do serviço ao longo de diversas dimensões ao longo do tempo. Visto que os governos e as autoridades planejadoras não são bem equipados para lidar com essas questões, o desenvolvimento de um planejamento e de uma política urbanos bem-sucedidos é difícil e requer a aquisição de sofisticação organizacional e tecnológica.

Desse modo, o problema da informação é simples o suficiente para entender: como pode o planejador na municipalidade saber o suficiente a respeito da vida das pessoas, em uma vizinhança particular, de forma a desenhar a melhor política possível naquele lugar?

Em geral, isso é de fato bastante difícil – existe um mundo de diferenças entre implementar uma solução padrão (em termos de transporte, abastecimento de água e eletricidade) e conceber um plano que seja ao mesmo tempo mais útil para o serviço à comunidade e realizável em termos de aquisição. Tal problema não é necessariamente mais simples que as práticas comuns de planejamento participativo, tais como promover encontros comunitários, a menos que estes possam ser moldados para ser uma forma efetiva de adquirir a informação necessária.

Do ponto de vista das populações, um problema similar aparece: como a comunidade pode ser motivada a facilitar o trabalho municipal, para saber como coletar sua informação local e comunicá-la de forma que possa ajudar aos planejadores?

Esse assunto é um problema convencional de coordenação e tem sido tratado como nos sistemas complexos: o problema reduz-se ao desenvolvimento de habilidades para resolver questões locais de modo que integra o processo de conhecimento de baixo para cima; e a coleta de dados e promoção de cima para baixo (Brennan e Sanchez, 2012). Em outras palavras, é essencial que as comunidades a serem servidas possam contribuir de forma relevante com informações a respeito das suas prioridades em termos de serviços de qualidade e quantidade e capacidade financeira, e que esta informação seja incorporada no planejamento de serviços pela municipalidade.

Isso representa um desafio de como disseminar a informação entre diferentes organizações. Muitos experimentos, tipicamente em vizinhanças de comunidades pobres, têm sido apontados como interessantes soluções para esse problema com dupla vertente, o interesse da comunidade a ser servida e a necessidade da municipalidade por informações adequadas. Eles têm demonstrado que o melhor modo para construir essas diferentes formas de organização é por meio de dados, que frequentemente podem

8. A razão para isso tem levado a um massivo programa de substituição de toaletes públicos por privados em Pune, Índia, por exemplo. Para mais informações, consultar: <[shelter-associates.org](http://shelter-associates.org)>.

ser coletados pelas comunidades, mas que precisam ser verificado por terceiros. Isso pode ser transformado de uma confrontação política sobre questões gerais em uma simples negociação a respeito de fatos e escolhas mais objetivas.

Novas informações e comunidades tecnológicas podem também desempenhar um papel importante na redução de dificuldades para executar esses processos. Isto se torna possível ao gerar uma pesquisa análoga ao censo de acordo com procedimentos padrões simples, utilizando métodos de papel e caneta ou dispositivos eletrônicos, coletando informação geoespacial de forma barata e acurada. Porque esses métodos são fáceis de compartilhar por meio das novas plataformas online,<sup>9</sup> eles permitem um menor custo de coordenação que no passado, além de permitirem o rastreamento de serviços, considerando ambas as perspectivas logística e socioeconômica. Tais métodos estão se tornando mais disseminados, mas são ainda relativamente novos. Países de renda média, como o Brasil (Perlman, 2010), têm necessidade e uma oportunidade única de usá-los para localizar os grandes investimentos e as melhorias em vizinhanças de baixa-renda e habitações públicas, assim como em serviços mais gerais nos contextos de distribuição.

Isso leva então ao assunto do aprendizado. Aprender é essencial, porque provê a oportunidade para os planejadores, o governo e os pesquisadores de resolverem problemas efetivamente e aperfeiçoarem as suas práticas a partir das experiências em curso. Isto requer a formalização de intervenções na cidade de forma clara, mensurando a produção e a habilidade de coletar informações ao longo do caminho. Isto significa que, o conhecimento a respeito da natureza do desenvolvimento urbano em muitos lugares possa ser comparado e avaliado, sendo que a busca por possíveis soluções onde quer que estejam possam ser exploradas e a riqueza de conhecimento gerada em muitos outros lugares. Enquanto o aprendizado está certamente ocorrendo por meio de uma miríade de intervenções em muitos lugares, é muito difícil avaliar cada uma dessas políticas objetivamente e por terceiros, não diretamente envolvidos nelas, para aprender a partir dessas experiências. Assim, requer-se uma forma integrada de distribuir o procedimento e as avaliações de políticas urbanas tal que a soma total do conhecimento resultante seja cumulativo (Ostrom, 2009).

A resposta para a primeira questão, no início da seção, pode agora ser abordada. Os mecanismos de auto-organização atuam sobre o conhecimento existente e sobre a sua expansão e o seu aperfeiçoamento. Uma política efetiva que encoraja a auto-organização precisa reforçar ciclos positivos de causalidade circular em ambientes heterogêneos, onde algumas soluções para os problemas apontados, provavelmente, existem localmente em algum lugar da cidade (Perlman, 2010). Por exemplo, até mesmo cidades pobres têm vizinhanças mais desenvolvidas onde os padrões de provisão de serviços são mais altos. A questão de expandir serviços

9. Para mais informações, consultar: <<http://migre.me/pFVHa>>.

pode então ser primariamente sobre escalonar e replicar a capacidade operacional local mais largamente. Assim, a resposta é frequentemente obter vantagem das dinâmicas socioeconômicas presentes de alguma forma no sistema, enquanto cria as condições para que tal capacidade seja expandida e aperfeiçoada, ao invés de tentar desenvolver nova solução *tabula rasa* (a partir do zero). Uma razão para isto é que soluções locais são mais propensas a serem bem adaptadas aos contextos e às necessidades locais que as receitas importadas. Mas, a mais importante razão é que a aquisição de informação e aprendizado pelos diversos agentes na cidade é a base para soluções fundamentais de muitos problemas diferentes e deve por si só ser o alvo primário de uma política.

Em resumo, as lições práticas de se considerar as cidades como sistemas complexos são que a capacidade de tratar ambos os problemas, simples e complexos, nas cidades, precisa coexistir, possibilitando ao planejador alternar entre as duas perspectivas: uma abordagem prática, para problemas particulares e claros no presente, ou uma abordagem mais estratégica, de mais longo prazo, para o desenvolvimento de cidades no decorrer das décadas.

## REFERÊNCIAS

- ANDRIS, C.; BETTENCOURT, L. M. A. **Development, information and social connectivity in Cote d'Ivoire**. Santa Fe: Santa Fe Institute, 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/GEwbAO>>.
- ANGEL, S. *et al.* The dimensions of global urban expansion. **Progress in Planning**, n. 75, p. 53-107, 2011.
- ARISTOTLE. **The politics of Aristotle**. Trans. into English with introduction, marginal analysis, essays, notes and indices by B. Jowett. Oxford. Clarendon Press, 1885. 2 v. Disponível em: <<http://oll.libertyfund.org/titles/579>>.
- ARROW, K. The economic implications of learning by doing. **The Review of Economic Studies**, n. 29, p. 155-173, 1962.
- ÅSTRÖM, K. J.; MURRAY, R. M. **Feedback systems**: an introduction for scientists and engineers. Princeton: Princeton University Press, 2008.
- BERRY, B. J. L. **Geography of market centers and retail distribution**. New York: Prentice-Hall, 1967.
- BETTENCOURT, L. M. A. The origin of scaling in cities. **Science**, v. 340, n. 6139, p. 1438-1441, 2013a.
- \_\_\_\_\_. The kind of problem a city is. In: OFFENHUBER, D.; RATTI, C. (Eds.). **Die stadt entschlüsseln**: wie echtzeitdaten den urbanismus verandern. Heidelberg: Birkhauser, 2013b.

- \_\_\_\_\_. **The role of technology in informational social networks.** New York: IEEE Proceedings, 2014a.
- \_\_\_\_\_. The uses of big data in cities, **Big Data**, n. 2, p. 12-22, 2014b.
- BETTENCOURT, L. M. A.; SAMANIEGO, H.; YOUN, H. **Professional diversity and the productivity of cities.** Ithaca: Cornell University Library, 2014. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1210.7335>>.
- BETTENCOURT, L. M. A.; WEST, G. B. A unified theory of urban living. **Nature**, n. 467, p. 912-913, 2010.
- BETTENCOURT, L. M. A. *et al.* Growth, innovation, scaling and the pace of life in cities. **Proceedings of the National Academy of Science**, v. 104, n. 17, p. 7301-7306, 2007.
- BETTENCOURT, L. M. A. *et al.* Urban scaling and its deviations: revealing the structure of wealth, innovation and crime across cities. **Plos One**, v. 5, n. 11, p. 13541, 2010.
- BETTENCOURT, L. M. A. *et al.* **The hypothesis of urban scaling:** formalization, implications and challenges. Ithaca: Cornell University Library, 2014. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1301.5919>>.
- BRENNAN, M.; SANCHEZ, T. W. **Planning as if people matter:** governing for social equity (Metropolitan Planning + Design). Washington: Island Press, 2012.
- CASTELLS, M. **The informational city:** information technology, economic restructuring, and the urban-regional process. Oxford: Blackwell, 1989.
- FUJITA, M.; KRUGMAN, P.; VENABLES, A. J. **The spatial economy.** Cambridge: MIT Press, 2001.
- GEDDES, P. **Cities in evolution:** an introduction to the town planning movement and to the study of civics. London: Williams and Norgate, 1915.
- GOMEZ-LIEVANO, A.; YOUN, H.; BETTENCOURT, L. M. A. The statistics of urban scaling and their connection to Zipf's Law. **Plos One**, v. 7, p. 40393, 2012.
- HAYEK, F. The use of knowledge in society. **American Economic Review**, n. 35, p. 519-530, 1945.
- HOLSTON, J. **Insurgent citizenship.** Princeton: Princeton University Press, 2008.
- JACOBS, J. **The death and life of great American cities.** New York: Random House, 1961.
- \_\_\_\_\_. **The economy of cities.** New York: Vintage Books, 1970.
- LYNCH, K. A. **A theory of good city form.** Cambridge: MIT Press, 1981.

MAHBUBANI, K. Big Idea No. 1: A 'less-car' Singapore. **The Straits Times**, 8 Feb. 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/j7sWQf>>.

MARQUES, S. Campeã de veículos por habitante, Curitiba tenta alternativas para garantir transporte coletivo para a Copa. **UOL Notícias**, 29 set. 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/nS3zUV>>.

MAYO, S. K.; GROSS, D. J. Sites and services – and subsidies: the economics of low-cost housing in developing countries. **The World Bank Economic Review**, n. 1, p. 301-335, 1987.

MUMFORD, L. **The city in history**: its origins, its transformations, and its prospects. New York: Harcourt, Brace and World, 1961.

OSTROM, E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. **Science**, n. 325, p. 419-422, 2009.

PERLMAN, J. **Favela**: four decades of living on the edge in Rio de Janeiro. New York: Oxford University Press, 2010.

RITTEL, H. W. J.; WEBBER, M. M. Dilemmas in a general theory of planning. **Policy Sciences**, n. 4, 155-169, 1973.

ROGLER, L. H. Slum neighborhoods in Latin America. **Journal of Inter-American Studies**, n. 9, p. 507-528, 1967.

SCHLÄPFER, M. *et al.* The scaling of human interactions with city size. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 11, 2014.

SITTE, C. **City planning according to artistic principles**. London: Phaidon Press, 1965.

SMITH, A. **An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations**. London: W. Strahan, 1776.

SPARC – SOCIETY FOR THE PROMOTION OF AREA RESOURCE CENTRE. **We, the invisible**: a census of pavement dwellers. Mumbai: SPARC, 1985.

SUDRA, T. L. **Low income housing in Mexico City**. 1976. Thesis (Doctoral) – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1976.

TURNER, J. F. C. **Housing by people**. New York: Pantheon Books, 1977.

UN-HABITAT – UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME. **Planning sustainable cities — Global Report on Human Settlements: 2009**. London: UN-Habitat, 2009. Disponível em: <<http://goo.gl/zWtCEF>>.

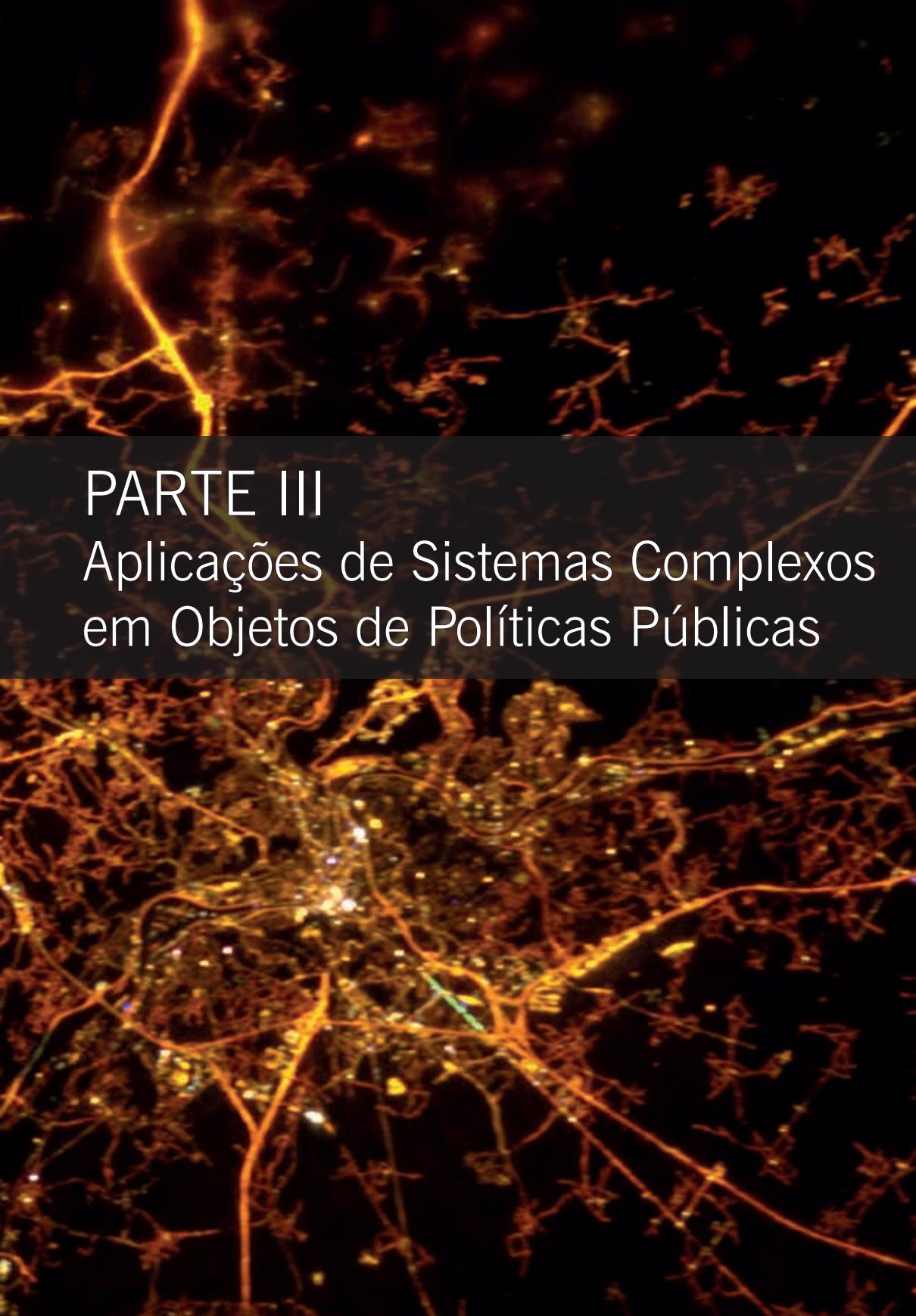
WEAVER, W. **The Rockefeller Foundation Annual Report**: 1958. New York: Rockefeller Foundation, 1958.

WHYTE, W. H. **The private life of small urban spaces.** New York: Project for Public Spaces, 2001.

WILSON, W. J. **The truly disadvantaged:** the inner city, the underclass, and public policy. Chicago: University of Chicago Press, 1990.

YOUN, H. *et al.* **The systematic structure and predictability of urban business diversity.** Santa Fe: SFI, 2014. (Working Paper, n. 33).



The background image shows an aerial view of a city at night, with streetlights and building lights creating a complex network of glowing orange and yellow lines against a dark sky. The city appears to be a dense urban area with a well-developed infrastructure.

## PARTE III

### Aplicações de Sistemas Complexos em Objetos de Políticas Públicas



## CAPÍTULO 11

# APLICAÇÕES DE SISTEMAS COMPLEXOS EM POLÍTICAS PÚBLICAS NO MUNDO<sup>1</sup>

Yaneer Bar-Yam<sup>2</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

A globalização, incluindo transporte, comunicação e integração econômica e social, implica que políticas aparentemente locais podem ter consequências de longo alcance. Sob essas condições, decisões tomadas pelas autoridades nacionais que parecem ser autônomas podem ter impactos mundiais. Como podemos identificar esses impactos? Dependências em redes e padrões de comportamento causados por esses impactos são a matéria da ciência de sistemas complexos (Bar-Yam, 1997; 2002). Sistemas complexos são sistemas em que o comportamento coletivo não satisfaz o teorema central do limite, isto é, os componentes não são independentes nem totalmente dependentes. Uma das metodologias centrais da ciência da complexidade é a análise multiescalar (Bar-Yam e Bialik, 2013; Bar-Yam, 2004; 2002). Essa metodologia pode ser usada para identificar as relações complexas entre o comportamento das partes e o todo. A complexidade toda de um sistema, ou a quantidade de informação necessária para descrever um sistema, pode ser analisada como uma função de escala. Se as partes de um sistema são independentes, então todo o sistema exibe comportamento aleatório em pequena escala. Se as partes são correlacionadas, o sistema apresenta comportamento coerente em larga escala. Se as partes são interdependentes, o sistema pode desempenhar comportamentos complexos, que podem ser caracterizados para identificar propriedades-chave.

O foco em comportamentos em escala maior, em relação ao componente de comportamento de escala menor, permite entender como as forças externas e a auto-organização interna compreendem, juntas, o comportamento do sistema. O impacto de intervenções políticas, as passadas e as intencionadas, pode ser retratado. Políticas que alteram um determinado comportamento devem ter uma escala adequada de intervenção, enquanto que políticas que mudam comportamentos complexos devem ter a habilidade necessária para

1. Traduzido por Marina Haddad Tóvolli.

2. Presidente fundador do New England Complex Systems Institute (NECSI).

responder a diferentes condições – uma intervenção eficaz deve ser ao menos tão complexa quanto o sistema-alvo.

A literatura da ciência de sistemas complexos tem se expandido com estudos científicos e aplicações a problemas do mundo real (Complexity Digest). As seções seguintes ilustrarão como a ciência de sistemas complexos e a análise multiescalar têm sido utilizadas pelo New England Complex Systems Institute como forma de desenvolver importantes *insights* e prover informações a decisões políticas em um mundo complexo interdependente. Na seção 2, descrevemos o papel de aumentos significativos dos preços dos alimentos na instabilidade política, incluindo a Primavera Árabe. Na seção 3, identificamos o mandato do etanol e a desregulação do mercado de *commodity* nos Estados Unidos como principais causas do aumento dos preços dos alimentos, que deflagrou os protestos. Na seção 4, mapeamos como podemos caracterizar pânico em mercados de ações e seus impactos no comportamento de mercado. A seção 5 descreve as consequências da interdependência para risco sistemático e crise financeira. Na seção 6, consideramos o papel da geografia étnica em tensões étnicas e violência, usando a pacífica Suíça como um estudo de caso para mostrar como uma coexistência pacífica pode ser alcançada. Finalmente, na seção 7, mostramos como o aumento do transporte mundial de fato altera os tipos de doenças existentes, levando da vulnerabilidade até a extinção, por meio de surtos de doenças de rápida propagação e altamente letais. A epidemia do Ebola de 2014 é um exemplo dos riscos que estamos enfrentando. A seção 8 fornece uma breve síntese.

## 2 CRISES DE ALIMENTOS E INSTABILIDADE POLÍTICA NO NORTE DA ÁFRICA E NO ORIENTE MÉDIO<sup>3</sup>

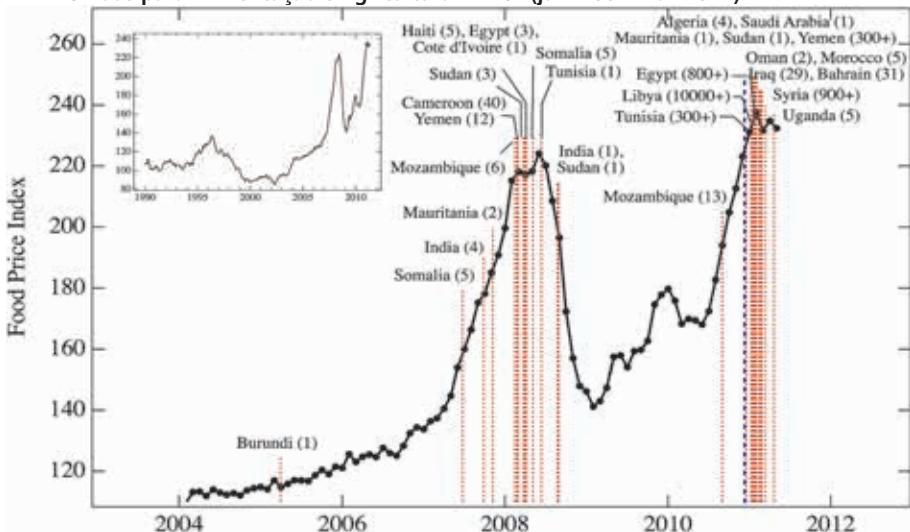
Em 2011, movimentos de protesto se difundiram no Norte da África e no Oriente Médio. Esses protestos foram associados a regimes ditoriais e frequentemente considerados o resultado dos fracassos dos sistemas políticos no campo de direitos humanos. Demonstramos que os preços dos alimentos são condição precipitante para tensões sociais e identificamos um limiar específico do preço mundial dos alimentos para que haja tensão. Prevemos que, mesmo sem picos agudos nos preços dos alimentos, dentro de poucos anos a tendência dos preços alcançaria o limiar. Isso apontou para o perigo de expansão de uma desordem social mundial. Nossas previsões foram concretizadas (Merchant, 2014).

---

3. Lagi, Bertrand, Bar-Yam (2011).

GRÁFICO 1

## Dependência temporal do Índice de Preços dos Alimentos da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura – FAO<sup>1</sup> (jan. 2004-mai. 2011)



Nota: <sup>1</sup> Food and Agriculture Organization (FAO).

Fonte: Lagi, Bertrand, Bar-Yam (2011).

Obs.: As linhas verticais traçadas em vermelho correspondem às datas iniciais das "revoltas por alimentos" e protestos associados, com a maior manifestação atual no Norte da África e no Oriente Médio. O número total de mortos é apresentado em parênteses. As linhas verticais em azul indicam a data, 13 de dezembro de 2010, na qual nós submetemos um relatório ao governo estadunidense, alertando sobre a conexão entre os preços dos alimentos, protestos sociais e instabilidade política. A inserção mostra o Índice de Preços dos Alimentos da FAO de 1990 a 2011.

Nota do Editorial: Imagem cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais disponibilizados pelos autores para publicação.

Historicamente, existem inúmeros exemplos de “revoltas por alimentos”, com consequentes desafios para mudança de autoridade e política. Notavelmente, temos as revoltas por alimentos e a instabilidade social na Europa em 1848, que foram seguidas por extensas secas. Apesar de muitas outras causas de protestos sociais terem sido identificadas, a escassez de alimentos e os altos preços frequentemente são as bases de protestos, revoltas e revoluções. Atualmente, muitos países pobres dependem do sistema mundial de oferta de alimentos, logo, são sensíveis aos preços mundiais de alimentos. Essa conjuntura é bem diferente da prevalência histórica da agricultura de subsistência em países pouco desenvolvidos, ou mesmo da dependência das ofertas locais de alimentos, que poderiam propiciar uma proteção contra a conjuntura da oferta mundial de alimentos. Este é um exemplo do crescente papel central que a interdependência mundial desempenha na sobrevivência humana e no bem-estar. Podemos compreender o surgimento da revolta social em 2011, com base na hipótese de que uma extensa revolta não surge de falhas políticas de longa data do sistema, mas sim de uma falha, percebida repentinamente,

em prover segurança básica à população. Em países importadores de alimentos com extensa pobreza, organizações políticas podem parecer ter um papel crítico na segurança alimentar. O fracasso em prover segurança solapa a verdadeira razão de existência de um sistema político. Uma vez que isso ocorre, os protestos resultantes podem refletir uma vasta gama de razões de insatisfação, ampliando o escopo do protesto e mascarando o estopim da revolta.

Os seres humanos dependem de sistemas políticos para a tomada de decisões e ações coletivas, e sua concordância com esses sistemas, se não seu entusiasmo por eles, é necessária para a existência desses sistemas políticos. A complexidade de se estabelecer segurança em todos os seus componentes, da proteção contra ameaças externas à oferta de alimentos e água, é muito alta para ser assegurada pelos próprios indivíduos e famílias nas sociedades modernas (Bar-Yam, 1997). Ou seja, os indivíduos dependem de um sistema político para uma tomada de decisão adequada, de forma a garantir os padrões de sobrevivência esperados. Isso é particularmente verdade para populações marginais, isto é, o pobre, cujas alternativas são limitadas e que vive perto do limite de sobrevivência mesmo em períodos bons. A dependência da população dos sistemas políticos induz o apoio a esses sistemas, mesmo quando eles são autoritários ou cruéis, comprometendo a segurança dos indivíduos enquanto mantêm a segurança da população. De fato, uma certa quantidade de autoridade é necessária para a manutenção da ordem contra indivíduos atípicos ou grupos que perturbariam a ordem (Lagi, Bertrand, Bar-Yam, 2011). Quando a capacidade do sistema político de prover segurança para a população falha, o apoio popular desaparece. Estados de ameaça generalizada à segurança estão presentes particularmente quando os alimentos são inacessíveis para a população em geral. Nesse caso, a razão implícita de apoio ao sistema é eliminada e, ao mesmo tempo, “não há nada a perder”, isto é, mesmo a ameaça de morte não detém ações tomadas em oposição à ordem política. Qualquer incidente então impele protestos que desafiam a morte e outras ações que perturbam a ordem estabelecida. Ocorrem ações extremas e generalizadas que colocam em perigo a liderança do sistema político ou o próprio sistema político. Todo apoio ao sistema e tolerância às suas falhas desaparecem. A perda de apoio ocorre mesmo se o sistema político não é diretamente responsável pelo fracasso da segurança alimentar, como é o caso se a responsabilidade primordial situar-se no sistema mundial de oferta de alimentos.

O papel dos preços mundiais dos alimentos nas revoltas sociais pode ser identificado nas reportagens sobre protestos por alimentos. O gráfico 1 mostra a medida dos preços mundiais dos alimentos, o Índice de Preços dos Alimentos

da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), e o momento dos protestos por alimentos reportados nos últimos anos. Em 2008, mais de sessenta protestos por alimentos ocorreram ao redor do mundo em trinta países diferentes, dos quais dez resultaram em inúmeras mortes, como mostrado nesse gráfico. Após uma queda intermediária, o aumento dos preços no final de 2010 e começo de 2011 coincidiu com novos protestos por alimentos (em Mauritânia e Uganda), assim como com os maiores protestos e as mudanças governamentais no Norte da África e no Oriente Médio, conhecidos como Primavera Árabe. Comparativamente, houve menos protestos por alimentos quando os preços mundiais estavam menores. Três desses, nos menores preços mundiais de alimentos, estão associados com fatores locais específicos que afetam a disponibilidade de alimentos: situações de refugiados em Burundi em 2005, interrupção da agricultura e ruptura social na Somália, e interrupções de oferta causadas por enchentes na Índia. Esses últimos dois casos ocorreram em 2007, assim que os preços mundiais de alimentos começaram a subir, mas não foram diretamente associados com os preços mundiais, como reportado pelo noticiário. Dois outros protestos por alimentos, em 2007 e 2010, na Mauritânia e em Moçambique, ocorreram quando os preços mundiais de alimentos estavam altos, mas não no nível da maioria dos protestos, de forma que eles parecem ser eventos precoces associados com o aumento dos preços.

Essas observações são consistentes com a hipótese de que elevados preços mundiais de alimentos são condições precipitadoras de revoltas sociais. Mais especificamente, protestos por alimentos ocorrem acima de um limiar do índice de preços da FAO de 210 ( $p < 10^{-7}$ , teste binomial). As observações também sugerem que os eventos no Norte da África e no Oriente Médio foram impelidos pelos preços dos alimentos. Considerando o período de tempo de janeiro de 1990 a maio de 2011 (gráfico 1), a probabilidade de que as revoltas no Norte da África e no Oriente Médio ocorreram por acaso no período de altos preços dos alimentos é  $p < 0,06$  (teste binomial com uma amostra). Essa estimativa conservadora considera as revoltas em todos os países como um evento único e ímpar durante esse período de apenas vinte anos. Se os eventos em países individuais são considerados independentes, porque as condições precipitadoras devem ser suficientes para a violência em massa em cada um deles, a probabilidade de coincidência é muito menor.

A permanência dos preços mundiais dos alimentos acima desse limiar do preço dos alimentos deveria gerar revoltas mundiais maiores e mais persistentes. Dados os picos agudos dos preços de alimentos, é de se esperar que os preços caiam em seguida (Lagi, Bertrand, Bar-Yam, 2011). No entanto,

após os picos (gráfico 1), vemos um aumento mais gradual, mas ainda sim rápido, nos preços dos alimentos durante o período que se inicia em 2004. É coerente supor que quando essa tendência exceder o limiar, a segurança de populações vulneráveis estará ampla e persistentemente comprometida. Tal ameaça à segurança deveria ser uma preocupação central dos políticos no mundo. Revoltas sociais e instabilidade política de países são esperadas a se espalharem com a persistência e a difusão do impacto da perda de segurança, mesmo que as causas latentes sejam os preços mundiais de alimentos, e não necessariamente políticas governamentais específicas. Mesmo que ocorra alguma variação na forma de revolta, devido a diferenças locais de governo, populações desesperadas provavelmente recorrerão à violência mesmo em regimes democráticos. Prevemos um colapso da ordem social como resultado da perda de segurança alimentar, com base nos eventos históricos e na expectativa de que o aumento da população mundial e as restrições de recursos levariam a uma catástrofe.

### **3 A CRISE DE ALIMENTOS: UM MODELO QUANTITATIVO DOS PREÇOS DE ALIMENTOS INCLUINDO ESPECULADORES E CONVERSÃO DO ETANOL<sup>4</sup>**

Em 2007 e início de 2008, os preços de grãos, incluindo trigo, milho e arroz, cresceram mais de 100%, depois caíram para os níveis anteriores no final de 2008. Um rápido aumento similar ocorreu novamente no outono de 2010. Essas mudanças dramáticas dos preços resultaram em severos impactos sobre as populações vulneráveis ao redor do mundo e impulsionaram análises sobre suas causas. Dentre as causas discutidas estão: *a)* o clima, particularmente secas na Austrália; *b)* o aumento da demanda por carne no mundo em desenvolvimento, especialmente na China e na Índia; *c)* os biocombustíveis, etanol de milho nos Estados Unidos e biodiesel na Europa; *d)* a especulação por investidores que buscam ganhos financeiros nos mercados de *commodities*; *e)* as taxas de câmbio; *e f)* a conexão entre os preços do petróleo e os dos alimentos.

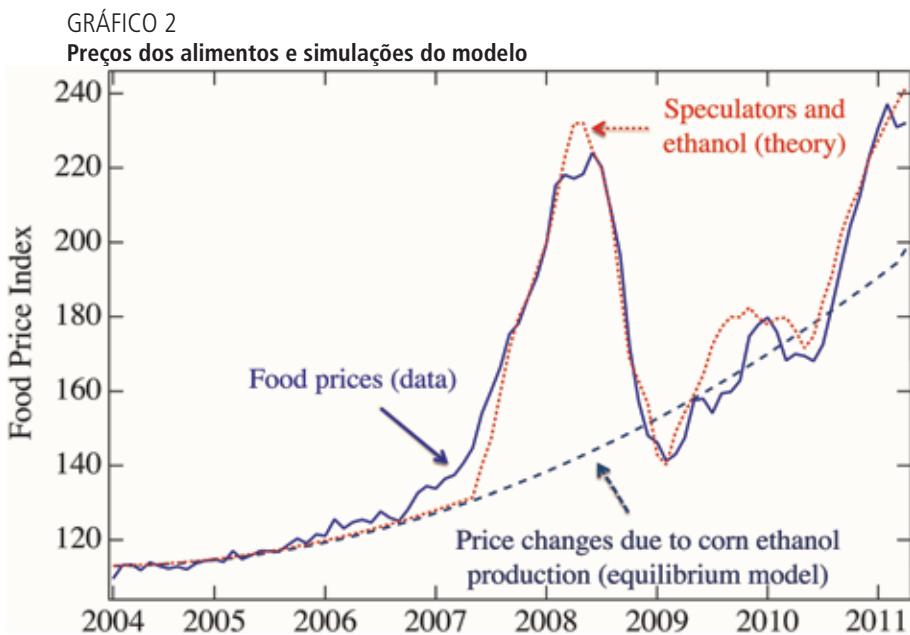
Muitas descrições conceituais e discussões qualitativas sobre as causas sugerem que múltiplos fatores são importantes. No entanto, a análise quantitativa é necessária para determinar quais fatores são realmente importantes e quais não o são. Embora vários esforços tenham sido feitos, nenhuma análise até agora forneceu uma descrição explícita das dinâmicas de preço. Desenvolvemos um modelo quantitativo das dinâmicas de preço em que demonstramos que somente dois fatores são centrais: especuladores e etanol de milho. Introduzimos e analisamos um modelo das dinâmicas de preço

---

4. Lagi *et al.* (2011).

de especulação financeira, descrevendo as bolhas especulativas e as crises. Ademais, mostramos que o aumento da conversão de milho em etanol pode explicar as tendências de preço quando excluímos as bolhas especulativas. Um modelo que combina os choques causados pelos especuladores e pelo aumento da conversão do etanol corresponde quantitativamente às dinâmicas de preço dos alimentos. Nossos resultados implicam que as mudanças nas regulações do mercado de *commodity*, que eliminaram as restrições aos investimentos e ao apoio do governo à produção de etanol, tiveram um papel direto no aumento do preço mundial dos alimentos.

A análise das mudanças do preço dos alimentos de imediato se depara com uma das controvérsias centrais da economia: se os preços são controlados pelas forças de oferta e demanda ou se são afetados por especuladores que podem causar bolhas “artificiais” e pânico. Mercados futuros de *commodity* foram desenvolvidos para reduzir a incerteza por permitirem a venda e a compra de contratos futuros a preços pré-determinados. Nos últimos anos, os “fundos de índices”, que permitem que investidores (especuladores) apostem no aumento do preço de uma *commodity* dentre toda uma série de *commodities*, se tornaram disponíveis por conta da desregulação do mercado. A questão que surge é se tais investidores, que de fato não recebem a *commodity*, podem afetar os preços de mercado. Uma corrente da literatura nega a possibilidade de efeitos especulativos sobre o mercado de *commodities*. Outras confirmam o papel dos especuladores nos preços. Porém, não há uma descrição quantitativa sobre os seus efeitos. A rápida queda dos preços em 2008, consistente com as dinâmicas de bolhas/crises, aumentou a convicção de que a especulação desempenha um papel importante. Além do mais, análises prévias são limitadas por uma incapacidade de modelar explicitamente os preços das *commodities*. Essa limitação está presente também em estudos históricos destes preços. Por exemplo, uma análise dos crescimentos agudos do preço de *commodities* nos anos 1970 descobriu que eles não poderiam ser resultado das forças de oferta e demanda. A discrepância entre as mudanças reais dos preços e as esperadas, em virtude do consumo e da produção, foi atribuída à especulação, embora nenhum modelo quantitativo sobre os seus efeitos tenha sido produzido. Mais recentemente, testes de causalidade estatística (Granger) foram utilizados para identificar se alguma parcela dos aumentos de preço em 2008 poderia ser atribuída à atividade especulativa. Os resultados encontraram evidência estatística para um efeito causal, mas a magnitude do efeito não pode ser estimada a partir dessa técnica.



Fonte: Lagi *et al.* (2011).

Obs.: O Índice de Preços dos Alimentos da FAO (linha sólida em azul), o modelo de oferta e demanda de etanol (linha tracejada em azul) – em que os choques de oferta dominantes são causados pela conversão do milho em etanol, de forma que as mudanças no preço são proporcionais à produção de etanol – e os resultados do modelo do especulador e do etanol (linha pontilhada em vermelho) – que adiciona a tendência do especulador de manter ou trocar entre mercados de investimento, incluindo *commodities*, ações e títulos.

Nota do Editorial: Imagem cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais disponibilizados pelos autores para publicação.

Desenvolvemos um modelo que relaciona especulação com preços, e analisamos as dinâmicas do preço. O modelo descreve comportamentos que acompanham tendências e pode explicitamente demonstrar as dinâmicas de bolhas e crises. Em nosso modelo, quando os preços aumentam, o comportamento de acompanhamento de tendência leva os especuladores a comprar, contribuindo com maiores aumentos dos preços. Se os preços caem, os especuladores vendem, contribuindo com maiores quedas dos preços. A negociação dos especuladores é adicionada a um modelo dinâmico de equilíbrio de oferta e demanda. Se um investidor hábil acredita que a oferta não corresponde à demanda (como inferido pela informação disponível), existe uma força contrária (walrasiana) em direção aos preços de equilíbrio. Quando os preços estão acima do equilíbrio, esses investidores vendem, e quando estão abaixo do equilíbrio, esses investidores compram. A interação do acompanhamento de tendências e das transações de restauração do equilíbrio gera uma variedade de comportamentos, a depender de suas forças relativas e absolutas. No caso de uma quantidade extremamente grande de especuladores, o acompanhamento da tendência faz com que os preços saiam do equilíbrio. Todavia, conforme os preços se distanciam cada vez

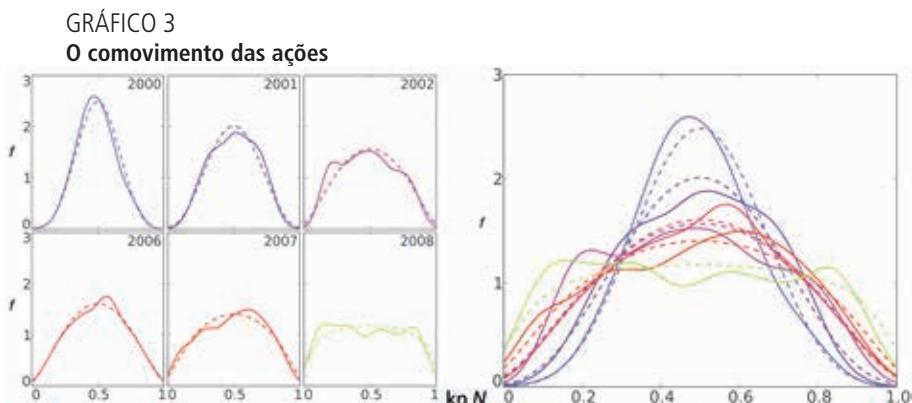
mais do equilíbrio, as forças de oferta e demanda de restauração se fortalecem e eventualmente revertem a tendência, que é então acelerada por uma tendência contrária, para e além do preço de equilíbrio. O comportamento oscilatório resultante, que consiste no afastamento dos valores de equilíbrio e em suas restaurações, corresponde aos fenômenos de dinâmicas de bolhas e crise. O modelo elucida a existência de sistemas em que os especuladores têm efeitos distintos no comportamento do mercado, tal como a estabilização e a desestabilização do equilíbrio de oferta e demanda.

Além dos picos de alto preço, a tendência de aumento dos preços dos alimentos corresponde aos aumentos da taxa de conversão do etanol. Construímos um modelo de choque de oferta dominante do impacto da conversão do etanol sobre os preços, que corresponde precisamente às tendências de preço e demonstra que o equilíbrio dos preços de oferta e demanda seria relativamente constante se não houvesse o aumento da conversão de milho em etanol. Combinamos então os efeitos dos especuladores e da conversão de milho em etanol em um único modelo, com uma excelente congruência quantitativa com as dinâmicas de preço dos alimentos. O modelo unificado também capta a maneira como os especuladores trocam entre ações e *commodities* para obter os máximos ganhos projetados. Os resultados finais são apresentados no gráfico 2.

#### 4 PREVENDO CRISES DO MERCADO ECONÔMICO COM O USO DE MEDIDAS DE PÂNICO COLETIVO<sup>5</sup>

Em sociologia (Wolfenstein, 1957; Smelser, 1963; Quarantelli, 2001; Mawson, 2005), pânico tem sido definido como uma fuga coletiva de uma ameaça real ou imaginária. Em economia, uma corrida aos bancos ocorre, pelo menos em parte, pelo risco de o banco ficar insolvente – e pode ser impulsionado por condições de suscetibilidade, por eventos externos (talvez catastróficos) ou mesmo aleatoriamente. Embora estudos empíricos sobre pânico sejam difíceis, esforços para distinguir pânicos de mercado endógenos (autogerados) e exógenos das oscilações dos índices de mercado têm tido certo sucesso, apesar de suas conclusões ainda serem debatidas. Geralmente, considera-se que o comportamento de mercado reflete notícias econômicas externas, mas evidências empíricas têm desafiado essa conexão. Esforços para retratar esses eventos variam do Presságio de Hindenburg aos modelos microdinâmicos, bem como à demonstração de que comportamentos de mercado são invariantes ao longo de muitas escalas. Pânico pode ser considerado uma mudança crítica, para a qual avisos prévios têm sido procurados. A característica de “fuga coletiva” de tal transição deveria ser descrita em medidas de mitemismo, que é considerado central ao pânico.

5. Harmon *et al.* (2011).



Fonte: Harmon et al. (2011).

Obs.: Representada graficamente está a fração de dias negociados durante o ano ( $f$ , eixo vertical), nos quais uma determinada razão de ações ( $k/N$ , eixo horizontal) subiu. Dados empíricos são apresentados (linhas sólidas) juntamente com os ajustes teóricos de um parâmetro (linhas tracejadas) para os anos indicados. São omitidos três anos, que não diferem muito dos anos imediatamente anteriores e seguintes. O painel à direita combina todos os anos apresentados. As ações incluídas são da Russell 3000, comercializadas na New York Stock Exchange (Nyse) ou Nasdaq Stock Market. As curvas são estimativas de densidade Kernel com Gaussian Kernels. Os ajustes passam no teste  $X^2$  (a divergência dos dados e da distribuição teórica não é estatisticamente significante ao nível de 25%).

Nota do Editorial: Imagem cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais disponibilizados pelos autores para publicação.

Usamos dados de comovimento para avaliar se a recente crise de mercado e as crises de um dia são geradas internamente ou impulsionadas externamente. Baseados numa hipótese sobre mimetismo, construímos um modelo que inclui mimetismo e fatores externos, e testamos o modelo empiricamente em comparação com a variação diária de comovimento. Nosso objetivo era determinar a importância relativa das causas internas e externas – e onde as causas internas são importantes – e descobrir um sinal de pânico autoinduzido, que pode ser usado para prever o pânico.

A literatura geralmente usa a volatilidade e a correlação entre os preços das ações para caracterizar risco. Essas medidas são sensíveis à magnitude da flutuação do preço, por isso aumentam dramaticamente quando ocorre uma crise. Estamos interessados na extensão na qual as ações se movimentam conjuntamente. O escopo de tal comovimento pode ser grande mesmo quando as flutuações dos preços são pequenas. De fato, mesmo quando as variações dos preços são pequenas, esperamos que o comovimento seja o comportamento coletivo característico do comportamento de pânico, ou em pânico, que precede o pânico. Dessa maneira, em vez de medirmos volatilidade ou correlação, medimos a fração de ações que movem na mesma direção. Descobrimos que essa fração aumenta bem antes da crise e que há inúmeros alertas prévios, fornecendo uma indicação clara para o impedimento de crise. A existência do indicador demonstra que as crises de mercado são precedidas por nervosismo, que gera o comportamento de acompanhamento – um aumento do comportamento coletivo anteriormente a um pânico.

Representamos o comovimento das ações ao longo do tempo pelo número de dias no ano em que houve subidas de uma determinada fração do mercado (e complementarmente quedas). De modo intuitivo, se substancialmente em torno de 50% do mercado se move na mesma direção, isso representa um comovimento. Como mostrado no gráfico 3, os resultados indicam que em 2000 o pico da curva está perto de 0,5, de forma que aproximadamente 50% das ações estão subindo ou descendo simultaneamente em um dia qualquer. Ao longo da década de 2000, no entanto, a curva tornou-se progressivamente plana – em 2008, a probabilidade de qualquer fração é quase a mesma para qualquer valor. A probabilidade de que uma grande parcela do mercado se mova na mesma direção, para cima ou para baixo, em qualquer dia, dramaticamente aumentou. Tais altos níveis de *comovimento* podem manifestar o comportamento coletivo que estamos procurando.

Para descrever quantitativamente comovimento, partirmos de um modelo da economia comportamental de uma única ação, que descreve o comportamento de acompanhamento de tendência, o efeito de “trem da alegria”. Tem sido mostrado que os investidores podem se beneficiar desse comportamento. Ademais, não há necessidade da mudança ser baseada em valores fundamentais para que os investidores se beneficiem. Quando os indivíduos observam que uma ação cresceu (diminuiu) em valor e decidem comprar (vender), como forma de antecipar futuros aumentos (quedas), essa autoconsciência leva à direção desejada de mudança. Tal efeito de “trem da alegria” pode minar as suposições de equilíbrio de mercado. Supomos que esse mimetismo de tendência de múltiplas ações pode causar um pânico por todo o mercado e desenvolvemos um modelo para captar este sinal. Assumimos que os investidores de uma ação observam três fatores: a direção das suas ações, os indicadores externos da economia e a direção de outras ações. Esse último é a potencial origem de pânico autoinduzido por todo o mercado.

Para modelar a fração de comovimento, descrevemos somente se o valor de uma ação sobe ou cai. Isso nos permite retratar explicitamente a medida na qual as ações se movem conjuntamente, e não o quanto elas se movem ao longo de um período qualquer. As ações são representadas por nós de uma rede, e as influências entre as ações são representadas por arestas entre os nós, uma representação apropriada para a análise de mercado. Consideramos tanto as redes completamente quanto as parcialmente conectadas. Todo dia, cada um dos  $N$  nós recebe um sinal (+/-), que indica o retorno diário da ação. As dinâmicas de mercado são simuladas por nós aleatoriamente selecionados, os quais mantêm seus sinais correntes ou copiam aleatoriamente o sinal de um de seus vizinhos. Para representar as influências externas, adicionamos nós que influenciam os outros nós, mas que não são influenciados, isto é, nós “fixos”. O número de nós fixos que influenciam na direção positiva é  $U$  e o número de nós fixos que influenciam na direção negativa é  $D$ . A força efetiva das influências externas positivas e negativas é dada pelo número desses nós. Influências externas de tipos opostos não se cancelam; pelo contrário,

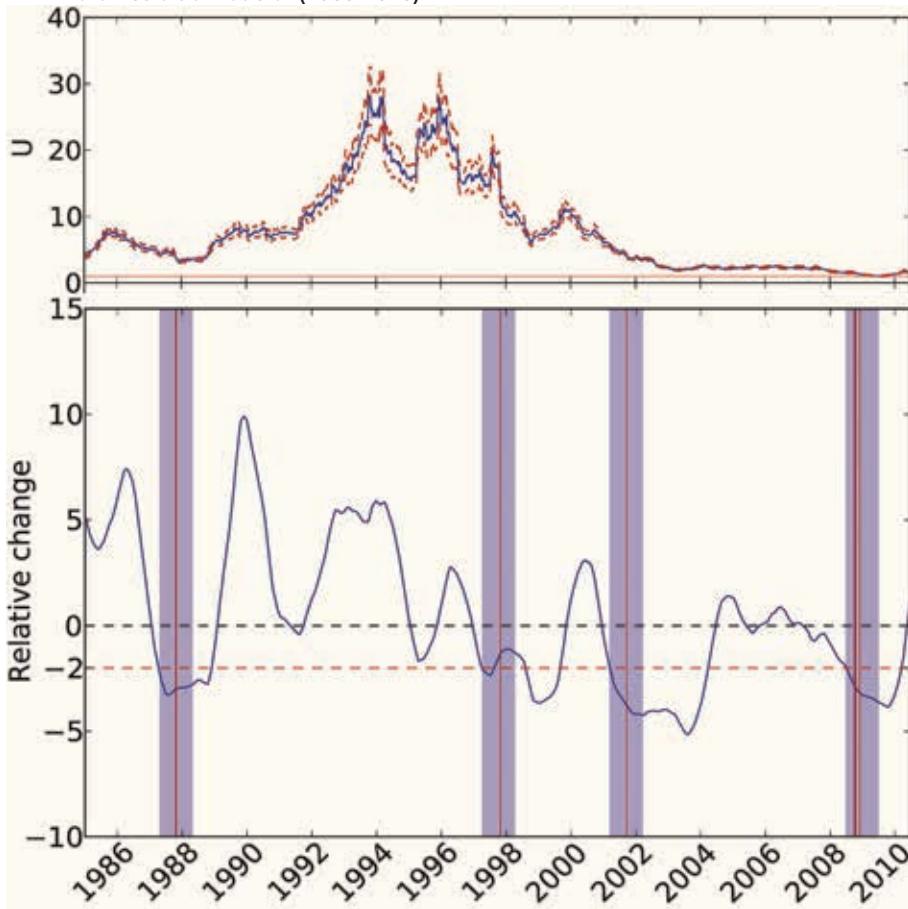
$U$  e  $D$  maiores refletem maior probabilidade de que as influências externas determinem os retornos de uma ação, independentemente das variações nas outras ações. Isso está em concordância com a visão tradicional de que o noticiário é responsável pelo comportamento de mercado. Notícias boas seriam representadas por um  $U$  maior do que  $D$ , e notícias ruins por um  $D$  maior do que  $U$ .

Previamente propomos esse modelo como uma teoria de comportamento coletivo de sistemas complexos de extensa aplicabilidade. A congruência perfeita com os dados será a confirmação dessa teoria. Esse modelo também foi previamente identificado como um modelo de conformidade e não conformidade em sistemas sociais, e tem sido estudado em aplicações de dinâmicas evolucionárias.

Se considerarmos um modelo de influências mais completo, no qual investidores de uma ação somente consideram como guias outras ações específicas, teremos uma rede parcialmente conectada. Temos estudo as dinâmicas de tais redes analiticamente e por meio de simulações, e a principal diferença em relação às redes totalmente conectadas é a ampliação do efeito das influências externas. Como existem menos ligações dentro da rede, ela pode ser aproximada por uma rede totalmente conectada, mas fracamente associada, com um fator de enfraquecimento, dado pelo número médio de conexões em relação ao número de conexões possíveis. Similarmente, se somente um subconjunto das influências externas é considerado relevante para o retorno de uma ação específica, a força relativa das influências externas pode ser substituída por influências externas uniformes e mais fracas. Caso contrário, para muitos casos, o formato da distribuição não é significantemente afetado. O modelo então mede as forças relativas das influências internas e externas em vez de medir suas forças absolutas. A robustez dos modelos indica uma universalidade ao longo de uma extensa gama de topologias de redes, o que sugere aplicabilidade em sistemas do mundo real.

Quando comparado com recentes dados empíricos do mercado apresentados no gráfico 3, o modelo se ajusta extremamente bem. Um modelo gaussiano se enquadra nos anos iniciais, um pouco menos nos anos finais, e não se enquadra em 2008. A boa congruência do nosso modelo é obtida com a equalização das influências para cima e para baixo,  $U = D$ , o qual é o único parâmetro ajustável. Quando  $U = 1$ , como foi o caso em 2008, uma transição para crise pode ser esperada. O gráfico 4 mostra as crises de um dia levando à crise maior.

## GRÁFICO 4 Parâmetro do modelo<sup>1</sup> (2000-2010)



Nota: <sup>1</sup> Painel superior.

Fonte: Harmon *et al.* (2011).

Obs.: As estimativas do parâmetro do modelo são apresentadas no final do longo período de anos no qual  $U$  foi estimado.

As estimativas do parâmetro do modelo são apresentadas na Tabela 10, período de 1985 a 2007. As estimativas do erro da amostra são apresentadas com +/-1 desvio-padrão. As distribuições do retorno positivo são computadas a partir dos retornos diários das ações da Russell 3000. O painel inferior mostra a variação anual de  $U$  como uma fração do seu desvio padrão do ano anterior em relação ao ano prévio. Das vinte maiores quedas percentuais do Dow Jones Industrial Average, oito encontram-se no período de tempo apresentado: 19/10/1987, 16/10/1987, 27/10/1997, 17/9/2001, 29/9/2008, 9/10/2008, 15/10/2008, 14/12/2008 (linhas verticais em vermelho). Quatro colunas de um total (sombreadas) seguem quedas de dois desvios-padrão no parâmetro do modelo após períodos de crescimento. As distribuições do retorno positivo são computadas a partir dos retornos diários da Russell 3000 para datas posteriores a 1<sup>a</sup> de julho de 1999. Anteriormente a essa data, os retornos eram obtidos para as listas dos membros da Russell 3000, de 2001, 2004 e 2007. Cada fração dos retornos positivos era computada com mais de 140 acões.

Nota do Editorial: Imagem cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais disponibilizados pelos autores para publicação.

## 5 REDES DE INTERDEPENDÊNCIA DE MERCADOS ECONÔMICOS E RISCO SISTÊMICO<sup>6</sup>

A economia global é um sistema extremamente complexo, cujas dinâmicas refletem as conexões entre os múltiplos componentes, como observado em outros sistemas em rede. Uma propriedade comum dos sistemas complexos é o risco de falência em cascata, em que a falência de um nó gera falências similares em nós conectados, que se propagam por todo o sistema, criando falências coletivas de larga escala. Riscos econômicos associados com perdas financeiras em cascata são evidentes na recente crise econômica, e na anterior crise econômica asiática, porém eles não são considerados nas medidas convencionais de risco de investimento.

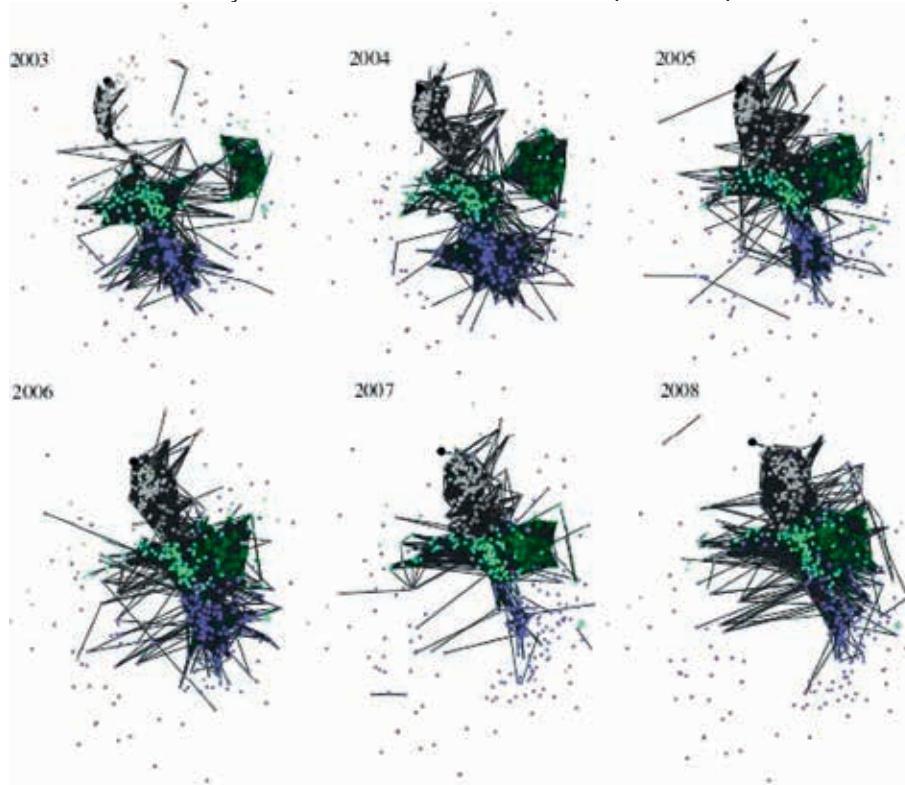
Uma questão central é o papel que a ciência de sistemas complexos pode desempenhar em informar políticas regulatórias que preservem a capacidade dos mercados de promover crescimento econômico, por meio da liberdade de investimento, e que ao mesmo tempo protejam o interesse público, ao prevenirem colapsos financeiros causados por risco sistemático.

Descrever a rede de dependências econômicas e sua relação com o risco é fundamental. As dependências entre organizações envolvem um grande número de fatores, que incluem competição por capital e trabalho; relações de oferta e demanda entre organizações que fazem produtos de fim comum ou que dependem das mesmas matérias-primas; desastres naturais e condições climáticas; atos de guerra e paz; mudanças de governo ou mudanças políticas, incluindo política econômica, tais como as taxas de juro; e conexão geográfica. Quantificar tais dependências, por exemplo, por meio de modelos de Leontief, é difícil porque muitas das dependências são não lineares e impulsionadas por questões socioeconômicas não incluídas nesses modelos. Ademais, a economia comportamental sugere que, sob determinadas condições, o comportamento coletivo do investidor, por exemplo, desde percepções de valor, pode ter efeitos significativos. Refletindo tanto as interações básicas quanto as comportamentais, as correlações no valor de mercado das firmas podem servir de medida da percebida dependência financeira agregada e podem quantificar o comportamento de “manada” nas flutuações coletivas. Adicionalmente, as correlações de preços são diretamente relevantes para medidas de risco.

---

6. Harmon *et al.* (2010).

**GRÁFICO 5**  
**Rede de correlações dos retornos diários do mercado (2003-2008)**



Fonte: Harmon *et al.* (2010).

Obs.: As corporações individuais são representadas por pontos, com cores diferentes de acordo com o setor econômico: tecnológico (azul); de materiais básicos, incluindo as companhias de petróleo (cinza claro) e outras (cinza escuro); e financeiro, incluindo investimentos imobiliários (verde escuro) e outros (verde claro). As ligações são as 6,35% maiores correlações de Pearson, da série temporal  $\log(p(t)/p(t-1))$ , em que  $p(t)$  são os preços diários ajustados de fechamento das firmas em cada ano. Os pontos maiores são preços spot de petróleo (*spot oil*) em Brent, Reino Unido, e em Cushing, Oklahoma (preto), e o preço dos títulos do tesouro de dez anos (verde).

Nota do Editorial: Imagem cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais disponibilizados pelos autores para publicação.

Construímos uma rede de dependências entre as quinhentas corporações com maior volume de negociação de ações, com a adição de vários índices econômicos – preços do petróleo e preços dos títulos, refletindo as taxas de juros. Formamos uma rede em que as conexões existem para as maiores correlações em retornos diários em cada ano, de 2003 a 2008. Para mostrar o efeito das variações ao longo do tempo, construímos uma única rede para todos os anos, com cada corporação, em um ano particular, representada por um nó, ligada a ela mesma no ano anterior e no próximo ano. Cada ano é apresentado separadamente no gráfico 5. Somente incluímos os setores econômicos que são significantemente autocorrelacionados,

dado que a maior rede, construída a partir do mercado inteiro, obscurece percepções essenciais. Análises prévias de correlação descreveram como as correlações podem surgir de forças externas no mercado – teoria da precificação por arbitragem (Chamberlain e Rothschild, 1983; Ross, 1976) – ou usaram as correlações para identificar as crises setoriais e de mercado – econofísica (Mantegna e Stanley, 2000; Onnela, 2003). Esse trabalho carece de um entendimento das origens econômicas das alterações nas dependências e suas implicações políticas. Examinamos as variações das correlações dentro e entre os setores, as quais surgem de efeitos não lineares, para obter informação sobre mudanças nas condições econômicas anteriores e durante a crise econômica.

O estudo das propriedades da comunidade em rede frequentemente requer uma análise cuidadosa. No nosso caso, as observações que descrevemos são visualmente apresentadas e foram também estatisticamente testadas. Particularmente, tendências aparentes foram testadas usando a estatística-*t* das diferenças nas densidades de ligação dentro e entre os setores (*merging*), ou o mínimo dessa estatística entre um setor e cada um dos outros setores (*auto clustering*). Os setores são estatisticamente conectados (desconectados) a um índice se a estatística-*t*, comparando as ligações com o índice relativo às densidades de ligação do gráfico, é maior do que 4 (menor do que 2).

Limitar os investimentos (isto é, limitar as razões capital-ativo) com o intuito de controlar o risco tem uma influência direta nas oportunidades de crescimento. Todavia, nossos resultados também apontam para uma estratégia diferente, que reconhece que as instituições financeiras conectam setores econômicos que de outra maneira estariam fracamente correlacionados. A questão-chave é que a conexão econômica entre companhias propaga o efeito de falências. Se uma entidade econômica *G* não cumpre com suas obrigações financeiras com a entidade *H*, o impacto sobre a entidade *H* pode afetar outras entidades *J* e *K*, que são conectadas a *H*, mesmo que suas atividades não tenham relação com as atividades de *G*. De modo contrário, enquanto uma baixa razão capital-ativo possa ser arriscada para uma determinada instituição, se os investimentos estão dentro de um setor econômico específico, é improvável que a falência daquela instituição cause repercussões em toda a economia. Logo, segregar relações financeiras, particularmente entre atividades que não são de outra maneira relacionadas, ou são fracamente relacionadas, reduz o risco sistêmico.

A ideia de que a separação dos componentes do setor financeiro contribui com a estabilidade econômica foi um aspecto chave da legislação para estabilizar o sistema bancário estadunidense após a crise de 1929. O Ato *Glass-Steagall* de 1933 separou bancos de investimentos de bancos comerciais (varejo) para prevenir que flutuações de outras partes da economia afetassem os bancos comerciais. Esse ato foi

progressivamente enfraquecido até sua revogação em 1999. Outras formas históricas de separação impostas por lei ou por costume incluíram a separação das associações de poupança e de empréstimo e provedoras de seguro, dos bancos comerciais e de investimento, assim como a separação geográfica por estado. Embora vários fatores contribuam com correlações na atividade econômica, não linearidades associadas com investimentos durante quedas de mercado sustentam a intuição histórica de que regular essas dependências é mais crucial do que regular os efeitos que surgem dessas dependências – por exemplo, cadeia de suprimentos. Um dos argumentos favoráveis à desregulação era de que os bancos, ao investirem em diversos setores, teriam maior estabilidade. Nossa análise sugere que investimentos entre setores econômicos geram um aumento dos vínculos entre partes da economia que do contrário seriam muito mais fracamente conectadas, causando dependências que aumentam, ao invés de diminuir, o risco. De forma geral, a separação previne a propagação de falências e as conexões aumentam os riscos de crises mundiais. A subdivisão é uma propriedade universal de sistemas complexos. Um aumento na separação dos serviços financeiros provavelmente acarreta custos, e os *trade-offs* de custo-benefício de impor tipos específicos de separação ainda precisam ser determinados.

Em suma, a ciência de sistemas complexos foca o papel da interdependência, um aspecto chave do comportamento dinâmico das crises econômicas, assim como da avaliação de riscos, tanto em condições “normais” quanto em condições raras. Analisamos as dinâmicas das dependências correlacionais em mercados em queda e em ascensão. O impacto de revogações de políticas governamentais da era da Depressão sobre o sistema econômico está se tornando cada vez mais evidente com as análises científicas da recente crise econômica. Esse estudo sugere que a erosão do Ato *Glass-Steagall*, a consolidação das atividades bancárias e os investimentos entre setores eliminaram barreiras que poderiam ter impedido que a colapso do setor imobiliário desencadeasse uma crise financeira e econômica maior.

## 6 BONS CERCAMENTOS: A IMPORTÂNCIA DA DEFINIÇÃO DE FRONTEIRAS PARA A COEXISTÊNCIA PACÍFICA<sup>7</sup>

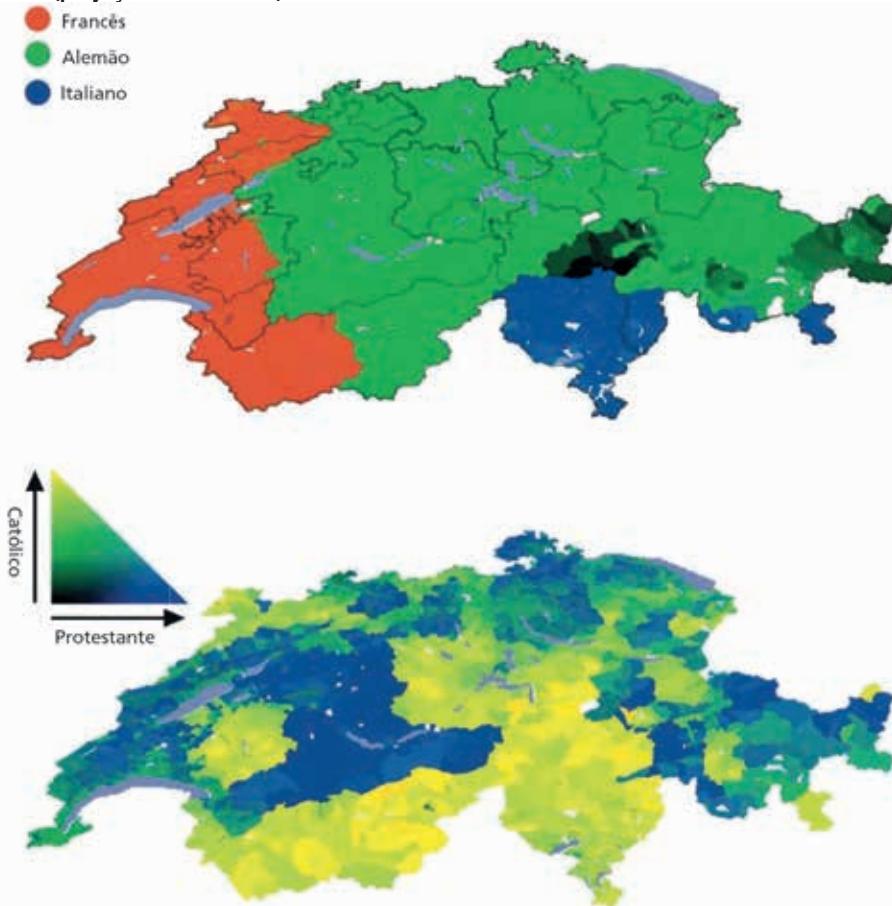
Esfôrços para resolver conflitos e alcançar uma paz duradoura são conduzidos/têm como guia perspectivas de como o conflito e a paz são baseados em relações interpessoais e intergrupais, assim como por contextos históricos, sociais, econômicos e políticos. Desenvolvemos uma teoria de sistemas complexos sobre conflito étnico que descreve com alta precisão os conflitos nas áreas da antiga Iugoslávia e da Índia. Nessa teoria, detalhes históricos e condições econômicas e sociais não são os principais determinantes da paz ou do conflito. Em vez disso, o fator primordial é a configuração geográfica populacional. Significantemente, nossa teoria aponta

7. Rutherford et al. (2014).

para duas condições distintas que conduzem à paz: populações bem misturadas e populações bem separadas. A primeira condição corresponde à estrutura pacífica mais comumente desejada: uma sociedade bem integrada. A segunda, corresponde à divisão, partição e autodeterminação espacial – uma abordagem historicamente usada mas frequentemente criticada. Aqui consideraremos uma terceira abordagem, mais sutil, a de fronteiras dentro de um estado, na qual cooperação intergrupal e autonomia estão ambas presentes. O sucesso dessa abordagem é de extrema importância, dado que o mundo se torna cada vez mais conectado por meio de cooperações internacionais. Como exemplificado pela União Europeia, o papel das fronteiras como limites está mudando.

FIGURA 1

**Suíça: proporção dos grupos linguísticos e proporção de católicos e protestantes (projeção de Mercator), de acordo com o Censo de 2000**



Fonte: Rutherford *et al.* (2014).

Nota do Editorial: Imagem cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais disponibilizados pelos autores para publicação.

Com o intuito de avaliar o papel das fronteiras dentro de um estado na paz, consideramos a coexistência de grupos na Suíça. Ela é conhecida como um país de grande estabilidade, sem grandes conflitos internos, apesar de ser lar de múltiplas línguas e religiões. A Suíça não é uma sociedade bem misturada; ela é geograficamente heterogênea tanto na linguagem quanto na religiosidade (figura 1). A topografia alpina e o sistema federal de cantões fortes têm sido considerados fatores relevantes para a coexistência; as suas importâncias podem ser vistas na declaração de Napoleão, após a falência de sua centralizada República Helvética, de que a natureza fez da Suíça uma federação. Porém, a existência de fronteiras alpinas e não alpinas entre os grupos e a presença de múltiplas línguas e religiões dentro de cantões individuais sugerem que a divisão não é essencial para a coexistência pacífica na Suíça. Ao tentar identificar as causas da paz, a literatura tem focado as condições socioeconômicas e políticas. Destaca-se: a longa tradição de mediação e acordo; divisões sociais que separam a população ao invés de uni-la; direitos escritos e não escritos de proporcionalidade (equidade) e proteção cultural; um sistema federal com unidades subnacionais fortes; uma sociedade civil que estimula a unidade; democracia direta por meio de referendos frequentes; pequeno tamanho; diferença do período histórico entre as divisões de linguagem e religião; neutralidade em guerras internacionais; e prosperidade econômica (Lijphart, 1977; Schmid, 1981; Martin, 1931; Steiner, 1974; Glass, 1977; Linder, 2010; Head, 2002; McRae, 1983). A geografia desempenha um papel não muito claro, presumidamente de suporte, nessas estruturas. A análise da coexistência na Suíça também é parte de um extenso debate sobre se os aspectos sociais e geográficos do federalismo promovem paz ou conflito (Christin e Hug, 2006).

Analisamos a distribuição geográfica dos grupos na Suíça com base na hipótese de que as disposições espaciais dos grupos étnicos são indicações de revoltas e violência entre os grupos. O modelo também reconhece que a topografia ou as fronteiras políticas podem funcionar como divisões para promover a paz. Testamos a capacidade da teoria de prever coexistência pacífica no contexto de fronteiras internas na Suíça. Pode-se esperar violência nas regiões onde não existem fronteiras explícitas, como em cantões mistos onde as fronteiras alpinas estão ausentes. Os resultados do modelo nessas áreas servem como um teste particularmente rigoroso da teoria. Na maioria dos casos, não é previsto violência, consistentemente com o que é observado. Em uma área, é previsto um significante nível de violência, e de fato é observado violência. A análise elucida o exemplo da Suíça como um modelo para a coexistência pacífica. A precisão dos resultados fornece alguma garantia da utilidade da teoria na formulação de intervenções que possam promover a paz em muitas regiões do mundo.

Descrevemos brevemente cinco categorias de distintas comparações bem-sucedidas entre as previsões do modelo e os dados observados contidos nos resultados. Nossa investigação dos grupos linguísticos e religiosos na Suíça incluiu casos nos quais sem a presença de fronteiras era previsto violência, porém esta era reduzida quando se consideravam fronteiras topológicas e políticas adequadas para os grupos linguísticos e religiosos, respectivamente.

- 1) As fronteiras topológicas reduziram a violência entre grupos linguísticos. Isso ocorreu ao longo: *i*) das fronteiras alpinas dos alpes suíços, entre as populações de língua alemã e as de língua italiana; *ii*) das fronteiras alpinas, entre as populações de língua alemã e as de língua francesa; e *iii*) das fronteiras da cordilheira do Jura, entre as populações de língua alemã e as de língua francesa.
- 2) As fronteiras políticas reduziram a violência entre os grupos religiosos. Esse é o caso de ambas: *i*) fronteiras dos cantões; e *ii*) fronteiras circulares no cantão dos Grisões/Graubünden. Nossa análise também identificou regiões nas quais nosso modelo não previu violência apesar da heterogeneidade linguística e religiosa e de nenhuma fronteira explícita.
- 3) A linearidade da fronteira previne a violência entre grupos linguísticos em Friburgo/Freiburg.
- 4) O isolamento de uma população protestante da maioria católica em uma extremidade previne a violência em Friburgo/Freiburg. Também identificamos uma área com o nível mais alto de propensão residual para violência calculado e ela corresponde a uma área de conflito histórico não resolvido.
- 5) A parte nordeste do cantão de Berna é a região da maior previsão de propensão para violência e também uma história real de tensão entre grupos. A única situação de conflito nessa parte da Suíça e sua correspondência com a previsão do modelo fornecem uma confirmação adicional do modelo.

Nossa pesquisa consistentemente identificou as fronteiras impropriamente alinhadas como causa primordial de violências étnicas localizadas. O uso de políticas para o estabelecimento de fronteiras bem definidas e de autonomia regional apresenta-se como uma forma de acabar com conflitos sectários.

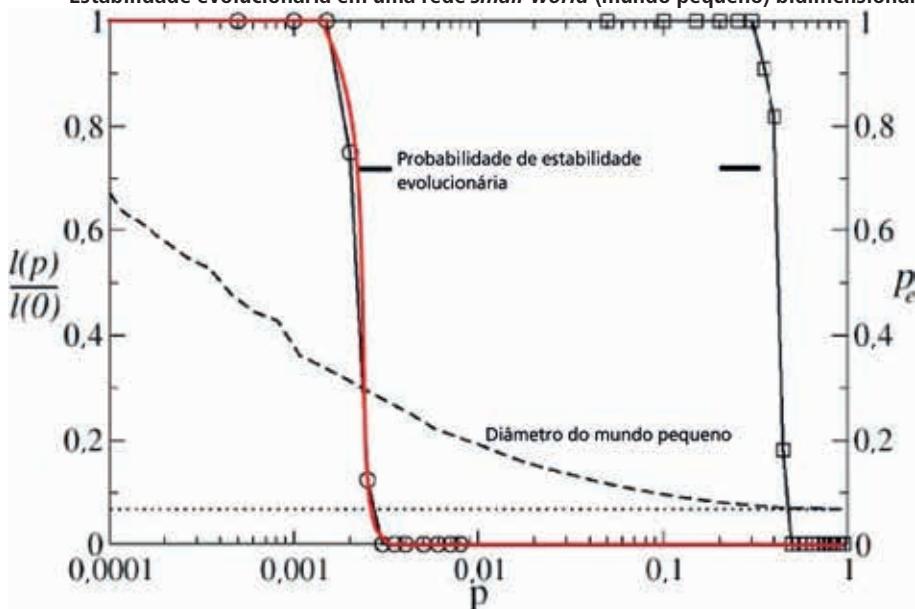
## **7 INTERAÇÃO DE LONGO ALCANCE E ESTABILIDADE EVOLUCIONÁRIA EM UM SISTEMA PREDADOR-PRESA<sup>8</sup>**

Modelamos o comportamento de predadores e de patógenos em modelos evolucionários espacialmente estendidos. Nossos resultados sugerem que tais modelos são relevantes para estudos de sistemas de interações de longo alcance. Há uma transição que ocorre da coexistência à extinção global. Essa transição pode ser repentina e pode ter lugar mesmo em sistemas que já apresentam uma densidade significativa de interações de longo alcance. Logo, não se deve concluir que um sistema que já tenha uma vasta mistura seja estável com misturas adicionais.

8. Rauch e Bar-Yam (2006).

De acordo com as nossas simulações, quando a mistura mundial cresce além da densidade crítica, predadores superexploradores ou linhagens de patógenos resistem à extinção local e substituem mundialmente linhagens sustentáveis, levando à sua própria extinção e dizimação da população de presas. Nossos resultados se aplicam diretamente a modelos evolucionários simples. Porém, considerações similares se aplicam aos fenômenos de doenças emergentes (tais como ebola, síndrome respiratória aguda grave/*severe acute respiratory syndrome* – SARS e gripe aviária), a maioria das quais se desenvolve em curtos períodos de tempo e podem também se aplicar a espécies invasivas, as quais têm sido uma difundida preocupação ecológica. Embora a demonstração de que algumas conexões de longo alcance nem sempre desestabilizam sistemas em desenvolvimento forneça alguma segurança, o perigo de novas conexões sugere que um sistema pode atravessar a transição e se tornar instável com poucos alertas, conforme a mistura mundial aumenta em frequência (gráfico 6).

GRÁFICO 6

Estabilidade evolucionária em uma rede *small-world* (mundo pequeno) bidimensional

Fonte: Rauch e Bar-Yam (2006).

Obs.: A probabilidade  $P_e$  de que um predador e uma presa coexistam por 100 mil gerações, como função de  $p$ , tomada a média sobre onze rodadas, para  $g=0.05$  (círculos) e  $g=0.2$  (quadrados) – taxa de redução  $\nu=0.2$ , tamanho da malha  $L=250$ . Note a escala logarítmica de  $p$ . Identificamos o ponto de transição para instabilidade  $p_c$  como a densidade, tal que para todo  $p > p_c$ ,  $P_e < 1/2$ . Para comparações, o comprimento médio  $l(p)$  entre os nós está representado como uma fração de  $l(0)$  – linha tracejada, mesma escala. Para comparações, as linhas pontilhadas mostram  $l(1)/l(0)$ , isto é, o valor para uma rede aleatória.

Nota do Editorial: Imagem cujos leiaute e textos não puderam ser padronizados e revisados em virtude das condições técnicas dos originais disponibilizados pelos autores para publicação.

Nossos resultados previram o surto do ebola na África Ocidental, e eles sugerem a necessidade de uma ação conjunta, incluindo avanços médicos e, talvez, mudanças sociais. Devido ao aumento do transporte mundial, os seres humanos parecem ter cruzado a transição para grandes pandemias. Ações preventivas devem ser tomadas para limitar o transporte mundial ou os seus impactos.

## 8 CONCLUSÃO

Demonstramos que decisões políticas tomadas por governos e órgãos regulatórios podem ter consequências de longo alcance no mundo moderno. Uma compreensão dos métodos de sistemas complexos e de seus conceitos – principalmente análise multiescalar, estruturas de rede e dinâmicas não lineares – permite uma análise que pode prover informações para tomadas de decisão efetivas do mundo real. Subsídios energéticos em uma nação podem gerar um grande aumento nos preços mundiais de alimentos, desencadeando revoltas políticas do outro lado do mundo. Mercados financeiros que se tornam muito interdependentes têm um alto risco de cascatas, e pânicos coletivos causam crises mundiais. Violência étnica pode ser, em grande parte, prevista a partir da geografia espacial étnica e pode ser amenizada por políticas que permitam autonomia local. A conectividade mundial favorece a existência de doenças virulentas que podem causar pandemias mundiais devastadoras. A ciência de sistemas complexos tem casos comprovados de prever e explicar as causas de fenômenos mundiais. Formuladores de políticas e reguladores que buscam alcançar objetivos específicos ou melhorar de forma mais geral os sistemas sociais e econômicos podem se beneficiar dos *insights* de estudos específicos.

## REFERÊNCIAS

- BAR-YAM, Y. **Dynamics of complex systems**. New York: Perseus Press, 1997.
- \_\_\_\_\_. **General features of complex systems**. Oxford: Unesco, 2002. (Encyclopedia of Life Support Systems).
- \_\_\_\_\_. **Complexity rising**: from human beings to human civilization, a complexity profile. Oxford: Unesco, 2002. (Encyclopedia of Life Support Systems); also NECSI Report, 1997.
- \_\_\_\_\_. Multiscale variety in complex systems, **Complexity**, v. 9, n. 4, p. 37-45, 2004.
- BAR-YAM, Y.; BIALIK, M. **Beyond big data**: identifying important information for real world challenges. Cambridge: NECSI, 2013.

CHAMBERLAIN, G.; ROTHSCHILD, M. Arbitrage, factor structure, and mean-variance analysis on large asset markets, **Econometrica**, v. 51, n. 996, p. 1.281-1.304, 1983.

CHRISTIN, T.; HUG, S. **Federalism, the geographic location of groups and conflict**. Zurich: CIS, 2006. (Working Paper, n. 23).

GLASS, H. Ethnic diversity, elite accommodation and federalism in Switzerland, **Publius**, v. 7, n. 4, p. 31-48, 1977.

HARMON, D. *et al.* **Networks of economic market interdependence and systemic risk**. Cambridge: NECSI, 2010.

HARMON, D. *et al.* **Predicting economic market crises using measures of collective panic**. Cambridge: NECSI, 2011.

HEAD, R. **Early modern democracy in the Grisons**: social order and political language in a Swiss mountain canton. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

LAGI, M.; BAR-YAM, Y.; BERTRAND, K. Z.; BAR-YAM, Y. **The food crises**: a quantitative model of food prices including speculators and ethanol conversion. Cambridge: NECSI, 2011.

LAGI, M.; BERTRAND, K. Z.; BAR-YAM, Y. **The food crises and political instability in North Africa and the Middle East**. Cambridge: NECSI, 2011.

LIJPHART, A. **Democracy in plural societies**: a comparative explanation. New Haven: Yale University Press, 1977.

LINDER, W. **Swiss democracy**: possible solutions to conflict in multicultural societies. New York: St. Martin Press, 2010.

MANTEGNA, R. N.; STANLEY, H. E. **An introduction to econophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

MARTIN, W. **An essay on the formation of a confederation of states**. London: Richards, 1931.

MAWSON, A. R. Understanding mass panic and other collective responses to threat and disaster, **Psychiatry**, v. 68, n. 2, p. 95-113, 2005.

MCRAE, K. D. **Conflict resolution in Switzerland**. Waterloo: Wilfred Laurier University Press, 1983.

MERCHANT, B. The math that predicted the revolutions sweeping the globe right now, **Motherboard**, 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/wWNBxm>>.

ONNELA, J. P. *et al.* Dynamics of market correlations: taxonomy and portfolio analysis, **Physical Review E**, v. 68, n. 5, p. 56-110, 2003.

- QUARANTELLI, E. L. The sociology of panic. In: SMELSER, N. J.; BALTES, P. B. (Eds.). **International encyclopedia of the social and behavioral sciences**. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- RAUCH, E.; BAR-YAM, Y. Long-range interaction and evolutionary stability in a predator-prey system, **Physical Review E**, v. 73, n. 2, 020903(R), 2006.
- ROSS, S. The arbitrage theory of capital asset pricing, **Journal of Economic Theory**, v. 13, n. 3, p. 341-360, 1976.
- RUTHERFORD, A. et al. Good fences: the importance of setting boundaries for peaceful coexistence, **PLoS ONE**, v. 9, n. 5, May 2014.
- SCHMID, C. **Conflict and consensus in Switzerland**. Berkley: University of California Press, 1981.
- SMELSER, N. J. **Theory of collective behavior**. Glencoe: Free Press, 1963.
- STEINER, J. **Conflict resolution in Switzerland**. Chapel Hill: University of North Carolina Press, 1974.
- WOLFENSTEIN, M. **Disaster**: a psychological essay. Glencoe: Free Press, 1957.

## CAPÍTULO 12

# SISTEMAS COMPLEXOS EM POLÍTICAS PÚBLICAS NO BRASIL

Bernardo Mueller<sup>1</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é avaliar o uso de técnicas de modelagem de sistemas complexos adaptáveis em políticas públicas no Brasil. Embora o interesse em sistemas complexos venha crescendo muito nos últimos anos, o uso desta abordagem por parte de governos no processo de formulação e implementação de políticas públicas tem sido limitado. Esta ausência é provavelmente devido à fase relativamente precoce da difusão dessas ideias, dado que complexidade ainda é uma ciência jovem que só recentemente começou a ganhar exposição mais generalizada. A fim de avaliar o potencial de uso da modelagem de sistemas complexos em políticas públicas no Brasil, este capítulo investiga onde a pesquisa está sendo feita sobre estes temas em universidades brasileiras e institutos de pesquisa. É razoável supor que muitos destes estudos serão as sementes que irão, eventualmente, levar a aplicações pioneiras em áreas específicas de política pública. A pesquisa acadêmica tem incentivos para procurar as áreas onde a necessidade de ideias inovadoras é mais saliente e onde abordagens de sistemas complexos têm o maior potencial.<sup>2</sup> Além disso, este capítulo especula sobre quais áreas de políticas públicas no Brasil poderiam, dadas a sua natureza e características, se beneficiar mais deste tipo de modelagem. Em conjunto, este mapeamento das primeiras pesquisas e das áreas políticas potenciais deve indicar onde devemos esperar que eventualmente surja no Brasil usos práticos de ideias relacionadas a sistemas complexos.

Para atingir esse objetivo, a seção 2 inicia descrevendo o modelo de políticas públicas que domina atualmente no Brasil. Se sistemas complexos vierem a ser introduzidos nas políticas públicas brasileiras, este é o cenário dominante que esta abordagem irá confrontar. A seção 3 discute brevemente por que este estilo dominante da formulação de políticas muitas vezes falha em situações que têm características de sistemas complexos. A seção 4 ilustra os tipos de problemas que

1. Professor do Departamento de Economia da Universidade de Brasília (UnB).

2. A escolha das áreas e temas de pesquisa também é determinada pelo que está disponível na literatura mundial, de modo que algumas pesquisas no Brasil podem estar simplesmente seguindo o que está sendo feito em outros lugares em vez de tentar resolver os problemas mais prementes do país.

tendem a surgir quando áreas de políticas públicas com características complexas são tratadas com instrumentos tradicionais de políticas públicas que pressupõem controle e informação perfeita. Como ilustração, serão contrastadas uma política concreta que fracassou no Brasil com outra que obteve sucesso, respectivamente, a reforma agrária e as transferências condicionais de renda (Programa Bolsa Família – PBF). A seguir, a seção 5 apresenta a lista de áreas em que a pesquisa vem sendo realizada no Brasil, envolvendo a aplicação prática de sistemas complexos em políticas públicas no Brasil. Finalmente, a seção 6 apresenta as considerações finais.

## **2 A NATUREZA DE POLÍTICAS PÚBLICAS NO BRASIL**

Para compreender o potencial da modelagem de sistemas complexos para políticas públicas no Brasil, é necessário, primeiro, considerar a natureza do processo de formulação de política pública que predomina atualmente no país. Cada país tem um processo de formulação de políticas, que é moldado por instituições políticas que influenciam quem são os atores relevantes, quais são os seus poderes, quais são as suas preferências e como eles interagem. Esta seção inicia-se por descrever brevemente as principais instituições políticas que moldam o processo de formulação de políticas no Brasil. Em seguida, descreve-se o modelo de políticas públicas que atualmente determina como as políticas públicas são criadas, implementadas e avaliadas. Será visto que este modelo é bastante contraditório à noção de sistemas complexos, em particular à noção de que são difíceis de serem controlados, o que sugere que a introdução de sistemas complexo será necessariamente um forte afastamento da prática atual.

A característica fundamental das instituições políticas brasileiras, que determina a natureza da formulação de políticas no país, é o alto nível de poder presidencial. O Executivo tem uma série de poderes proativos e reativos, bem como uma série de instrumentos políticos e recursos para adquirir apoio no Congresso e em outras arenas. Isto permite que ele defina a agenda política e, em circunstâncias normais, aprove a maioria de suas propostas (Alston *et al.*, 2008). Embora as regras eleitorais levem a um sistema partidário composto por múltiplos partidos, o Executivo é geralmente capaz de montar uma coalizão majoritária que lhe confere altos níveis de governabilidade. Embora isto implique que o Executivo tem influência preponderante sobre a política pública, uma série de freios e contrapesos assegura que este poder não é abusado. Estes freios e contrapesos se manifestam por meio de, entre outros, um sistema judiciário independente, uma imprensa livre e combativa, um Ministério Público independente, uma burocracia profissionalizada (para os padrões latino-americanos), uma sociedade civil vibrante e diversificada e um orçamento vinculado que predetermina mais de 90% dos gastos. O resultado de fortes poderes presidenciais em conjunto com freios e contrapesos é um elevado nível de governabilidade com boa governança e um Estado de direito relativamente forte.

Isto tem resultado em reduções sem precedentes da desigualdade e da pobreza e em políticas fiscais e monetárias razoavelmente disciplinadas, que têm mantido a inflação sob controle desde 1995. Esta situação, no entanto, ainda não se traduziu em níveis excepcionais de crescimento econômico – o desempenho do Brasil tem sido medíocre em comparação com a maioria dos outros países latino-americanos.

Alston *et al.* (2014) interpretam as crenças fundamentais que permeiam a sociedade brasileira desde 1995 como sendo uma crença na inclusão social com disciplina fiscal. Esta crença surgiu como uma reação às experiências perversas com o autoritarismo (1964-1985) e a hiperinflação (1985-1994). Desde 1995, esta crença tem sido uma restrição ativa, constrangendo e moldando o que pode ser feito em termos de políticas públicas, independentemente do partido que estivesse no poder. Isto significa que a política pública se concentra na inclusão, igualdade e participação, mas sempre sujeita a uma forte restrição orçamentária. Os grupos sociais possuem a capacidade real de participar do processo de formulação e implementação de políticas, por meio de conselhos, associações e outras instituições participativas (Pires, 2011). Os estados e municípios desempenham papéis importantes em algumas áreas de políticas, como educação e saúde, mas sob a sombra do Executivo, que centraliza grande parte da tomada de decisão e constrange estas unidades subnacionais por meio de leis, como a Lei de Responsabilidade Fiscal (LRF), e várias formas de auditoria e regulação. Tanto o conteúdo como a forma da política no Brasil devem ser compatíveis com a crença na inclusão social sustentável e nas instituições que surgiram sob estas crenças.

Tomando as crenças e as instituições como dadas, qual é o modelo específico de políticas públicas que atualmente predomina no Brasil? Como grande parte do mundo, o Brasil foi fortemente influenciado pelo surgimento da nova gestão pública (*new public management*) no início da década de 1990. Uma grande reforma em 1995 procurou modernizar o sistema de administração pública e torná-lo mais eficiente, flexível e simplificado, reduzindo o papel do Estado na implementação de políticas (Abrúcio, 2007). Esta nova abordagem para as políticas públicas procurou romper com o estilo centralizado, hierárquico, rígido e não responsável que permeava a maioria das burocracias públicas, incorporando muitas das características de empresas privadas, como a concorrência, os incentivos, a descentralização e o foco nos clientes. Em particular, este tipo de gestão pública coloca ênfase na definição de metas, planejamento, regulação de incentivos (em oposição ao comando e controle), coleta de dados e em ser baseada em evidências e resultados, e focada na eficiência. Embora estas características de políticas possam ser desejáveis, em muitas situações, elas pressupõem uma capacidade irrealista de obter e processar informações e são excessivamente otimistas sobre a capacidade de controlar, intervir e sintonizar as políticas e suas consequências. Quando a área de política tem a natureza e as características de um sistema complexo, este nível

de apreensão e controle é muitas vezes improvável, dadas a incerteza e a pouca informação inerentes ao processo.

A seção 3 discute a incompatibilidade fundamental entre esse estilo de gestão centralizado de políticas públicas em domínios que têm características complexas. A seção 4 trará alguns exemplos concretos.

### 3 POLÍTICAS PÚBLICAS EM CENÁRIOS COMPLEXOS

Sistemas complexos são compostos por um grande número de agentes heterogêneos que agem localmente, seguindo regras simples, sob racionalidade limitada, sem controle central e em constante adaptação e aprendizagem. Há, portanto, uma contradição fundamental com a noção padrão de política pública, que pressupõe que as decisões de planejamento ideais podem ser feitas considerando todas as opções *ex-ante*, pesando custos e benefícios e levando em conta incertezas ao atribuir probabilidades para todas as contingências possíveis.

Além disso, a abordagem tradicional para a formulação de políticas públicas requer a fixação de metas e objetivos específicos e quantificáveis, pressupondo um nível apurado de controle em cada fase de formulação e implementação, com *feedback* constante, permitindo ajustamentos para corrigir qualquer desvio do caminho predeterminado. Embora alguns domínios políticos tenham características tais que este tipo de abordagem seja possível, o mesmo não é válido para domínios que têm as características de sistemas complexos. Estas áreas complexas podem muitas vezes exibir dinâmicas com equilíbrios estáveis e comportamento previsível, mas elas estão sujeitas a transições de fase, onde adquirem comportamento periódico, complexo ou caótico, onde não há como prever o que o sistema vai fazer, a não ser deixando-o correr. Ou seja, os resultados das políticas públicas são frequentemente fenômenos emergentes que são surpreendentes e inesperados, e não podem ser antecipados ou prescritos. Grande parte do fracasso das políticas públicas, tanto no Brasil como em outros países, é devido à tentativa reducionista de lidar com fenômenos complexos usando pressupostos e instrumentos que são apropriados apenas para problemas não complexos, mesmo que complicados.

A existência dessa contradição fundamental não implica que o formulador de políticas esteja impotente para perseguir objetivos e tentar influenciar o sistema. Embora possa não ser possível assegurar metas específicas, predeterminando exatamente como elas serão alcançadas, sistemas complexos podem ser influenciados de modo a levar a resultados que têm as propriedades que o formulador de políticas pode preferir. De acordo com Page (2013), “um ator em um sistema complexo controla quase nada, mas influencia quase tudo”. Ao afetar as propriedades do sistema, como a interdependência, a diversidade, a conectividade e a capacidade de adaptação, o

sistema pode ser levado a ter as propriedades desejadas. As intervenções podem, assim, ser alcançadas mesmo que resultados específicos não possam.

O que é necessário, portanto, para lidar com sistemas complexos é uma revisão dos pressupostos e das expectativas sobre o que significa fazer políticas públicas em tais circunstâncias. Trata-se de uma nova compreensão do que é possível e de como os resultados podem ser julgados. Como os sistemas complexos seguem uma lógica evolutiva, eles naturalmente envolvem erros, falhas, desperdício e redundâncias, e raramente alcançam soluções globalmente ideais. Estas características não coadunam com a noção tradicional de políticas públicas, onde há uma expectativa de absoluto controle e eficiência. Ao lidar com sistemas complexos, não é possível simplesmente ignorar estas características e tentar suprimi-las. Em vez disso, é necessário reconhecer e aceitar estas características, levando-as em conta ao criar as políticas. Talvez um dos principais entraves à adoção da modelagem de sistemas complexos nas políticas públicas de países como o Brasil será a necessidade da mudança de cultura na compreensão da natureza do que pode e do que não pode ser feito em políticas públicas em domínios complexos.

#### **4 AS DIFICULDADES DAS POLÍTICAS PÚBLICAS TRADICIONAIS EM UM DOMÍNIO COMPLEXO**

A fim de ilustrar como uma abordagem para a política pública que depende de controle, previsão e altos níveis de informação pode ser propensa a falhas quando a política tem as características de um sistema complexo, esta seção descreve brevemente as tentativas de reforma agrária no Brasil. Posteriormente, será feita uma comparação com uma área política distintamente mais bem-sucedida: transferências condicionais de renda – isto é, o Programa Bolsa Família.

Historicamente o Brasil tem sido um dos países com o maior nível de concentração da propriedade da terra no mundo. As consequências sociais e econômicas perversas desse estado de coisas foram reconhecidas no início do século XIX, e já na Constituição de 1946, a reforma agrária constava como um objetivo explícito. Como a reforma agrária naturalmente implica redistribuição, é uma questão controversa e ideologicamente carregada, que sempre teve proeminência no debate político brasileiro. O golpe militar de 1964 foi em parte motivado por conflito rural, e a reforma agrária foi adotada como uma das principais bandeiras do novo regime democrático que tomou o seu lugar em 1985. Enquanto o governo militar procurou implementar uma reforma agrária a fim de alcançar uma maior eficiência produtiva, o novo regime democrático usou a mesma política para buscar justiça social, transferindo terras para as massas de camponeses sem terra. Nenhum dos regimes, no entanto, nem qualquer outro desde então, conseguiu implementar uma reforma agrária bem-sucedida, apesar de todos terem tentado e investido substanciais recursos para este fim. Desde o início da década de 1990, grupos organizados de

camponeses sem terra – em especial o Movimento Sem Terra (MST) – adotaram estratégias para pressionar o governo a acelerar o processo de reforma, invadindo terras improdutivas e ocupando-as até que o governo efetuasse a desapropriação e a transferência. Esta estratégia não funciona pela força, mas sim porque o eleitorado aprova e simpatiza com a reforma agrária. A comoção criada pelas invasões, que muitas vezes envolvem conflito e violência, é transmitida em todo o país pela imprensa e constrange o governo federal, que é corretamente visto como não cumprindo a sua obrigação de realizar a reforma. Como resultado desta pressão, uma área equivalente à França, Portugal, Áustria e Irlanda foi redistribuída para mais de 1 milhão de famílias de camponeses sem terra nas últimas duas décadas.

Com números tão surpreendentes, como se pode afirmar que a reforma agrária tem sido uma política fracassada? E por que estou classificando esta área de política como possuindo características de um sistema complexo? Em relação à primeira questão, deve-se notar que o objetivo final da reforma agrária não é simplesmente redistribuir a terra de usos improdutivos para trabalhadores sem terra, mas sim de fazê-lo de forma a criar uma classe viável de agricultura familiar, que seja capaz de inserir-se no mercado e tornar-se autossustentável. Este objetivo não foi alcançado. A maioria dos projetos de assentamento por meio do qual a terra foi redistribuída falhou em emancipar-se dos subsídios do governo, com muitos dos beneficiários originais vendendo ou abandonando seus lotes, o que em muitos casos levou à reconsolidação dos lotes em fazendas maiores sob a posse de proprietários com mais riqueza e experiência. Apesar da enorme área de terra que foi redistribuída nas últimas décadas por programas de reforma agrária, hoje mais da metade da produção agrícola no Brasil é realizada por um impressionante 0,62% dos produtores (Alves e Rocha, 2010). É evidente que esta não é marca de uma política de reforma agrária bem-sucedida.

Então, o que deu errado com esse processo de política pública? Embora parte da culpa do fracasso das primeiras tentativas de reforma (pré-1995) possa ser explicada pela capacidade dos proprietários de terras de bloquear políticas contrárias aos seus interesses, o mesmo não pode ser dito dos esforços desde 1995, quando o governo foi totalmente investido em levar as reformas adiante – dado que o eleitorado urbano se posiciona no Brasil favorável à reforma agrária, permitindo o sucesso da estratégia do MST de invasões e manifestações públicas. Se o governo realmente queria alcançar os objetivos da reforma e realmente investiu os recursos políticos e orçamentários para este fim, então por que os resultados foram tão ruins?

Para se ver que o governo realmente tinha muito pouco controle sobre o processo, note-se que a concepção original da política é que um grande cadastro seria feito de todos os camponeses sem terra (demanda) e de todas as potenciais propriedades improdutivas (oferta), que a agência de reforma agrária usaria para

expropriar e redistribuir a terra. Como o ritmo da reforma agrária sob estas regras foi terrivelmente lento, os sem-terra perceberam que poderiam acelerar o processo por invasão e ocupação em vez de esperar passivamente pela ação do governo. À medida que estas invasões geravam conflitos que apareciam nos noticiários, o governo foi forçado a correr atrás, expropriando terras e criando projetos de assentamento em um ritmo cada vez maior. No entanto, a falta de controle sobre o processo é tal que quanto mais esforço e recursos o governo dedicava para acalmar o setor, maiores eram os incentivos para mais invasões (Alston, Libecap e Mueller, 1999; 2000; 2010).

Um dos principais problemas era que todo o debate político sobre se o governo estava fazendo um esforço adequado em reforma agrária foi enquadrado ao longo de uma única métrica: o número de famílias assentadas naquele determinado ano. O governo, os movimentos camponeses sem-terra e a imprensa, todos focavam nesta única medida para determinar se a reforma agrária estava ou não sendo feita. O governo fazia promessas eleitorais de milhares de famílias assentadas por ano, os camponeses organizados denunciavam que o número real de assentados era inferior ao prometido e a imprensa mediava o debate também focando exclusivamente nessa dimensão. Assim, os incentivos eram para o governo fazer promessas ambiciosas e realmente cumprir nos números de famílias assentadas, porém fazendo isto sem considerar a qualidade da terra e do assentamento e sem seguir com o acompanhamento necessário para o sucesso das novas unidades agrícolas.<sup>3</sup> Depois que uma família recebia a terra, ela passava a contar como mais uma estatística para aquele ano, e o governo apressava-se para atender outros camponeses sem terra. Mas sem a assistência posterior fundamental, um grande número de camponeses assentados foi incapaz de subsistir e acabou vendendo ou abandonando suas terras. Como o debate político não enxergava esta dimensão do programa, havia poucos incentivos para o governo agir de outra forma.

À medida que a maior parte da terra subutilizada mais propícia havia sido distribuída, e a maioria dos potenciais beneficiários com a aptidão para o trabalho agrícola havia sido assentada, o governo teve que buscar terras de pior qualidade e mais distante (muitas vezes na Amazônia) e também buscar beneficiários entre as massas de pobres urbanos – que tinham pouca intenção ou capacidade de permanecer na terra –, aumentando assim a probabilidade de fracasso dos assentamentos. É verdade que no processo de reforma agrária uma grande redistribuição dos recursos foi feita em benefício de uma parte menos favorecida da sociedade. No entanto, a forma como isto foi feito envolveu tremendo desperdício em termos

3. Embora o Programa Bolsa Família (PBF) também incite um debate político em torno da única métrica do número de beneficiários, neste caso, o objetivo final era efetivamente a transferência de recursos e apenas secundariamente outros objetivos, tais como manter as crianças na escola. Assim, o governo tinha incentivos para realmente perseguir os verdadeiros objetivos do programa, em vez de seguir um objetivo enganoso, como no caso da reforma agrária.

de violência, insegurança e deslocamento humano, para não falar dos danos ambientais. Não é forçado supor que uma quantidade equivalente de redistribuição poderia ter sido alcançada, a um custo e sofrimento muito mais baixos por meio de programa de transferência direta de renda, como o Programa Bolsa Família, por meio do qual cerca de 15 milhões de famílias no Brasil recebem pequenas transferências condicionais em ações, tais como manter os filhos na escola. O Programa Bolsa Família é considerado como uma das causas da redução da desigualdade e pobreza no Brasil na última década, com quase nenhum dos incentivos perversos que este tipo de programa pode muitas vezes provocar (Soares, 2012). O sucesso desta política tornou-o um exemplo frequentemente citado pelo Banco Mundial e outras organizações internacionais e já foi copiado por várias outras nações (Lindert *et al.*, 2007).

Explicar o sucesso do PBF e o fracasso da reforma agrária requer dados e análise que estão além do escopo deste capítulo. No entanto, é útil comparar essas políticas públicas a partir da perspectiva de quanto elas se aproximam das características de sistemas complexos. Ambas são políticas sociais que visam à redução da pobreza e da desigualdade por meio da transferência de recursos para os pobres. Ambas envolvem milhões de beneficiários, distribuídos em vastas áreas de mais de 5,5 mil municípios. E ambas têm grande visibilidade e impacto político. No entanto, ao passo que a reforma agrária é centralizada nas mãos de uma única agência federal, a implementação do PBF pelo governo federal é compartilhada com governos subnacionais – estados e municípios – por meio de esquemas em que estes são recompensados com base em resultados. Enquanto o governo federal mantém a tarefa de selecionar as famílias e transferir o dinheiro diretamente por meio de caixas eletrônicos, os governos locais administram e mantêm um cadastro único dinâmico, que é essencial para fornecer as informações de quem está no programa e se as condições estão sendo atendidas (Cunha e Pinto, 2008). Ao transferir os recursos diretamente para os beneficiários, o programa evita a apropriação por intermediários, um problema tradicional neste tipo de política. Na reforma agrária, por outro lado, o governo nunca conseguiu criar um cadastro de terras completo e atualizado, que é um passo crucial para uma reforma em larga escala. Além dos problemas logísticos de mapear limites e posses em um país continental com uma história muito complicada de grilagem e apropriação de terras, há sempre resistência dos proprietários de terra, que temem a utilização das informações para fins fiscais ou de expropriação. Assim, os bons níveis de informação que estão disponíveis no domínio do PBF não existem na área de reforma agrária. Além disso, a tarefa de transferir pequenos valores em dinheiro é relativamente simples e sem oposição. Já na reforma agrária, a tarefa é repleta de problemas e conflitos potenciais, pois envolve: *i*) tomar a terra de um agente; *ii*) o deslocamento de grandes contingentes de indivíduos heterogêneos, muitas vezes de outras regiões; e *iii*) o acompanhamento dos beneficiários por muitos anos para que eles sejam capazes de se estabelecer, se adaptar e, eventualmente, se tornarem

produtivos e sustentáveis em mercados competitivos, apesar da falta de experiência. É evidente que há muito mais que pode dar errado em uma área política do que na outra, especialmente tendo em conta que, enquanto o PBF não tem praticamente nenhuma oposição e recebe reconhecimento internacional, a reforma agrária é historicamente envolta em controvérsia e conflito. Além disso, enquanto no PBF prefeitos competem para serem vistos como promotores da política (De Janvry, Finan e Sadoulet, 2012), a política de reforma agrária está envolvida em competição por grupos de interesse, ideologia e desinformação.

O ponto não é que a reforma agrária não pode ser bem feita, mas sim que o tipo e a escala de reforma agrária que foi tentada não coincidem com as realidades desta área de política complexa. A política é intensiva em informação quando a informação é escassa; ela tenta centralizar uma política que é inherentemente local; ela presupõe a capacidade de controlar o processo, quando, na realidade, só pode agir de forma reativa; exige a mensuração e avaliação ao longo de uma série de margens diversas e sutis, enquanto, na realidade, uma métrica única e imprecisa é usada (o número de famílias assentadas); trata de maneira míope uma área política que se desenvolve a longo prazo. Dadas estas características, é evidente que uma política de reforma agrária com uma chance de sucesso no Brasil teria necessariamente de ser muito diferente daquela que foi tentada. Em particular, teria de incorporar o fato de que esta política é, em muitos aspectos, um sistema complexo.

## 5 APLICAÇÕES DE SISTEMAS COMPLEXOS EM POLÍTICAS PÚBLICAS NO BRASIL

Esta seção compila todas as evidências encontradas em pesquisas realizadas no Brasil sobre temas relacionados a sistemas complexos. Se o uso de sistemas complexos na área de políticas públicas irá surgir no Brasil, é provável que esta prática será influenciada pelo trabalho precursor realizado por indivíduos e grupos em universidades e institutos de pesquisa. Ou seja, a pesquisa aqui apresentada pode ser vista como indicação de que áreas, temas e instrumentos serão mais suscetíveis a abordagens relacionadas a sistemas complexos. Em parte, a distribuição de estudos documentados aqui reflete também a evolução da literatura internacional. Mas, ao mesmo tempo, esta pesquisa deve espelhar em parte áreas e problemas onde as aplicações desses métodos são mais promissoras para as circunstâncias brasileiras. Os estudos são apresentados nas subseções agrupados por área de política pública. Para ser incluído, cada item deve necessariamente lidar com temas relacionados às políticas públicas brasileiras por meio de uma abordagem de sistemas complexos. Isto inclui tanto trabalhos teóricos como empíricos, sendo excluídos, porém, aqueles que são puramente abstratos e não relacionados com problemas ou questões concretas da realidade brasileira. É evidente que esta lista apresenta apenas uma visão instantânea do que é, naturalmente, um processo dinâmico, que deve crescer substancialmente nos próximos anos.

## 5.1 Uso da terra e planejamento urbano

Esta área de política pública envolve o planejamento e a regulação do uso e ocupação do solo em áreas urbanas. Estão envolvidas questões ligadas às favelas, à densidade, ao congestionamento, à expansão descontrolada, entre muitos outros. As cidades são claramente sistemas complexos compostos por diversos agentes heterogêneos, que interagem localmente, de acordo com regras simples que levam à auto-organização e à ordem espontânea, rotineiramente desafiando as tentativas de planejamento central e de controle. Com uma taxa de urbanização de 81%, o Brasil é eminentemente urbano, e suas cidades sofrem de todas as patologias modernas, como poluição, crime, congestionamento, segregação, expansão descontrolada, perda do espaço público, serviços públicos deficientes etc.

As políticas públicas nessa área geralmente tendem a ser de nível local, implementadas por meio de planos diretores, leis de zoneamento e demais legislação, com acompanhamento por um conjunto diversificado de entidades e organizações, desde secretarias municipais até promotores e policiais. A maioria dos estudos encontrados nesta área procura modelar a natureza complexa da organização da cidade e sua evolução por meio de instrumentos como autômatos celulares, modelos baseados em agentes e teoria de rede, todos os quais são bem adequados para capturar as propriedades endógenas de auto-organização das cidades.

### QUADRO 1

#### **Estudos sobre uso da terra e planejamento urbano com abordagem de sistemas complexos no Brasil**

|   | Autores   | Título  | Referência   |
|---|---|---|--|
| 1 | Bommel, P.<br>Poccard-Chapuis, A. B. Coudel, E.                                       | <i>An ABM to monitor landscape dynamics and to undertake collective foresight investigations in the Amazon</i>  | Proceedings of the third international workshop on social simulation (BWSS 2012)       |
| 2 | Delaneze, M. E.<br>Riedel, P. S.<br>Marques, M. L.<br>Ferreira, M. V.<br>Bentz, C. M. | <i>Modelagem espacial utilizando autômato celular aplicada à avaliação das mudanças do uso e cobertura da terra no entorno da faixa de dutos Rio de Janeiro</i>                 | Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, Brasil, 2011    |
| 3 | Feitosa, F. F.<br>Le, Q. B.<br>Vlek, P.<br>Monteiro, A. M. V. Rosembach, R.           | <i>Countering urban segregation in brazilian cities: policy-oriented explorations using agent-based simulation</i>  | Environment and planning B: planning and design, 2012                                  |
| 4 | Furtado, B. A<br>Van Delden, H.   | <i>Modelagem urbana e regional com autômatos celulares e agentes: panorama teórico, aplicações e política pública</i>   | Ipea, Texto para Discussão n. 1576, 2011   |
| 5 | Furtado, B. A.  | <i>Modelling social heterogeneity, neighborhoods and local influences on urban real estate prices: spatial dynamic analyses in the Belo Horizonte Metropolitan Area, Brazil</i> | Faculty of geosciences, Utrecht University, Netherlands Geographical Studies 385, 2009 |

(Continua)

(Continuação)

|   | Autores  | Título   | Referência   |
|---|--|--|--|
| 6 | Lim, K.<br>Deadman, P. J.<br>Moran, E.<br>Brondizio, E.<br>McCracken, S.         | <i>Agent-Based simulations of household decision making and land use change near Altamira, Brazil</i>  | <i>In: Gimblett H. R. (Ed.), Integrating GIS and Agent-based modeling techniques for simulating social and ecological processes, Santa Fe Institute, Studies in the Sciences of Complexity, 2002</i> |
| 7 | Mello, B. A.<br>Cajueiro, D. O.,<br>Gomide, L. H. B.<br>Vieira, R.<br>Boueri, R. | <i>Teoria de redes complexas e o poder de difusão dos municípios</i>   | Ipea, Texto para Discussão n. 1484, 2010   |
| 8 | Saraiva, M.V. P.   | <i>Simulação de crescimento urbano em espaços celulares com uma medida de acessibilidade: método e estudo de caso em cidades do sul do Rio Grande do Sul</i> | Dissertação (Mestrado) do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012   |
| 9 | Soares-Filho, B. S. Pennachin, C.<br>L. Cerqueira, G.                            | Dynamical – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier                           | <i>Ecological modelling</i> , v. 154, Issue 3, Sept. 2002  |

Elaboração do autor.

## 5.2 Crescimento econômico e desenvolvimento

Esta é uma área de política pública ampla e diversificada e que tem muitas sobreposições com outras áreas. Ela lida com políticas ligadas às atividades relacionadas com os componentes do produto interno bruto (PIB), ou seja, consumo, investimento, gastos do governo e exportações/importações, bem como os determinantes de curto prazo destes, como a política fiscal e monetária, e os determinantes de longo prazo, como as instituições, o Estado de direito e as crenças. A teoria econômica tradicional é geralmente reducionista e acredita que a causa e o efeito podem ser modelados analiticamente e testados com dados de maneira detalhada e linear, levando a recomendações de políticas para promover o crescimento e o desenvolvimento. Este estilo de análise baseia-se na hipótese de racionalidade forte e concentra-se quase exclusivamente em resultados de equilíbrio. Os trabalhos aqui, pelo contrário, tratam a economia como um sistema complexo composto por agentes heterogêneos que agem localmente, com informações limitadas sujeitas a aprendizagem e adaptação, levando a fenômenos emergentes difíceis de prever, por exemplo, desenvolvimento ou crises. O projeto de Hidalgo e Hausman (2009) faz uso inteligente da teoria de rede e da teoria da evolução (o adjacente possível) para criar um índice de complexidade para os países que supera outros índices que visam explicar a disparidade no crescimento econômico entre os países.

**QUADRO 2****Estudos sobre crescimento econômico e desenvolvimento com abordagem de sistemas complexos no Brasil**

|   | Autores  | Título   | Referência   |
|---|--|--|--|
| 1 | Hausmann, R. et al.  | <i>The atlas of economic complexity</i>  | Cambridge: Puritan Press. 2011.<br>< <a href="http://atlas.media.mit.edu/">http://atlas.media.mit.edu/</a> >   |
| 2 | Vasconcellos, T.   | <i>O índice de complexidade econômica: uma revisão teórica e aplicações ao caso brasileiro</i>   | Monografia do Departamento de Economia da Universidade de Brasília, 2013   |
| 3 | Dataviva   | <i>Ferramenta que disponibiliza dados oficiais sobre exportações, atividades econômicas, localidades e ocupações de todo o Brasil.</i> | < <a href="http://dataviva.info/">http://dataviva.info/</a> ><br>2014  |
| 4 | Alston, L. J.<br>Mello, M. A.<br>Mueller, B.<br>Pereira C.E. | <i>Beliefs, leadership and critical transitions: Brazil 1964-2014</i>  | Princeton University Press.<br>2015  |
| 5 | Mueller, B.  | <i>Emergence and evolution of beliefs and institutions in development.</i>   | Working Paper Dept. of Economics, Universidade de Brasília, 2014   |
| 6 | Possas, M. L.<br>Dweck, E.                                   | <i>Ciclo e tendência num modelo micro-macro-dinâmico de simulação</i>  | < <a href="http://www.ie.ufrj.br/datacenterie/pdfs/seminarios/pesquisa/texto1610.pdf.2006">www.ie.ufrj.br/datacenterie/pdfs/seminarios/pesquisa/texto1610.pdf.2006</a> > |

Elaboração do autor.

**5.3 Epidemias e doenças infecciosas**

A disseminação de doenças ao longo do espaço e do tempo é uma importante preocupação política em todos os países. Modelos epidemiológicos tradicionais – como suscetível, infectado, resistente (SIR) – deixam de incorporar adequadamente a dinâmica espacial que está no cerne desses problemas. Abordagens via sistemas complexos são mais capazes de lidar com os fenômenos emergentes contidos em epidemias, como *tipping points* e transições de fase. Muitas das fontes encontradas neste tópico foram teses/dissertações de engenharia ou física em vez de saúde pública ou medicina.

**QUADRO 3****Estudos sobre epidemias e doenças infecciosas com abordagem de sistemas complexos no Brasil**

|   | Autores   | Título   | Referência   |
|---|---|--|--|
| 1 | Alvarenga, L. R.  | <i>Modelagem de epidemias através de modelos baseados em indivíduos</i>                              | Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Federal de Minas Gerais, 2008                                |
| 2 | Carvalho, A. M.   | <i>Dinâmica de doenças infecciosas em redes complexas</i>  | Tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Física da UFRGS, 2012  |
| 3 | Nepomuceno, E. G.   | <i>Dinâmica, modelagem e controle de epidemias</i>   | Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). 2005   |
| 4 | Possas, C. A.   | <i>Saúde no ecossistema social: enfrentando a complexidade e a emergência de doenças infecciosas</i> | Cadernos de Saúde Pública, v. 17, n. 1, jan./fev., 2001  |
| 5 | Jacinto, L. F. O.<br>Batista, A. F. M.<br>Ruas, T. L.<br>Marietto, M. G. B.<br>Silva, F. A. | <i>An agent-based model for the spread of the Dengue fever: a swarm platform simulation approach</i> | Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference ( <i>SpringSim '10</i> ). Society for Computer Simulation International, San Diego, 2010 |

(Continua)

(Continuação)

|   | Autores  | Título   | Referência   |
|---|--|--|--|
| 6 | Takahashi, C.C.<br>Takahashi, F.C.<br>Alvarenga, L.R.<br>Takahashi, R.H.C. | <i>Estudo do tempo de erradicação de epidemias em modelos baseados em indivíduos</i> | Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática, 2008 |

Elaboração do autor.

#### 5.4 Saúde pública

Embora não seja óbvio à primeira vista, a saúde pública é um dos sistemas adaptativos complexos mais prototípicos, com redes de redes que não podem ser decompostas em suas partes constituintes sem perder informações sobre suas inter-relações cruciais (Rouse, 2008). Ao mesmo tempo, esta área envolve uma das políticas públicas mais problemáticas na maioria dos países, incluindo o Brasil. Poucas referências foram encontradas usando abordagens de sistemas complexos, o que sugere uma área vasta para ser preenchida pela pesquisa sobre complexidade no futuro.

#### QUADRO 4

#### Estudos sobre saúde pública com abordagem de sistemas complexos no Brasil

|   | Autores                                 | Título  | Referência  |
|---|---|---|---|
| 1 | Almeida-Filho, N.                       | <i>A saúde e o paradigma da complexidade</i>  | Cadernos IHU, n. 15, 2006                                       |
| 2 | Pinheiro Filho, F. P.<br>Mori Sarti, F. | <i>Falhas de mercado e redes em políticas públicas: desafios e possibilidades ao Sistema Único de Saúde</i> | Ciência & Saúde Coletiva, v. 17, n. 11, p. 2981-2990, nov. 2012 |

Elaboração do autor.

#### 5.5 Meio ambiente e mudança climática

As alterações climáticas e os problemas ambientais podem ser o maior desafio para sistemas complexos nas próximas décadas, dadas a magnitude dos fenômenos e da diversidade e a inter-relação dos agentes globais e suas ações. As abordagens tradicionais de política que dependem de comando e controle, bem como aquelas que procuram desenvolver incentivos de mercado, têm se mostrado totalmente inadequadas. Já existe um movimento na academia no sentido de reconhecer a natureza complexa do problema, como nestes manifestos pedindo diferentes abordagens: Levin *et al.* (2013) e Jordan *et al.* (2011). O Brasil sempre foi um país crucial para questões relacionadas com o meio ambiente, devido à floresta amazônica, à grande população e às grandes reservas de água doce. Em particular, seria natural que houvesse estudos sobre o desmatamento, para os quais abordagens de sistemas complexos são particularmente bem adaptadas.

**QUADRO 5****Estudos sobre meio ambiente e mudança climática com abordagem de sistemas complexos no Brasil**

|   | Autores   | Título  | Referência   |
|---|---|---|--|
| 1 | Andrade, P. R.<br>Monteiro, A. M. V.<br>Camara, G.            | <i>From input-output matrixes to agent-based models: a case study on carbon credits in a local economy</i>              | Proceedings of the Second International Workshop on Social Simulation. BWSS, 2010  |
| 2 | Costa, A. C. R.<br>Mota, F. P.<br>Dimuro, G. P.<br>Santos, I. | Um framework para simulação de políticas públicas aplicado ao caso da Piracema, sob o olhar da teoria dos jogos         | Brazilian Conferences in Intelligence Systems, 2012. < <a href="http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/enia/2012/0027.pdf">http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/enia/2012/0027.pdf</a> > |
| 3 | Mello, R. F. L.   | Em busca da sustentabilidade da organização antropossocial através da reciclagem e do conceito de auto-eco-organização. | Dissertation Universidade Federal do Paraná. 1999  |

Elaboração do autor.

**5.6 Mercados financeiros e crises**

A crise financeira iniciada em 2008/2009 tornou evidente que os modelos tradicionais de finanças – modelos DSGE (do inglês, *dynamic stochastic general equilibrium*) e VAR (do inglês *vector autoregression*) –, fundamentados em conceitos de equilíbrio e distribuições gaussianas, são representações inadequadas do mundo real e são incapazes de lidar com grandes eventos imprevisíveis. A literatura da aplicação de métodos relacionados a sistemas complexos – muitas vezes feitas por físicos – está bem desenvolvida. Vários pesquisadores no Brasil já procuraram aplicar estes métodos para mercados brasileiros, tornando-se uma das áreas mais desenvolvidas de estudos da complexidade no Brasil.

**QUADRO 6****Estudos sobre mercados financeiros e crises com abordagem de sistemas complexos no Brasil**

|   | Autores   | Título  | Referência   |
|---|---|---|--|
| 1 | Gleria, I.<br>Matsushita, R.<br>Silva, S.                   | <i>Scaling power laws in the São Paulo stock exchange</i>                                   | Economics Bulletin v. 7, n. 3, p. 1-12, 2002   |
| 2 | Matsushita, R.<br>Silva, S.<br>Figueiredo, A.<br>Gleria, I. | <i>Log-Periodic Crashes Revisited</i>   | Physica A 364, p. 331-335, 2006  |
| 3 | Matsushita, R.<br>Silva, S.<br>Figueiredo, A.<br>Gleria, I. | <i>Hurst Exponents, Power Laws, and Efficiency in the Brazilian Foreign Exchange Market</i> | Economics Bulletin, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2007  |
| 4 | Tabak, B.<br>Takami M.Y.<br>Cajueiro, D. O.                 | <i>Quantifying price fluctuations in the Brazilian stock market</i>                         | Physica A: statistical mechanics and its applications, v. 388, Issue 1, p. 59-62, 2009 |
| 5 | Tabak, B. M.<br>Cajueiro D. O.<br>Serra, T. R.              | <i>Topological Properties of Bank Networks: The Case of Brazil</i>                          | Int. J. Mod. Phys. C, v. 20, p. 1121, 2009   |
| 6 | Cajueiro, D. O.<br>Tabak, B.M.                              | <i>Possible causes of long-range dependence in the Brazilian stock market.</i>              | Phys. A, v. 345, Issue 3-4, p. 635-645, 2005.  |
| 7 | Cajueiro, D. O.<br>Tabak, B. M.                             | <i>The role of banks in the Brazilian interbank market: Does bank type matter?</i>          | Phys. A, v. 387, n. 27, p. 6825-6836, 2008.  |

Elaboração do autor.

## 5.7 Modelagem computacional, modelagem baseada em agentes e simulações computacionais

Esta subseção inclui referências que são principalmente interessadas pelo método de simulação de políticas públicas – ou seja, a modelagem baseada em agentes – e apenas secundariamente pela própria política pública. Estes estudos são úteis para avançar e difundir métodos que podem ser usados por outros pesquisadores que estão primordialmente interessados nos resultados em si da área de política. Três edições do *Workshop* brasileiro de simulação social foram realizadas em 2008, 2010 e 2014, liderando o esforço para avançar esta literatura no Brasil. A maioria dos trabalhos é metodológico, e não relacionado às políticas públicas, porém, são importantes para o avanço nesse campo de pesquisa no Brasil.<sup>4</sup>

**QUADRO 7**

### Estudos sobre modelagem computacional e simulações com abordagem de sistemas complexos no Brasil

|   | Autores   | Título  | Referência   |
|---|---|---|--|
| 1 | Andrade, A. A.<br>Frazzon E. M.                                       | <i>Simulação baseada em agentes: para a análise de uma cadeia global de suprimentos</i> | XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Bento Gonçalves, 15 a 18 de outubro, 2012 |
| 2 | Sichman, J. S.<br>Rocha Costa, A. C.<br>Adamatti, D.<br>Dimuro, G. P. | <i>An overview of social simulation research in Brazil</i>                              | Proceedings of the Third International Workshop on Social Simulation. BWSS, 2012             |

Elaboração do autor.

## 5.8 Crime e outros problemas urbanos

Esta categoria está relacionada a cidades, mas concentra-se em problemas específicos que surgem quando um grande número de agentes heterogêneos altamente conectados interage localmente, sendo o crime a principal área de política pública. Crime e segurança pública são um dos principais problemas nas cidades brasileiras, e há um grande potencial em se analisar o crime por meio da perspectiva de sistemas complexos.

**QUADRO 8**

### Estudos sobre crime e outros problemas urbanos com abordagem de sistemas complexos no Brasil

|   | Autores                              | Título   | Referência  |
|---|--------------------------------------|--|---|
| 1 | Berger, L. M.<br>Borenstein, D.      | <i>An Agent-based simulation of car theft: further evidence of the rational choice theory of crime</i> | <i>Economic Analysis of Law Review</i> , v. 4, n. 1, p. 103-119, Jan-Jun. 2013.   |
| 2 | Pint, B.<br>Crooks, A.<br>Geller, A. | <i>Exploring the emergence of organized crime in Rio de Janeiro: an agent-based modeling approach</i>  | Proceedings of the Second International Workshop on Social Simulation. BWSS, 2010 |

Elaboração do autor.

4. Neste capítulo estão relacionados apenas trabalhos que tratam de políticas públicas.

### 5.9 Energia, transporte e infraestrutura

A maior parte dos serviços públicos de infraestrutura está organizada em redes, ou seja, telecomunicações, transportes, electricidade, gás, esgoto etc. Há uma grande literatura internacional que aplica sistemas complexos a questões relacionadas à infraestrutura, e há muito escopo para o uso desses métodos no Brasil. Este país tem grandes problemas nesta área de políticas públicas, com subinvestimento e deficiências generalizadas. Atualmente problemas de infraestrutura são diagnosticados como um dos principais obstáculos ao crescimento econômico.

**QUADRO 9**

**Estudos sobre energia, transporte e infraestrutura com abordagem de sistemas complexos no Brasil**

|   | Autores                                  | Título   | Referência   |
|---|--|--|--|
| 1 | Avancini, D. P.                          | <i>Demanda por transporte rodoviário urbano: um modelo computacional baseado em agentes</i>  | Monografia – Universidade Federal de Santa Catarina. 2013                        |
| 2 | Zopelari, A. L. M. S.<br>Silva Cesar, A. | <i>Competitiveness and social inclusion within national the programme for production and use of biofuels: negative feedbacks on profitability awareness in sharp institutional settlements in Brazil south region concerning soybean oil</i> | Proceedings of the Third International Workshop on Social Simulation. BWSS, 2012 |

Elaboração do autor.

### 5.10 Redes sociais

Os brasileiros são usuários contumazes de mídias sociais, e o país está bastante avançado na difusão destas tecnologias, inclusive para fins de *e-governo* e políticas públicas. As mídias sociais podem ser naturalmente entendidas como sistemas complexos, dada a sua interdependência, conexão e dinâmica não linear. Existe, portanto, a possibilidade de pesquisa nesta área por meio de uma lente de sistemas complexos.

**QUADRO 10**

**Estudos sobre redes sociais com abordagem de sistemas complexos no Brasil**

|   | Autores   | Título   | Referência  |
|---|---|--|---|
| 1 | Barbosa Filho, H.<br>Lima Neto F. B.<br>Fusco, W. | <i>Migration, communication and social networks; an agent-based social simulation</i>  | <i>Complex networks: studies in computational Intelligence</i> , v. 424, p. 67-74, 2013 |
| 2 | Martelete, R. M.                                  | <i>Análise de Redes Sociais – Aplicação nos Estudos de Transferência da Informação</i> | Ci. Inf., Brasilia, v. 30, n. 1, p. 71-81, 2001   |

Elaboração do autor.

## 6 DISCUSSÃO

A seção anterior mostrou que há boa cobertura na literatura brasileira de sistemas complexos de temas que são importantes nas políticas públicas do país, mesmo que o número total de referências ainda seja relativamente baixo. Há, no entanto, várias

ausências notáveis, ou seja, áreas de políticas públicas que são muito importantes no Brasil, mas para as quais não foi encontrada nenhuma pesquisa.

A ausência mais gritante, talvez, é a educação, que é entendida pela sociedade brasileira como a principal área onde o investimento do governo deveria se concentrar. Outras importantes áreas de políticas públicas no Brasil que também não foram ainda tratadas por abordagens complexas são: desmatamento, biodiversidade, inovação, organização industrial, poluição, trânsito, reforma agrária, assistência social – por exemplo, o Programa Bolsa Família –, racismo e outras patologias sociais, entre outros. Também não há praticamente nada na área de ciência política, como eleições, plataformas políticas etc.

Este capítulo mostrou que a literatura de sistemas complexos no Brasil ainda está em estágio nascente. Não só não há caso de política pública explicitamente utilizando estas abordagens, como mesmo na área acadêmica ainda há muito pouco a ser feito. Claramente a adoção ainda está na parte horizontal da curva de difusão em forma de S que esta abordagem irá atravessar nos próximos anos. A conferência sobre Modelagem de Sistemas Complexos para Políticas Públicas, organizada pelo Ipea, para a qual este capítulo foi obtido, certamente será um marco histórico nesta jornada.

## REFERÊNCIAS

- ABRÚCIO, F. L. Trajetória recente da gestão pública brasileira: um balanço crítico e a renovação da agenda de reformas. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, n. 41, 2007.
- ALSTON, L.; LIBECAP, G.; MUELLER, B. A model of rural conflict: violence and land reform policy in Brazil. **Environment and Development Economics**, Cambridge, n. 4, p. 135-160, 1999.
- \_\_\_\_\_. Property rights to land and land reform: legal inconsistencies and the sources of violent conflict in the Brazilian amazon. **Journal of Environmental Economics and Management**, n. 39, p.162-188, 2000.
- \_\_\_\_\_. **Interest groups, information manipulation in the media, and public policy**: the case of the landless peasant's movement in Brazil. Cambridge: NBER, 2010. (Working Paper, n. 15865). Disponível em: <<http://goo.gl/x9tYMP>>.
- ALSTON, L. *et al.* Political institutions, policymaking processes and policy outcomes in Brazil. In: STEIN, E. *et al.* **Policymaking in Latin America?** How Politics Shapes Policies. Cambridge: Harvard University Press, 2008.
- \_\_\_\_\_. **Beliefs, leadership and critical transitions**: Brazil 1964-2014. Princeton: Princeton University Press, 2014.

ALVES, E.; ROCHA, D. P. Ganhar tempo é possível? In: GASQUES, J. G.; NAVARRO, Z. (Orgs). **A agricultura brasileira: desempenho, desafios, perspectivas.** Brasília: Ipea, 2010. p. 275-290.

CUNHA, R. E.; PINTO, B. H. C. **Programa Bolsa Família como estratégia para redução da pobreza e da desigualdade no Brasil e os processos de cooperação e coordenação intergovernamental na sua implementação.** In: CONGRESO INTERNACIONAL DEL CLAD SOBRE LA REFORMA DEL ESTADO Y DE LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA, 13. Buenos Aires, nov. 2008.

DE JANVRY, A.; FINAN, F.; SADOULET, E. Local electoral incentives and decentralized program performance. **The Review of Economics and Statistics**, v. 94, n. 3, p. 672-685, 2012.

HIDALGO, C.; HAUSMANN, R. The Building Blocks of Economic Complexity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 26, p. 10570-10575, June, 2009.

JORDAN, T. E. et al. Recommendations for Interdisciplinary Study of Tipping Points in Natural and Social Systems. **Eos Transactions American Geophysical Union**, v. 91, n. 16, p. 143-144, 2011.

LEVIN, S. et al. Social-ecological systems as complex adaptive systems: modeling and policy implications. **Environment and Development Economics**, n. 18, p. 111-132, 2013.

LINDERT, K. et al. **The nuts and bolts of Brazil's Bolsa Família Program:** implementing conditional cash transfers in a decentralized context. Washington: World Bank, 2007. (Discussion Paper, n. 709).

PAGE, S. **Understanding Complexity.** Ann Arbor: University of Michigan, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/WlTk4>>.

PIRES, R. **Efetividade das instituições participativas no Brasil:** estratégias de avaliação. Brasília: Ipea, 2011. (Diálogos para o Desenvolvimento, v. 7).

ROUSE, W. B. **Health care as a complex adaptive system:** implications for design and management. Washington: Spring, 2008.

SOARES, S. **Bolsa Família, its design, its impacts and possibilities for the future.** Brasília: IPC-IG, 2012. (Working Paper, n. 89).

## MÉTODOS DE COMPLEXIDADE APLICADOS AO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES<sup>1</sup>

Dick Ettema<sup>2</sup>

### 1 INTRODUÇÃO: SISTEMAS DE TRANSPORTES COMO SISTEMAS COMPLEXOS

Nas últimas décadas, as teorias da complexidade vêm apresentando um interesse crescente nas áreas científicas e de políticas públicas (Cilliers, 2001), de economia (Brian Arthur, 2007), de planejamento urbano (Batty, 2007; Bettencourt, 2014) e de transportes (Frazier e Kockelman, 2004). É importante notar que as cidades – nas quais os sistemas de transporte são parte constituinte – são cada vez mais consideradas como sistemas complexos (Bettencourt, 2014). A complexidade das cidades é definida por Bettencourt (2014) em cinco características: *i*) heterogeneidade; *ii*) interconectividade; *iii*) escala; *iv*) causalidade circular; e *v*) desenvolvimento. Se a heterogeneidade e a interconectividade referem-se a agentes individuais e a suas interações (*op.cit.*), o desenvolvimento e a causalidade circular concernem aos processos que ocorrem nas cidades, os quais se materializam, frequentemente, em níveis mais agregados, tais como os padrões de uso do solo, o crescimento econômico e os congestionamentos. Uma importante noção da complexidade das cidades pode ser notada quando o desenvolvimento ocorre como resultado das ações entre agentes em diversos domínios, fazendo com que o desenvolvimento urbano seja produto de interligados processos sociais, econômicos, tecnológicos e ecológicos.

De um modo mais formal, Manson (2001) menciona a noção relevante de complexidade agregada. Tal noção implica que o estado de um sistema, em um certo momento, é o produto do comportamento de elementos individuais (agentes) do sistema. O comportamento dos agentes é guiado por certas regras e por interações mútuas, mas estes não estão cientes do comportamento dos demais agentes deste sistema. Contudo, efeitos de retroalimentação (*feedback*) existem, no sentido de que os agentes podem individualmente responder ao estado agregado do sistema. A agregação de comportamentos individuais leva a produtos emergentes no nível do sistema agregado, os quais podem ser fortemente não lineares. De modo similar, forças externas ao sistema podem acionar uma cadeia

---

1. Traduzido por Cleandro Krause.

2. Utrecht University.

de respostas em nível individual, levando a uma mudança para um novo estado no nível do sistema (dissipação), por meio de uma série de efeitos de retroalimentação. A Revolução Industrial, deflagrada pela utilização de novas tecnologias, é um exemplo típico deste fenômeno. A esse respeito, é importante ressaltar a noção de que um sistema complexo não existe de modo isolado; pelo contrário, ele existe em um ambiente que exerce forças e que influencia o sistema complexo. Assim, uma decisão importante refere-se à maneira de como definir os limites do sistema, e se essas influências devem ser consideradas como externas ou parte do sistema em si.

Do que foi supracitado, entende-se que os sistemas de transporte têm propriedades de sistemas complexos. Eles contam com múltiplos agentes, incluindo os usuários do sistema (pedestres, ciclistas, passageiros de transportes coletivos, motoristas e passageiros de automóveis), que tomam decisões sobre se, quando, onde e qual modo de transporte se deve utilizar. Da agregação desses comportamentos, emergem características agregadas do sistema, tais como carregamentos de tráfego e níveis de congestionamento nas vias, bem como níveis de utilização ou ocupação dos sistemas de transporte público.<sup>3</sup> Os usuários, ao tomar decisões, respondem ao estado do sistema, podendo responder a níveis de congestionamento, mudando frequência de viagens, destinos, modos de transporte e horários das viagens. Por sua vez, as autoridades e os provedores de serviços também podem ser considerados agentes em um sistema de transportes complexo; isto porque decidem sobre a construção de infraestruturas e a provisão de serviços de transporte, respondendo, ao menos parcialmente, ao carregamento do tráfego e à ocupação dos veículos do transporte público. Ainda, em resposta a novas tecnologias, o sistema de transporte pode tornar-se dissipativo. Por exemplo, a produção de automóveis em linha de montagem e a subsequente motorização em massa levaram a uma mudança radical na divisão modal e na extensão das viagens em vários países (Van Wee, 2014). Este exemplo também ilustra a necessidade de definir apropriadamente os limites do sistema, uma vez que a motorização de massa não só causou, mas também foi estimulada pelo processo de expansão urbana. Isto sugere que um sistema de transporte pode ser delimitado de modo estendido, incluindo o desenvolvimento urbano, as decisões de localização residencial e os agentes imobiliários. Ao mesmo tempo, nota-se que desenvolvimentos na sociedade, na economia e na tecnologia, que emergem fora do campo dos transportes, podem exercer influência significativa no uso dos sistemas de transporte. Por exemplo, estilos de vida urbanos podem tornar-se mais aceitos entre adultos jovens, colocando menor ênfase no uso do automóvel e no carro enquanto símbolo de *status* (Frändberg e Vilhelmsen, 2014). As novas tecnologias de informação e comunicação (TICs) também podem propiciar novas formas de organizar as viagens, viabilizando a implementação de plataformas

3. *Patronage levels of public transport systems*, no original.

flexíveis, em internet móvel, para o compartilhamento de carros (*car sharing*) (Hansen *et al.*, 2010). Adicionalmente, o desenvolvimento econômico e sua manifestação especial – na forma da localização dos empregos – têm grande impacto na demanda (no tempo e no espaço) de viagens para trabalho e negócios, ainda que seja, inherentemente, de difícil previsão (Dawid, 2015). Por fim, mudanças nos hábitos de trabalho, combinadas com o aumento no uso de tecnologias de informação e comunicação, podem moderar os efeitos do desenvolvimento econômico nesses movimentos pendulares (Alexander, Ettema e Dijst, 2010; Aguilera, 2014).

Tradicionalmente, o planejamento de transportes buscou acomodar as demandas de viagens individuais, de modo a facilitar que fossem atingidos objetivos individuais, sociais e econômicos. As condições principais são, geralmente, garantir um nível mínimo de acessibilidade para todos e evitar congestionamentos, riscos à segurança e poluição que ameace a saúde. Tipicamente, tal planejamento seguiu abordagens de engenharia baseadas no princípio de que a demanda por viagens pode ser determinada (e prevista) a partir da distribuição da população, dos empregos e dos equipamentos. Neste sentido, os modelos de tráfego aplicados consideram a emergência de congestionamentos como uma agregação de decisões individuais sobre viagens. Contudo, a gama de efeitos complexos em um sistema de transportes e usos do solo é potencialmente muito maior, podendo englobar aspectos como poluição e saúde, mercados residenciais, efeitos de equidade e de exclusão, além de questões de sustentabilidade. Reconhecendo tal complexidade, os modelos de tráfego tradicionais foram estendidos, resultando em modelos de interações entre usos do solo e transportes (Luti, sigla em inglês para *land use transport interaction models*), que utilizam representações de indivíduos (baseadas em agentes), famílias, moradias e firmas. Se, por um lado, esses modelos podem levar em conta uma maior gama de interações e de efeitos de *feedback*, por outro, tal acréscimo de opções traz o custo de aumentar não só a necessidade de dados, mas também a incerteza sobre a validade dos resultados. Pode-se, também, apresentar críticas quanto à medida na qual os fatores mais importantes para as mudanças no comportamento de mobilidade<sup>4</sup> conseguem ser bem representados em modelos de tráfego ou modelos Luti baseados em agentes. Algumas questões cruciais que se colocam são: qual valor deveria ser dado aos modelos de transporte existentes no contexto da complexidade das cidades e dos sistemas de transportes? Como esses modelos podem ser aplicados de modo a explorar os efeitos de processos complexos, tanto internos como externos ao âmbito dos transportes, sobre os sistemas de transportes?

O objetivo deste capítulo é, portanto, proporcionar um panorama geral dos modelos de simulação de tráfego e transportes, bem como de suas opções

4. Entre os fatores mais importantes para as mudanças no comportamento de mobilidade, podem-se elencar o crescimento econômico, as mudanças em normas sociais e nos modelos de negócios das empresas de transporte etc.

em descrever efeitos complexos de políticas públicas ou tendências autônomas, e, também, discutir implicações para formuladores dessas políticas. O capítulo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 discute as características principais dos métodos de complexidade no planejamento de transportes. A seção 3 aborda aspectos de implementação relativos a esses métodos. A seção 4 apresenta implicações para os sistemas de transportes seguidas, na seção 5, de implicações para as cidades e a sociedade. Já a seção 6 traz a discussão de avanços recentes no desenvolvimento de sistemas complexos para os transportes.

## 2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS MÉTODOS DE COMPLEXIDADE PARA PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES EXISTENTES

Nas últimas décadas, várias ferramentas de suporte ao planejamento foram desenvolvidas divididas à complexidade dos sistemas de transportes, como descrito anteriormente. Essas ferramentas operam em diferentes escalas e consideram os distintos limites dos sistemas. Tais ferramentas serão discutidas a seguir, com crescente escala espacial e complexidade.

- 1) Modelos de simulação de tráfego.
- 2) Modelos de previsão de demanda de viagens.
- 3) Modelos Luti.

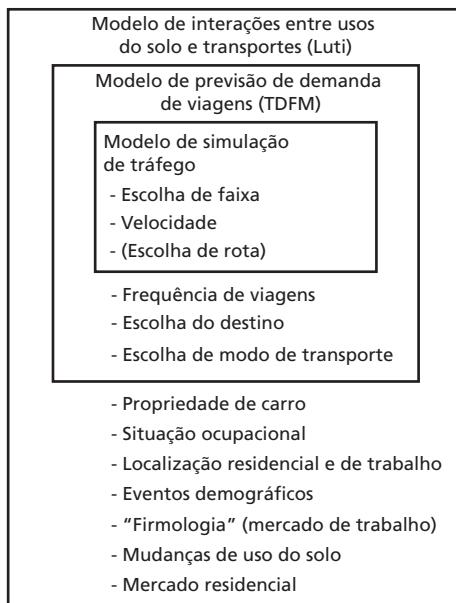
Pode-se conceber tais modelos como se estivessem embutidos um no outro, uma vez que um crescente número de decisões de agentes estaria sendo representado (figura 1). Como os modelos Luti, obviamente, abrigam a mais ampla gama de respostas, eles também consideram a maior variedade de efeitos complexos e emergentes, incluindo, especialmente, interações entre sistemas de transportes, de um lado, e mercados residenciais e de trabalho, frota de veículos, sistema energético e usos do solo, de outro. Desse modo, uma ênfase relativamente forte é colocada na discussão dos modelos Luti ao longo do capítulo.

### 2.1 Modelos de simulação de tráfego

Os modelos de simulação de tráfego (Barceló *et al.*, 2005; Rieser *et al.*, 2007) descrevem como os veículos, individualmente, se deslocam de uma certa origem para um certo destino em uma rede viária. Os modelos mais recentes incluem uma representação de cada veículo, equipada com um conjunto de regras de “comportamento”, tais como a escolha de velocidade e faixa de rolamento, em resposta à presença de outros veículos na via, escolha e ajuste da rota até o destino etc. Além disso, são atribuídos origens e destinos para cada veículo. Normalmente, tais modelos presumem que o número de viagens entre origens e destinos, assim como os horários de partida, já esteja definido *a priori*. Além dos veículos, os modelos

podem incluir representações de equipamentos como semáforos, que também podem responder de modo dinâmico aos veículos (simulados) na via.

**FIGURA 1**  
**Um sistema aninhado de modelos de transporte**



Elaboração do autor.

Os modelos de simulação de tráfego geralmente mostram características emergentes (carregamento de tráfego e velocidade por *link*) que resultam do comportamento individual dos veículos. Ainda que estas características também possam ser obtidas de algoritmos agregados que definam as relações entre carregamentos de tráfego e velocidades, estes modelos fazem isso com muito mais detalhes e, também, podem esmiuçar efeitos de rede, tais como filas de veículos bloqueando cruzamentos a montante etc. Modelos recentes são capazes de simular fluxos de tráfego baseados na representação individual de veículos em áreas urbanas extensas. Rieser *et al.* (2007) descrevem uma aplicação baseada na representação individual de veículos para toda a Suíça. Contudo, uma limitação importante dos modelos de simulação de tráfego é que decisões, tais como geração de viagens, escolha de destinos, modo de transporte e horário de partida, são exógenas, supondo que os indivíduos não respondam a congestionamentos nessas dimensões. Isso pode levar a uma superestimação de congestionamentos e tempos de deslocamento, uma vez que, na realidade, os indivíduos considerariam essas opções, de modo a evitar tempos excessivos de viagem.

## 2.2 Modelos de previsão de demanda de viagens

Além dos modelos de simulação de tráfego, os modelos de previsão de demanda de viagens (TDFMs, sigla em inglês para *travel demand forecasting models*) também descrevem geração de viagens e escolhas de destino, bem como modo e horário de partida (McNally, 2008; Yai, 1989). A versão tradicional dos TDFMs compreende modelos de quatro estágios que modelam os quatro aspectos de cada viagem – geração, destino, modo e rota – subsequentemente e de modo independente um do outro. Motivos diferentes para as viagens (deslocamentos casa-trabalho e casa-estudo, negócios e outros) também são modelados de forma independente. Isso resulta em uma matriz origem-destino de viagens que é, geralmente, um *input* dos modelos de simulação de tráfego. Os TDFMs (Algiers, 1995; Jovicic e Hansen, 2003) incluem um conjunto de modelos de escolha discreta que descrevem os comportamentos supracitados, em função de características pessoais e de características do sistema de transporte, tais como tempos e custos de viagem. Esses modelos são aplicados a uma representação da população em um sistema de zonas de tráfego, o que pode ser feito de distintas formas. Tradicionalmente, os modelos de frequência de viagens, destinos e modos são aplicados a um número de tipos de famílias e pessoas em cada zona, resultando em distribuições de probabilidades. Dados os números de cada tipo de famílias em cada zona, isto resulta em uma distribuição geral de viagens por destino e por modo. Mais recentemente, modelos baseados em agentes foram desenvolvidos com representação individual de viajantes e definidos por zona residencial e características socioeconômicas – tal como o modelo Ramblas (Veldhuisen *et al.*, 2000). Cada agente, frequência de viagem, destino e modo de transporte são determinados individualmente. Uma representação baseada em agentes das viagens traz a vantagem de maior flexibilidade e ligação mais simples a módulos que preveem aspectos, tais como, relocalização residencial, mudança de emprego etc. (conferir também a subseção 2.3.).

Os modelos TDFM podem ser considerados como métodos de complexidade no sentido de que as distribuições agregadas de viagem emergem de decisões (semi)individuais de frequência de viagem, escolha de destino e modo de transporte. Além disso, os modelos TDFM incluem efeitos de *feedback*, no sentido de que decisões individuais são afetadas por resultados no nível do sistema, ainda que os últimos se limitem a mudanças de tempo de viagem causadas por congestionamentos. Do mesmo modo que modelos de simulação de tráfego, os modelos TDFM geralmente tendem a desenvolver situações de equilíbrio, uma vez que os efeitos de *feedback* têm um efeito de mitigação: os congestionamentos levam a uma escolha por diferentes destinos, modos e tempos de viagem, o que, por sua vez, conduz a menores níveis de congestionamentos.

Os limites dos sistemas são traçados envolvendo a população atual e suas localizações residenciais, presumindo-se que suas regras de comportamento, bem como aspectos como a propriedade de veículos (taxa de motorização), sejam invariantes; sistemas de transportes e infraestruturas também são supostos como constantes. Como resultado, forças externas – tais como mudanças de tecnologia, de mercados residenciais e de trabalho, as quais podem levar a regras e padrões de comportamento radicalmente diferentes – não são muito bem representadas nesses modelos.

Nas últimas décadas, há uma tendência ativa em direção à substituição gradual dos modelos TDFM tradicionais de quatro estágios pelos chamados modelos de demanda de viagens baseados em atividades<sup>5</sup> (Ettema e Timmermans, 1997; Arentze *et al.*, 2000; Bowman e Ben-Akiva, 2000). Sem entrar em uma discussão detalhada dos aspectos técnicos dos modelos baseados em atividades, pode-se dizer que o mais importante princípio subjacente a esses modelos é derivado da participação em atividades, significando que, para entender as viagens, o padrão total de atividades deve ser levado em consideração. Isso traz várias consequências. Em primeiro lugar, as decisões sobre realizar uma viagem podem ser relacionadas às decisões sobre realizar outra viagem. O aspecto mais óbvio refere-se ao momento de cada viagem, que depende de um ordenamento de atividades. Contudo, as escolhas de destinos para várias atividades também podem ser interdependentes, por exemplo, se as viagens para compras dependerem da localização do trabalho. Outra dimensão (da maior parte) dos modelos baseados em atividades é que as decisões sobre viagens são tomadas no nível da família. Isto implica a alocação de certas atividades (por exemplo, viagens para compras ou viagens para levar alguém) a membros específicos da família e, também, a decisão de quem utilizará os veículos da família. Em comparação com os modelos de quatro estágios, os baseados em atividades evidentemente incluem uma gama maior de modelos estatísticos, tais como os de encadeamento de viagens, os de agendamento de atividades e os de uso do tempo.<sup>6</sup> Em consequência, os modelos baseados em atividades são mais aptos a representar alguns efeitos emergentes, nos casos em que políticas públicas em um âmbito apresentam implicações em outro âmbito. Por exemplo, modelos baseados em agentes têm o potencial de prever efeitos de mudanças em regimes temporais (turnos escolares ou de trabalho) sobre os momentos das respectivas viagens, ou o efeito do trabalho feminino sobre o comportamento de compras masculino, ou ainda o efeito de decisões sobre os locais de compras sobre o movimento pendular.

5. *Activity-based travel demand models*, no original.

6. No original, *trip chaining models, activity-scheduling models and time use and duration models*.

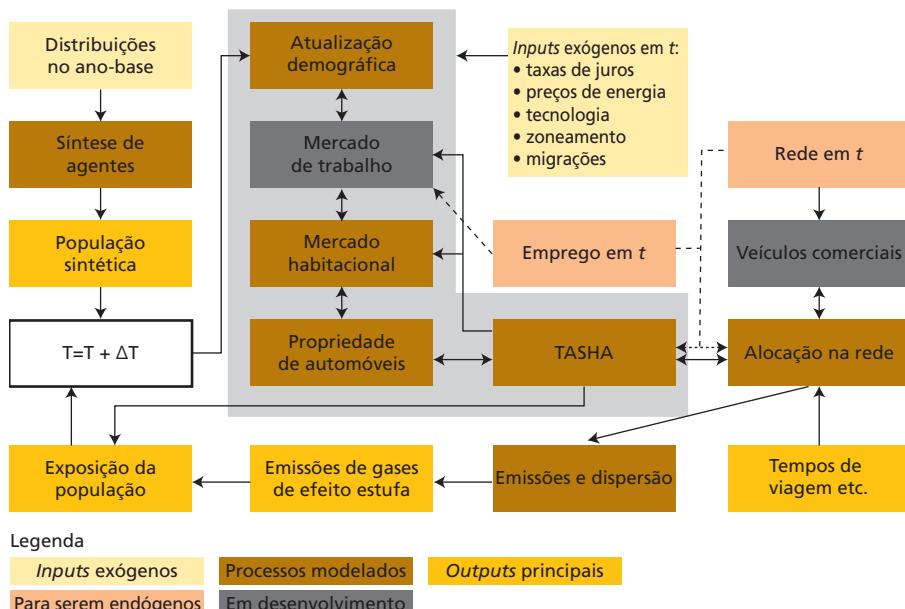
### 2.3 Modelos Luti

Os modelos Luti (Wegener, 2013) incluem uma representação do comportamento de mobilidade por meio de um modelo TDFM, mas tal representação está “implantada” no modelo Luti, interagindo com uma representação da distribuição espacial de pessoas, empregos e atividades econômicas. Basicamente, estes modelos descrevem processos demográficos das famílias (taxas de natalidade e mortalidade, formação e dissolução de famílias), decisões de localização (residência, emprego e mudanças no tipo de trabalho) e decisões de propriedade de veículos, assim como processos econômicos (desenvolvimento de oferta de empregos em diferentes localizações, variações de preços da terra e desenvolvimento urbano). Esses processos são influenciados pelos tempos de viagem e pelos níveis de acessibilidade descritos por um modelo TDFM “implantado”. Na maioria dos casos, os desenvolvimentos dos mercados econômicos e residenciais são representados por modelos econômicos *input-output*; recentemente, sistemas de simulação baseados em agentes – tais como o Urban Simulation (UrbanSim) (Borning Waddell e Förster, 2008), o The Integrated Land Use, Transportation, Environment (Ilute) (Chingcuanco e Miller, 2012) e o Integrated Land-Use Modelling and Transportation System Simulation (Illumass) (Strauch *et al.*, 2005) – foram desenvolvidos.

Como exemplo de um modelo Luti baseado em agentes, a estrutura do sistema Ilute está apresentada na figura 2. O Ilute (Chingcuanco e Miller, 2012) inclui uma representação das famílias – constituídas por pessoas – definida por idade, gênero, escolaridade, ocupação e posse de automóvel. Adicionalmente, há representações individualizadas das moradias (definidas por tipo, tamanho, localização e valor de venda ou aluguel), das firmas que oferecem empregos (especificando-se níveis de experiência e conhecimento) e de proprietários e empreendedores que tomam decisões sobre desenvolvimento imobiliário e mudanças no uso do solo. Um pacote de modelos é implementado para descrever o comportamento de pessoas e famílias, o que, geralmente, implica alguma forma de interação com outros tipos de agentes. Um modelo baseado em atividades (Tasha, sigla em inglês de *travel/activity scheduler for household agents*) está incluído, descrevendo atividades e decisões de viagens das famílias e das pessoas (subseção 2.2). Um modelo de simulação demográfica descreve o envelhecimento das pessoas ano a ano e eventos como falecimentos, nascimentos, casamentos, bem como formação e dissolução de famílias. Dada a estrutura baseada em agentes, isto implica a existência de um “mercado” de solteiros e de um mecanismo de aproximação de parceiros. Para descrever decisões de localização e relocalização, um módulo de simulação do mercado habitacional acompanha a vacância e a ocupação de moradias, assim como a combinação de unidades vagas e de famílias que estão buscando outra moradia. É importante notar que esse mecanismo de combinações implica um sistema de atribuição

de preços que responde à oferta e à demanda por moradias de diferentes tipos em variadas áreas. De modo semelhante, outro módulo descreve o desenvolvimento de firmas e de empregos como função de tendências econômicas maiores (Harmon, 2014), combinando indivíduos com certo nível de habilidade e experiência a empregos e seus requisitos. O Ilute – assim como outros modelos Luti baseados em agentes, tais como UrbanSim – está constituído de forma modular, permitindo relacionar-se, de modo relativamente simples, com outros modelos dedicados. Por exemplo, o Ilute foi associado a modelos de emissões, de modo a prever a exposição de indivíduos a poluentes durante seus padrões de atividades diárias, bem como a modelos de consumo domiciliar de energia, de maneira a prever o consumo urbano de energia.

**FIGURA 2**  
**Representação do sistema de modelos Ilute**



Fonte: Chingcuanco e Miller (2012).

Fica claro que os modelos Luti também podem ser considerados como sistemas complexos. Eles representam a maior gama de reações potenciais a mudanças na economia, na demografia e no sistema de instituições, não apenas por indivíduos e famílias, mas também por agentes econômicos, empreendedores e formuladores de políticas públicas. As famílias podem, por exemplo, decidir pela realocação, mudar de empregos, ou comprar/vender veículos em resposta a mudanças de acessibilidade. Do mesmo modo, as modificações na localização de empregos, que resultam de mudanças de acessibilidade, podem

ser representadas, assim como mudanças nos preços das moradias ou no desenvolvimento urbano. Como resultado, os modelos Luti baseados em agentes, por um lado, apresentam menos chances de desenvolver estados de equilíbrio que sejam relativamente semelhantes ao estado inicial; por outro, têm mais chances de representar transições para estados fundamentalmente diferentes. Tendo em vista que os modelos Luti descrevem o desenvolvimento urbano, as decisões de propriedade de veículos e o comportamento de mobilidade, tais modelos também são capazes de descrever processos – relacionados e que se reforçam – de crescente taxa de motorização e de espraiamento urbano (*sprawl*).

Outra característica importante dos modelos Luti baseados em agentes é seu caráter dinâmico. O fato destes modelos simularem mudanças no desenvolvimento urbano, na demografia, nas localizações residenciais e de empregos, bem como nos padrões de viagens ao longo dos anos, implica que as decisões dos agentes no ano  $t+1$  são condicionais às características agregadas do sistema (tempos de viagem, preços, oferta de moradias e de empregos etc.) no ano  $t$ , as quais, por sua vez, são acumuladas a partir das decisões individuais dos agentes. Tal abordagem dinâmica permite modelar a dimensão temporal das respostas às políticas públicas. Verificou-se, por exemplo, que as respostas à realocação de escritórios, em termos de escolha de modo de transporte, têm um retardamento de até cinco anos, uma vez que uma resposta comportamental pode necessitar de mudanças na organização das famílias, na propriedade de carros ou na realocação residencial. Enquanto os modelos de equilíbrio tradicional teriam previsto mudanças imediatas para um novo equilíbrio, os modelos dinâmicos baseados em agentes são mais aptos a descrever os processos graduais que levam a um resultado final.

### 3 QUESTÕES DE IMPLEMENTAÇÃO

O desenvolvimento de modelos de simulação de tráfego, TDFMs e Luti pode ser dividido em dois grandes componentes:

- 1) Desenvolvimento de uma representação das estruturas e dos agentes relevantes.
- 2) Desenvolvimento de uma representação das regras de comportamento dos agentes, de suas interações mútuas e de efeitos relevantes de *feedback*.

Uma vez desenvolvido o modelo, é necessário calibrá-lo, de modo a verificar se os resultados são gerados com um grau razoável de confiabilidade. Finalmente, é necessário desenvolver cenários para a aplicação, de modo a se avaliar políticas públicas alternativas. Esses estágios serão discutidos a seguir.

### 3.1 Representação de estruturas e agentes

As estruturas a serem representadas dependem do tipo de modelo. No caso dos modelos de simulação de tráfego, a estrutura inclui uma representação da rede viária, não só em termos de nós viários e outros *links*, mas também no tocante às características destes *links*, tais como velocidade e leiaute (por exemplo, largura). Tais dados, em muitos casos, estão disponíveis nos órgãos de planejamento em formato digital. A depender da especificação, a estrutura também pode incluir equipamentos de sinalização como semáforos. O *software* que gerencia os equipamentos de sinalização, atualmente, pode ser conectado diretamente a sensores físicos, bem como a um *software* de simulação de tráfego. Além disso, as zonas de origem e as de destino são definidas, assim como o número de veículos que trafegam pela rede entre essas zonas. Dependendo da escala da aplicação (desde uma única trajetória até uma região inteira), matrizes OD podem ser derivadas de contagens de tráfego ou de algum modelo TDFM existente. Os agentes principais são, portanto, os veículos, cujos condutores são equipados com regras de comportamento (subseção 3.2).

Nos modelos TDFM, a estrutura inclui uma representação da área, dividida em zonas de tráfego – as quais incluem populações específicas –, produzindo um certo número de viagens com vários motivos. Ainda, é necessária uma representação de tempos de viagem por vários modos de transporte em diferentes momentos do dia. Para o transporte público, esses tempos são derivados de tabelas de horários existentes (e possivelmente ajustadas, de modo a representar cenários). Para veículos privados, as informações provêm de tempos de viagem calculados em uma rede (por exemplo, aqueles utilizados em modelos de simulação de tráfego). Se necessário, os tempos podem ser ajustados com base em resultados de simulações de tráfego, de modo a levar em conta os efeitos de congestionamentos sobre os tempos de viagem.

Com base em uma representação da área de estudo em zonas, para os modelos Luti baseados em agentes, as estruturas adicionais são necessárias. Geralmente, essas estruturas incluem não apenas famílias e indivíduos com sua situação de ocupação, propriedade de veículos e renda, mas também representações do mercado residencial e da economia (firmas e empregos) em cada zona. Os modelos baseados em agentes requerem uma população de famílias vistas individualmente e com todas as características relevantes especificadas no nível das pessoas. Contudo, esses dados raramente estão disponíveis em registros oficiais. A abordagem mais comum, assim, é usar populações sintéticas (Zhu e Ferreira, 2014). Ao sintetizar populações, um conjunto de indivíduos com características específicas é gerado, de modo que as distribuições agregadas de idade, gênero, escolaridade etc. sejam equivalentes às distribuições reais. O método mais usado para gerar populações sintéticas é o ajuste

proporcional iterativo,<sup>7</sup> o qual pode ser aplicado a famílias/pessoas, bem como a unidades habitacionais. Essencialmente, esta abordagem pode ser usada para firmas; porém, dado que o número de firmas por zona é muito menor, pode haver dificuldades. Assim, o Ilute e o UrbanSim modelam o mercado de trabalho como uma população de empregos ao invés de uma população de firmas que oferecem empregos. De modo similar, e ainda que o desenvolvimento urbano e a mudança de uso do solo resultem de decisões tomadas por agentes como os formuladores de políticas públicas – os empreendedores imobiliários, por exemplo –, tais decisões são muito menos frequentes e de natureza mais complexa que, por exemplo, as decisões de realocação das famílias e as decisões individuais sobre qual modo de transporte utilizar. Assim, lida-se geralmente com esses processos de modo mais estilizado. Para cada zona ou lote, a abordagem mais comum é modelar a probabilidade de mudança para outro tipo de uso do solo. Várias abordagens estatísticas (versões de modelos de escolha discreta) foram utilizadas para tal (Zöllig Renner e Axhausen, 2013; Shen *et al.*, 2014; Bhat *et al.*, 2014).

### **3.2 Desenvolvimento de regras de comportamento e efeitos de feedback**

Em modelos de simulação de tráfego, os condutores dos veículos são equipados com regras relativas à escolha de velocidade, faixa de rolamento e percurso. Estas regras podem ser derivadas de experimentos em que condutores são observados em simuladores, mas são mais comumente escolhidas por quem faz a modelagem, baseadas em sua experiência prévia sobre como chegar a um resultado realista. O *feedback* é modelado automaticamente, dado que os veículos respondem à posição e à velocidade de outros veículos na rede.

Nos modelos TDFM, as regras de comportamento compreendem escolhas sobre: *i*) realizar uma viagem com um motivo específico; *ii*) o horário de partida da viagem; *iii*) o destino; e *iv*) o modo de transporte. Geralmente, essas escolhas são modeladas com modelos de escolha discreta econômicos, que descrevem as escolhas como um resultado das características das alternativas de escolha. A versão tradicional desses modelos era o modelo multinomial logit (MNL), o qual tinha, contudo, a propriedade indesejável de que a quota das probabilidades de escolha de duas alternativas independe da presença de uma terceira alternativa – o que é conhecido como problema do ônibus vermelho/ônibus azul.<sup>8</sup> O fato dessa propriedade ser indesejável reside em que se espera que as alternativas que tenham mais características em comum (por exemplo, ônibus e bonde) sejam substitutas, frente a uma alternativa com mais diferenças (por exemplo, carro). Além disso, escolhas de viagens em dimensões diferentes são, tradicionalmente, supostas como

7. *Iterative proportional fitting*, no original.

8. *Red bus/blue bus problem*, no original.

independentes uma da outra (por exemplo, descritas por modelos MNL separados), ainda que, na realidade, elas possam relacionar-se. Por exemplo, o modo de transportes pode depender da escolha do destino, e vice-versa. Para conseguir dar conta desses efeitos de substituição e de interdependência, as especificações de modelos mais avançadas foram desenvolvidas, tais como os modelos logit *nested* (Ben-Akiva e Lerman, 1985) e os modelos logit mistos (Hess e Polak, 2006). Além disso, nos contextos de escolhas espaciais, os modelos MNL têm falhas na consideração da autocorrelação especial, o que levou ao desenvolvimento de modelos de escolha de valor extremo generalizado (*generalized extreme value* – GEV) alternativos (Bekhor e Prashker, 2008).

Os parâmetros dos modelos de escolha devem ser estimados com base em escolhas observadas. Essas podem ser as efetivamente feitas, registradas em *surveys* ou diários de viagens (preferência revelada), e, também, as escolhas feitas sob condições hipotéticas, obtidas em *surveys* (preferência declarada). O mecanismo de *feedback* principal é a resposta aos congestionamentos por parte de quem viaja, o que é representado ajustando-se o tempo de viagem dos veículos aos congestionamentos, seguindo-se a alocação de tráfego, que, por sua vez, influenciará a escolha de fazer a viagem, o destino, o horário de partida e o modo, a depender do tempo do coeficiente do tempo de viagem.

Os modelos Luti baseados em agentes incluem modelos adicionais para o comportamento das famílias (propriedade de carro, localização e tipo residencial, bem como tipo de ocupação/emprego) que são, geralmente, baseados também em modelos de escolha discreta. Neste caso, são comumente calcados em escolhas observadas, o que é obtido por *surveys*. Também se supõe que o mercado residencial e o desenvolvimento econômico sigam regras específicas. Uma discussão detalhada da calibragem desses modelos vai além do escopo deste capítulo, de modo que se recomenda ao leitor que busque Chingcuanco e Miller (2012), Strauch *et al.* (2005), Borning, Waddell e Forster (2008) e Ettema *et al.* (2007).

### 3.3 Desenvolvimento de cenários

Os modelos complexos de tráfego e de viagens são utilizados para fazer previsões sobre os resultados de intervenções ou sobre o que se supõe do futuro. As previsões geralmente tratam dos carregamentos de tráfego em vias ou dos níveis de utilização do transporte público. Usualmente, o objetivo não é tanto fazer previsões de resultados exatos, e sim obter *insights* sobre as diferenças entre alternativas de política pública distintas. De qualquer modo, usar um modelo de tráfego ou de transporte requer que as estruturas e os agentes sejam especificados para uma situação futura. É comum que a infraestrutura e os serviços de transportes sejam especificados de acordo com as intervenções cujos efeitos se desejam prever. Contudo, outros *inputs*, tais como a população por zona, o desenvolvimento de firmas, os empregos e as áreas residenciais,

também precisam ser especificados. Para tanto, os responsáveis pela modelagem dependem, geralmente, de previsões externas obtidas de modelos demográficos e econômicos, assim como de planos que especifiquem o desenvolvimento almejado de áreas residenciais e comerciais nos anos vindouros. Para horizontes de previsão crescentes, é útil compor diferentes cenários, por exemplo, de desenvolvimento econômico, de modo a testar os resultados sob diferentes circunstâncias externas.

Na prática, cenários de previsão de demanda de viagens são frequentemente baseados em extrapolações de tendências demográficas e econômicas vigentes. Por exemplo, Arentze *et al.* (2008) previram as implicações para os transportes de uma população em processo de envelhecimento, com base em extrapolações da participação da força de trabalho e em parâmetros de comportamento. Esses exercícios geralmente têm o objetivo de prever um resultado aproximado, como uma mudança relativamente marginal da situação vigente ou de um cenário de linha de base. Contudo, tratando-se das cidades – de seus sistemas de transportes e de usos do solo – como sistemas complexos, sugere-se que as interações entre os vários componentes dos sistemas e os agentes poderiam levar a resultados inesperados, que difeririam fundamentalmente de simples extrapolações. Exemplos dessas interações incluem os efeitos das TICs nas viagens pessoais e de entrega de mercadorias que, dependendo do contexto, podem substituir, modificar ou estimular estas viagens (Mokhtarian, 2009). Os modelos TDFM e Luti não são muito adequados para representar tais interações, de modo que seu uso, para explorar esses cenários, exigiria a formulação de premissas adicionais que deveriam ser incluídas na estrutura dos modelos. De maneira similar, Cervero (2006) aponta que os modelos TDFM convencionais não são muito apropriados para capturar os efeitos de estratégias de uso do solo em escalas de vizinhança, defendendo o uso de extensões dedicadas aos modelos tradicionais que representem as interações entre as características das vizinhanças e o comportamento de mobilidade.

#### 4 BENEFÍCIOS DA MODELAGEM PARA OS SISTEMAS DE TRANSPORTES

Os transportadores e os fornecedores de infraestrutura podem se beneficiar de simulações de tráfego e dos modelos TDFM e Luti de várias maneiras. Basicamente, esses modelos permitem *insights* sobre os efeitos de variáveis operacionais como preços, velocidades e frequências em diferentes cenários, o que permite aos provedores investirem da forma mais eficiente em infraestruturas e serviços de transporte. A eficiência pode ser definida tanto em um sentido puramente econômico, como para a sociedade em seu conjunto. Em sentido econômico, os modelos podem prever quantas pessoas utilizarão um serviço (por exemplo, uma linha de ônibus ou uma rodovia pedagiada) e quais serão as receitas obtidas. Assim, a lucratividade dos investimentos poderá ser estimada *a priori*. Em um sentido social, os benefícios dos investimentos poderão ser avaliados. Por exemplo, os efeitos de uma nova infraestrutura ou de um novo serviço poderão ser medidos, na forma

de mudanças em frequências de viagens, usos de diferentes modos de transporte e, consequentemente, modificações em níveis de congestionamento e tempos de viagem. Tanto os ganhos em tempo de viagem quanto a acomodação da chamada demanda latente são considerados benefícios sociais frequentemente quantificados em valores monetários, por meio de métodos de disposição a pagar. Isto permite que as autoridades comparem os investimentos com as benfeitorias à sociedade, em análises de custo-benefício.

Outro benefício dos modelos de tráfego e de transportes é a possibilidade de explorar comportamentos de mobilidade, carregamentos de tráfego e congestionamentos sob diferentes cenários de longo prazo – por exemplo, dados diferentes sobre cenários demográficos e socioeconômicos. Os modelos podem indicar em que medida um sistema de transporte pode dar suficiente acessibilidade, de modo que os cidadãos tenham suas necessidades atendidas; e, também, podem indicar se o sistema tem sustentabilidade econômica em cenários de mudança de renda, transição demográfica e desenvolvimento urbano.

## 5 MODELAGEM DE IMPACTOS PARA A CIDADE E PARA A SOCIEDADE

Na seção precedente, foi discutida a avaliação de resultados para os sistemas de transportes; nesta, será mostrado que os modelos de tráfego e de transportes também podem ser usados para avaliar o impacto das políticas públicas e de mudanças isoladas (*autonomous developments*) sobre questões urbanas e da sociedade, vistas de modo mais amplo.

Em primeiro lugar, os modelos de tráfego e de transportes podem ser usados para avaliar mudanças na acessibilidade – devido a modificações nos níveis de congestionamento. Por exemplo, ao planejar a expansão urbana em certo setor, os modelos de transportes podem indicar os volumes de viagens esperados e, também, a acessibilidade dos novos moradores a serviços específicos. Essas mudanças na acessibilidade podem ser relacionadas ao acesso a determinados serviços, para grupos específicos, tais como a acessibilidade a serviços de saúde para grupos não motorizados ou vulneráveis (Nemet e Bailey, 2000). Assim, por um lado, questões sociais mais específicas podem ser contempladas, incluindo considerações sobre equidade. Por outro lado, a acessibilidade é relevante para os provedores dos serviços, de modo a determinar sua área de atendimento e o potencial de mercado. Por exemplo, o comércio varejista pode usar medidas de acessibilidade para estabelecer o número de consumidores em potencial; as firmas, por sua vez, podem estar interessadas na acessibilidade a trabalhadores qualificados, dentro de um certo tempo de viagem. Assim, os modelos de tráfego e de transporte podem ser utilizados para avaliar se uma região manter-se-á economicamente viável e atrativa para as firmas, do ponto de vista do transporte.<sup>9</sup>

9. Ver, entre outros autores, Wheaton (2004), que realizou um esforço de modelagem mais estilizado.

Em segundo lugar, os modelos de tráfego e transporte preveem fluxos de tráfego que, por sua vez, trazem efeitos negativos, como poluição e ruído locais. As previsões servem, assim, para calcular concentrações de poluentes e volumes de ruído, de modo a se poder avaliar as consequências da sua exposição e para a saúde pública. Ao relacionar esses resultados à concentração especial de diferentes segmentos da população, por exemplo, podem ser determinadas as ameaças à saúde de grupos vulneráveis (conferir, entre outros, Pearce, Kingman e Zawar Reza, 2006). Hatzopoulou, Miller e Santos (2007) integraram um modelo de viagens baseado em atividades (Tasha) a modelos de emissões, de modo a obter quantificações dinâmicas e detalhadas de emissões geradas por tráfego, localização e hora do dia. Além disso, os autores confrontaram essas emissões com as localizações das pessoas, de acordo com seus padrões de atividade simulados, em vez de suas localizações residenciais, de modo a obter uma estimativa mais realista do impacto das emissões.

Por fim, como os modelos de tráfego e de transporte preveem as viagens conforme vários modos de transporte, também é possível utilizá-los para avaliar em que medida as pessoas usarão modos de transporte ativos, tais como a caminhada e a bicicleta. Dada a preocupação mundial com o sobrepeso e a obesidade, o transporte ativo é cada vez mais tido como uma forma importante de combater esses efeitos, como foi indicado em numerosos estudos (Saelens e Handy, 2008; Boarnet *et al.*; 2011; Van Wee, 2014). Avaliar os efeitos de intervenções de uso do solo e de transporte sobre o transporte ativo é, portanto, um benefício importante dos modelos de transporte.

Isso se aplica, de modo geral, às políticas públicas que buscam comportamentos de mobilidade mais sustentáveis. Enquanto uma mudança de modos de transporte menos sustentáveis (carro) para mais sustentáveis (transporte público, bicicleta e caminhada) pode ser efetivada por meios econômicos (Bonsall e Willumsen, 2014). As políticas de uso do solo são tidas cada vez mais como um caminho promissor para práticas de mobilidade mais sustentáveis (Van Wee e Handy, 2014). Dado que os modelos de tráfego e os TDFMs descrevem comportamentos de escolha do modo de transporte baseados na distribuição espacial das moradias das pessoas e seus destinos em potencial, eles podem ser valiosos para avaliar políticas de uso do solo que tenham como objetivo uma mudança para modos mais sustentáveis.

Como discutido anteriormente, os modelos Luti ampliam o conjunto de respostas, em comparação com os modelos TDFM, uma vez que permitem apontar como resultados certas mudanças na propriedade de veículos, localização residencial e mudança de emprego. Isso é relevante, uma vez que foi verificado que as respostas das pessoas e das famílias consideram uma variedade de estratégias

que facilitam um padrão de mobilidade desejado e que respondem a mudanças em condições pessoais (Oakil *et al.*, 2014; Cao e Mokhtarian, 2005). Além disso, os modelos Luti permitem investigar as interações com outros mercados, tais como o residencial, o imobiliário em geral, o de trabalho e a economia regional, os quais podem responder a mudanças no contexto dos transportes, assim como influenciá-lo. A literatura apresenta alguns exemplos do valor agregado dos modelos Luti.

Erdogan *et al.* (2013) utilizaram um modelo Luti para mostrar como as mudanças nos preços dos combustíveis têm efeitos diretos não apenas sobre a frequência de viagens e as escolhas de modo e destino, mas também sobre escolhas de mais longo prazo, como as localizações residenciais e de trabalho. Por meio dos mercados imobiliário e de habitação, preços mais altos dos combustíveis podem mesmo levar a maiores densidades urbanas.

Contudo, as políticas de infraestrutura também podem ter efeitos indiretos por meio de seus impactos sobre as decisões locacionais de famílias e firmas. Guerra (2014) descreve um estudo empírico da extensão do metrô (linha B) na Cidade do México. O autor relata que a extensão do metrô atraiu um número significativo de novos passageiros que não usavam o automóvel anteriormente. Houve efeitos no uso do solo sob a forma de densificação do comércio ao redor das novas estações do metrô. Mais uma vez, os modelos Luti mostraram-se uma ferramenta promissora para avaliar tanto o transporte como os efeitos sobre o uso do solo.

Outro tópico muito relevante é o efeito de níveis de renda crescentes, em países em desenvolvimento, levando a forte crescimento na propriedade de veículos, em países como Colômbia (Gómez-Gélvez e Obando, 2013), China (Cervero e Day, 2014) e Brasil. É notável que os efeitos variem conforme o contexto. Enquanto Gómez-Gélvez e Obando (2013) mostram que a propriedade de automóveis em Bogotá cresceu principalmente como resultado de um crescimento no número de famílias, no contexto chinês o que cresceu substancialmente foi o número de carros por família, levando a um crescimento dos subúrbios e do espraiamento urbano. Cervero e Day (2014) concluem que o desenvolvimento urbano orientado pelo transporte público (TOD)<sup>10</sup> pode contribuir para, ao menos, mitigar o crescimento massivo de uso e propriedade de automóveis na China. Contudo, quantificar o efeito de TOD exige modelar, conjuntamente, os efeitos da propriedade de carros pelas famílias e das decisões de localização, assim como sua mobilidade quotidiana, uma vez que os congestionamentos podem ter um impacto significativo nessas decisões. Para tanto, os modelos Luti podem mostrar-se uma ferramenta útil no sentido de avaliar os efeitos conjuntos desse tipo de desenvolvimento urbano.

---

10. Sigla em inglês de *transit oriented development*.

## 6 INOVAÇÕES E DESAFIOS DA MODELAGEM DE TRANSPORTES

Os modelos complexos de transportes passaram por várias inovações nas últimas décadas, a maior parte das quais se inclui em uma tendência de crescente complexidade – em termos de mais interações e *feedback* entre elementos dos sistemas – e maior detalhamento, que se reforçam mutuamente.

Os modelos de simulação de tráfego se beneficiaram de avanços de capacidade computacional e de organização de dados, de modo que se tornaram cada vez mais capazes de modelar regiões maiores e, no caso da Suíça, até um país inteiro (Meister *et al.*, 2010).

Nos modelos TDFM, observam-se duas tendências importantes: primeiramente, uma passagem do modelo tradicional de quatro estágios – no qual as viagens eram modeladas independentemente umas das outras – para modelos baseados em atividades, nos quais as viagens fazem parte dos padrões de atividades. Isso tem uma implicação importante, no sentido de que o agendamento das viagens se torna mais realista e o seu momento pode ser previsto com mais precisão. Modelos baseados em atividades recentes, como o Tasha, foram estendidos, criando-se agendas de atividades não só no nível dos indivíduos, mas também para as famílias, o que implica que as interações destas podem ser modeladas com mais confiabilidade. Uma segunda tendência aponta para a plena microssimulação individual, em vez de se produzir distribuições para segmentos específicos de população por zona. Esta tendência é facilitada pela crescente capacidade de computação e armazenagem de dados.

Por fim, os modelos complexos de transportes beneficiam-se de dados cada vez mais detalhados, os quais se tornam cada vez mais disponíveis no presente, incluindo dados sobre a infraestrutura de transportes e os usos do solo, com detalhamento até o nível do parcelamento da terra (lote). Combinados à representação individual de agentes (pessoas que realizam as viagens), isto permite uma representação mais detalhada e mais variada de seu comportamento de mobilidade.

Dado o progresso na modelagem de transportes e usos do solo no período recente, pode-se questionar como o “estado da arte” dos modelos de transportes e utilização do solo deveria ser julgado no contexto mais amplo da complexidade das cidades, da qual os sistemas de transporte são uma parte. Uma questão essencial a este respeito é se os transportes deveriam ser considerados um problema simples ou um complexo (Bettencourt, 2014). Um problema simples é aquele que é bem definido em termos de métricas de desempenho e que oferece ações rápidas e diretas para movê-lo em direção ao estado final desejado. Um problema complexo, por sua vez, envolve muito mais interações, causalidades circulares e um vasto espaço de problema, com muitas incertezas (*op.cit.*). Em consequência, saber quais ações podem ser usadas para influenciar o sistema, e qual serão seus efeitos, é muito menos evidente.

O fato é que, tradicionalmente, os planejadores abordaram o planejamento de transportes como um problema simples, supondo que a demanda e o comportamento de mobilidade seguiriam, de modo simples, a organização espacial e as características do sistema de transporte. Por exemplo, as mudanças no tempo ou no custo de viagem levariam a modificações nos volumes de viagem e na distribuição modal, de forma bem definida e esperada. Além disso, os planejadores supuseram que os sistemas de transportes tenderiam a um estado de equilíbrio, em vez de colocarem o foco no desenvolvimento dos sistemas em resposta a forças externas. Em particular, utilizaram um pequeno conjunto de variáveis explanatórias, extrapolando correlações presentes para condições futuras e supondo invariantes as preferências e as necessidades de quem viaja.

É certo que essa abordagem teve muitos méritos ao proporcionar *insights* para o planejamento de infraestruturas em situações concretas. Contudo, ela tem limitações sobre como pensar os sistemas de transportes em um futuro incerto. De fato, a complexidade das sociedades urbanas leva a desdobramentos que fazem as premissas – sobre as quais os modelos de transportes e Luti foram construídos – serem questionadas. Mudanças na composição da população, em parte devido a migrações internacionais, levam a mudanças nas necessidades e nas preferências das pessoas, o que também se aplica à mobilidade. De modo mais geral, normas sociais quanto a estilos de vida sustentáveis e saudáveis podem mudar, com implicações para o uso destes modos de transporte sustentáveis. Processos sociais complexos de opinião e difusão de normas (Tessone, 2014) podem ter um papel importante. Além disso, com o uso de plataformas móveis de TICs, a organização de serviços de transporte pode ter mudanças fundamentais, levando a iniciativas de baixo para cima, tais como programas de compartilhamento de carros e caronas (Hansen *et al.*, 2010). Neste caso, as interações sociais também estimulam a difusão e a adoção desses sistemas. A maior difusão de ferramentas e serviços móveis de TICs pode não só mudar a organização do trabalho e da esfera privada, mas também levar a mudanças nas maneiras como se percebe o tempo de viagem e em como são tomadas as decisões de viagens (Lyons, Jain e Holly, 2007). Por fim, o desenvolvimento de veículos elétricos e automatizados poderá transformar radicalmente o modo como se escolhe viajar e usar o tempo de viagem e, também, mudar as decisões sobre ter, compartilhar ou alugar um veículo (Pendyala, 2014). Contudo, e reiterando, a velocidade e a extensão na qual esses novos sistemas serão difundidos resultam de processos sociais e econômicos complexos. Cada um dos supracitados poderá ter um impacto significativo ou muito grande na mobilidade futura. Porém, os modelos de transportes e Luti existentes não são equipados para lidar com eles, uma vez que os modelos estão baseados na extração da organização presente dos sistemas, bem como em necessidades e preferências vigentes.

A questão, portanto, trata de quais ferramentas os planejadores de transportes poderão usar para explorar e antecipar esses futuros incertos. A primeira opção seria os modelos Luti baseados em agentes, aplicados a análises específicas de sensibilidade. Em vez de tentar prever o resultado exato, pode-se buscar encontrar conjuntos de parâmetros e *inputs* que levem a mudanças radicais nos transportes e nos usos do solo; em outras palavras, que conduzam a um resultado dissipativo. Dados esses conjuntos dissipativos, o próximo passo compreenderia uma análise exploratória de como essas mudanças nas preferências e nas variáveis de *input* podem ocorrer. Por exemplo, um baixo valor de tempo de viagem para usuários de carros poderia ser trazido pelo lançamento de veículos automáticos, que permitissem atividades de trabalho ou de lazer durante os deslocamentos. Em outro exemplo, custos extremos de transportes poderiam ser relacionados à escassez de combustíveis fósseis. Tais análises poderiam dar *insights* aos planejadores, no que se refere a quais fatores seriam mais prováveis de levar a grandes mudanças nos sistemas de usos da terra e transportes. Uma segunda opção para explorar futuros incertos seria estudar, especificamente, a difusão de novas tecnologias e formas de organização, tais como os esquemas de compartilhamento de veículos, ou os carros elétricos. Usando modelos de difusão de mercados (Shaheen e Cohen, 2007; Janssen e Jager, 2002), as chances de esses desenvolvimentos se tornarem correntes, e de serem estimulados por políticas públicas, poderão ser estudadas. Do mesmo modo, estudar e modelar a difusão de uma mudança de atitudes (Tessone, 2014; Nowak, Szamrej e Latané, 1990) poderá aumentar a compreensão de como estilos de vida sustentáveis e saudáveis se espalham em certos segmentos da população.

## REFERÊNCIAS

- AGUILERA, A. Business travel and sustainability. In: GARLING, T.; ETTEMA, D.; FRIMAN. M. (Eds.). **Handbook of sustainable travel**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 199-214.
- ALEXANDER, B.; ETTEMA, D.; DIJST, M. Fragmentation of work activity as a multi-dimensional construct and its association with ICT, employment and sociodemographic characteristics. **Journal of Transport Geography**, v.18, p. 55-64, 2010.
- ALGERS, S. et al. **Stockholm model system (SIMS)**: application. In: WORLD CONFERENCE OF TRANSPORTATION RESEARCH, 7. Sydney: WCTR, 1995.
- ARENTE, T. A.; TIMMERMANS, H. J. P. A learning-based transportation oriented simulation system. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 38, n. 7, p. 613-633, 2004.

ARENTZE, T. *et al.* More gray hair – but for whom? Scenario-based simulations of elderly activity travel patterns in 2020. **Transportation**, v. 35, n. 5, p. 613-627, 2008.

BARCELÓ, J. *et al.* Microscopic traffic simulation: a tool for the design, analysis and evaluation of intelligent transport systems. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, v. 41, n. 2-3, p. 173-203, 2005.

BATTY, M. **Cities and complexity**: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals. Cambridge: The MIT Press, 2007.

BEKHOR, S.; PRASHKER, J. GEV-based destination choice models that account for unobserved similarities among alternatives. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 42, n. 3, p. 243-262, Mar. 2008.

BEN-AKIVA, M. E.; LERMAN, S. R. **Discrete choice analysis**: theory and application to travel demand. Cambridge: The MIT Press, 1985.

BETTENCOURT, L. Cities as complex systems. In: FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M.; TÓVOLLI, M. H. (eds.). **Modeling complex systems for public policies**. Brasília: Ipea, 2014 (no prelo).

BHAT, C. R. *et al.* **A new spatial multiple discrete-continuous model for land use change analysis**. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 93. Washington: TRB, 2014.

BOARNET, M. G. *et al.* The street level built environment and physical activity and walking: results of a predictive validity study for the Irvine Minnesota Inventory. **Environment and Behavior**, v. 43, n. 6, p. 735-775, Jan. 2011.

BONSALL, P.; WILLUMSEN, L. Pricing methods to influence car use. In: GÄRLING, T.; ETTEMA, D.; FRIMAN, M. (Eds.). **Handbook of sustainable travel**. Dordrecht: Springer, 2014.

BORNING, A.; WADDELL, P.; FÖRSTER, R. UrbanSim: using simulation to inform public deliberation and decision-making. **Digital Government**, v. 17, p. 439-464, 2008.

BOWMAN, J. L.; BEN-AKIVA, M. E. Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 35, n. 1, p. 1-28, 2000.

BRIAN ARTHUR, W. Complexity and the economy. **Science**, v. 284, p.107-109, Apr. 1999.

CAO, X.; MOKHTARIAN, P. L. How do individuals adapt their personal travel? A conceptual exploration of the consideration of travel-related strategies. **Transport Policy**, v. 12, n. 3, p. 199-206, 2005.

- CERVERO, R. Alternative approaches to modeling the travel-demand impacts of smart growth. **Journal of the American Planning Association**, Chicago, v. 72, n. 3, p. 285-295, 2006.
- CERVERO, R.; DAY, J. Suburbanization and transit-oriented development in China. **Transport Policy**, v. 15, n. 5, p. 315-323, 2008.
- CHINGCUANCO, F.; MILLER, E. J. A microsimulation model of urban energy use: modelling residential space heating demand in ILUTE. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 36, n. 2, p. 186-194, 2012.
- CILLIERS, P. Boundaries, hierarchies and networks in complex systems. **International Journal of Innovation Management**, v. 5, n. 2, p. 135-147, 2001.
- DAWID, H. Modeling the economy as a complex system. In: FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M.; TÓVOLLI, M. H. (Eds.). **Modeling complex systems for public policies**. Brasília: Ipea, 2015.
- ERDOGAN, S. et al. **What to expect in 2030**: the impacts of fuel price and fuel economy on land use and transportation. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 92. Washington: TRB, 2013.
- ETTEMA, D. et al. PUMA: multi-agent modelling of urban systems. In: KOOMEN, E. et al. (Eds.). **Modelling land-use change**. Dordrecht: Springer, 2007. p. 237-258.
- ETTEMA, D. F.; TIMMERMANS, H. J. P. Theories and models of activity patterns. In: \_\_\_\_\_. (Eds.). **Activity-based approaches to travel analysis**. Bradford: Emerald, 1997. p. 1-36.
- FRÄNDBERG, L.; VILHELMSON, B. Spatial, generational and gendered trends and trend-breaks in mobility. In: GARLING, T.; ETTEMA, D.; FRIMAN, M. (Eds.). **Handbook of sustainable travel**. Dordrecht: Springer, 2014. p. 199-214.
- FRAZIER, C.; KOCKELMAN, K. M. Chaos theory and transportation systems: an instructive example. **Transportation Research Record**, n. 1897, p. 9-17, Jan. 2004.
- GUERRA, E. **Mexico City's suburban land use and transit connection**: the effects of the Line B Metro expansion. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 93. Washington: TRB, 2014.
- GÓMEZ-GÉLVEZ, J. A.; OBANDO, C. **Modeling car ownership in urban areas of developing countries**: a case study of Bogotá, Colombia. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 92. Washington: TRB, 2013.

- HANSEN, E. G. *et al.* A community-based toolkit for designing ride-sharing services: the case of a virtual network of ride access points in Germany. **International Journal of Innovation and Sustainable Development**, v. 5, n. 1, p. 80-99, 2010.
- HATZOPOLOU, M.; MILLER, E. J.; SANTOS, B. Integrating vehicle emission modeling with activity-based travel demand modeling: a case study of the greater Toronto area (GTA). **Journal of the Transportation Research Board**, v. 2011, n. 2011, p. 29-39, 2007.
- HARMON, A. **A microsimulated industrial and occupation-based labour market model for use in the Integrated Land Use, Transportation, Environment (Ilute) Modelling System**. Toronto: University of Toronto, 2013.
- HESS, S.; TRAIN, K. E.; POLAK, J. W. On the use of a Modified Latin Hypercube Sampling (MLHS) method in the estimation of a Mixed Logit Model for vehicle choice. **Transportation Research**, v. 40, n. 2, p. 147, 2006.
- JANSSEN, M. A.; JAGER, W. Stimulating diffusion of green products: co-evolution between firms and consumers. **Journal of Evolutionary Economics**, v. 12, n. 3, p. 283-306, 2002.
- JOVICIC, G.; HANSEN, C. O. A passenger travel demand model for Copenhagen. **Transportation Research Part A: policy and practice**, v. 37, n. 4, p. 333-349, 2003.
- LYONS, G.; JAIN, J.; HOLLEY, D. The use of travel time by rail passengers in Great Britain. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 41, n. 1, p. 107-120, 2007.
- MANSON, S. M. Simplifying complexity: a review of complexity theory. **Geoforum**, v. 32, n. 3, p. 405-414, 2001.
- MCNALLY, M. G. **The Four Step Model**. Davis: Center for Activity Systems Analysis, 2008.
- MEISTER, K. *et al.* **Large-scale agent-based travel demand optimization applied to Switzerland, including mode choice**. In: WORLD CONFERENCE ON TRANSPORTATION RESEARCH, 12. Lisbon: WCTR, July 2010.
- MOKHTARIAN, P. L. If telecommunication is such a good substitute for travel, why does congestion continue to get worse? **Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research**, v. 1, n. 1, p. 1-17, 2009.
- NEMET, G. F.; BAILEY, A. J. Distance and health care utilization among the rural elderly. **Social Science and Medicine**, v. 50, n. 9, p. 1197-1208, 2000.
- NOWAK, A.; SZAMREJ, J.; LATANÉ, B. From private attitude to public opinion: a dynamic theory of social impact. **Psychological Review**, v. 97, n. 3, p. 362-376, 1990.

OAKIL, A. Y. *et al.* Changing household car ownership level and life cycle events: an action in anticipation or an action on occurrence. **Transportation**, v. 41, n. 4, p. 889-904, 2013.

PEARCE, J.; KINGHAM, S.; ZAWAR-REZA, P. Every breath you take? Environmental justice and air pollution in Christchurch, New Zealand. **Environment and Planning A**, v. 38, n. 5, p. 919-938, 2006.

PENDYALA, R. Next generation infrastructure implications of autonomous vehicles and transport automation. In: CAMPBELL, P.; PEREZ, P. (Eds.). **Infrastructure for a better future: a forum for vision, leadership and action**. Wollongong: University of Wollongong, 2014.

RIESER, M. *et al.* Agent-oriented coupling of activity-based demand generation with multiagent traffic simulation. **Transportation Research Record**, Washington, n. 2021, p. 10-17, 2007.

SAELENS, B. E.; HANDY, S. L. Built environment correlates of walking: a review. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 40, n. 7, p. 550-566, 2008.

SHAHEEN S. A.; COHEN, A. P. Growth in worldwide carsharing an international comparison. **Transportation Research Record**, n. 1992, p. 81-89, 2007.

SHEN, Y.; MARTÍNEZ, L. M.; ABREU E SILVA, J. **A cellular agent-based approach incorporating spatial discrete choice methods**: a simulation of future land-use impacts of high-speed rail on Aveiro, Portugal. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 92. Washington: TRB, 2013.

STRAUCH, D. *et al.* Linking transport and land use planning: the microscopic dynamic simulation model ILUMASS. In: ATKINSON, P. M. *et al.* (Eds.). **Geodynamics**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p. 295-311.

TESSONE, C. J. The complex nature of social systems. In: FURTADO, B. A.; SAKOWSKI, P. A. M.; TÓVOLLI, M. H. (Eds.). **Modeling complex systems for public policies**. Brasília: Ipea, 2014. No prelo.

VAN WEE, B. The unsustainability of car use. In: GÄRLING, T.; ETTEMA, D.; FRIMAN, M. (Eds.). **Handbook of sustainable travel**. Dordrecht: Springer, 2014.

VAN WEE, B.; HANDY, S. Do future land-use policies increase sustainable travel? In: GÄRLING, T.; ETTEMA, D.; FRIMAN, M. (Eds.). **Handbook of sustainable travel**. Dordrecht: Springer, 2014.

VELDHUISEN, K. J.; TIMMERMANS, H. J. P.; KAOPEN, L. L. Simulating the effects of urban development on activity-travel patterns: an application of Ramblas to the Randstad North Wing. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 32, n. 4, p. 567-580, 2005.

WEGENER, M. The future of mobility in cities: challenges for urban modelling. **Transport Policy**, v. 29, p. 275-282, 2013.

WHEATON, W. C. Commuting, congestion, and employment dispersal in cities with mixed land use. **Journal of Urban Economics**, v. 55, p. 417-438, 2004.

YAI, T. Disaggregate behavioural models and their applications in Japan. **Transportation Research Part A: General**, v. 23, n. 1, p. 45-51, 1989.

ZHU, Y.; FERREIRA, J. **Synthetic population generation at disaggregated spatial scales for land use and transport microsimulation**. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 92. Washington: TRB, 2013.

ZÖLLIG RENNER, C.; AXHAUSEN, K. W. **Comparing estimation results of land use development models using different databases available in Switzerland**. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 92. Washington: TRB, 2013.



## A EDUCAÇÃO COMO SISTEMA COMPLEXO: IMPLICAÇÕES PARA A PESQUISA EDUCACIONAL E POLÍTICAS<sup>1,2</sup>

Michael J. Jacobson<sup>3</sup>

### 1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas três décadas, o estudo científico do comportamento de sistemas complexos físicos e sociais levou a *insights* significativos sobre o mundo que as abordagens clássicas tendiam a simplificar ou ignorar (Bar-Yam, 2003). No entanto, Jacobson e Wilensky (2006) observaram que a aplicação de perspectivas de complexidade para a pesquisa e a política educacional está em fase inicial. Dado este cenário, os principais objetivos deste capítulo são discutir quatro principais áreas: *i*) a educação como sistema complexo; *ii*) a complexidade e as metodologias para o estudo da educação; *iii*) a pesquisa sobre sistemas de ensino e política educacional; e *iv*) os desafios para a aprendizagem sobre sistemas complexos e suas implicações. Estas áreas são consideradas separadamente, seguidas das considerações finais.

Durante a última década, houve uma mudança nos campos das ciências cognitivas e de aprendizagem e da pesquisa em educação. Partiu-se de trabalhos anteriores sobre o aprendizado de conceitos sobre sistemas complexos para a aplicação das perspectivas de sistemas complexos físicos e sociais, com o intuito de aprimorar a pesquisa educacional e orientar políticas públicas.<sup>4</sup> Uma indicação dessa tendência é refletida na utilização de conceitos de complexidade por pesquisadores da educação. Estes conceitos possuem importantes implicações, que vão além de apenas um vocabulário técnico enriquecido para pesquisadores. Por exemplo, Bereiter e Scardamalia (2005) argumentaram que:

1. Este capítulo incorpora material de estudo de Jacobson e Wilensky (2006), Jacobson e Kapur (2012) e Jacobson, Kapur e Reimann (2014). O autor agradece aos colegas de pesquisa e colaboradores, que ao longo dos anos contribuíram para a compreensão e o aprofundamento dos meandros e das maravilhas correspondentes aos sistemas complexos físicos e sociais, especialmente, Manu Kapur, Uri Wilensky, e Yaneer Bar Yam.

2. Traduzido por Patrícia Alessandra Morita Sakowski.

3. Centro para Pesquisa em Aprendizado e Cognição Assistidos por Computador da Universidade de Sidney, Austrália.

4. Para uma visão geral, ver Jacobson (2006).

Conforme os conceitos de sistemas complexos, como auto-organização e emergência, passam a ser incorporados no *mainstream* da psicologia educacional, torna-se cada vez mais evidente que não há explicações causais simples para nada neste campo. Em geral, o que sai de um processo sociocognitivo não pode ser explicado ou totalmente previsto pelo que entra nele. Trabalhos criativos, compreensão e desenvolvimento cognitivo são todos exemplos de estruturas complexas que emergem a partir da interação de componentes mais simples. O aprendizado em si, em ambos os níveis, neural e de conhecimento, tem propriedades emergentes (Sawyer, 1999; 2004, p. 707).<sup>5</sup>

Lemke e Sabelli (2008) observam ainda:

O sistema educacional é um dos sistemas mais complexos e desafiadores para a pesquisa. Por mais que saibamos sobre aspectos cognitivos da aprendizagem, estratégias pedagógicas e implementação de reformas, atualmente não temos a capacidade de modelagem necessária para ajudar os profissionais (*practitioners*) e formuladores de política a explorar o impacto potencial de intervenções propostas, pois os esforços nesta área ainda estão em estágio de desenvolvimento muito preliminar (p. 128).<sup>6</sup>

A partir dessas duas perspectivas, se a pesquisa atual sobre educação e aprendizagem estabeleceu que não há explicações causais simples para nada neste campo, então o corolário político é que não há políticas simples para iniciativas e intervenções educacionais. Para tratar das implicações desse corolário político, primeiramente, considera-se o tratamento da educação como um sistema complexo, e, em seguida, realiza-se um panorama das abordagens metodológicas atuais para conduzir a pesquisa em educação voltada para políticas públicas.

## 2 A EDUCAÇÃO COMO SISTEMA COMPLEXO

Lemke e Sabelli (2008) articularam um quadro importante para entender sistemas de educação e iniciativas de reforma educacional sob a perspectiva da complexidade, o qual possui cinco componentes principais: *i*) definição do sistema; *ii*) análise estrutural; *iii*) relações entre subsistemas e níveis; *iv*) motores de mudança; e *v*) métodos de modelagem. Para os objetivos deste capítulo, os três primeiros componentes são os mais relevantes, e serão brevemente resumidos a seguir.

5. No original: "As complex systems concepts such as self-organization and emergence make their way into mainstream educational psychology, it becomes increasingly apparent that there are no simple causal explanations for anything in this field. In general, what comes out of a socio-cognitive process cannot be explained or fully predicted by what goes into it. Creative works, understanding, and cognitive development are all examples of complex structures emerging from the interaction of simpler components. Learning itself, at both neural and knowledge levels, has emergent properties".

6. No original: "The education system is one of the most complex and challenging systems for research. Much as we know about cognitive aspects of learning, pedagogical strategies, and reform implementation, we currently lack the modeling capability needed to help practitioners and policymakers explore the potential impact of proposed interventions, since efforts in this area are still at a very preliminary stage of development".

## 2.1 Elementos do sistema

Lemke e Sabelli (2008) definem um sistema educacional a partir de seus *elementos constituintes e de sua dinâmica ambiental*, tais como instituições e práticas sociais, fontes e usuários de informação, e recursos humanos e materiais. Os elementos a serem incluídos no sistema educacional devem ser intimamente ligados e interdependentes. Por exemplo, os estudantes representam um elemento crítico no sistema e aprendem em uma variedade de contextos: em ambientes de aprendizagem formais, com professores em escolas e universidades, e em ambientes de aprendizagem informais, como museus de ciência, mídia em massa, publicações impressas e, cada vez mais, fontes *on-line* mediadas pela internet. Também podem ser incluídos como elementos (isto é, *stakeholders*) dos sistemas educacionais, os conselhos e as assembleias escolares, as autoridades de educação do governo, as instituições de pesquisa, os financiadores de pesquisadores e as comunidades.

Outro aspecto de um sistema educacional são os *níveis de organização*. Eles devem ser vistos não apenas como hierarquias de controle de linhas de autoridade, mas também em termos de padrões emergentes e processos nos níveis médio e macro do sistema. Também há fontes de informação e materiais que fluem entre níveis adjacentes e não adjacentes de um sistema educacional. Por exemplo, em um nível, as notas individuais de um estudante são enviadas aos pais, assim como são transformadas e reorganizadas por meio de ferramentas de reconhecimento de padrões, que extraem apenas a informação relevante para a dinâmica dos níveis do sistema de educação superior da escola, distrito, estado ou país.

## 2.2 Análise estrutural

As hierarquias das organizações formais fornecem uma estrutura para analisar o sistema educacional. Exemplos dessas hierarquias são estudantes e professores individuais, grupos de estudantes, salas de aula, departamentos, escolas e – dependendo dos termos utilizados nos diferentes sistemas nacionais – distritos, estados ou províncias, e todo o sistema nacional. Lemke e Sabelli (2008) propõem que uma *análise estrutural* deste sistema também deveria considerar as diferentes escalas temporais em que os seus distintos níveis funcionam, e analisar os processos dinâmicos e as propriedades emergentes existentes entre estes níveis.

Na definição de um sistema educacional, também é crucial a *gama de prazos (range of timescales)* dos processos críticos. Como o objetivo central deste sistema é promover o aprendizado individual, as escalas temporais relevantes abrangem intervalos de milissegundos de interações sinápticas neurais e de processos cognitivos; de minutos para conversas entre estudantes e estudante-professor; de horas de jornada escolar; de meses de períodos escolares; até intervalos de anos no nível

do ano escolar, anos de educação primária, secundária e terciária, e anos e décadas de implementação de políticas em níveis nacionais.

A análise estrutural de um sistema educacional também deve se preocupar com a troca de informação que ocorre em intervalos de minutos nas atividades em sala de aula, assim como com processos de alteração curricular que ocorrem ao longo de anos. Outro aspecto diz respeito ao modo como o entendimento de um conceito em particular pode se desenvolver a partir de eventos de aprendizagem na sala de aula ou no laboratório, mas também em experiências em corredores, cafeterias e fora do ambiente escolar. O desenvolvimento de identidades duradouras, atitudes e valores também ocorre no contexto de redes de interação social entre alunos na sala de aula, na comunidade local e em redes sociais virtuais de comunidades *on-line*. A análise estrutural também se deve preocupar com o modo como o desenvolvimento emergente das identidades, das atitudes e dos valores que ocorre ao longo de anos afetará as decisões e ações que adultos poderão fazer numa escala de tempo de segundos, minutos ou horas. Em níveis mais elevados do sistema, estas análises podem examinar como problemas comunitários e mudanças de prioridade nacionais influenciam as agendas e os programas do sistema educacional mais amplo. Questões similares relacionadas a professores também poderiam ser analisadas, tais como as interações em termos de escalas temporais diferentes com estudantes, supervisores e administradores, educadores de professores, desenvolvedores de currículo, editoras educacionais e pesquisadores nas universidades.

### **2.3 Relações entre subsistemas e níveis**

Na análise de sistemas complexos, são críticas as relações dentre e entre subsistemas e níveis. Lemke e Sabelli (2008) arguem que são de particular importância os níveis acima e abaixo do nível de interesse focal específico. Um professor interessado em implementar uma nova abordagem de ensino, por exemplo, deve considerar um nível abaixo – como os estudantes devem responder ao novo método – e um nível acima – como o diretor da escola deve ver a nova abordagem.

De modo mais geral, para os sistemas de educação, um nível organizacional imediatamente superior pode gerar *feedback* positivo ou negativo, podendo melhorar ou constranger o modo como a dinâmica no nível focal se desdobra. Similarmente, subsistemas num nível inferior podem prover interações de *feedback* que podem influenciar os comportamentos no nível focal. Ao analisar as relações entre os níveis do sistema, também é interessante verificar os graus de liberdade existentes após as restrições a serem consideradas.

Para compreender os subsistemas e níveis educacionais, é fundamental conhecer os tipos de material e de informação trocados, tais como salas de aula com computadores, mesas e cadeiras da administração escolar, assim como os relatórios agregados de desempenho escolar fornecidos para os formuladores de política. Essas interações entre os subsistemas e níveis podem ser fortemente acopladas, por exemplo, quando o orçamento da escola destinado para a compra de computadores é vinculado a metas específicas de desempenho escolar em relatórios ou avaliações educacionais de larga escala nacionais ou internacionais.

Para concluir esta seção, cita-se outra propriedade geral de sistemas complexos relevante para a pesquisa e para as políticas que envolvem sistemas educacionais, a *coexistência dialética de linearidade e não linearidade* (Jacobson e Kapur, 2012):

A complexidade do comportamento emergente é proveniente da coexistência de linearidade e não linearidade entre e dentro dos vários níveis ou escalas de um sistema aberto. De fato, devido a isso, sistemas complexos apresentam propriedades e comportamentos aparentemente opostos: aleatoriedade e ordem, previsibilidade (por exemplo, atratores, nós ou *hubs* altamente conectados) e imprevisibilidade, coerência e incoerência, estabilidade e instabilidade, centralização e descentralização, e assim por diante. Não é um ou o outro, são *ambos* (Kauffman, 1995, p. 310).

### 3 COMPLEXIDADE E METODOLOGIAS PARA O ESTUDO DA EDUCAÇÃO

Aceitar a perspectiva de que a educação nas sociedades modernas deve ser vista como um sistema complexo, é importante tanto para a pesquisa acadêmica que busca explorar o funcionamento e o comportamento dos sistemas educacionais em termos de subsistemas e níveis relevantes, quanto para as políticas relativas aos sistemas educacionais em níveis nacional e local, de particular importância para este capítulo. Na verdade, essas duas áreas estão ligadas dado que os fluxos de informação disponíveis aos formuladores de política são limitados pelos tipos de metodologias que foram desenvolvidos e validados pela pesquisa acadêmica.

Em termos gerais, as abordagens metodológicas existentes para a pesquisa educacional dividem-se em duas categorias principais: *quantitativa* e *qualitativa* (Firestone, 1987). As abordagens quantitativas – inclusive as quase experimentais – são amplamente utilizadas na pesquisa em educação (Kapur *et al.*, 2007; Suthers e Hundhausen, 2003). Enraizados em uma tradição filosófica positivista, métodos quantitativos tipicamente procuram estabelecer explicações causais ou *quasi-causais* dos efeitos de projetos ou de intervenções *versus* condições de controle ou comparativas. Em contraste, as abordagens qualitativas têm uma base filosófica fenomenológica que procura descrever e compreender os contextos e ambientes

educacionais. Embora haja pesquisadores educacionais que utilizam exclusivamente apenas uma dessas metodologias, desde o final dos anos 1980, tornou-se cada vez mais comum para os pesquisadores que estudam a aprendizagem usar ambos os métodos, de forma complementar, a fim de entender a questão educacional a ser investigada a partir dos diferentes tipos de informações gerados por essas duas perspectivas metodológicas.

Apesar disso, uma importante pergunta deve ser feita. As metodologias qualitativas e quantitativas utilizadas na pesquisa educacional – seja separadamente ou em conjunto – são de fato suficientes para fornecer informações adequadas e entendimentos da dinâmica dos sistemas educacionais, vistos a partir das perspectivas de complexidade descritas na seção anterior?

*Infelizmente, a resposta é não.* Isso ocorre porque as principais ferramentas matemáticas utilizadas em métodos quantitativos – por exemplo, equações diferenciais, modelos estatísticos – são fundamentalmente ferramentas *lineares* que decompõem um sistema em partes, estudando-as individualmente, e em seguida, adicionando-as para formar o conjunto. No entanto, fenômenos emergentes geralmente possuem *propriedades não lineares* que não podem ser analisadas pela *soma das partes*, uma vez que padrões no nível macro de um sistema complexo geralmente apresentam propriedades *diferentes* das partes constitutivas no nível micro. Como Holland (1995) explica, “não linearidades significam que nossas ferramentas mais úteis para generalizar observações em teoria – análise de tendência, determinação de equilíbrios, médias amostrais, e assim por diante, são muito deficientes” (p. 5).<sup>7</sup>

Finalmente, há outra restrição importante tanto nas abordagens quantitativas quanto nas qualitativas: elas são amplamente limitadas *para explicar e entender o que já emergiu* (Epstein e Axtell, 1996). Uma vez que padrões ou organizações, como opiniões, normas, convergência em discussões de grupo, emergem, eles podem ser submetidos a métodos quantitativos para explicar as relações em nível agregado. Ao mesmo tempo, métodos qualitativos podem ser empregados para obter descrições ricas e entendimentos sobre as trajetórias que levaram a organizações emergentes. No entanto, caso fosse possível voltar no tempo, *a mesma trajetória poderia não ter ocorrido, mesmo a partir de condições iniciais semelhantes* (Kauffman, 1995). Parte do que faz um padrão emergente irredutível e, portanto, também sua própria descrição mais curta, é a sua elevada sensibilidade às condições iniciais. Consequentemente, para entender um fenômeno emergente, é preciso compreender e explicar não só a trajetória de evolução que *realmente* ocorreu, mas também o espaço de possibilidades de trajetórias de evolução que *poderia* ter ocorrido. Assim, dispor apenas

7. No original: "Nonlinearities mean that our most useful tools for generalizing observations into theory – trend analysis, determination of equilibria, sample means, and so on – are badly blunted".

de abordagens quantitativas e qualitativas limita o entendimento sobre o espaço de possibilidades como um fenômeno emergente pode se desdobrar.

Com o entendimento de que cada uma das abordagens quantitativas e qualitativas possui valor para a pesquisa educacional, tem havido apelos para o avanço da maior integração dessas abordagens (Firestone, 1987). No entanto, existe um imperativo para uma metodologia que não tenha por base apenas os métodos quantitativos e qualitativos, mas também que seja capaz de investigar adequadamente a emergência da aprendizagem, dado o argumento de que tanto as abordagens quantitativa e qualitativa – sozinhas ou combinadas – possuem limitações para esse fim.

Em Jacobson e Kapur (2012), a *modelagem baseada em agentes* (ABM) é proposta como um *complemento* metodológico para as abordagens quantitativa e qualitativa em pesquisa educacional, uma vez que tem sido cada vez mais utilizada não só nas ciências naturais (Jackson, 1996), mas também na economia (Arthur, Durlauf e Lane, 1997), sociologia (Watts e Strogatz, 1998), psicologia sociocultural (Axelrod, 1997), ciência organizacional (Carley, 2002), apenas para citar algumas áreas. Fundamentada na teoria da complexidade, a ABM está fornecendo importantes *insights* teóricos e empíricos sobre a dinâmica dos sistemas complexos (Eidelson, 1997).

Quando integradas com as abordagens quantitativa e qualitativa, ABMs podem revelar *insights* sobre a dinâmica de emergência em processos e ambientes de aprendizagem, que, de outra forma, permaneceriam despercebidos, assim como métodos qualitativos podem revelar *insights* sobre um fenômeno que poderiam não ser possíveis apenas com a utilização de métodos quantitativos. Já há exemplos de pesquisa educacional e de aprendizagem em que ABMs e outras técnicas de modelagem estão sendo usadas como importante complemento metodológico às abordagens tradicionais, os quais serão discutidos na seção seguinte.

#### **4 DA PESQUISA À POLÍTICA: FERRAMENTAS PARA O ESTUDO DA EDUCAÇÃO COMO SISTEMA COMPLEXO**

Como observado anteriormente, Lemke e Sabelli (2008) argumentam que há uma grande necessidade de contar com recursos de modelagem que possam informar profissionais (*practitioners*) e formuladores de política sobre como as intervenções de reforma educacional podem se desdobrar. Um trabalho recente indica que progressos importantes estão sendo feitos para resolver essa importante necessidade.

Maroulis *et al.* (2010) fornecem um panorama da pesquisa envolvendo a aplicação das perspectivas de sistemas complexos, especialmente modelagem computacional, na pesquisa educacional e de política. Eles notam, por exemplo, que pesquisadores estão usando novas ferramentas de visualização para examinar dados longitudinais de rede, nos quais os resultados, no nível macro, como disciplina na sala de aula, emergem das interações de conversa entre estudantes no nível micro. Outros pesquisadores em sociologia estão utilizando a modelagem computacional para identificar grupos sociais em nível macro, que emergem a partir de interações locais de estudantes em redes escolares, em vez de utilizar categorias de estudante *a priori*, como *atletas* ou *scholars* (Frank *et al.*, 2008). Maroulis *et al.* (2010) observam que abordagens de visualização em modelagem computacional como essas podem ser utilizadas com dados existentes e assim representar novas e importantes ferramentas analíticas para os pesquisadores que estudam os sistemas complexos educacionais.

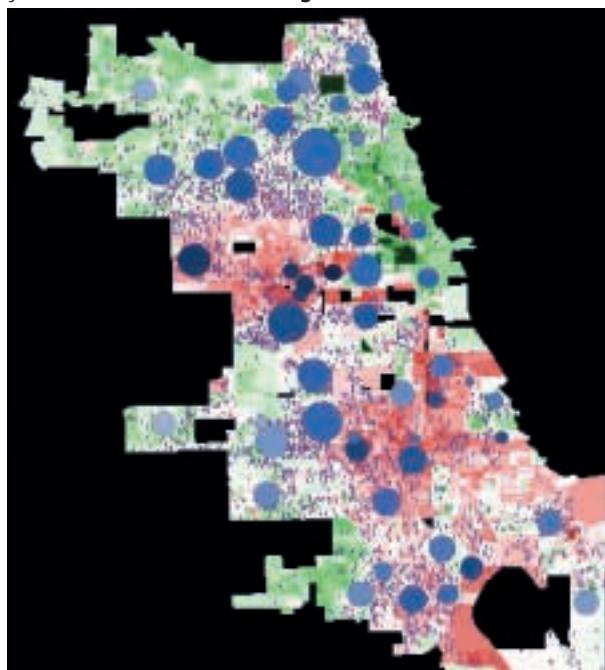
Em termos de pesquisa em políticas educacionais e reformas, Maroulis *et al.* (2014), no trabalho em que utilizam ABMs, relatam e analisam iniciativas voltadas a oferecer aos pais a possibilidade de escolha da escola para seus filhos nos Estados Unidos. Resumidamente, os defensores da *reforma pela escolha de escola* (*school choice reform*) argumentam que ao permitir que os pais selecionem as escolas que seus filhos frequentarão, surgirá a concorrência entre as escolas, resultando em incentivos para a reforma escolar e em melhor escolaridade. Em contrapartida, os opositores desse tipo de reforma alegam que os recursos serão drenados para fora das escolas e a qualidade da escola será, assim, ferida e não melhorada. Desde a década de 1990, pesquisas sobre essa questão haviam empregado métodos quantitativos e qualitativos padrão, mas seus resultados foram inconclusivos ou até mesmo conflitantes.

Maroulis *et al.* (2014) investigaram esse debate de política criando ABMs para a mudança de um distrito escolar de um sistema de área de influência da escola local do bairro para um sistema de *escolha de escola*. Os agentes no sistema eram as escolas e os alunos. Os agentes escolares variavam em termos de qualidade e capacidade da construção das escolas existentes, e as novas escolas que entravam no sistema imitavam as melhores escolas existentes. Os agentes estudantes variavam em sua habilidade e características (*background*), e classificavam as escolas em termos de desempenho e de proximidade geográfica.

O desempenho acadêmico dos agentes estudantis combinava características individuais e o *valor adicionado* pela qualidade da escola que frequentaram. Dados reais das escolas públicas de Chicago foram usados para inicializar o modelo (figura 1).

FIGURA 1

Visualização do modelo baseado em agentes de escolha escolar – Chicago, Illinois



Fonte: Maroulis et al. (2014).

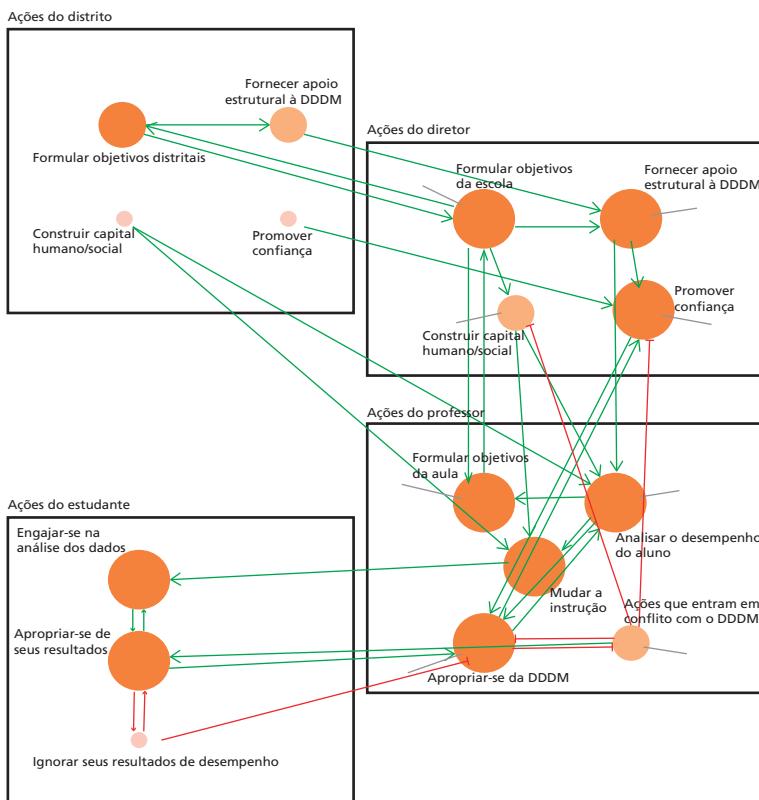
Obs.: Os pontos pequenos representam os alunos, os círculos grandes representam as escolas, o tamanho do círculo representa o desempenho acadêmico, e as cores vermelho escuro e verde escuro mostram áreas de alta e baixa pobreza, respectivamente.

A análise do modelo baseado em agentes (ABM) identificou dinâmicas não reveladas em pesquisas quantitativas e qualitativas anteriores. Especificamente, execuções do modelo demonstraram que o momento em que as novas escolas entravam no sistema era um fator crítico. O sistema global melhora porque as novas escolas imitam as melhores escolas existentes. No entanto, a grande ênfase sobre o desempenho nas escolas faz com que as novas escolas entrem no sistema mais cedo, resultando em escolas novas com desempenho menor. Assim, houve um descompasso paradoxal entre os comportamentos no nível macro e micro do sistema, em que o aumento da ênfase no desempenho escolar no nível das famílias não gerou desempenho escolar melhor no nível distrital. Sob uma perspectiva de política pública, os resultados da utilização deste ABM sugerem que os críticos da reforma de escolha escolar estavam corretos ao sugerir que o desempenho escolar no sistema geral não aumentaria. No entanto, a razão proposta por tais críticos – drenagem de recursos das escolas existentes – não foi, na realidade, o fator causal; mas o momento de entrada das novas escolas no sistema. Esse ABM do sistema de escolas públicas de Chicago também forneceu *insights* sobre outros efeitos sistêmicos, como abordagens políticas para minimizar a transferência indesejada (*unintended*)

dos melhores alunos para as escolas privadas, com a utilização dos títulos (*vouchers*) emitidos pelo governo para pagar o ensino privado (Maroulis *et al.*, 2010).

Levin e Datnow (2012) fornecem outro exemplo do uso de modelagem computacional para explorar a influência da liderança do diretor na implementação de uma reforma no ensino médio. A abordagem de reforma educacional envolvendo a tomada de decisões baseada em dados (*data drive decision making* – DDDM) tem se verificado eficaz para orientar as decisões educacionais. Os dados usados para informar o desenvolvimento do ABM – ao qual Levin e Datnow (2012) se referem como modelo multimediatizado (MMM) – vieram de um estudo de caso de uma escola urbana nos Estados Unidos, onde o uso de DDDM havia influenciado resultados escolares positivos. O MMM permite a manipulação de interações entre a administração do distrito que deseja implementar a reforma DDM, as ações do diretor como o líder local na promoção da reforma DDDM, as interações do diretor com professores dentro da escola, e as interações dos professores com seus alunos.

**FIGURA 2**  
**Modelo multimediatizado de reforma educacional DDDM, incluindo diretor, professor, aluno e ações distritais**



O MMM desenvolvido por Levin e Datnow (2012) é mostrado na figura 2. As linhas verdes mostram o *feedback* positivo entre os nós da rede no modelo, e as linhas vermelhas mostram *feedback* negativo. O modelo também ilustra as interações de *feedback* entre os níveis, como o *feedback* positivo entre as ações distritais *fornecer apoio estrutural DDDM*, e as ações do diretor *fornecer apoio estrutural à DDDM*. No entanto, note-se que há *feedback* negativo entre as ações do diretor *construir capital social e humano* e *promover confiança* e as ações do professor *ações que entram em conflito com DDDM*. Em consistência com os dados do estudo de caso qualitativo, as execuções do modelo revelaram que é necessário que o diretor tanto *construa capital social humano* quanto *promova a confiança* para que a iniciativa de reforma DDDM seja sustentável. A persistência da reforma DDDM pode ser vista como um tipo de transição de fase no sistema escolar. Indo além dos dados, o MMM pode então ser usado para explorar cenários *e se (what if)*. Quando o modelo é executado com o diretor só se envolvendo em uma ou outra dessas duas ações, o MMM sugere uma alta probabilidade de que uma reforma DDDM falhe; isto é, que não haja uma transição de fase no sistema escolar. Pesquisas futuras envolvendo outros estudos de caso são necessárias, incluindo alguns com uma escola onde DDDM não foi implementada com sucesso, para verificar se há um *ajuste* entre os novos dados e o MMM, com a possibilidade de que o MMM requeira revisão para incorporar fatores adicionais e uma dinâmica nos novos casos.

Esses projetos representam provas conceituais de pesquisa (*proof of concept research*) que ilustram como o uso de modelagem computacional, particularmente ABMs, pode fornecer *insights* para a pesquisa e as políticas sobre sistemas educacionais complexos. Neste breve resumo desta pesquisa incipiente, fica claro que abordagens baseadas em complexidade de modelagem computacional podem fornecer análises e informações que vão além das abordagens quantitativas e qualitativas tradicionais de pesquisa educacional. Como Jacobson e Kapur (2012) observaram, esses projetos usam métodos de modelagem para complementar e estender metodologias tradicionais de pesquisa em educação, não para substituí-las. Considerável trabalho é agora necessário para desenvolver e validar abordagens de modelagem que atendam às necessidades de formuladores de política e profissionais afins. Ainda assim, esses esforços iniciais são bastante promissores e investigações futuras nestas áreas são claramente necessárias.

## 5 DESAFIOS À APRENDIZAGEM SOBRE SISTEMAS COMPLEXOS E IMPLICAÇÕES

Neste capítulo, argumenta-se que a investigação sobre a dinâmica e as propriedades de sistemas físicos e sociais complexos é relevante para a compreensão de características importantes dos sistemas educacionais. Além disso, há agora um corpo de pesquisa que tem demonstrado formas como as perspectivas conceituais e metodologias da complexidade podem, de fato, ser utilizadas para estudar eficazmente aspectos dos sistemas educacionais, que complementam as abordagens existentes na pesquisa educacional.

Apesar disso, enquanto os sistemas complexos são comumente experimentados, a pesquisa indica que existem diferenças significativas na forma como especialistas e novatos pensam sobre sistemas complexos (Hmelo-Silver, Marathe e Liu, 2007; Jacobson, 2001). Isto não é surpreendente uma vez que atualmente ideias centrais sobre sistemas complexos – por exemplo, auto-organização, caos, emergência – e métodos de pesquisa – por exemplo, a modelagem baseada em agentes – não são sistematicamente ensinados nos currículos de ciência dos principais países da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE). Esse é um problema, pois significa que a maioria dos adultos não cientistas – ou seja, ex-alunos – que podem estar envolvidos em áreas profissionais, organizações de políticas governamentais, ou serviço público são suscetíveis de não terem tido qualquer exposição direta a perspectivas de complexidade, como parte de sua educação formal.

Para resolver essa questão, faz-se necessário realizar alterações nos padrões de ciência (*science standards*), para desenvolver novos materiais curriculares, para educar e preparar os professores para ensinar novas áreas de conhecimentos avançados, tais como sistemas complexos, para desenvolver avaliações relevantes, e assim por diante, todos os quais são áreas com implicações políticas. Um passo nessa direção é a criação da próxima geração de padrões científicos (*next generation science standards*) (National Research Council, 2013), que fornece recomendações para começar a ensinar conceitos de complexidade nos níveis pré-universitários nos Estados Unidos. A aprendizagem de conceitos e métodos de complexidade também pode ser um problema para muitos cientistas sociais atuantes, que podem estar envolvidos com a realização de pesquisas sobre sistemas de ensino, o que tem implicações para o desenvolvimento profissional neste momento.

Há um desafio mais amplo e talvez mais profundo na aprendizagem relacionada a perspectivas da complexidade, que vão além da compreensão conceitual, que é a implicação epistêmica da teoria e métodos de sistemas complexos. Um aspecto epistêmico-chave e talvez contraintuitivo desses sistemas é a aparente complexidade no comportamento de muitos sistemas complexos poder ser descrita em termos da interação entre os elementos do sistema com base em regras relativamente simples. Esta perspectiva parece implícita na visão de Simon (1996): “A tarefa central da ciência natural é fazer o maravilhoso lugar-comum: mostrar que a complexidade, corretamente visualizada, é apenas uma máscara para a simplicidade; para encontrar o padrão escondido no caos aparente” (p. 1).<sup>8</sup> Este capítulo denomina este de ponto de vista epistêmico *simplicidade-complexidade*.

Perspectivas de complexidade representam um desafio para a visão epistêmica razoavelmente comum de *complexidade-complexidade*, isto é, sistemas complexos,

8. No original: “The central task of a natural science is to make the wonderful commonplace: to show that complexity, correctly viewed, is only a mask for simplicity; to find pattern hidden in apparent chaos”.

como aqueles estudados por pesquisadores educacionais, devem ter explicações *complexas*, enquanto sistemas simples teriam, naturalmente, explicações simples. Com efeito, um viés epistêmico *complexidade-complexidade* – e seu corolário, o viés epistêmico *simplicidade-simplicidade* – seriam características óbvias de *senso comum*. Por exemplo, uma máquina simples, como uma roldana, que pode ser explicada como uma correia enrolada em torno de uma roda para elevar ou abaixar algo, enquanto o comportamento e funcionamento de uma máquina complexa; ou ainda, como um moderno avião a jato poderia apenas ser explicado com conceitos complexos da física – ou seja, efeito Bernoulli –, da engenharia e da ciência dos materiais, modelos de negócios para financiamento e manutenção, e assim por diante.

Embora não tenha havido nenhuma pesquisa direta sobre essa conjectura, acredita-se que muitos pesquisadores educacionais e, provavelmente, indivíduos em agências de política tendem a ter visões epistemológicas alinhadas com o viés *complexidade-complexidade*. Se isto realmente ocorrer, então, um importante desafio epistêmico da perspectiva de complexidade para a pesquisa educacional e para os formuladores de política é que não deve haver necessariamente explicações complexas para o comportamento complexo; tal comportamento pode muito bem ser explicado por uma abordagem *bottom up* a partir de informações simples, mínimas, como função de utilidade, regra de decisão, ou heurística contida em interações locais (Nowak, 2004). Claro, é possível que o futuro da pesquisa em sistemas educacionais complexos pode ou não se alinhar com a visão epistêmica *simplicidade-complexidade*. Ainda assim, estar ciente de pressupostos epistemológicos como estes tem valor para pesquisadores da educação e formuladores de políticas educacionais.

## 6 CONCLUSÃO

Para encerrar este capítulo, retorna-se à questão de Lemke e Sabelli (2008):

Podem as novas ferramentas de análise de sistemas complexos nos ajudar a entender o impacto potencial de novas tecnologias sobre o sistema educacional e nos ajudar a prever os caminhos que diferentes esforços de reforma sistêmica seguem? (...) Podem elas nos ajudar a identificar relações críticas dentro do sistema educacional resistentes à mudança sistêmica ou oferecer oportunidade para novas alternativas? (...) Se a resposta para qualquer dessas perguntas for ‘sim’, será necessária a colaboração entre as diversas novas comunidades de pesquisadores que procuram por um quadro comum para compartilhar ideias de diferentes disciplinas e abordagens tanto para a análise de sistemas complexos como para a educação.<sup>9</sup>

9. No original: “*Can the new tools of complex system analysis help us understand the potential impact on the educational system of new technologies and help us predict the paths that different efforts at systemic reform follow? Can they help us identify critical relationships within the educational system that resist systemic change or afford opportunities for new alternatives? (...) If the answers to any of these questions are to be ‘yes’, we will require collaboration within a diverse new community of researchers seeking a common framework for sharing ideas from different disciplines and approaches to both complex system analysis and to education*”.

Parece que agora, cerca de seis anos depois que essas perguntas foram feitas, pode-se de fato dizer um *sim* provisório a várias delas. Diante dessa afirmação positiva, e dada a gama de necessidades educacionais e desafios do século XXI, tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento, há uma necessidade urgente de promover a difusão das ferramentas metodológicas e intelectuais de sistemas complexos disponíveis para aplicação no estudo de sistemas educacionais. A difusão desse ferramental e arcabouço conceitual também é premente entre políticos e outros *stakeholders* que moldam a política educacional. Espera-se que este capítulo contribua para avançar o diálogo no sentido de elevar a consciência tanto da urgência de entender a educação como um sistema complexo quanto das oportunidades que essa abordagem traz.

## REFERÊNCIAS

- ARTHUR, B.; DURLAUF, S.; LANE, D. (Eds.). **The economy as an evolving complex system**. Reading: Addison-Wesley, 1997. v. 2.
- AXELROD, R. **The complexity of cooperation: agent-based models of competition and collaboration**. Princeton: Princeton University Press, 1997.
- BAR-YAM, Y. **Dynamics of complex systems**. New York: Perseus Publishing, 2003.
- BEREITER, C.; SCARDAMALIA, M. Technology and literacies: from print literacy to dialogic literacy. In: BASCIA, N. et al. (Eds.). **International handbook of educational policy**. Dordrecht: Springer, 2005.
- CARLEY, K. M. Computational organizational science: a new frontier. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 19, n. 3, p. 7257-7262, 2002.
- EIDELSON, R. J. Complex adaptive systems in the behavioral and social sciences. **Review of General Psychology**, v. 1, n. 1, p. 42-71, 1997.
- EPSTEIN, J. M.; AXTELL, R. **Growing artificial societies: social science from the bottom up**. Washington: Brookings Institution Press; MIT Press, 1996.
- FIRESTONE, W. A. Meaning in method: the rhetoric of quantitative and qualitative research. **Educational Researcher**, v. 16, n. 7, p. 16-21, 1987.
- FRANK, K. A. et al. The social dynamics of mathematics coursetaking in high school. **American Journal of Sociology**, v. 113, n. 6, p. 1645-1696, 2008.
- HMELO-SILVER, C. E.; MARATHE, S.; LIU, L. Fish swim, rocks sit, and lungs breathe: expert-novice understanding of complex systems. **The Journal of the Learning Sciences**, v. 16, n. 3, p. 307-331, 2007.

- HOLLAND, J. H. **Hidden order**: how adaptation builds complexity. Reading: Addison-Wesley, 1995.
- JACKSON, E. A. **The second metamorphosis of science**: a second view. Santa Fe: Santa Fe Institute, 1996.
- JACOBSON, M. J. Problem solving, cognition, and complex systems: differences between experts and novices. **Complexity**, v. 6, n. 3, p. 41-49, 2001.
- JACOBSON, M. J.; KAPUR, M. Learning environments as emergent phenomena: theoretical and methodological implications of complexity. In: JONASSEN, D.; LAND, S. (Eds.). **Theoretical foundations of learning environments**. 2nd ed. New York: Routledge, 2012.
- JACOBSON, M. J.; WILENSKY, U. Complex systems in education: scientific and educational importance and implications for the learning sciences. **The Journal of the Learning Sciences**, v. 15, n. 1, p. 11-34, 2006.
- JACOBSON, M. J.; KAPUR, M.; REIMANN, P. Conceptualizing debates in learning and educational research: towards a complex systems meta-theory of learning. **Educational Psychologist**, Manuscript under review, 2014.
- KAPUR, M. *et al.* **Emergence of learning in computer-supported, large-scale collective dynamics**: a research agenda. New Brunswick, 2007. (Paper presented at the Computer Supported Collaborative Learning Conference).
- KAUFFMAN, S. **At home in the universe**: the search for laws of self-organization and complexity. New York: Oxford University Press, 1995.
- LEMKE, J.; SABELLI, N. Complex systems and educational change: towards a new research agenda. **Educational Philosophy and Theory**, v. 40, n. 1, p. 118-129, 2008.
- LEVIN, J. A.; DATNOW, A. The principal role in data driven decision making: using case study data to develop multi-mediator models of educational reform. **School Effectiveness and School Improvement**, v. 23, n. 2, p. 179-201, 2012.
- MAROULIS, S. *et al.* Complex systems view of educational policy research. **Science**, v. 330, p. 38-39, 2010.
- MAROULIS, S. *et al.* Modeling the transition to public school choice. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 17, n. 2, 2014.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Next Generation Science Standards**: for States, by States. Washington: The National Academies Press, 2013.
- NOWAK, A. Dynamical minimalism: why less is more in psychology. **Personality and Social Psychology Review**, v. 8, n. 2, p. 183-192, 2004.

- SAWYER, R. K. The emergence of creativity. **Philosophical Psychology**, v. 12, n. 4, p. 447-469, 1999.
- \_\_\_\_\_. The mechanisms of emergence. **Philosophy of the Social Sciences**, v. 34, n. 2, p. 260-282, 2004.
- SIMON, H. A. The sciences of the artificial. Cambridge: MIT Press, 1996.
- SUTHERS, D.; HUNDHAUSEN, C. An empirical study of the effects of representational guidance on collaborative learning. **The Journal of the Learning Sciences**, v. 12, n. 2, p. 183-219, 2003.
- WATTS, D. J.; STROGATZ, S. H. Collective dynamics of “small-world” networks. **Nature**, v. 393, p. 440-442, 1998.

#### BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- BASCIA, N. *et al.* (Eds.). **International handbook of educational policy**. Dordrecht: Springer, 2005.
- RAHAYU, P.; JACOBSON, M. J. Speaking self-efficacy and English as a foreign language: learning processes in a multi-user virtual environment. In: PISCIONER, M. (Ed.). **Effectively implementing information communication technology in higher education in the Asia-Pacific region**. Hauppauge: Nova Science Publishers, 2012.

## CAPÍTULO 15

# PERSPECTIVAS DA COMPLEXIDADE PARA A EDUCAÇÃO NO BRASIL

Patrícia A. Morita Sakowski<sup>1</sup>  
Marina H. Tóvolli<sup>2</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas educacionais abrangem um grande número de agentes heterogêneos, cuja interação leva ao aprendizado, ao ensino, à cognição e à educação. Eles são compostos de camadas interconectadas, cada uma das quais dá suporte às outras camadas e as restringem. Por meio de mecanismos de retroalimentação (*feedback*) e adaptação, esses sistemas e seus agentes coevoluem. Todas essas características fazem dos sistemas educacionais sistemas complexos.

Os agentes heterogêneos de um sistema educacional são, por exemplo, os estudantes, os professores e os pais. Cada estudante aprende de um modo diferente, cada professor tem o seu método de ensino e cada família tem seu modo particular de educar os filhos. O aprendizado surge não somente das informações transmitidas pelos professores; ele é resultado das interações entre os estudantes e outros indivíduos em ambientes formais e informais.

Como já mencionado, os sistemas educacionais são formados por camadas interconectadas. Na perspectiva macro, eles englobam instituições governamentais, tais como o Ministério da Educação e as redes de escolas e universidades. No entanto, os ministérios da Fazenda, da Saúde e dos Transportes, entre outros, também podem ser considerados como parte do sistema, dado que eles influenciam a alocação dos recursos orçamentários, as condições de saúde da população e a acessibilidade às escolas, respectivamente.

Em um nível menor, as escolas não podem ser separadas do contexto em que existem. Fatores externos à escola, tais como segurança do bairro ou posição socioeconômica da comunidade, impactam a frequência escolar e o desempenho acadêmico dos alunos. Similarmente, o ensino superior influencia e educação básica e por ela é influenciada.

1. Técnica de Planejamento e Pesquisa e chefe da Assessoria de Planejamento e Articulação Institucional do Ipea.

2. Economista, mestre em Ciência Política e bolsista do Subprograma de Pesquisa para o Desenvolvimento Nacional (PNPD) do Ipea.

No nível interpessoal, os alunos interagem com seus colegas, professores, pais, diretores e sua comunidade como um todo, enquanto no nível intrapessoal o aprendizado resulta de processos mentais influenciados por interesses pessoais, histórico pessoal, níveis de hormônio, memória operacional e outras características específicas, como resposta a estímulos do ambiente.

Os traços educacionais em uma sociedade emergem então das interações de todas essas diferentes escalas, as quais não podem ser isoladas umas das outras. Dada a natureza complexa dos sistemas educacionais, as tradicionais metodologias lineares não são suficientes para capturar as dinâmicas de tais sistemas. A presença de múltipla causalidade e não linearidade pode até mesmo colocar em dúvida a validade externa de resultados obtidos em rigorosos experimentos aleatórios controlados, dado que o controle de todas as principais variáveis pode ser impossível em pesquisas educacionais (Cohen, Manion e Morrison, 2003).

Dada a natureza complexa da educação, as metodologias de sistemas complexos podem ajudar a analisar a educação em diferentes formas. Primeiramente, o simples entendimento da natureza complexa dos sistemas educacionais pode ajudar os pesquisadores a se desprenderem de uma visão mecanicista da educação, regida por causalidades simples e controles que levam a resultados previsíveis.

Em segundo lugar, a modelagem da educação pode fornecer uma melhor compreensão das dinâmicas do sistema. Na tentativa de identificação dos principais elementos e regras de um sistema, pode-se entender, pouco a pouco, como os diferentes agentes se inter-relacionam, assim como simular os possíveis resultados de uma determinada intervenção, por exemplo. Nesse contexto, o papel de modelos como “comunicadores de teoria” deve ser enfatizado (Heemskerk, Wilson e Pavao-Zuckerman, 2003). Os modelos podem ser aprimorados a partir de pesquisas colaborativas, enriquecendo ao mesmo tempo o entendimento dos fenômenos.

A imensa disponibilidade de dados sobre educação também torna viável estudos de associação. Técnicas de *machine learning* (aprendizagem automática) e análise de rede podem fornecer *insights* valiosos sobre tendências ou aspectos específicos a serem investigados. Além disso, compreender a complexidade dos sistemas educacionais pode ser a maneira de se encontrar soluções simples (Berlow *et al.*, 2009). Por exemplo, ao se conhecer a rede de relações compreendidas no sistema, é possível identificar os nós centrais ou pontos de alavancagem a partir dos quais poderiam ocorrer mudanças.

É importante mencionar que as metodologias de sistemas complexos não são um substituto dos métodos tradicionais de pesquisa educacional, mas sim um complemento. O conhecimento sobre os sistemas educacionais pode surgir da combinação de pesquisas empíricas, métodos quantitativos e qualitativos tradicionais, estudos de associação e modelagem.

Como apresentado no capítulo anterior,<sup>3</sup> uma considerável quantidade de pesquisas no mundo tem explorado a natureza complexa dos sistemas educacionais, da aprendizagem e do ensino. No Brasil, no entanto, essa área ainda é incipiente. O objetivo deste capítulo é analisar o que tem sido feito nessa área no país e investigar como a abordagem da complexidade pode ajudar a educação no Brasil. Seguindo esta introdução, a seção 2 concentra-se no uso dos conceitos da complexidade, em sentido mais teórico, para se pensar a educação. A seção 3 apresenta aplicações dos métodos e metodologias de sistemas complexos no país. Finalmente, a seção 4 discute por que a abordagem da complexidade parece ser particularmente apropriada para se analisar a educação no Brasil e ajudar no seu aprimoramento.

## 2 O PENSAMENTO COMPLEXO NA EDUCAÇÃO

No Brasil, a discussão da perspectiva da complexidade sobre a educação remete particularmente ao filósofo e sociólogo francês Edgar Morin. Vários estudos chamam a atenção para os princípios da complexidade e a necessidade de se repensar a educação, principalmente a ressignificação das práticas pedagógicas. Há um grande foco em se questionar o modelo tradicional, baseado nas teorias instrucionistas, e em se propor um novo modelo a partir dos pressupostos epistemológicos presentes nas teorias quânticas e biológicas.

O paradigma tradicional ou newtoniano-cartesiano, que tem como pressupostos básicos a fragmentação e a visão dualista do universo, teve grande influência sobre a educação, sobre a escola e sobre a prática pedagógica do professor (Behrens e Oliari 2007). A prática educacional tem sido marcada por uma visão cartesiana de dicotomia das dualidades (sujeito-objeto, parte-todo, razão-emoção, local-global), em que se rejeita a articulação desses pares binários. Observa-se uma subdivisão do conhecimento em áreas, institutos e departamentos, em que os princípios de fragmentação, divisão, simplificação e redução são dominantes, acabando por resultar em uma prática pedagógica descontextualizada (Santos, 2008). O mesmo é enfatizado por Petraglia (1995), que argumenta que os princípios de fragmentação e de simplificação foram concretizados na educação por meio de uma estrutura disciplinar do conhecimento, na qual este acabou por perder significação.

De acordo com Araújo (2007), as atividades pedagógicas têm enfatizado os aspectos instrutivos em detrimento de aspectos criativos, reflexivos, construtivos e cooperativos. Observa-se um processo rígido, de transmissão de conteúdo, que privilegia a memorização de informações isoladas, e que desconsidera o contexto,

3. Capítulo 14 deste livro.

o envolvimento dos alunos e as suas diferenças.<sup>4</sup> O aluno é concebido como um espectador, que deve copiar, memorizar e reproduzir os conteúdos apresentados pelo professor (Behrens, 1999).

De forma geral, a maioria dos educadores tende a perceber e a interpretar o mundo a partir da física clássica, em que a realidade é apresentada como estável, previsível e predeterminada. Contrapondo esta visão, as teorias quânticas e biológicas apresentam pressupostos epistemológicos, como dialogicidade e incerteza, propondo uma ressignificação das práticas pedagógicas (Moares, 2004a). Apresentam-se brevemente alguns desses princípios.

## 2.1 O princípio dialógico

Morin (2011) destaca o princípio dialógico como importante conceito da complexidade. Esse princípio refere-se à capacidade de associação entre dois termos que são antagônicos, mas ao mesmo tempo complementares. Por exemplo, ordem e desordem são antagônicos, mas podem ser, em alguns momentos, complementares, ao colaborarem e produzirem organização e complexidade.

Em relação ao princípio dialógico, Aquino Guimarães *et al.* (2009) argumentam que o envolvimento dos contrários implica a valorização de uma pedagogia que considera o conflito; que observa o todo, as partes e as suas relações em vez de isolá-los. A partir dessa visão, o currículo fragmentado cederia lugar para um currículo que permitisse a comunicação e o diálogo entre os saberes, o que promove a construção do todo.

## 2.2 A complementaridade dos opostos

Relacionada com o princípio dialógico está a ideia da complementaridade dos opostos.<sup>5</sup> No contexto da educação, Santos (2008) chama a atenção para a dicotomização e a ênfase em apenas um dos atributos dos pares binários como base do ensino – como, por exemplo, a racionalidade –, o que acaba por gerar uma visão unilateral e uma incompreensão do processo de ensino e aprendizagem. Como resultante, os alunos não são capazes de articular as diversas dimensões do próprio indivíduo. Nesse contexto, Santos (2008) propõe a articulação dos pares binários de forma a obter uma visão mais completa dos fenômenos observados. Para a autora, “razão sem emoção não capta a característica humana, enquanto que emoção sem razão não conduz a parte alguma” (Santos, 2008, p. 77).

4. Araújo (2007), particularmente interessada nos desafios emergentes para a educação *online*, observa que existem cursos de ensino a distância (EaD) que continuam amarrados aos conceitos de currículo, marcado por uma visão instrucionista. Para a autora, os modelos instrucionistas apresentam-se científicamente defasados e acabam por simplificar o processo de construção do conhecimento. Isso implica a necessidade de investigar o uso da tecnologia nos cursos de EaD a partir de uma perspectiva de ensino-aprendizagem em rede, a qual permita o desenvolvimento do pensamento autônomo.

5. O princípio da complementaridade dos opostos foi proposto pelo físico dinamarquês Niels Bohr (1961), por meio do qual ele argumenta que onda e partícula integram uma mesma realidade (Santos, 2008).

Outro exemplo é o binário ordem-desordem. Para Santos (2008), há uma relação simbiótica de interdependência entre ordem e desordem. Em relação à gestão educacional, a autora argumenta:

a ordem está representada pela legislação e pela organização, normas legais e burocráticas, grades curriculares. Na gestão dessa organização surgem a desordem e a ambiguidade, introduzidas pelos sujeitos que dão dinamicidade ao modelo de funcionalidade e racionalidade do sistema. Seres humanos, com sua diversidade, dão suporte e funcionalidade ao gerenciamento da organização. O comportamento das pessoas na instituição é um misto de dependência e autonomia (outro par binário). A ordem é desejável, mas a desordem, o espontaneísmo, a desobediência, proporcionam vitalidade à instituição, embora, em excesso, levem à sua desintegração (Santos, 2008 p. 78).

### **2.3 Incerteza e não linearidade**

Essas ideias nos conduzem à importância da incerteza e da não linearidade. Como apresentado por Santos (2008), o princípio da complementaridade dos opostos leva à articulação das dualidades, tais como certeza e incerteza, negando uma visão reducionista e determinista. O conceito de incerteza opõe-se à ideia dualista dicotomizada, que enfatiza apenas a ordem e a certeza. A escola mantém um cenário de certeza ao repetir normas, valores e sanções sociais, ao seguir as regras instituídas, tais como as regras de avaliação, de forma que se torna previsível o comportamento dos professores. Os professores muitas vezes desconsideram as características incertas e complexas do processo de construção do conhecimento, despersonalizando e homogeneizando os alunos. Santos (2008), ao considerar que as características do sujeito, do conhecimento e da sociedade são dinâmicas, argumenta que a articulação da certeza e da incerteza na prática pedagógica é fundamental.

Ademais, o conceito de incerteza vai contra a ideia de causalidade linear, fundamentada na racionalidade cartesiana, ao questionar a estabilidade, a determinação e a previsibilidade dos fenômenos (Moares, 2004a; 2004b). O pressuposto de uma dinâmica não linear contrapõe-se às práticas pedagógicas oriundas da teoria instrucionista, em que o processo de construção do conhecimento é compreendido como linear e onde não há espaço para uma aprendizagem colaborativa e interativa (Araújo, 2007).

### **2.4 Recursão organizacional**

Outro importante conceito da complexidade é a recursão organizacional. Segundo Morin (2011, p. 74), um processo recursivo é “um processo em que os produtos e os efeitos são ao mesmo tempo causas e produtores do que os produz”. O princípio recursivo rompe com a ideia de causa e efeito ao apresentar a concepção cíclica de que tudo o que é produzido retorna sobre o que o produziu.

Essa ideia é congruente com o sistema educacional se considerarmos o sistema educacional como um sistema que se auto-organiza, no sentido de que o aluno é fruto de um determinado sistema educacional e ao mesmo tempo influenciador deste. Dessa forma, as relações retroativas entre o aluno e o sistema fazem com que o sistema educacional evolua e se desenvolva (Moraes, 2004a).

A mesma ideia pode ser vista quando se discute sobre a construção do conhecimento. De acordo com Bonilla (2002), informação e conhecimento se relacionam. Porém, estando o sentido no intérprete e não na informação, esta só adquire significado dentro de um contexto humano. Conhecimento é, então, o processo de atribuição de significado às informações; e isso ocorria nas interações entre os sujeitos e na relação do sujeito com o mundo. Dessa forma, a construção de conhecimento engloba movimentos recursivos, em que indivíduos transformam o conhecimento e o conhecimento transforma os sujeitos que o produziram.

## 2.5 O princípio da autopoiese

Relacionado com a recursão organizacional, há o princípio da autopoiese, formulado pelos biólogos e filósofos chilenos Maturana e Varela.<sup>6</sup> Esse princípio refere-se a uma unidade autônoma que se constitui como uma rede de produção de componentes, em que tais componentes participam recursivamente na mesma rede de produção. Ou seja, não existe uma separação entre o produtor e o produto, de forma que a organização autopoética é em si o produto de suas operações (Varela, Maturana e Uribe, 1974; Maturana e Varela, 1995).<sup>7</sup>

Com base nessa ideia, Moraes e Torre (2006) argumentam que todo conhecer e aprender implicam processos autopoieticos, dado que o conhecimento e a aprendizagem são processos interpretativos e recursivos gerados pelo sujeito quando este interage com o ambiente. Os autores chamam a atenção para a impossibilidade de se predizer o que acontece com o aluno apenas pela observação do ambiente em que este está inserido, dado que o ambiente não determina, mas pode apenas desencadear mudanças nas estruturas cognitivo-emocionais do aluno. Isso implica

6. Maturana e Varela (1995), na busca por compreender a organização do ser vivo, formulam o princípio autopoético, afirmando que todo ser vivo é uma organização autopoética. A célula, por exemplo, é uma “rede de reações químicas que produz moléculas que, (i) a partir de suas interações produzem e participam recursivamente na mesma rede de reações que as produziram, e (ii) constituem a célula como uma unidade física” (Varela, Maturana e Uribe, 1974, p. 560, tradução nossa). No original: “*network of chemical reactions which produce molecules such that (i) through their interactions generate and participate recursively in the same network of reactions which produced them, and (ii) realize the cell as a material unity*”.

7. A principal diferença entre o princípio prévio de recursão organizacional e o da autopoiese é como os autores entendem autonomia *per se*. Morin (2011) considera uma autonomia relativa – o indivíduo é de fato dependente do ambiente –, enquanto Maturana e Varela (1995) admitem uma autonomia absoluta. Para os últimos autores, cada unidade autopoética apresenta uma estrutura particular, e quando a unidade autopoética interage com o ambiente, a estrutura do ambiente não determina; ela só desencadeia mudanças na estrutura da unidade. Isto é, devido à organização autopoética, o sistema é autônomo em relação ao ambiente. O sistema e o ambiente são inter-relacionados, mas não dependentes; cada sistema opera independentemente do outro.

que a dinâmica de um professor pode funcionar bem para um determinado grupo de alunos, mas não para um outro grupo.

Em consonância com Moraes e Torre, Santos (2008) argumenta que para a prática pedagógica isso implica a adoção de uma metodologia que estimule os alunos a, eles mesmos, produzirem o próprio conhecimento. O professor teria o papel de facilitar diálogos entre os saberes, respeitando a diversidade de cada aluno, dado que cada aluno tem seu próprio estilo de aprendizagem e sua própria forma de solucionar problemas. Ao considerar que o ambiente influencia o indivíduo, Santos (2008) enfatiza que o conhecimento deve ser encarado como resultante do enredamento de aspectos físicos, biológicos e sociais. Para a autora, isso implica a necessidade de ressignificar o próprio conceito de percepção.

## 2.6 O princípio hologramático

O último princípio apresentado aqui é o princípio hologramático. Proposto por Edgar Morin (2011), o princípio hologramático refere-se à ideia de que a parte constitui o todo e o todo constitui a parte. O autor usa a ideia do holograma físico para argumentar que o menor ponto da imagem do holograma contém quase toda a informação do objeto representado.

Essa ideia vai contra a atual estrutura disciplinar do conhecimento, baseada nas orientações cartesianas, em que se acredita que a soma das partes listadas nas grades curriculares equivale ao todo do conhecimento. Essa estrutura disciplinar impossibilita o aluno de estabelecer relações entre os conhecimentos obtidos (Santos, 2008). Ao considerar que a compreensão das partes depende de suas inter-relações com a dinâmica do todo, Santos argumenta que, para explicar fenômenos isolados, a contextualização é fundamental. Para a autora, há uma necessidade de se inverter o foco do binário parte-todo e de interligar a totalidade fragmentada.

Uma forma de superar a atual estrutura disciplinar e fragmentária do ensino e de articular os contrários é a transdisciplinaridade. Ao apontar que o que parece contraditório em um nível de realidade pode não o ser em outro nível de realidade, a transdisciplinaridade desvela que não existe uma verdade absoluta, mas sim verdades relativas, sujeitas a constantes mudanças. Dessa forma, a transdisciplinaridade oferece uma maior compreensão da realidade, que assume um significado mais amplo (Santos, 2008).

A partir da visão transdisciplinar, o conhecimento é visto como uma rede de conexões. O conhecimento é multidimensional, dados os diferentes níveis de realidade no processo cognitivo (Santos, 2008). Para Santos, ao seguir a prática pedagógica tradicional, os professores tendem a ignorar o princípio hologramático e a não articular os diversos saberes para a construção de um conhecimento multidimensional. Dada a complexidade dos fenômenos, para se conhecer um

objeto em toda a sua dimensão, se fazem necessários conhecimentos e observadores transdisciplinares. Como citado pela autora,

A transdisciplinaridade maximiza a aprendizagem ao trabalhar com imagens e conceitos que mobilizam, conjuntamente, as dimensões mentais, emocionais e corporais, tecendo relações tanto horizontais como verticais do conhecimento. Ela cria situações de maior envolvimento dos alunos na construção de significados para si (Santos, 2008, p. 76).

### 3 MÉTODOS E METODOLOGIAS DE SISTEMAS COMPLEXOS EM EDUCAÇÃO

A seção anterior apresentou uma discussão sobre a utilização dos conceitos teóricos da complexidade para pensar a educação no Brasil. Esta seção foca as aplicações dos métodos e metodologias de sistemas complexos em educação no país. Tais aplicações podem ser divididas em dois grupos principais: aquelas predominantemente relacionadas à modelagem e aquelas mais relacionadas à disponibilidade de dados. Essa divisão é basicamente feita por questões analíticas, dado que os dois grupos são fundamentalmente entrelaçados e interconectados. Modelagem abrange autômatos celulares e modelagem baseada em agentes, sistemas dinâmicos, análise de redes e sistemas tutores inteligentes, enquanto mineração de dados educacionais (*educational data mining*), *learning analytics* e visualização de dados compõem o segundo grupo.<sup>8</sup>

#### 3.1 Modelos baseados em agentes e autômatos celulares

No Brasil, modelos baseados em agentes e autômatos celulares têm sido particularmente usados para ensinar conceitos da complexidade, ciências e matemática, em diferentes níveis de ensino. Xavier e Borges (2004), por exemplo, discorrem sobre o uso de autômatos celulares para ensinar estudantes do último ano da educação básica sobre padrões emergentes e comportamento complexo. Uehara e Silveira (2008) focam a aplicação de autômatos celulares no ensino de cálculo em cursos de graduação em ciência da computação. Outros exemplos incluem o uso de modelagem computacional e simulação para ensinar física (Gomes e Ferracioli, 2002), química (Recchi e Martins, 2013), biologia (Pereira e Sampaio, 2008) e questões ambientais (Santos *et al.*, 2001).<sup>9</sup>

O software NetLogo é popular em muitas dessas aplicações. Recchi e Martins (2013), por exemplo, usaram o NetLogo para ensinar química e ciências em um curso de graduação. No curso, foi pedido que os alunos desenvolvessem projetos usando esta ferramenta. Um estudo interessante, elaborado por um grupo desses

8. Para mais informações sobre os métodos e as metodologias de sistemas complexos, ver o capítulo 3 deste livro.

9. O uso de jogos em educação também pode ser considerado uma abordagem baseada em simulação, que está ganhando popularidade no Brasil (Borges *et al.*, 2013).

estudantes, simulou a difusão da Aids. A partir da simulação, os alunos foram capazes de melhor entender os conceitos e os mecanismos de doenças infecciosas, assim como os fatores que contribuem para a proliferação de tais doenças. Desse modo, o *software* promoveu um processo dinâmico de aprendizagem, no qual o aluno pode intervir e interagir com este e construir conhecimento.

O uso de autômatos celulares e modelagem baseada em agentes no ensino também é extenso no mundo. Um projeto de pesquisa na Universidade de Stanford, por exemplo, incentiva o uso de modelos computacionais para conectar experimentos físicos e virtuais em aulas de ciência (Blikstein, 2012). Porém, no exterior, diferentemente do Brasil, modelos baseados em agentes têm sido mais diretamente aplicados na análise de políticas educacionais. Maroulis *et al.* (2010) simulam um modelo baseado em agentes para investigar o impacto de reformas de “escolha escolar”<sup>10</sup> em escolas públicas de Chicago,<sup>11</sup> enquanto Millington, Butler e Hamnett (2014) utilizam um modelo baseado em agentes para analisar o impacto de políticas de alocação de escolas baseadas na distância no Reino Unido. Estudos similares não foram encontrados no Brasil.

### 3.2 Sistemas dinâmicos

Conforme a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD, 2009, p. 10),

Sistemas dinâmicos são, de modo geral, conjuntos de equações diferenciais ou de equações discretas iterativas usados para descrever o comportamento de partes inter-relacionadas em um sistema complexo, e frequentemente incluem ciclos positivos e negativos de retroalimentação. Eles são usados para permitir a simulação de, dentre outros, resultados de alternativas de intervenções no sistema (por exemplo, quais incentivos são mais prováveis de produzir a adoção de energias alternativas por consumidores e companhias de energia). Eles também têm sido usados para antecipar consequências não intencionais de políticas (por exemplo, o impacto do aumento da disponibilidade de seguro de saúde na diminuição de comportamentos preventivos de saúde).

Somente uma aplicação de sistemas dinâmicos à política educacional foi encontrada no Brasil. Preocupados com o possível não cumprimento da meta da taxa líquida de matrícula na educação superior estabelecida no Plano Nacional de Educação (PNE),<sup>12</sup> Strauss e Borenstein (2014) utilizaram a metodologia de sistemas dinâmicos para melhor analisar e entender a dinâmica do sistema de graduação brasileiro. Os autores desenvolveram um modelo que permitiu a

10. As reformas de “escolha escolar” (*school choice reforms*) dão aos pais a possibilidade de escolher a escola que seus filhos frequentarão, não ficando restritos às escolas presentes na região ou bairro em que habitam.

11. Para mais detalhes acerca deste assunto, ver o capítulo 14 deste livro.

12. O PNE (2011/2020) estabelece a meta de elevar para 33% da população entre 18 a 24 anos a taxa líquida de matrícula na educação superior (FNE, 2011).

simulação do comportamento de diversas variáveis – tais como políticas regulatórias, oferta e demanda e setor público e privado –, como forma de se analisar o efeito de diferentes políticas. A análise de diferentes cenários possibilitou uma melhor compreensão do comportamento dinâmico do sistema de educação superior brasileiro, permitindo assim o desenvolvimento de estratégias eficazes e o progresso de políticas educacionais.

Um exemplo similar no âmbito internacional é o trabalho de Murthy, Gujrati e Iyer (2010), que utilizam um modelo de simulação de sistemas dinâmicos para analisar e planejar investimentos futuros de um programa de educação à distância em um importante instituto de engenharia na Índia. Outros trabalhos relacionados (Al Hallak *et al.*, 2009; Dahlan e Yahaya, 2010; Rodrigues *et al.*, 2012) utilizam a abordagem de sistemas dinâmicos como sistemas de apoio à decisão para administração do ensino superior.

### 3.3 Análise de redes

Diferentes exemplos de aplicação de análise de redes à educação foram encontrados no Brasil. Mesquita *et al.* (2008) utilizam a metodologia de análise de redes para investigar o potencial de organização e ação em rede de um grupo de educadores, técnicos, coordenadores e diretores de escolas da rede municipal de ensino da cidade de Fortaleza que têm como interesse comum a inclusão socioeducacional de pessoas com necessidades especiais. Ao permitir a identificação do papel de cada ator, do tamanho e da densidade de rede, bem como os atores em posições favoráveis para a sustentação e a expansão da rede, a análise possibilita a detecção de ações necessárias para um melhor funcionamento do grupo. Isso compreende o incentivo ao compartilhamento de informação e de experiências que promovam a inclusão de pessoas com necessidades especiais.

Aquino Guimarães *et al.* (2009) também aplicam a metodologia de análise de redes para examinar a rede de programas de pós-graduação em administração no Brasil. Observando uma carência de tradição de pesquisa na área de administração no país, os autores consideram de suma importância a articulação entre os programas de pós-graduação, de forma a aumentar a produção nacional em administração e a consolidação desse campo científico no país. Ou seja, uma rede forte e densa, no que se refere à diversidade de laços estabelecidos e de atores (programas) envolvidos, tende a ser uma condição ideal para o aumento do volume e da qualidade da produção científica.

Dessa forma, uma melhor compreensão da rede de programas de pós-graduação permite que os programas envolvidos identifiquem seu papel na rede e suas possíveis contribuições para o fortalecimento e a expansão da rede. Ademais, isso contribui para a formulação de políticas públicas mais adequadas ao fornecer informações importantes para o desenvolvimento dos programas de pós-graduação no país (Aquino Guimarães *et al.*, 2009).

O estudo mostra que a rede dos programas de pós-graduação em administração no Brasil é fraca e pouco densa, sugerindo que as atividades partilhadas e as parcerias são pouco utilizadas pelos programas analisados. Ademais, a natureza da instituição, isto é, se é pública ou privada, não é um fator determinante na constituição da rede. Com base nesses resultados, Aquino Guimarães *et al.* (2009) argumentam que políticas institucionais que estimulem a prática de pesquisas conjuntas e o intercâmbio de professores e alunos deveriam ser consideradas como forma de aumentar a cooperação e o fortalecimento da rede de programas de pós-graduação.

Um estudo similar investiga a rede de instituições de pesquisa de administração pública e gestão social no Brasil (Rossoni, Hocayen-da-Silva e Ferreira, 2008). A análise mostra uma rede difusa, na qual os laços mais fortes se dão entre instituições de mesmo estado. Ademais, a estrutura da rede é relacionada aos indicadores de produção científica de cada instituição de pesquisa. Na mesma linha, Silva *et al.* (2006) usam o método de análise de redes para examinar a rede de coautoria dos professores do programa de pós-graduação em ciência da informação.

Outra interessante aplicação examina sistemas interativos e Objetos de Aprendizagem (OA) no processo de ensino-aprendizagem. Rossi *et al.* (2013) utilizam o método de análise de redes para avaliar a aprendizagem a partir do uso de jogos que exercitem operações matemáticas com frações. O método permitiu a análise tanto da participação quanto do desempenho dos estudantes no jogo e a identificação de deficiências de aprendizagem entre um grupo de estudantes.

Estudos futuros com análise de redes poderiam abranger o uso de modelos de contágio e de formação de opinião<sup>13</sup> para examinar a propagação da educação na sociedade.<sup>14</sup>

### 3.4 Sistemas tutores inteligentes

Sistemas tutores inteligentes são relacionados à aplicação de inteligência artificial em educação e podem ser descritos como “*software* de computador projetado para simular o comportamento e a orientação de um tutor humano” (Educause, 2013).<sup>15</sup> Sistemas tutores inteligentes diferem de outra instrução assistida por computador, ao serem capazes de interpretar respostas complexas do estudante e ao aprenderem enquanto operam. Isso significa que esses sistemas não checam simplesmente se uma resposta é correta ou errada, mas identificam onde, na resposta, o estudante errou. Ademais, eles podem ajustar as suas bases de conhecimento a partir dos dados gerados pelos estudantes ao usarem o sistema, e alterar em tempo real os

13. Ver o capítulo 7 deste livro, o qual discorre sobre a natureza complexa dos sistemas sociais.

14. Para uma visão mais geral da utilização de análise de redes em pesquisa educacional, ver Alan J. Daly (2010) e Brian V. Carolan (2013).

15. Uma informação mais detalhada sobre os sistemas tutores inteligentes pode ser encontrada em Koedinger *et al.* (2013).

seus comportamentos de tutor de modo a serem mais efetivos (Educause, 2013). Cursos *online* aberto e massivo (*massive open online courses* – MOOCs), tais como Coursera e Edx, são exemplos de instruções assistidas por computador, dado que eles não se adaptam conforme o comportamento do estudante. Consistem basicamente em vídeos pré-gravados e exercícios, cujo conteúdo não se altera conforme os estudantes respondem. No entanto, eles têm o potencial de se tornarem sistemas tutores inteligentes.

O melhor exemplo de sistemas tutores inteligentes no Brasil provavelmente é o Geekie.<sup>16</sup> Geekie é um sistema tutor inteligente desenvolvido no país que oferece tutoria assistida por computador para estudantes conectados à internet. Em 2014, Geekie fez parceria com a Secretaria de Educação de diferentes estados do Brasil para oferecer gratuitamente seu sistema tutor inteligente para os estudantes se prepararem para o Exame Nacional do Ensino Médio (Enem). Quando o estudante entra no sistema, realiza um teste diagnóstico, a partir do qual o sistema identifica as dificuldades e o nível de proficiência do aluno em diferentes áreas de conteúdo, e constrói um plano de estudo personalizado. Os relatórios de progresso dos estudantes são enviados aos professores e diretores, de forma que eles podem adaptar seus planos de aula de acordo com os relatórios. Em seu *website*, Geekie afirma que o sistema tem tido impacto sobre 13 mil escolas públicas e mais de 2 milhões de estudantes.

Há várias pesquisas em sistemas tutores inteligentes no Brasil, e a maioria se concentra nos departamentos de ciência da computação. O Simpósio Brasileiro e o Congresso Brasileiro de Informática na Educação (SBIE e CBIE), por exemplo, reúnem muitas pesquisas na área. Bittencourt *et al.* (2009) e Brusilovsky e Peylo (2003), por exemplo, constroem plataformas de aprendizagem adaptativa que utilizam dados dos estudantes para fornecer uma experiência de aprendizado personalizado.

Müller e Silveira (2013) usam uma técnica de recomendação – análoga àquelas empregadas para sugerir produtos para consumidores – a fim de indicar, em um sistema, usuários que possam ajudar outros usuários a resolver um determinado problema. Em outras palavras, o sistema utiliza pareamento social (*social matching*) para apoiar a formação de pares. O sistema é direcionado a professores que possam ter dificuldades no uso de plataformas de ensino assistido por computador. Quando um professor tem uma dúvida, o sistema o ajuda a encontrar uma pessoa com similares sistema de configuração e grau de habilidade para resolver a questão.

---

16. Para conhecê-lo, acessar a seguinte página eletrônica: <[www.geekie.com.br](http://www.geekie.com.br)>.

### 3.5 Learning analytics e mineração de dados educacionais

Todos esses sistemas tutores inteligentes, MOOCs, e outras tecnologias educacionais têm produzido uma grande quantidade de dados que podem ajudar a entender como os alunos aprendem e consequentemente possibilitar uma educação mais inteligente, interativa, atraente e efetiva (Koedinger *et al.*, 2013).

Mineração de dados (*data mining*) e *analytics* referem-se a “metodologias que extraem informações úteis e açãoáveis de grandes bases de dados”,<sup>17</sup> tais como as mencionadas anteriormente. Quando essas metodologias são aplicadas à educação, elas são chamadas de mineração de dados educacionais (*educational data mining*) e *learning analytics* (Baker e Siemens, 2014).<sup>18</sup>

Baker e Siemens (2014)<sup>19</sup> classificam as principais metodologias da área em cinco grupos centrais: *i*) métodos de predição; *ii*) descobrimento de estrutura (*structure discovery*); *iii*) mineração de relações (*relationship mining*); *iv*) destilação de dados para julgamento humano (*distillation of data for human judgment*); e *v*) descobrimento com modelos. Os principais modelos para predição são classificadores, regressores e estimação de conhecimento latente. Por exemplo, ao se estudarem os dados dos estudantes, podem-se identificar aqueles com maior risco de abandono escolar; e ao se analisarem as respostas dos estudantes, pode-se estimar o conhecimento latente. Descobrimento de estrutura engloba agrupamento (*clustering*), análise fatorial, análise de rede social e descobrimento de estrutura de domínio. Em um exercício em que cada estudante responde de forma diferente, técnicas de agrupamento podem ajudar na identificação de um conjunto de respostas erradas e na detecção de conceitos que estão sendo mal compreendidos. Dessa forma, vídeos que esclareçam tais questões podem ser sugeridos aos alunos. Mineração de relações abrange quatro grupos principais: *i*) mineração de regras de associação (*association rule mining*); *ii*) mineração de correlações (*correlation mining*); *iii*) mineração de padrões sequenciais (*sequential pattern mining*); e *iv*) mineração de dados causais (*causal data mining*). Destilação de dados para facilitar decisões humanas é relacionada a estratégias de visualização<sup>20</sup> para apresentar dados a educadores de forma adequada, tal como mapas de calor (*heat maps*), curvas de aprendizagem e *learnograms*.<sup>21</sup> Finalmente, descobrimento com modelos envolve o uso de um modelo de predição dentro de outro modelo de predição ou dentro de uma análise de mineração de relações, por exemplo.

17. No original: “*methodologies that extract useful and actionable information from large datasets*”.

18. Para mais informações sobre o desenvolvimento das duas comunidades – *learning analytics* e *educational data mining* – e suas divergências, ver Siemens e Baker (2012) e Baker e Siemens (2014).

19. O trabalho fornece exemplos e explicações detalhadas das aplicações dessas metodologias.

20. A questão da visualização é discutida em mais detalhes na seção seguinte.

21. Um *learnogram* é uma ferramenta de representação gráfica que permite a visualização do processo de aprendizagem de alunos ao longo do tempo.

*Big data* (megadados) em educação parece ser a área que mais avançou. No mundo, *learning analytics* e mineração de dados educacionais têm sido usadas, por exemplo, para estudar cursos *online*, dar suporte ao desenvolvimento de sistemas de *e-learning* (ensino eletrônico) mais efetivos e investigar como as crianças “jogam o sistema”<sup>22</sup> (Baker e Yacef, 2009; Kotsiantis, 2012; Siemens e Baker, 2012). Dados de rastreamento ocular (*eye tracking*) e sensores de movimento têm sido usados para fornecer *insights* do exato processo de aprendizagem que ocorre quando uma criança realiza uma atividade (Blikstein, 2011); e *machine learning* (aprendizagem automática) tem sido utilizada para ajudar a prever quando um aluno abandonará a escola ou será reprovado (Bayer *et al.*, 2012; Márquez-Vera *et al.*, 2013).

No Brasil, tais aplicações são mais escassas, apesar de ainda assim serem muitas. Kampff (2009) buscou identificar, em um ambiente virtual de aprendizagem, as características e o comportamento de estudantes que apresentavam um maior risco de reprovação. O sistema, então, alertou o professor de que o estudante poderia precisar de uma atenção especial e, com base em experiências anteriores, forneceu sugestões ao professor sobre como lidar com tal situação. Pimentel e Omar (2006) utilizaram dados de estudantes para identificar a relação entre habilidades cognitivas e metacognitivas, ou seja: o que nós acreditamos saber está relacionado com o que nós realmente sabemos? Finalmente, Rigo *et al.* (2014) discutem o progresso necessário na aplicação de mineração de dados educacionais, tal como a implementação de soluções interativas de forma que os resultados possam efetivamente dar suporte à detecção de comportamento conectado ao abandono escolar.

### 3.6 Visualização

A grande quantidade de dados em educação e modelos poderosos podem ajudar na simulação de intervenções políticas e no melhor entendimento de mecanismos na educação. Porém, se os *stakeholders* não conseguem entender o que todos esses dados e modelos expressam, todos os esforços terão uma contribuição pequena. É por isso que a destilação de dados para facilitar decisões humanas, mencionada acima, é crucial.

Como colocado por Rand (em *Sistemas complexos: conceitos, literatura, possibilidades e limitações*, capítulo 2 deste livro), *stakeholders* e formuladores de política precisam compreender as análises para poderem tomar decisões adequadas.

Em alguns casos, eles não têm o conhecimento necessário para entender os resultados. A educação (sobre sistemas complexos) contribuirá com isso, mas também haverá a

22. *Play the system*: usar as regras destinadas a proteger o sistema para manipular e direcionar o sistema a um resultado desejado.

necessidade de maiores esforços em visualização, dado que a visualização pode tornar os resultados e os modelos mais claros.<sup>23</sup>

Gentile (2014) também enfatiza a importância da visualização e da interatividade: Deve-se considerar como os resultados da simulação são apresentados aos *stakeholders*, tendo em mente os seus interesses, relevância e experiência. Deve-se promover a exploração de dados *ad-hoc*, pois isso facilita a verificação e validação do modelo e a descoberta de conhecimento.

Em relação à visualização, um dos exemplos mais proeminentes no Brasil é o *site* Qedu.<sup>24</sup> É um portal de livre acesso que fornece informações sobre a qualidade da educação em âmbito federal, estadual e municipal. O portal reúne todos os dados que são gerados por diferentes avaliações de aprendizagem conduzidas no Brasil e os apresenta de forma mais clara e prática para o público em geral.

O portal mostra, por exemplo, que apenas 12% das crianças matriculadas no último ano do ensino básico no Brasil alcançaram um aprendizado considerado adequado em matemática em 2011. O portal também permite que o usuário visualize quanto essa porcentagem varia por estado. Alagoas e Amapá, por exemplo, apresentam a menor porcentagem (3%) no país, enquanto Minas Gerais (22%) e Santa Catarina (17%) apresentam os melhores resultados. No entanto, quando se observa detalhadamente o estado de Minas Gerais, constata-se que os resultados entre as cidades são muito heterogêneos. Em Gameleiras, no norte do estado, a porcentagem é de 3%, enquanto em Coronel Xavier Chaves, também no norte do estado, esta é de 85%. O *site* também permite que o usuário visualize os resultados até ao nível da escola. Esse pode ser um importante instrumento para os pais e para a população em geral, por possibilitar o acompanhamento do desempenho dos alunos, ajudar na escolha da escola e facilitar a cobrança de melhores serviços da escola, bem como permitir que cada indivíduo seja ativo e possa influenciar o sistema educacional.

#### 4 DISCUSSÃO

Este capítulo apresentou um panorama da aplicação da abordagem de sistemas complexos em educação no Brasil. A primeira parte investigou o uso de conceitos da complexidade para se pensar a educação no sentido teórico, enquanto a segunda parte focou nas aplicações dos métodos e metodologias no país. A revisão levantou alguns *insights* para o ensino e aprendizagem, e para a elaboração de políticas educacionais no Brasil, os quais são discutidos nesta seção.

23. No original: "In some cases, they do not have the complex systems literacy necessary to understand the results. Education (about complex systems) will help this, but so will increased efforts in visualization, since visualization can make results and models easier to understand".

24. Dados disponíveis em: <[www.qedu.org.br](http://www.qedu.org.br)>.

Um primeiro *insight* é que ensinar a alunos e *stakeholders* conceitos da complexidade parece ser relevante. Como menciona Rand (em *Sistemas complexos: conceitos, literatura, possibilidades e limitações*, capítulo 2 deste livro), quando ainda jovens, as pessoas tendem a desenvolver uma mentalidade determinística e centralizada, ou seja, esperam que os sistemas tenham regras determinísticas que governem seus comportamentos e que exista um controle central na maioria dos sistemas. Contudo, a maioria dos sistemas complexos demonstra o oposto.<sup>25</sup> Assim, expor os alunos aos conceitos da complexidade pode ajudar na contraposição dessa tendência.

Ademais, os métodos de sistemas complexos podem ser considerados relativamente novos na pesquisa educacional no Brasil. São relativamente poucos os pesquisadores com um conhecimento completo do tema, e há uma menor tradição das abordagens quantitativas ou computacionalmente intensivas nas pesquisas em educação. De fato, a maioria das aplicações tende a vir de departamentos de ciência da computação em vez de departamentos de educação. Assim sendo, o ensino de conceitos de sistemas complexos a professores e a familiarização dos termos e metodologias dessa abordagem por *stakeholders* podem ser um importante passo para o aperfeiçoamento da pesquisa em educação, podendo contribuir com importantes *insights* para as políticas educacionais.

Segundo, promover um currículo transdisciplinar no nível do estudante e conduzir uma análise interdisciplinar no nível da pesquisa-política podem ser cruciais para estimular um aprendizado efetivo e para abordar a natureza complexa dos sistemas educacionais.

Como citam Carter e Reardon (2014, p. 16, grifos das autoras) sobre a desigualdade educacional:

*Os problemas multidimensionais da desigualdade requerem soluções multidimensionais, desenvolvidas talvez por colaborações inovadoras e interdisciplinares entre pesquisadores experientes e pesquisadores da próxima geração. Conforme avançamos, abordar a desigualdade a partir da pesquisa, da política e da prática exige uma abordagem ecológica que atenda às múltiplas e interconectadas áreas da desigualdade. Projetos de pesquisa com métodos mistos, em particular, talvez sejam necessários para produzir resultados generalizáveis e insight mais profundo nos sutis, e geralmente invisíveis, mecanismos sociais que moldam as experiências de vida dos indivíduos.*

Terceiro, parece importante reconhecer e incorporar a heterogeneidade dos estudantes na prática e na pesquisa educacional. Dados os altos níveis de desigualdade no Brasil, considerá-la é uma questão crítica.<sup>26</sup>

25. No original: "from a young age, people tend to develop a deterministic and centralized mindset. (...) People expect systems to have deterministic rules that govern their behavior and that there is a central controller in most system. (...) Most complex systems show the opposite".

26. Ver o capítulo 7 deste livro, o qual tematiza heterogeneidades intrínsecas e adquiridas.

Quarto, modelagem e simulação computacional são ferramentas poderosas e importantes para o ensino de conceitos complexos no nível do estudante e para a análise de problemas complexos no nível da pesquisa e da política. Modelos podem ajudar na compreensão de mecanismos subjacentes e podem ser usados como instrumentos de apoio a decisões.

Quinto, a análise de redes pode ser empregada para promover a resiliência do sistema, identificar nós-chave e estimular o fluxo de informação.

No contexto dos dados, estes são recursos valiosos para o aperfeiçoamento do conhecimento de aprendizagem e para a validação e o aprimoramento de modelos. No entanto, empenhos na visualização são muito importantes para promover o fluxo de informação e o aprendizado dentro de um sistema educacional, bem como a emergência de soluções de baixo para cima (*bottom-up solutions*).

Por último, o direcionamento das políticas e práticas educacionais para o *aprendizado personalizado*, isto é, “instrução que é ajustada às necessidades de aprendizagem, ajustada às preferências de aprendizagem e ajustadas aos interesses específicos dos diferentes aprendizes”<sup>27</sup> (Pea *et al.*, 2014, p. 13), pode ser um interessante caminho para se seguir. O aprendizado personalizado dá suporte para o aprendizado de todos os estudantes; considera-se que ele aprimora o desempenho educacional, gera eficiências de custo por meio da produtividade educacional e otimização organizacional e estimula a inovação educacional (Pea *et al.*, 2014, p. 13).

Isso parece fazer sentido particularmente no Brasil, considerando-se a heterogeneidade dos estudantes anteriormente mencionada, que abrange diferentes aspectos, tais como o contexto socioeconômico e as características intrínsecas do indivíduo. Um fator importante que merece destaque é a heterogeneidade presente dentro das salas de aula no Brasil, devido à elevada distorção idade-série no país. Em 2011, 15% dos estudantes da 1<sup>a</sup> à 5<sup>a</sup> série estavam dois ou mais anos atrás da série adequada; da 6<sup>a</sup> à 9<sup>a</sup> série eram 28%; e dos estudantes do ensino médio, 30% (Qedu). Esse cenário acaba por gerar retenção e abandono escolar.

Uma política de progressão continuada foi adotada em alguns estados do Brasil na tentativa de melhorar essa situação. Após avaliação do programa, Menezes-Filho *et al.* (2008) afirmam que

os resultados apontam para uma maior taxa de aprovação e uma menor taxa de abandono nas escolas estaduais urbanas que adotaram o programa. As estimativas do impacto do desempenho escolar indicam uma redução significativa na proficiência dos alunos do 8º ano, enquanto que o impacto sobre os alunos do 4º ano não foi significativo.

27. No original: “instruction that is tailored to learning needs, tailored to learning preferences, and tailored to the specific interests of different learners”.

Isso sugere que a política de progressão continuada talvez seja importante como forma de estimular a presença e evitar o abandono escolar, porém insuficiente. Nesse contexto, o aprendizado personalizado poderia complementar essa política, visando ao aprendizado e à proficiência, por incorporar a heterogeneidade dos alunos e pelas possibilidades de expansão se implementando por meio de sistemas tutores inteligentes.

Acemoglu, Laibson e List (2014, p. 8) argumentam que “a educação a distância terá extensos efeitos equalizadores. Não somente o capital humano ao redor do mundo será aprimorado,<sup>28</sup> mas as desigualdades de capital humano também poderão diminuir”.<sup>29</sup> Nós acreditamos que o aprendizado personalizado seja uma boa oportunidade para possibilitar o desenvolvimento do capital humano e a diminuição das desigualdades educacionais no Brasil. Ao mesmo tempo, é importante destacar que existe também um risco. Se não acompanhamos os novos desenvolvimentos em educação e não investirmos numa infraestrutura que permita a aplicação dessa técnica para a população como um todo, esses avanços poderão ter o efeito oposto.

Para finalizar, é importante destacar que os *insights* mencionados acima são possíveis caminhos derivados da abordagem de sistemas complexos para a educação. Uma maior investigação é necessária para confirmar a validade desses fatores.

## REFERÊNCIAS

- ACEMOGLU, D.; LAIBSON, D.; LIST, J. A. **Equalizing superstars: the internet and the democratization of education.** Cambridge: NBER, 2014. (Working Paper, n. 19851). Disponível em: <<http://goo.gl/GY4HMN>>. Acesso em: 8 dez. 2014.
- AL HALLAK, L. *et al.* Decision support systems for University Management processes: an approach towards dynamic simulation model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND ELECTRICAL ENGINEERING, 2., New York. 2009. **Annals...** New York: IEEE, Dec. 2009.
- AQUINO GUIMARÃES, T. *et al.* A rede de programas de pós-graduação em administração no Brasil: análise de relações acadêmicas e atributos de programas. **Revista de Administração Contemporânea**, Curitiba, v. 13, n. 4, p. 564-582, 2009.

28. Sobre o impacto da internet na concentração da atividade econômica, ver Forma, Goldfarb e Greenstein (2014) e Słkowski (2014). Forma, Goldfarb e Greenstein (2014) argumentam que: “A taxa de crescimento de patentes foi maior entre países que não eram líderes de patenteamento no começo dos anos 1990, mas eram líderes na adoção da internet em 2000, o que sugere que a internet ajudou a conter a tendência de maior concentração geográfica” e que “a internet poderia atuar como uma ampla força para enfraquecer as ligações entre a geografia da atividade inovadora e os padrões espaciais do uso downstream dela”. (No original: “The rate of patent growth was faster among counties who were not leaders in patenting in the early 1990s but were leaders in internet adoption by 2000, suggesting that the internet helped stem the trend towards more geographic concentration” and that “the internet could act as a broad force for weakening the links between the geography of inventive activity and spatial patterns of downstream use of it”).

29. No original: “web-based education will have broadly equalizing effects. Not only will human capital around the globe be enhanced, but human capital inequalities may also decrease”.

ARAÚJO, M. M. S. O pensamento complexo: desafios emergentes para a educação online. **Revista Brasileira de Educação**, v. 12, n. 36, p. 515-551, 2007.

BAKER, R.; SIEMENS, G. Educational data mining and learning analytics. In: SAWYER, K. (Ed.). Cambridge handbook of the learning sciences. 2nd ed., p. 253-274, 2014.

BAKER, R. S. J.; YACEF, K. The state of educational data mining in 2009: a review and future visions. **Journal of Educational Data Mining**, v. 1, n. 1, p. 3-17, 2009.

BAYER, J. et al. **Predicting drop-out from social behaviour of students**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EDUCATIONAL DATA MINING, 5. Chania: International Educational Data Mining Society, June 2012.

BEHRENS, M. A. A prática pedagógica e o desafio do paradigma emergente. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, Brasília, v. 80, n. 196, p. 383-403, 1999.

BEHRENS, M. A.; OLARI, A. L. T. A evolução dos paradigmas na educação: do pensamento científico tradicional a complexidade. **Revista Diálogo Educacional**, Curitiba, v. 7, n. 22, p. 53-66, 2007.

BERLOW, E. L. et al. Simple prediction of interaction strengths in complex food webs. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 1, p. 187-191, 2009.

BOHR, N. **Atomic physics and human knowledge**. New York: Science Editions Inc., 1961.

BONILLA, M. H. S. **Escola Aprendente**: desafios e possibilidades postos no contexto da sociedade do conhecimento. 2002. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2002. Disponível em: <<https://goo.gl/WQEm1a>>. Acesso em: 3 out. 2014.

BORGES, S. S. et al. Gamificação aplicada à educação: um mapeamento sistemático. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO, 24., 2013, Campinas, São Paulo. **Anais...** Campinas: CBIE, 2013.

BITTENCOURT, I. I. et al. A computational model for developing semantic web-based educational systems. **Knowledge-Based Systems**, v. 22, n. 4, p. 302-315, May 2009.

BLIKSTEIN, P. **Using learning analytics to assess students' behavior in open-ended programming tasks**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LEARNING ANALYTICS AND KNOWLEDGE, 1. New York: ACM, 2011. p. 110-116. Disponível em: <<http://goo.gl/rGSJWK>>. Acesso em: 9 jan. 2014.

\_\_\_\_\_. **Bifocal modeling**: a study on the learning outcomes of comparing physical and computational models linked in real time. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIMODAL INTERACTION, 14. New York: ACM, 2012. p. 257-264. Disponível em: <<http://goo.gl/IcVXuh>>. Acesso em: 22 ago. 2014.

BRUSILOVSKY, P.; PEYLO, C. Adaptive and intelligent web-based educational systems. **International Journal of Artificial Intelligence in Education**, v. 13, n. 2, p. 159-172, Jan. 2003.

CAROLAN, B. V. **Social network analysis and education:** theory, methods and applications. SAGE Publications, 2013.

CARTER, P. L.; REARDON, S. F. **Inequality matters.** New York: William T. Grant Foundation, Sept. 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/vPdJnr>>. Acesso em: 30 set. 2014.

DAHLAN, S. F. M.; YAHAYA, N. A. A system dynamics model for determining educational capacity of higher education institutions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE, MODELLING AND SIMULATION, 2., 2010, Bali, Indonesia. **Annals...** Bali: IEEE, Sept. 2010.

DALY, A. J. **Social network theory and educational change.** Cambridge: Harvard Education Press, 2010.

EDUCAUSE. Intelligent tutoring systems. **ELI 7 Things You Should Know About**, Louisville, July 2013. Disponível em: <<https://goo.gl/QPpyoD>>. Acesso em: 16 out. 2014.

FNE – FÓRUM NACIONAL DE EDUCAÇÃO. **O PNE 2011-2020:** metas e estratégias. Brasília: FNE, 2011. Disponível em: <<http://goo.gl/HgNhys>>.

FORMAN, C.; GOLDFARB, A.; GREENSTEIN, S. **Information technology and the distribution of inventive activity.** Cambridge: National Bureau of Economic Research, 2014. (Working Paper, n. 20036). Disponível em: <<http://goo.gl/R6PZsa>>.

GUIMARÃES, M. C. M. et al. Paradigma da complexidade e paradigmas holísticos: implicações no processo educacional. In: ENCONTRO NACIONAL DE DIDÁTICA E PRÁTICA DE ENSINO, 3., 2009, Anápolis, Goiás. **Anais...** Anápolis: Ceped, 21-24 out. 2009. Disponível em: <<http://goo.gl/vsIsMC>>. Acesso em: 3 out. 2014.

GOMES, T.; FERRACIOLI, L. A abordagem da aprendizagem em física através de uma ferramenta de modelagem computacional baseada na metáfora de objetos e eventos: uma proposta de estudo. In: SEMINÁRIO SOBRE REPRESENTAÇÕES E MODELAGEM NO PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZAGEM, 4., 2002, Vitória, Espírito Santo. **Anais...** Vitória: Modelab, out./nov. 2002.

HEEMSKERK, M.; WILSON, K.; PAVAO-ZUCKERMAN, M. Conceptual models as tools for communication across disciplines. **Conservation Ecology**, v. 7, n. 3, p. 8, 2003.

- KAMPFF, A. J. C. **Mineração de dados educacionais para geração de alertas em ambientes virtuais de aprendizagem como apoio à prática docente.** 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- KOEDINGER, K. R. *et al.* New potentials for data-driven intelligent tutoring system development and optimization. **The AI magazine**, Palo Alto, v. 34, n. 3, p. 27-41, 2013.
- KOTSIANTIS, S. B. Use of machine learning techniques for educational proposes: a decision support system for forecasting students' grades. **Artificial Intelligence Review**, v. 37, n. 4, p. 331-344, Apr. 2012.
- MAROULIS, S. *et al.* **An agent-based model of intra-district public school choice.** Evanston: CCL, Sept. 2010. (Working Paper). Disponível em: <<http://goo.gl/VQywAj>>. Acesso em: 17 jun. 2014.
- MÁRQUEZ-VERA, C. *et al.* Predicting student failure at school using genetic programming and different data mining approaches with high dimensional and imbalanced data. **Applied Intelligence**, v. 38, n. 3, p. 315-330, Apr. 2013.
- MATURANA, H. R; VARELA, F. J. **A árvore do conhecimento:** as bases biológicas da compreensão humana. Campinas: Psy II, 1995.
- MENEZES-FILHO, N. *et al.* Avaliando o impacto da progressão continuada nas taxas de rendimento e desempenho escolar do Brasil. In: VASCONCELLOS, L.; BIONDI, R. L.; WERLANG, S. R. C. **Avaliação econômica de projetos sociais.** Rio de Janeiro: Fundação Itaú Social, 2008. Disponível em: <<http://goo.gl/S0c0Xf>>. Acesso em: 12 out. 2014.
- MESQUITA, R. B. *et al.* Analysis of informal social networks: application to the reality of inclusive school. **Interface**, Botucatu, v. 12, n. 26, p. 549-562, 2008.
- MILLINGTON, J.; BUTLER, T.; HAMNETT, C. Aspiration, attainment and success: an agent-based model of distance-based school allocation. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 17, n. 1, p. 10, 2014.
- MORAES, M. C. **Pensamento ecossistêmico:** educação, aprendizagem e cidadania no século XXI. Petrópolis: Vozes, 2004a.
- \_\_\_\_\_. **Pressupostos teóricos do sentipensar.** In: MORAES, M. C.; TORRE, S. Sentipensar: fundamentos e estratégias para reencantar a educação. Petrópolis: Vozes, 2004b.
- MORAES, M. C.; TORRE, S. Pesquisando a partir do pensamento complexo – elementos para uma metodologia de desenvolvimento ecossistêmico. **Educação**, Porto Alegre, v. 29, n. 1, p. 145-172, 2006.

- MORIN, E. **Introdução ao pensamento complexo**. Porto Alegre: Sulina, 2011.
- MÜLLER, L.; SILVEIRA, M. S. Podes me ajudar? Apoiando a formação de pares em sistemas de ajuda em pares através de técnicas de recomendação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO, 24., 2013, Campinas, São Paulo. **Anais...** Campinas: CBIE, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/tmrP87>>. Acesso em: 8 dez. 2014.
- MURTHY, S.; GUJRATI, R.; IYER, S. Using system dynamics to model and analyze a distance education program. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND DEVELOPMENT, 4., 2010, New York. **Annals...** New York: ACM, 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/UpoEEEn>>. Acesso em: 24 jul. 2014.
- OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Applications of complexity science for public policy:** new tools for finding unanticipated consequences and unrealized opportunities. França: OECD, 2009.
- PEA, R. et al. **The learning analytics workgroup:** a report on building the field of learning analytics for personalized learning at scale. Stanford: Stanford University Press, 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/RAsTEs>>. Acesso em: 30 set. 2014.
- PEREIRA, A. S. T.; SAMPAIO, F. F. Avitae: desenvolvimento de um ambiente de modelagem computacional para o ensino de biologia. **Ciências e Cognição**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 51-70, 2008.
- PETRAGLIA, I. C. **Edgar Morin:** a educação e a complexidade do ser e do saber. Petrópolis: Vozes, 1995.
- PIMENTEL, E. P.; OMAR, N. Descobrindo conhecimentos em dados de avaliação da aprendizagem com técnicas de mineração de dados. In: WORKSHOP DE INFORMÁTICA NA ESCOLA, 2006, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. **Anais...** Porto Alegre: Ceie, 2006.
- RECCHI, A. M. S.; MARTINS, M. M. **Netlogo:** linguagem de programação educacional para o ensino de química e ciências. In: ENCONTRO DE DEBATES SOBRE O ENSINO DE QUÍMICA, 33. Ijuí: Editora Unijuí, 2013.
- RIGO, S. J. et al. Minerando dados educacionais com foco na evasão escolar: oportunidades, desafios e necessidades. **Revista Brasileira de Informática na Educação**, v. 22, n. 1, maio 2014.
- RODRIGUES, L. L. R. et al. Modelling and simulation of quality management in higher education: a system dynamics approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE, MODELLING AND SIMULATION, 4., 2012, Kuantan, Malásia. **Annals...** Kuantan: IEEE, Sept. 2012.

- ROSSI, A. C. *et al.* Análise de rede social no processo de ensino e aprendizagem de um jogo educativo: jogo de fração. **Conferencias Laclo**, v. 4, n. 1, 2013.
- ROSSONI, L.; HOCAYEN-DA-SILVA, A. J.; FERREIRA JÚNIOR, I. Aspectos estruturais da cooperação entre pesquisadores no campo de administração pública e gestão social: análise das redes entre instituições no Brasil. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 6, p. 1041-1067, 2008.
- SAKOWSKI, P. A. M. **Quão distante é longe?** A importância da distância geográfica para fluxos de conhecimento. Brasília: Ipea, 2014. (Texto para Discussão, n. 1995). Disponível em: <<http://goo.gl/Ryko5Q>>.
- SANTOS, A. Complexidade e transdisciplinaridade em educação: cinco princípios para resgatar o elo perdido. **Revista Brasileira de Educação**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 37, p. 71-83, 2008.
- SANTOS, A. C. K. *et al.* A modelagem computacional como uma possível estratégia para a educação ambiental fundamental. **Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, v. 5, p. 41-57, 2001.
- SIEMENS, G.; BAKER, R. S. J. **Learning analytics and educational data mining:** towards communication and collaboration. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LEARNING ANALYTICS AND KNOWLEDGE, 2. New York: ACM, 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/nzdtGb>>. Acesso em: 22 ago. 2014.
- SILVA, A. B. O. *et al.* Análise de redes sociais como metodologia de apoio para a discussão da interdisciplinaridade na ciência da informação. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 35, n. 1, p. 72-93, 2006.
- STRAUSS, L. M.; BORENSTEIN, D. A system dynamics model for long-term planning of the undergraduate education in Brazil. **Higher Education**, v. 69, n. 3, p. 375-397, 2014.
- UEHARA, O. K.; SILVEIRA, I. F. Aplicação de autômatos celulares no ensino de cálculo diferencial e integral em cursos de computação. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, 28., 2008, Belém, Pará. **Anais...** Belém: SBC, 12-18 out. 2008. p. 238.
- VARELA, F. G.; MATURANA, H. R.; URIBE, R. Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model. **Biosystems**, v. 5, n. 4, p. 187-196, 1974.
- XAVIER, A.; BORGES, A. T. **A utilização de autômatos celulares no ensino de ciências.** In: ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 9. Belo Horizonte: SBF, out. 2004.



## CAPÍTULO 16

# SUPERANDO O CAOS: LEGISLATIVOS COMO SISTEMAS COMPLEXOS ADAPTATIVOS

Acir Almeida<sup>1</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo faz o ponto que legislaturas são sistemas adaptativos complexos e avalia brevemente a contribuição potencial da abordagem da complexidade para a análise da evolução de instituições legislativas, aqui entendidas como sistema de regras formais e informais de produção de leis. Também indica como os *insights* desta abordagem podem lançar luz sobre a evolução de padrões de produção legislativa no Brasil pós-1988, no nível nacional.

A abordagem da complexidade mobiliza conceitos, teorias e metodologias de diferentes campos científicos para o estudo de processos e padrões de *sistemas adaptativos complexos*. Um sistema é considerado complexo se este é composto de grande coleção de diversos agentes interdependentes, não sujeitos a controle centralizado. Uma propriedade crucial deste tipo de sistema é que os resultados que emergem das interações entre seus agentes não podem ser entendidos simplesmente pela “soma” dos comportamentos das suas partes individuais. Um sistema complexo é adaptativo se está continuamente se auto-organizando em resposta aos resultados que este gera e às mudanças no seu ambiente (Eidelson, 1997; Holland, 1992).

Um legislativo democraticamente eleito é um sistema complexo adaptativo. Este é composto de muitos agentes heterogêneos que, em princípio, não estão sujeitos a controle centralizado. Estes agentes têm objetivos individuais, mas não conseguem alcançá-los agindo isoladamente – dado o caráter coletivo das decisões legislativas, cada um destes precisa da cooperação de pelo menos um certo número de outros. No entanto, uma vez que os recursos legislativos – por exemplo, tempo de plenário – são limitados, nem todos os objetivos podem ser realizados em tempo hábil. Assim, a natureza complexa das legislaturas situa-se nas interações estratégicas, nas quais os legisladores precisam se envolver um com o outro, a fim de avançar seus objetivos.

---

1. Técnico de Planejamento e Pesquisa da Diretoria de Estudos e Políticas do Estado, das Instituições e da Democracia (Diest) do Ipea. E-mail: <acir.almeida@ipea.gov.br>.

Três problemas coletivos são especialmente relevantes para a produção de leis: o uso racional de direitos legislativos; a aquisição e a disseminação de informações sobre os impactos esperados de políticas públicas alternativas; e a estabilidade das decisões coletivas. Se não forem devidamente tratados, estes problemas podem provocar, respectivamente, paralisia legislativa, políticas com consequências altamente incertas e decisões coletivas instáveis. No limite, estes aspectos podem tornar o legislativo ineficaz como órgão produtor de leis, ou, mais genericamente, disfuncional como sistema.

Legisladores resolvem esses problemas coletivos mediante a regulação do exercício dos seus direitos legislativos. Em outras palavras, eles adotam *instituições legislativas*, aqui definidas como uma coleção de regras e procedimentos definidores de quem pode fazer o que, quando e como no que se refere à produção de leis; regras e procedimentos que são reconhecidos e compartilhados por todos os indivíduos da população relevante e, finalmente, que são relativamente resilientes às preferências idiossincráticas destes indivíduos (March e Olsen, 2006, p. 3-4; North, 1990, p. 3-6).

Mais frequentemente, instituições legislativas têm natureza formal – ou seja, estas são abertamente escritas em documentos oficiais e são aplicadas por meio de canais oficiais. Mas este não é sempre o caso: normas e convenções são determinantes importantes do funcionamento de muitos sistemas decisórios democráticos. Igualmente importante é que as instituições informais podem muito bem influenciar a maneira como as formais funcionam (Helmke e Levitsky, 2006). Outra característica significativa das instituições legislativas é que estas muitas vezes apresentam efeitos distributivos – servem aos interesses de alguns grupos em detrimento dos interesses de outros (Knight, 1992, cap. 2). Como resultado, subjacente às instituições legislativas, há conflito constante entre forças de mudança, de um lado, e de preservação, de outro. E o resultado de tal conflito pode manifestar-se sobre os elementos formais ou informais das instituições, ou até mesmo sobre a forma como estes interagem entre si.

Muito se sabe sobre as propriedades de diferentes instituições legislativas que promovem a eficiência e a estabilidade. No entanto, muito menos se conhece a respeito da dinâmica destas instituições. Como estas evoluem? Quais são as forças que promovem ou impedem a adaptação institucional? Como a adaptação é influenciada pelo ambiente político mais amplo? Como este capítulo argumenta adiante, a abordagem da complexidade oferece uma caixa de ferramentas conceituais potencialmente útil para compreender este processo dinâmico.

O restante deste capítulo tem a seguinte estrutura, além desta introdução. A seção 2 explica a natureza complexa das legislaturas, ao analisar os principais problemas de ação coletiva e de escolha social dos legisladores, bem como os

dilemas que estes enfrentam, e também explica por que estes problemas podem transformar o Legislativo em sistema disfuncional, se não forem devidamente tratados. A seção 3 descreve os dois principais modelos de organização que a literatura identifica como soluções institucionais para aqueles problemas de escolha coletiva e social. A seção 4 aborda a questão da evolução das instituições legislativas, ao apontar tanto para as limitações das abordagens tradicionais em explicar o surgimento e a mudança das instituições, como para os recentes desenvolvimentos na direção de abordagem orientada pela complexidade. A seção 5 indica brevemente possíveis aplicações desta abordagem para a análise da evolução das instituições legislativas no Brasil pós-1988. A seção 6 fecha o capítulo com um breve resumo.

## 2 CAOS LEGISLATIVO

A título de argumento, é proveitoso começar imaginando uma legislatura em seu “estado de natureza”. Esta é a situação na qual “todos os negócios são conduzidos na sessão plenária (sem comissões) e a capacidade dos membros de falar e fazer moções é em grande parte irrestrita e não regulamentada” (Cox, 2006, p. 141, tradução nossa). Assim, para qualquer projeto ser convertido em lei em uma legislatura em “estado de natureza”, este precisa passar por um – e apenas um – processo simples: deve ser formalmente proposto, discutido e, em seguida, votado em sessão plenária, onde deve obter o apoio de maioria.

Nesse estado hipotético, o uso do tempo de plenário torna-se um dilema coletivo – ou seja, um conflito entre objetivos de grupo e autointeresse individual. Como é limitado o que se pode fazer em qualquer sessão plenária, o número de decisões políticas relevantes por sessão depende de quão eficientemente o tempo de plenário é utilizado. Na ausência de qualquer restrição ao uso de direitos legislativos, cada legislador provavelmente, por um lado, apresentará ao plenário tantos projetos quantos achar conveniente e, por outro, usará tanto quanto necessário o tempo de plenário, a fim de bloquear ou atrasar qualquer projeto do qual discorda. Cada membro percebe então que sua estratégia de negociação ótima é impedir qualquer outro projeto de lei, a menos que os seus sejam aprovados. O resultado mais provável nestas condições é a paralisa legislativa (Cox, 2006, p. 143).

Mesmo que os legisladores consigam fazer uso coletivo do tempo de plenário racionalmente, ainda há um segundo dilema coletivo enfrentado por uma legislatura em estado de natureza: a aquisição e a disseminação de informações relevantes sobre as consequências de políticas públicas alternativas (Krehbiel, 1991). Legislativos modernos devem fazer várias escolhas políticas complexas a respeito de muitas áreas diferentes de políticas públicas, mas a maioria dos legisladores tem apenas informação escassa, se alguma, sobre as consequências destas políticas. Decisões mal informadas

têm maior risco de gerar resultados muito diferentes dos pretendidos, o que representa perda de utilidade para todos os interessados. Todavia, dado que a aquisição de informação requer tempo e esforço, os legisladores individuais têm forte incentivo para pegar carona no conhecimento dos outros. Além disso, a distribuição desigual da informação privada levanta o problema adicional de oportunismo, com legisladores mais informados tentando influenciar as escolhas dos menos informados, por meio da retenção de informações importantes. Assim, no estado de natureza legislativo, decisões políticas são suscetíveis de serem realizadas sob condições de elevada incerteza, o que leva a políticas públicas com resultados de baixa previsibilidade.

Suponha-se que esses dois problemas coletivos são resolvidos, de modo que os legisladores são capazes de tomar decisões bem informadas em tempo hábil. Mesmo assim, eles podem não ser capazes de chegar a uma escolha coletiva coerente entre o projeto de lei, uma versão alterada deste e o *status quo*. A razão é que a decisão por regra da maioria pode não produzir opção de escolha que seja majoritariamente preferida a todas as outras opções disponíveis (Black, 1948). Este resultado – chamado de *maioria cíclica* – foi mais tarde abrangido pelo famoso Teorema Geral da Impossibilidade, de Arrow, que afirma que não existe nenhuma regra de escolha coletiva que satisfaça um conjunto de condições razoáveis, e que a condição específica violada pelo método da maioria é a transitividade da preferência coletiva (Arrow, 1963).<sup>2</sup> Além disso, também se demonstrou que – em contextos de escolha multidimensional – é possível encontrar sequência de votações de pares de alternativas, por regra da maioria, que leve à escolha coletiva de praticamente qualquer opção disponível (McKelvey, 1976). Estes resultados implicam que as decisões por regra da maioria são inherentemente instáveis e que virtualmente qualquer uma das opções de escolha pode ser obtida. Por estas razões, diz-se que as decisões por maioria são inherentemente caóticas.<sup>3</sup>

A princípio, legisladores podem beneficiar-se da cooperação espontânea, envolvendo-se em *logrolling* – ou seja, acordos do tipo “votarei a favor do seu projeto depois se você votar a favor do meu agora” (Tullock, 1981). Ao votarem a favor de questões com que se preocupam menos em troca de votos favoráveis de questões com que se preocupam mais, os legisladores podem ser capazes de aprovar leis e reduzir o risco de decisões cílicas. O problema, porém, é que barganhas legislativas são frágeis em termos de durabilidade e aplicabilidade (*enforceability*) – nada impede qualquer uma

2. Uma ordem de preferência é transitiva se – para qualquer uma das três alternativas A, B, e C – as condições  $A \geq B$  e  $B \geq C$  implicam  $A \geq C$ , onde “ $\geq$ ” significa “é preferida tanto quanto”. Para preferências coletivas, a transitividade pode não ser obtida, como no caso de três indivíduos (I1, I2 e I3) com perfis de preferência I1:  $A \geq B \geq C$ , I2:  $B \geq C \geq A$  e I3:  $C \geq A \geq B$ , que levam à seguinte preferência (intransitiva) da maioria:  $A \geq B \geq C \geq A$ .

3. O termo “caótico” é usado aqui na tradição da escolha social, referindo-se à imprevisibilidade e à instabilidade da votação por maioria, quando o espaço político é multidimensional. Não deve ser confundido com a propriedade de ter trajetória muito sensível a pequenas perturbações nas condições iniciais.

das partes de renegar acordos presentes mediante a entrada em coalizão diferente no futuro (Weingast e Marshall, 1988).

Decisões por maioria não estão sujeitas a ciclos quando as opções de escolha podem ser alinhadas ao longo de apenas uma dimensão de política pública e as preferências dos votantes são de pico único, de tal forma que – para todo votante – qualquer opção mais próxima da considerada ideal é preferível às mais distantes. Quando estas condições são obtidas, a regra da maioria produz resultado de equilíbrio, que é a opção mais próxima do votante cuja política ideal ocupa a posição mediana na dimensão relevante (Black, 1948). No entanto, se a escolha envolve mais de uma dimensão política – o que é muitas vezes o caso –, o equilíbrio de regra da maioria só se obtém sob pressupostos muito restritivos sobre as localizações das preferências dos votantes (Plott, 1967).

Esses dilemas de escolha coletiva e social refletem a natureza complexa dos legislativos. Os três problemas associados com os dilemas (paralisia, incerteza e decisões cíclicas) implicam que a produção de políticas públicas em um legislativo em estado de natureza – ou seja, quando não há restrições ao uso de direitos legislativos individuais – provavelmente será ineficaz e praticamente caótica. Políticas importantes e controversas só raramente devem chegar a ser votadas; quando o forem, os legisladores devem fazer escolhas mal informadas; e tais escolhas devem ser bastante instáveis e difíceis de prever.

Na vida real, no entanto, legislativos raramente são ineficazes ou caóticos. Esta contradição entre teoria e prática estimulou estudiosos a investigarem quais aspectos dos legislativos poderiam resolver dilemas coletivos e induzir a estabilidade das decisões. O que eles descobriram foi que a resposta está no conjunto de arranjos institucionais que, invariavelmente, se encontram na base do funcionamento da regra da maioria (Shepsle e Weingast, 1994). Estes arranjos, que são autoimpostos pelos próprios legisladores, solucionam estes problemas coletivos, ao restringir o uso de direitos legislativos. Estes geram ordem e efetividade em um órgão que, de outra maneira, seria caótico. A próxima seção descreve brevemente duas configurações ideal-típicas destes arranjos institucionais.

### 3 DOIS MODELOS DE ORGANIZAÇÃO LEGISLATIVA

Uma característica comum das legislaturas da vida real é que, por um lado, os legisladores têm direitos de voto iguais, mas, por outro, eles possuem direitos desiguais sobre a definição da agenda legislativa. *Definição da agenda* refere-se ao controle sobre o fluxo de projetos de lei para o plenário e sobre os procedimentos sob os quais estes são considerados nesta arena. Tais procedimentos incluem, por exemplo, direitos de propor legislação, de acelerar, bloquear ou atrasar a votação de projetos e de determinar os termos do debate e da natureza das emendas legislativas.

A distribuição dos direitos de definição da agenda é fortemente associada a como legislativos organizam suas atividades. Existem dois modelos ideais-típicos de organização legislativa, definidos de acordo com o grau de concentração destes direitos: o modelo de comissão, no qual os poderes de agenda são dispersos por comissões parlamentares autônomas, cada uma com o monopólio sobre um conjunto de áreas de políticas públicas; e o modelo de partido-cartel, em que estes poderes são concentrados nas mãos da liderança do partido majoritário.

### 3.1 O modelo de comissão

O modelo de comissão tem as seguintes características: *i*) há uma série de comissões permanentes, cada uma com jurisdição exclusiva sobre uma ou algumas áreas de política pública; *ii*) os legisladores autosselecionam-se para as comissões com jurisdições pelas quais eles se interessam mais; *iii*) as comissões têm o direito exclusivo de propor leis em suas jurisdições; e *iv*) apenas emendas relevantes para o projeto de lei em análise são permitidas em plenário.

Nesse modelo estilizado, o processo legislativo tem a seguinte sequência: *i*) uma vez que um projeto de lei é proposto, este é enviado para a comissão que tem jurisdição sobre o seu tema; *ii*) a comissão decide pela regra da maioria se deve ou não enviar o projeto – ou uma versão modificada deste – ao plenário; e *iii*) se esta envia, o plenário então vota o projeto de lei e eventuais emendas a este apresentadas. Observe-se que, se um projeto contém mais de um tema de política pública, cada tema é considerado separadamente na comissão que tem jurisdição sobre este.

Por meio do sistema de comissões, os legisladores são capazes de evitar paralisia decisória e instabilidade (Shepsle, 1979). Como discutido anteriormente, a troca de votos não é solução para a paralisia legislativa quando não há mecanismo para evitar que os legisladores reneguem suas promessas. O modelo de comissão funciona como tal mecanismo: dado o monopólio da comissão sobre a agenda dentro da sua jurisdição, esta tem o poder de vetar qualquer projeto contrário aos seus interesses, o que torna, assim, ineficaz qualquer quebra de acordo legislativo. Além disto, uma vez que diferentes temas de políticas públicas são atribuídos a diferentes comissões na base de um-para-um e apenas emendas que tenham relação com o tema são permitidas, decisões maioritárias são sempre restritas a um espaço unidimensional de escolha; situação para a qual – assumindo-se preferências de pico único – se sabe que há solução de equilíbrio: a preferência mediana na dimensão.

Outro aspecto relevante do modelo de comissão é seu papel na motivação da produção endógena e na divulgação de informações importantes sobre a relação entre as políticas públicas e seus resultados (Krehbiel, 1991). Como legisladores se autosselecionam para as comissões, estas são supostamente compostas por parlamentares altamente interessados nos seus respectivos temas, com mais motivação

para incorrer nos custos de tornarem-se mais bem informados. No entanto, para esta motivação ser efetiva, maiorias legislativas precisam evitar violar em plenário os projetos das comissões. Para tanto, estas se autoimpõem restrições, que podem se aplicar aos seus direitos de emenda ou de submeter à votação projetos já aprovados na comissão. O poder de agenda da comissão e os procedimentos restritivos sob os quais seus projetos são deliberados em plenário induzem a comissão a produzir e disseminar informação.

### 3.2 O modelo de partido-cartel

No modelo de partido-cartel, o controle da agenda legislativa é concentrado nas mãos da liderança do partido – ou da coligação – majoritário, e é exercido mediante a nomeação de delegados leais a cargos com poderes de agenda, como as presidências do parlamento e das comissões. Por meio desta cartelização de cargos com poder de agenda, o partido majoritário força a deliberação sobre suas próprias iniciativas e impede que projetos e moções a que este se opõe cheguem a ser votados em plenário (Cox e McCubbins, 1993).

A eficácia do modelo de partido-cartel, no entanto, depende de a liderança do partido ter os meios para evitar oportunismo entre suas fileiras e manter tanto seus delegados como seus membros menos proeminentes em linha, comportando-se de acordo com os interesses coletivos do partido. Por esta razão, os membros do partido geralmente confiam a seus líderes o uso de mecanismos de punição, como o poder de expulsão da bancada, de negar-lhes recondução à lista eleitoral do partido, ou de negar-lhes futuras oportunidades de ocupação de cargos.

O modelo de partido-cartel impede a paralisia legislativa não somente porque priva as minorias dos meios para bloquear ou atrasar projetos, como também em razão de as proposições que chegam ao plenário serem aquelas sobre as quais os membros do partido majoritário já estão previamente acordados. Independentemente de como o poder de agenda é distribuído, o modelo também evita a instabilidade decisória, uma vez que apenas a preferência do partido majoritário é decisiva, desde que seus membros votam juntos, como bloco unificado. Além do mais, uma vez que o partido se beneficia eleitoralmente da reputação de produzir “boas políticas públicas” – pelo menos, no sentido limitado de obter os resultados pretendidos –, os líderes partidários têm incentivos para estimular a aquisição e a disseminação de informações relevantes dentro das fileiras do partido.

Tanto o modelo de comissão como o de partido-cartel podem, a princípio, resolver os problemas coletivos enfrentados pelos legisladores. Estes modelos podem ser pensados como os dois extremos de um *continuum* hipotético, desde a mais descentralizada até a mais centralizada forma de organização legislativa, respectivamente. Na verdade, apenas um punhado de casos parece se encaixar bem nestes

dois tipos ideais. Um exemplo clássico do modelo de comissão é a câmara baixa dos Estados Unidos, a House of Representatives, antes da década de 1970. A House of Commons britânica sempre foi um caso exemplar do modelo de partido-cartel. Na verdade, porém, a maioria das legislaturas democráticas modernas encaixa-se em algum lugar entre estes dois extremos (Mattson e Strom, 1995).

#### 4 SURGIMENTO E MUDANÇA DE INSTITUIÇÕES LEGISLATIVAS

Se legislaturas são sistemas *adaptativos* complexos, então devemos levar a sério a questão de como as instituições legislativas evoluem. Isto requer compreender mudança de legislaturas como processo dinâmico e endógeno. Contudo, apesar de se saber muito sobre como diferentes modelos organizacionais solucionam os problemas coletivos que os legisladores enfrentam, conhece-se bem menos a respeito de como surgem e mudam as instituições que caracterizam estes modelos. No que se segue, discute-se brevemente a literatura existente sobre a evolução da organização legislativa e as contribuições potenciais da abordagem da complexidade.

##### 4.1 Institucionalismo da escolha racional

A abordagem convencional na análise da evolução das instituições legislativas é o institucionalismo da escolha racional (IER). Esta é perspectiva de nível micro que enfatiza premeditação individual, bem como cálculo e propósito racionais. Deste ponto de vista, as instituições são soluções de equilíbrio para problemas coletivos, que emergem e mudam como resultado de escolhas individuais que visam a objetivos. Ao longo do tempo, as instituições podem gerar uma série de consequências imprevistas, que, por sua vez, são passíveis de motivar os indivíduos a fazer mais mudanças institucionais.

Há três teorias concorrentes da escolha racional sobre organização legislativa, que enfatizam diferentes atores ou objetivos. As teorias *distributiva* e *informacional* oferecerem explicações alternativas para o surgimento de sistema de comissões forte. De acordo com a primeira, os legisladores empoderam comissões, com vista a garantir a produção de políticas particularistas para seus eleitores (Shepsle, 1979; Weingast e Marshall, 1988). Partindo-se do princípio de que a motivação principal dos legisladores é conseguir se reeleger e que – para alcançar este objetivo – é preciso satisfazer os interesses de alguma minoria de eleitores, a teoria distributiva postula que cada parlamentar tentará formar coalizão vencedora, o que exige intercâmbio e cooperação. Como discutido anteriormente, um sistema de comissões heterogêneas que, no entanto, são internamente homogêneas – em termos dos temas que mais interessam a seus membros –, e com forte poder de agenda sobre os projetos sob suas jurisdições específicas, viabiliza a formação de coalizões de *logrolling* duráveis. Assim, a partir da teoria distributiva, deve-se esperar que o

sistema de comissões seja especialmente forte e autônomo quando os legisladores têm preferências políticas mais particularistas ou heterogêneas.

A teoria informacional argumenta que os legisladores criam um sistema de comissões forte para viabilizar a escolha informada de políticas públicas (Krehbiel, 1991). Assume-se que a principal preocupação dos legisladores é com as consequências incertas de suas decisões políticas e, tal como discutido anteriormente, considera-se a redução da incerteza legislativa o principal problema da ação coletiva. Ao delegar poderes de agenda para as comissões, o plenário motiva seus membros tanto a adquirir conhecimento especializado sobre áreas de políticas públicas específicas como a divulgá-lo para o parlamento como um todo. Assim, se a incerteza política é alta – como em períodos de rápida mudança social e econômica –, as comissões tendem a receber mais poder.

As teorias distributiva e informacional pressupõem que os partidos são irrelevantes para a explicação da organização legislativa. Como alternativa, a teoria *do partido-cartel* postula que um partido ou uma coligação que sejam majoritários são a força organizadora e que estes desenham as instituições legislativas, a fim de atingir seus objetivos políticos coletivos (Cox e McCubbins, 1993). O pressuposto fundamental desta teoria é que o destino eleitoral dos legisladores depende fortemente da reputação dos seus partidos entre os eleitores. Assim, o principal problema coletivo enfrentado pelos legisladores é construir e preservar uma (boa) reputação para seus partidos, em termos de políticas públicas. Para tanto, os membros do partido delegam poderes legislativos aos líderes partidários – principalmente, o controle sobre a nomeação para os cargos que ditam a agenda legislativa –, capacitando os últimos a impor cooperação intrapartidária. A presidência da comissão é um destes cargos. Na verdade, a teoria do partido cartelizado não requer que as comissões sejam fracas – somente que estas não sejam autônomas. Comissões fortes podem ser um meio para o partido manter controle sobre decisões legislativas.

Assim, de acordo com essas teorias, é mais provável que a organização de um legislativo seja mais próxima do modelo de comissão quando: *i*) as preferências políticas dos legisladores são mais particularistas; ou *ii*) estas não formam *clusteres* partidários nítidos, e a incerteza sobre políticas públicas é alta. Por sua vez, é mais provável que a organização legislativa seja mais próxima do modelo partido-cartel quando as preferências dos parlamentares são mais universalistas e formam nítidos *clusteres* partidários.

A teoria *do governo de partido condicional* articula essas condições em um relato de como a organização legislativa muda ao longo do tempo (Aldrich, 1994; Rohde, 1991). Pressupõe-se que as legislaturas são organizadas por partidos em comissões e argumenta-se que estas alternam entre períodos de *governo de partido* e períodos de *governo de comissão*, condicionadas ao grau de coesão partidária

e à divergência entre partidos. Quando há um partido ou uma coligação majoritária e uma oposição com preferências que formam dois *clusters* distintos – ou seja, há alta homogeneidade intragrupo e elevada heterogeneidade entre grupos –, os incentivos para que os membros da maioria deleguem poder de agenda ao líder do partido são mais fortes e, portanto, as condições para o governo de partido são ótimas. Neste caso, o líder do partido da maioria demanda mais poder de agenda e seus membros estão dispostos a concedê-lo. Por sua vez, na medida em que as preferências dos membros dos partidos majoritário e minoritário se sobrepõem, há menos incentivos para centralizar o poder nas mãos da liderança do partido e, desta forma, as condições são mais favoráveis para o governo de comissão.

Todas essas teorias compartilham a visão de que as instituições legislativas são soluções de equilíbrio estático para problemas coletivos. Há pelo menos três limitações desta perspectiva no que diz respeito à questão da evolução institucional. A primeira é que a visão das instituições como *soluções* para determinados problemas tem natureza funcionalista – ou seja, tende a pressupor que os benefícios – esperados – das instituições são cruciais para sua adoção e persistência, bem como ignora a possibilidade de que estes benefícios podem ser consequências não intencionais. Além disso, a ideia de “solução” é difícil de conciliar com a possibilidade de que os legisladores são passíveis de ficar presos em equilíbrios ineficientes, que podem eventualmente levar o legislativo a decair em um sistema disfuncional (Pierson, 2000).

A segunda é que a visão de *equilíbrio* não requer a compreensão dos processos que levam a equilíbrios específicos ou que possam perturbar o equilíbrio uma vez atingido. Isto torna o processo de mudança institucional de interesse relativamente menor para institucionalistas da escolha racional e, portanto, inibe o progresso teórico sobre o assunto.

A terceira limitação é que a visão *estática* não pode acomodar mudança endógena e, portanto, esta mudança somente pode ser motivada por fatores exógenos às instituições em estudo. A este respeito, note-se que a teoria do governo de partido condicional é baseada apenas em mudanças na distribuição das preferências políticas dos parlamentares, o que é produto de resultados eleitorais – por definição, variável exógena ao processo legislativo. Estas três limitações tornam o IER mal equipado para lidar com a questão da evolução institucional.<sup>4</sup>

4. De fato, os editores de livro relativamente recente, que aplica teorias da escolha racional à história política e institucional do Congresso dos Estados Unidos, concluem que “estudiosos do legislativo devem desenvolver teorias mais dinâmicas que respondam por mudanças institucionais e comportamentais” (Brady e McCubbins, 2002, p. 472, tradução nossa).

## 4.2 Institucionalismo histórico

Na ciência política, a abordagem chamada *institucionalismo histórico* (IH) tem tido maior sucesso na exploração da mudança institucional (Pierson, 2000; Steinmo, Thelen e Longstreth, 1992; Thelen, 1999). Esta é perspectiva de nível macro, que insiste no fato de que as instituições evoluem de forma não planejada e não direcionada pelas pessoas que as compõem. Não é que a ação humana seja irrelevante para o desenvolvimento institucional – simplesmente, o processo não é explicitamente controlado por indivíduos. Em vez de ver instituições como soluções de equilíbrio estáticas, o IH as nota como o legado dinâmico de processos históricos concretos.

Na verdade, os estudiosos do IH veem fenômenos políticos e sociais pelas mesmas lentes de estudiosos da complexidade. Nas palavras de Lewis e Steinmo:

institucionalistas históricos são como o biólogo ambiental que acredita que, para entender o destino específico de um organismo ou um comportamento particular, deve-se examinar explicitamente esse organismo ou comportamento na ecologia ou contexto no qual vive. Isto implica uma ontologia científica diferente da que comumente se encontra nas ciências duras da física e da química. Enquanto os objetos do mundo físico muitas vezes aderem a “leis” da natureza constantes, os organismos biológicos muitas vezes desafiam as tentativas de reduzi-los aos seus componentes essenciais em razão da sua complexidade. O institucionalismo histórico está enraizado numa mudança ontológica semelhante na ciência social (Lewis e Steinmo, 2010, p. 243).

O IH faz uso de conceitos como *dependência de trajetória* e *equilíbrio pontuado*, que transmitem as ideias, respectivamente, que os desenvolvimentos futuros são condicionados por trajetórias passadas e que longos períodos de mudança pequena, incremental, podem ser interrompidos por breves períodos de mudança radical, descontínua. Com relação à dependência de trajetória, há também os conceitos de *conjuntura crítica* e *feedback*. O primeiro expressa momento definidor na evolução de uma instituição, no sentido de que constitui o ponto de partida para um processo dependente de trajetória. O segundo conceito revela fenômeno pelo qual cada passo sucessivo ao longo de uma trajetória particular produz consequências que ajudam ou a sustentar (*feedback* positivo) ou a minar (*feedback* negativo) esta.

A maioria das aplicações dessa abordagem, no entanto, dirige-se para a explicação da persistência de macroarranjos institucionais, frequentemente durante longos períodos de tempo. Nestas aplicações, a mudança tende a seguir modelo de equilíbrio pontuado, no qual há breves momentos de agência humana e escolha, quando um conjunto de instituições é substituído por outro. Este modelo sugere, assim, que os arranjos institucionais ou persistem ou se desmantelam. Por esta razão, as aplicações do IH tendem a obscurecer fontes e mecanismos endógenos de persistência e mudança. Não surpreendentemente, esta abordagem tem sido criticada por não especificar corretamente as ligações entre o comportamento micro e as fontes de mudança institucional.

Tem havido alguns esforços para juntar os *insights* do IER e do IH, a fim de articular melhor os microfundamentos da mudança institucional. Uma contribuição importante é Greif e Laitin (2004). Eles oferecem uma teoria da escolha racional sobre mudança institucional endógena, que se baseia em ideias do IH – particularmente, a noção de efeitos de *feedback*. Sua principal inovação é redefinir parâmetros exógenos como variáveis endógenas – chamados de *quase parâmetros* –, que mudam marginalmente pelo comportamento de equilíbrio de uma forma que permite ou mudança ou persistência institucional (endógena). No entanto, não está claro como estas forças endógenas podem ser identificadas *ex ante*.

O reconhecimento de que a mudança institucional não é apenas o produto de choques exógenos, mas também está imbricada nas formas com que os agentes interagem entre si e com seu ambiente, implica fazer um esforço sério no entendimento dos processos endógenos de evolução institucional.

### 4.3 Rumo a um institucionalismo evolucionário?

Se a intenção é levar a evolução institucional a sério, um ponto de partida promissor é a caixa de ferramentas conceituais da teoria evolucionária. De fato, os desenvolvimentos recentes na literatura institucionalista têm sido no sentido desta teoria, motivada particularmente pela noção de que – em vez de concentrar-se exclusivamente em cada macroestrutura ou microcomportamento – se deve centrar nas interações entre estes dois níveis, a fim de compreender como as instituições evoluem. Alguns cientistas políticos sustentam que as deficiências do IH podem ser enfrentadas com sucesso, mediante a plena utilização das ferramentas conceituais da teoria evolucionária (Blyth *et al.*, 2011; Lewis e Steinmo, 2010; 2012; Lustick, 2011).

Basicamente, uma teoria evolucionária tem dois pilares: um mecanismo de variação transmissível, que gera unidades com diferenças transmissíveis; e um mecanismo de seleção, que determina o sucesso relativo com que estas diferenças se propagam. Uma explicação evolucionária requer alguma especificação de como a variação ocorre, de modo que objetos com diferenças observáveis sejam produzidos por meio de algum processo. Esta também deve explicar como a seleção ocorre – ou seja, como algum princípio opera na escolha de determinadas variações e não outras, e também como as variações que foram selecionadas são reproduzidas.

Como esse esquema explicativo se traduz para o caso da mudança institucional? Variação refere-se a alguns agentes ocasionalmente agirem de forma diferente das expectativas institucionalizadas. Seleção concerne à adoção do mesmo comportamento desviante por outros agentes da população relevante. Se os agentes que adotam o comportamento desviante ficarem em situação melhor que os outros – em média –, então é provável que este comportamento se propague e leve a mudanças nas expectativas e, por último, à transformação institucional. Mas se estes não ficarem

em situação melhor, não é provável que o comportamento desviante se propague e, por isto, a instituição permanecerá estável.<sup>5</sup>

Mahoney e Thelen (2010) fornecem uma teoria da mudança institucional endógena que é razoavelmente próxima do modelo evolucionário. Nesta teoria, tanto o contexto político (meio ambiente) como a própria instituição moldam conjuntamente o tipo de agente significativo que emerge em contexto institucional específico e o modelo de estratégia (ação desviante) que provavelmente este agente perseguirá para efetuar a mudança. O aspecto relevante do contexto político é a força das possibilidades de voto dos defensores do *status quo* institucional, enquanto o aspecto relevante da instituição é o nível de discricionariedade na sua interpretação e aplicação. Diferentes combinações de possibilidades de voto fracas/fortes e discricionariedade alta/baixa dão origem a diferentes tipos de agentes de mudança e possíveis modos de mudança institucional. Os quatro modos especificados pelos autores são: o deslocamento das regras anteriores por novas; a anexação de novas regras às existentes (superposição); a modificação do impacto das regras existentes (*drift*); e a mudança na aplicação das regras existentes (conversão).

Além de fornecer descrição explícita de processo endógeno de mudança, o modelo de Mahoney e Thelen (2010) oferece pelo menos dois outros elementos interessantes para a compreensão da evolução das instituições. O primeiro não apenas enfatiza os conflitos latentes entre desafiantes e defensores das instituições existentes, como também leva em conta que “o sucesso de vários tipos de agentes para efetuar a mudança tipicamente depende crucialmente das coligações que estes são capazes de forjar deliberadamente ou que emergem inesperadamente no curso da luta distributiva” (Mahoney e Thelen, 2010, p. 29, tradução nossa). Este processo de construção de coalizão e o sucesso em forjar maioria pró-mudança podem ser pensados como o processo de seleção na teoria evolucionária. O segundo elemento interessante do modelo é que este reconhece que algumas mudanças não necessariamente se manifestam nos aspectos formais das regras – ou seja, estas podem ser informais. Os autores denominam este processo de “conversão”.

O modelo de Mahoney e Thelen (2010) parece muito promissor para a análise da evolução das instituições legislativas. Na verdade, em sua análise da inovação institucional ao longo da história do Congresso dos Estados Unidos, Schickler (2001) identifica alguns padrões de mudança institucional que são consistentes com o modelo. Coerente com a ideia de agentes de mudança que constroem coligações pró-mudança, ele encontra evidência de que empreendedores políticos tiveram papel importante, ao alinharem múltiplos objetivos por trás de mudanças importantes. E, consistente com a hipótese

5. Note-se que uma teoria evolucionária não exige mecanismos análogos aos que são relevantes para a evolução biológica. Também não implica qualquer ideia de progresso adiante no caminho evolutivo. E, finalmente, este não precisa ser funcionalista.

de conflito distributivo, Schickler (2001) encontrou evidência de que mudanças que visavam promover apenas um interesse geralmente provocaram uma resposta de membros que procuravam proteger interesses conflitantes. Outro padrão de acordo com a teoria é que mudança institucional muitas vezes envolveu a sobreposição de novos arranjos sobre estruturas preexistentes destinadas à prossecução de finalidades diferentes (superposição).

Mas o modelo tem uma lacuna analítica importante: este não especifica como são formadas as preferências dos agentes a respeito da preservação e da mudança institucional. Os autores simplesmente definem diferentes tipos de atores com base em se estes procuram ou não preservar a instituição e se a aceitam ou não. Mas eles não oferecem nenhuma pista sobre como estas ações – e as preferências subjacentes – dizem respeito aos resultados da instituição e às condições ambientais. Isto limita severamente a compreensão dos mecanismos endógenos de mudança.

Para ser justo, esse é um problema compartilhado por todas as teorias de evolução institucional correntes. Teorias baseadas em escolha racional pressupõem um conjunto constante e universal de preferências. Embora os estudiosos do IH sejam interessados em explicar por que as preferências variam no tempo e no espaço, eles têm pouco a oferecer em termos de explicação das motivações humanas, além do ponto geral que a história molda preferências. Não obstante, há otimismo crescente de que a teoria evolucionária possa fornecer contribuições significativas quando se trata de explicar a formação de preferências políticas (Lewis e Steinmo, 2012).

Outra potencial contribuição da teoria evolucionária se refere à visão multicamadas de instituições que vários estudiosos adotaram. Ostrom (2005), por exemplo, faz distinção entre regras *operacionais*, *de escolha coletiva* e *constitucionais*, que regem, respectivamente, as interações diárias, a escolha de regras operacionais e a seleção de regras de escolha coletiva. A fim de analisar a forma como as regras são formadas em um nível, as de níveis mais elevados são consideradas – temporariamente – fixas. Assim, o processo de mudança institucional desenrola-se mais ou menos da seguinte maneira: cada indivíduo calcula seus custos e benefícios esperados de uma mudança institucional, e, se uma coalizão mínima necessária para efetuar a mudança concorda em realizá-la, uma mudança institucional pode ocorrer. O que constitui *coalizão mínima* é determinado pelas regras de nível superior – por exemplo, em uma ditadura, o ditador por si só pode constituir uma coalizão vencedora; em uma democracia, a maioria formaria uma coalizão vencedora. Portanto, a mudança institucional depende da avaliação dos tomadores de decisão de como a mudança provavelmente os afetará e das regras de nível superior. Esta visão das instituições – como complexo de múltiplas camadas – é o tipo de sistema elaborado ao qual a teoria evolucionária tem a contribuir, pois suas ferramentas foram especificamente concebidas para integrar níveis de análise que conectam indivíduos às populações.

Em suma, a teoria evolucionária, que é utilizada para analisar a dinâmica de sistemas complexos, oferece uma abordagem potencialmente proveitosa para a explicação de como as instituições legislativas emergem e mudam.

## 5 O CASO DAS INSTITUIÇÕES LEGISLATIVAS NO BRASIL PÓS-1988

Esta seção faz o ponto de que as instituições legislativas nacionais no Brasil pós-1988 estão passando por significativa mudança estrutural e, em seguida, explora brevemente como os *insights* da abordagem da complexidade podem ser úteis para entender esta transformação.

### 5.1 Caracterizando a mudança institucional

As regras formais de produção legislativa adotadas pelos membros do Congresso Nacional, no período 1988-1989, e que consolidaram a transição para o regime democrático atual têm alguns elementos que dispersam e outros que concentram poder. Poder é disperso no sentido de que o sistema de comissões possui papel-chave no processo legislativo ordinário. Com poucas exceções, cada projeto de lei supostamente não apenas deve ser examinado e discutido nas comissões permanentes, mas também tem de ser conclusivamente votado.<sup>6</sup> O plenário pode derrubar a decisão da comissão, mas isto requer que uma maioria aprove petição a favor de o projeto ter votação final em plenário. Além disso, as vagas nas comissões e suas presidências devem ser alocadas aos partidos proporcionalmente ao seu tamanho legislativo, garantindo representação da minoria opositora em postos-chave da comissão.

No entanto, as regras também concentram poderes de agenda extraordinários na Presidência da República e nas lideranças de partido no Congresso. O presidente tem o poder de editar decretos (medidas provisórias – MPs) com força imediata da lei sobre assuntos relevantes e urgentes, que devem ser votados no plenário, depois de terem sido relatados por comissões *ad hoc*.<sup>7</sup> O presidente também tem o poder de invocar procedimentos de urgência para qualquer projeto de lei do governo. Neste caso, se o Congresso não votá-lo em 45 dias, fica impedido de deliberar sobre qualquer outro projeto de lei.<sup>8</sup> Os líderes de partido, por sua vez, têm o poder de representar suas bancadas em petições de urgência para retirar qualquer projeto de comissão e levá-lo à votação imediata no plenário, a qualquer momento.<sup>9</sup> Estes três dispositivos de definição de agenda podem ser usados para contornar o sistema de comissão e, portanto, para apelar diretamente para ao plenário, determinando sobre quais assuntos o Congresso deve decidir e quando.

6. Artigo 58 da Constituição Federal de 1988 (CF/1988), Artigo 24 do Regimento Interno da Câmara dos Deputados (RICD) e Artigo 91 do Regimento Interno do Senado Federal (RISF).

7. Artigo 62 da CF/1988 e Resolução 1-1989 do Congresso Nacional.

8. Artigo 64 da CF/1988.

9. Artigo 155 do RICD e Artigo 336 do RISF.

Nos primeiros quinze anos após a promulgação da Constituição Federal de 1988 (CF/1988), a MP e o procedimento de urgência foram usados intensamente para promover a agenda do Executivo, o que levou à forte dominância presidencial na produção de leis e a um papel subordinado, se não menor, para as comissões do Congresso (Figueiredo e Limongi, 2007; Pereira e Mueller, 2004). De 1989 a 2006, o presidente emitiu e o Congresso aceitou uma média de 6,9 MPs não orçamentárias por mês, que compreendiam 72% de todas as iniciativas presidenciais que não eram relacionadas ao orçamento, promulgadas em lei pelo Congresso.<sup>10</sup> Além disso, entre os projetos presidenciais não orçamentários que foram transformados em lei nesse período, 58% foram aprovados na Câmara dos Deputados sob procedimento de urgência. Isto levou o Congresso a transformar em lei um número de iniciativas presidenciais três vezes maior que o número de iniciativas dos seus próprios membros, a maioria daquelas sem ser adequadamente examinada pelo sistema de comissões.

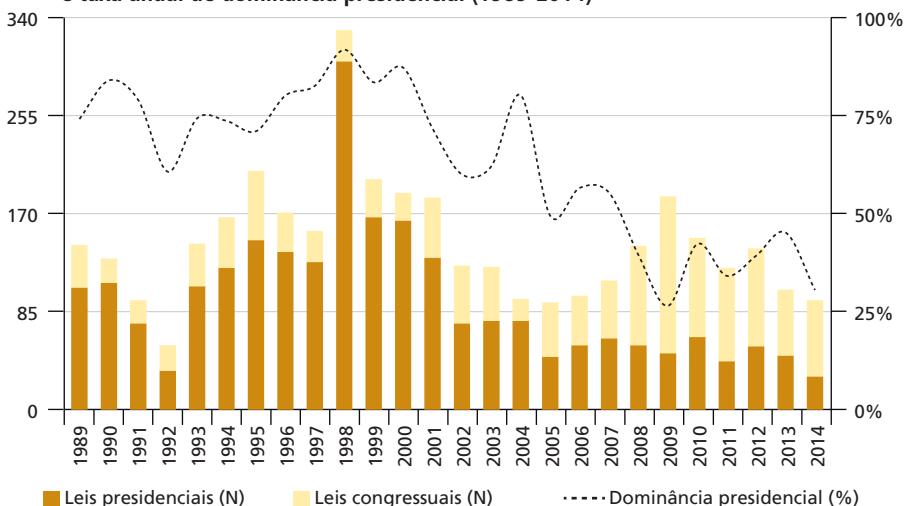
Por razões que não são totalmente claras, o Congresso parece ter delegado o controle da agenda legislativa para o Executivo, apesar de nenhum presidente ter se beneficiado do apoio de uma maioria de partido único. Uma condição necessária para esta delegação ocorrer parece ser a cooperação entre o presidente e os líderes de partidos no Congresso, sob a forma de coalizões majoritárias lideradas pelo presidente (Figueiredo e Limongi, 2007). Na verdade, o único período em que esta cooperação não ocorreu, o governo do então presidente Fernando Collor de Mello (1990-1992), foi também aquele em que o Executivo experimentou seu pior desempenho legislativo.

Na última década, no entanto, um padrão de produção de lei radicalmente diferente parece estar se consolidando, embora as características básicas da estrutura institucional formal tenham permanecido estáveis e presidentes tenham consistentemente formado coalizões de governo majoritárias. Primeiro de tudo, dominância presidencial tem progressivamente dado lugar à dominância do Congresso. O gráfico 1 mostra as contagens anuais de leis não orçamentais presidenciais e do Legislativo (eixo vertical principal), bem como a taxa de dominância presidencial *vis-à-vis* o Congresso (eixo vertical secundário), medidas em percentagem de iniciativas presidenciais entre estas leis. A partir de 2002, houve diminuição substancial no número anual de leis originadas na Presidência e, a partir de 2008, a quantidade de leis originadas no Congresso registrou aumento acentuado. Estes dois movimentos fizeram a dominância legislativa do presidente cair da média anual de 78%, no período 1989-2001, para 60%, no período 2002-2007, e, finalmente, para 37%, no período 2008-2014.

10. Dados computados pelo autor, baseado nas seguintes fontes: a Brasil ([s.d.]a), o Centro Brasileiro de Análise e Planejamento (Cebrap, [s.d.]l) e o Brasil ([s.d.]b). As contagens de leis presidenciais incluem as diferentes versões de MPs que foram continuamente reeditadas por diversos meses (Amorim Neto e Tafner, 2002, p.10). A exclusão destas últimas não altera as conclusões da análise.

GRÁFICO 1

Contagens anuais de leis não orçamentárias iniciadas pelo presidente e pelo Congresso e taxa anual de dominância presidencial (1989-2014)



Fonte: Amorim Neto e Tafner (2002, p. 10), Brasil ([s.d.]a) e Brasil ([s.d.]b).

Elaboração do autor.

Obs.: As contagens de leis presidenciais incluem as diferentes versões de MPs que foram reeditadas.

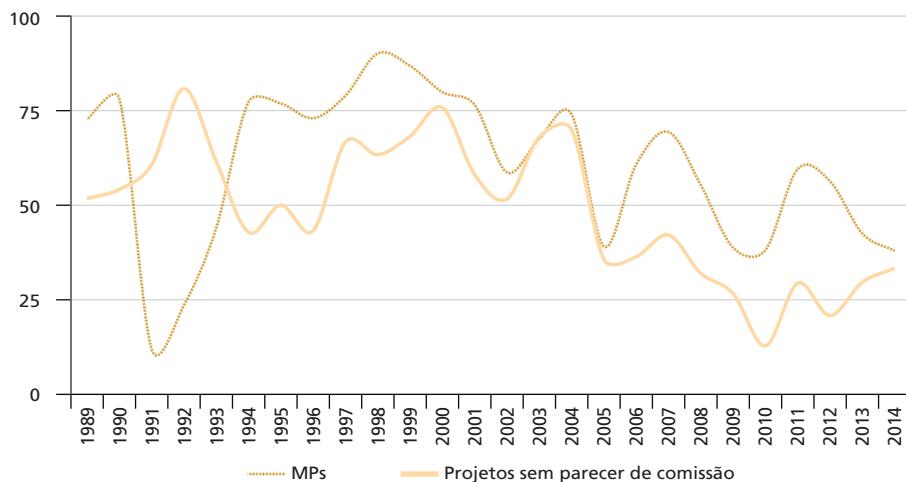
O processo legislativo de iniciativas presidenciais não orçamentárias também mudou, em direção a papel mais ativo para o sistema de comissões. Como pode ser observado no gráfico 2, a partir do início dos anos 2000, houve redução moderada na percentagem de leis presidenciais promulgadas por MP e diminuição substancial na percentagem de projetos presidenciais – transformados em lei – aos quais foi atribuído regime de urgência antes que todas as comissões às quais foram encaminhados na Câmara dos Deputados tivessem concluído seus pareceres. A primeira destas percentagens diminuiu da média anual de 67%, no período 1989-2001, para 62%, no período 2002-2007, e, em seguida, para 47%, no período 2008-2014. A segunda diminuiu de 60% para 51%, e finalmente para 26%, respectivamente.

Há também evidências de que a Câmara tem delegado a decisão final sobre projetos de lei cada vez mais para as comissões. O gráfico 3 mostra a série anual de projetos da Presidência e do Congresso conclusivamente aprovados pelo sistema de comissões da Câmara, em percentagem das leis que de fato poderiam ser submetidas a este processo.<sup>11</sup> Fica claro que a legislação iniciada tanto pelo presidente como por membros do Congresso tem sido cada vez mais decidida exclusivamente pelas comissões. Este padrão não desaparece com a exclusão de legislação honorífica – na maior parte do Congresso – e administrativa – principalmente da Presidência –, que são tipicamente não controversas.

11. Exclui leis iniciadas por MP, leis orçamentárias e outros casos muito menos frequentes, como detalhado no Artigo 24 do RICD.

**GRÁFICO 2**

**Leis não orçamentárias presidenciais que foram editadas por MP e por projetos que não receberam parecer completo do sistema de comissões da Câmara dos Deputados (1989-2014)**  
(Em %)

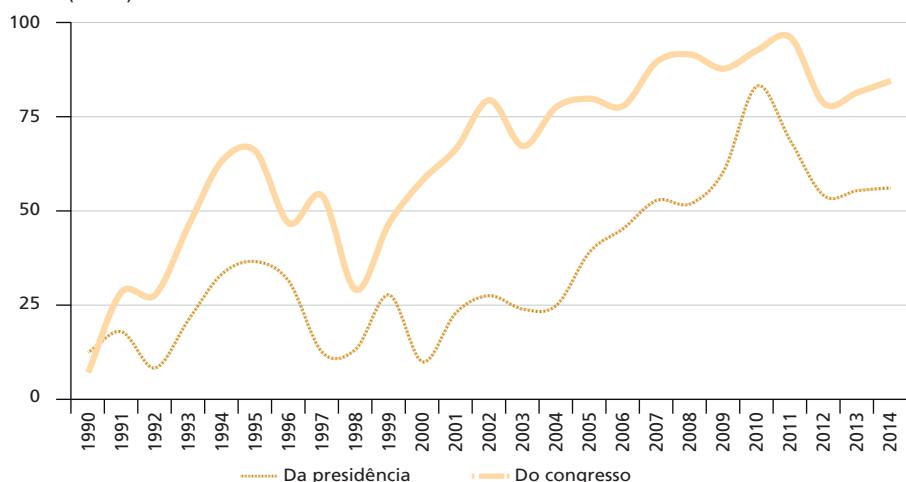


Fonte: Amorim Neto e Tafner (2002, p. 10), Brasil ([s.d.]a), Centro Brasileiro de Análise e Planejamento (Cebrap, [s.d.]) e Brasil ([s.d.]b). Elaboração do autor.

Obs.: As contagens de leis presidenciais incluem as diferentes versões de MPs que foram reeditadas.

**GRÁFICO 3**

**Leis que foram aprovadas conclusivamente por comissões, por iniciador (1990-2014)**  
(Em %)



Fonte: Brasil ([s.d.]a), Cebrap ([s.d.]) e Brasil ([s.d.]b).

Elaboração do autor.

Apesar de dados mais detalhados ainda serem necessários – particularmente sobre o novo papel desempenhado pelas comissões do Congresso –, parece razoável concluir que a produção de leis no Congresso Nacional passou por grande transformação, de processo inicialmente dominado pelo Executivo – no qual decisões eram realizadas predominantemente no plenário, com poucas oportunidades para as comissões permanentes desempenharem sua função consultiva – para um no qual o Congresso é mais proativo e as comissões são participantes proeminentes. Embora a estrutura institucional formal tenha permanecido relativamente estável, o conjunto de regras e práticas organizadas sob o qual o “jogo legislativo” é praticado mudou, permitindo-se caracterizar conceitualmente esta transformação como um caso de mudança institucional.

Como as seções seguintes tentarão mostrar, há vários indícios de que a mudança nas instituições legislativas brasileiras tem várias características que a tornam um caso promissor para a aplicação da abordagem da complexidade, ou, mais especificamente, da visão evolucionária de mudança institucional.

## 5.2 Uma perspectiva estática

Em termos dos modelos teóricos discutidos anteriormente, na seção 3, uma interpretação promissora do fenômeno é que a produção de leis no Congresso Nacional se tornou menos parecida com o modelo de partido-cartel e mais com o modelo de comissão. Em outras palavras, é possível que o principal agente para quem o controle da agenda legislativa é delegado tenha mudado, do presidente – ou seja, o líder do cartel – para as comissões.<sup>12</sup>

De acordo com a tese de governo partidário condicional (subseção 4.1), que é teoria da mudança institucional baseada na abordagem IER, a razão mais provável para esta mudança é alguma alteração (exógena) na distribuição das preferências legislativas, uma que implique maior divergência dentro da coalizão de governo ou menor divergência entre partidários do governo e oposicionistas. Na verdade, ocorreu tal mudança na política brasileira, que coincidiu com o aparecimento do novo padrão de produção legislativa. Em 2003, depois de oito anos sob o controle do Partido da Social Democracia Brasileira (PSDB), de centro-direita, a Presidência passou para o Partido dos Trabalhadores (PT), de esquerda. Durante quase todo o seu período na Presidência, o PSDB encabeçou coalizão majoritária de centro-direita, composta por outros três ou quatro partidos. Todas as coligações de governo formadas desde 2003 – e até a presente data –, no entanto, foram muito mais heterogêneas, e incluem não

12. Sobre a aplicação da tese de cartel ao sistema político brasileiro, é importante ter em mente dois aspectos: embora nenhum partido presidencial tenha controlado uma maioria das cadeiras, coalizações de governo majoritárias são sistematicamente formadas sob a liderança de presidentes; e a posição de um legislador em relação às políticas presidenciais parece ser o sinal mais informativo sobre suas preferências políticas (Santos, 2003, cap. 2). Por estas razões, para os membros da coalizão de governo, o presidente é o equivalente funcional do líder do partido na tese do cartel, em termos da lógica subjacente à decisão de delegar poderes de agenda.

apenas partidos de esquerda, mas também de centro-direita, com seis a nove parceiros incluídos. De fato, com base nos registros do comportamento em votações nominais na Câmara, há fortes indícios de que as coligações majoritárias lideradas pelo PSDB se comportaram como um cartel legislativo até 2000, mas nenhuma evidência de que qualquer coalizão majoritária formada depois tenha se comportado como tal (Amorim Neto, Cox e McCubbins, 2003, p. 563; Santos e Almeida, 2009, p. 98). Portanto, de acordo com a tese do governo partidário condicional, o fato de que a coalizão majoritária liderada pelo presidente mudou de relativamente homogênea para altamente heterogênea deve explicar a descentralização dos poderes de agenda, da Presidência para as comissões do Congresso.

No entanto, existem algumas indicações de que a crescente recorrência ao sistema de comissões não foi escolha proposital – como pressuposto pela abordagem do IER –, mas consequência não antecipada de escolhas institucionais anteriores e, portanto, mais consistente com a visão de mudança institucional do IH. Além disso, o registro de regras e práticas relativas ao processo legislativo de MPs mostra que houve mudanças relevantes sutis e pequenas – além da transformação abrupta, concretizada por meio da reforma constitucional de 2001 –, mais de acordo com os processos adaptativos estudados pela visão evolucionária da mudança institucional. Estes pontos são ilustrados a seguir, por meio de breve descrição da evolução de regras e práticas do “jogo da MP”.

### 5.3 Uma perspectiva evolucionária

Quaisquer que tenham sido as razões que levaram os constituintes a conceder autoridade de decreto constitucional ao presidente, isto parece ter feito muito sentido no momento. Durante a maior parte da segunda metade da década de 1980, o Brasil esteve sob crise econômica grave e persistente, com a inflação fora de controle. A estratégia dominante das políticas de estabilização era terapia de choque, e três tentativas traumáticas diferentes já tinham falhado desde 1986. Dada a natureza complexa, urgente e incerta de tais políticas – e da falta de perícia do Congresso sobre a questão –, delegar o controle da agenda legislativa ao presidente provavelmente pareceu natural. De fato, após a promulgação da CF/1988, o país teve mais duas experiências com terapia de choque econômico – em 1989 e 1990 –, e ambas basearam-se fortemente em decretos presidenciais.

Originalmente, a CF/1988 definia que o presidente poderia expedir MPs sobre assuntos relevantes e urgentes, e que estes deveriam ser aprovados pelo plenário do Congresso – ou seja, por maioria de deputados e senadores na mesma sessão plenária – em trinta dias, caso contrário iriam se tornar inválidos. No entanto, o contexto econômico crítico ofereceu uma boa justificativa para presidentes testarem os limites desta delegação. Entre as primeiras MPs editadas pelo então presidente José Sarney (1985-1990), uma dificilmente poderia ser considerada importante ou

urgente (MP nº 10, de 21 de outubro de 1988) e outra foi reeditada na sua data de validade, após o Congresso não votá-la no prazo (MP nº 29, de 15 de janeiro de 1989). O primeiro destes “desvios” foi prontamente aceito pelo Congresso, e até hoje não houve uso sistemático da cláusula de relevância e urgência para disciplinar o uso de decretos. O segundo desvio (a reedição de MPs), por sua vez, foi objeto de parecer de comissão especial conjunta, que afirmou que – até que o Congresso regulamentasse a matéria – o presidente poderia reeditar decretos não votados desde que seus textos permanecessem os mesmos.

Não obstante a leniência inicial do Congresso com o uso de decretos, este conseguiu firmar posição contra vários abusos do presidente Collor (1990-1992). O Congresso efetivamente resistiu a decretos que invadiam sua competência exclusiva sobre matéria penal (MPs nºs 153 e 156, ambas de 15 de março de 1990) e à reedição de uma MP rejeitada (MP nº 185, de 4 de maio de 1990), o que eventualmente levou a Comissão de Constituição e Justiça (CCJ) da Câmara a aprovar um projeto de lei restringindo o poder de edição de MPs, em 6 de junho de 1990 (Líderes..., 1990) (*Folha de S. Paulo*, 8 de junho de 1990, p. A-5). O novo Congresso – que se reuniu em fevereiro de 1991 – imediatamente aprovou o projeto na Câmara, embora este nunca tenha sido levado à votação no Senado Federal. De qualquer forma, foi provavelmente o suficiente, já que o uso de MPs caiu drasticamente no restante do mandato de Collor.

O Congresso afrouxou o controle mais uma vez em 1994, quando houve aumento substancial no número de novas MPs e a reedição de medidas não votadas tornou-se prática regular, tanto que, nos próximos sete anos – até mesmo após a inflação ter sido estabilizada –, esta chegou ao ponto em que as MPs eram apenas raramente votadas pelo Congresso e a maioria era reeditada por pelo menos sete meses consecutivos, sendo muitas com texto diferente das versões anteriores.

A reedição de MPs foi debatida no Congresso durante todo o período e uma emenda constitucional (EC) foi aprovada pelo Senado, em maio de 1997, com o apoio da mesma coalizão majoritária que havia aceitado a reedição indefinida de MPs. Mas foi somente em setembro de 2001 que a EC nº 32 foi finalmente aprovada pelo Congresso. Esta emenda basicamente teve as seguintes consequências:

- proibição expressa de reedição de MPs;
- expansão para total de 120 dias a validade das MPs não votadas;
- definição de que as MPs fossem votadas primeiro na Câmara e depois no Senado, em vez de no Congresso pleno; e
- bloqueio de decisões plenárias em qualquer outro item da pauta se houvesse qualquer MP aguardando votação e que tivesse sido editada há mais de 45 dias.

A reforma de 2001 foi eficaz em travar a reedição de MPs e, embora a utilização destas continue a ser questão controversa, desde então não houve nenhuma grande mudança na utilização deste poderoso dispositivo de interferência na agenda.

Vários aspectos da sequência de eventos e práticas já referida podem ser interpretados à luz das teorias evolucionárias de mudança institucional. A teoria de Mahoney e Thelen (2010), por exemplo, oferece *insights* interessantes sobre a evolução do “jogo da MP”. A autoridade de decreto tem sofrido alterações de dois tipos: conversão (as novas práticas adotadas nos primeiros anos) e deslocamento (a reforma constitucional de 2001). O primeiro tipo foi promovido pelo presidente e o segundo, por uma maioria no Congresso.

De acordo com a teoria, a conversão ocorre quando agentes de mudança atuam como oportunistas, situação que corresponde a uma instituição-alvo que apresenta alto nível de discricionariedade na sua interpretação ou aplicação e a um contexto político de fracas possibilidades de voto para os defensores do *status quo* – ou seja, de baixa probabilidade de uma maioria congressual rejeitar MPs. No caso deste poder de decreto, a Constituição permitiu muita discricionariedade na interpretação, pois não há definição de quais assuntos são “relevantes e urgentes” e não existia nenhuma restrição explícita sobre a reedição de MPs. O segundo tipo de mudança institucional (deslocamento) resulta quando os agentes de mudança atuam como insurgentes, o que corresponde a uma instituição-alvo com baixa margem de discricionariedade na interpretação e na aplicação, bem como com fracas possibilidades de voto para os defensores. Este tipo corresponde à reação do Congresso em 2001, quando uma maioria extraordinária foi formada para mudar a Constituição e explicitamente proibir a reedição de MPs.

Outro aspecto relevante que chama atenção quando a dinâmica da mudança institucional é levada em consideração é que a relação entre a reforma de 2001, que restringiu o poder de decreto do presidente, e o reforço do sistema de comissões, que se observa a seguir, não é tão simples. Como discutido anteriormente – de acordo com a visão estática da teoria do governo partidário condicional –, estes eventos podem ser interpretados como os dois lados de uma mesma moeda, no sentido de que estes refletem movimentos diferentes para o mesmo fim, que é transferir poderes de agenda do presidente para o sistema de comissões.

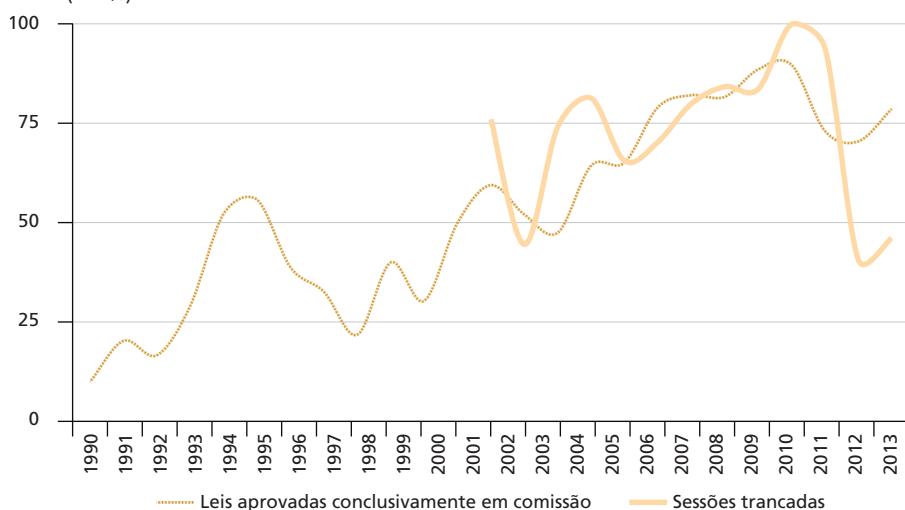
Além disso, a literatura sobre o Congresso identificou ligação mais direta entre esses eventos. A reforma gerou a consequência imprevista que as sessões plenárias tornaram-se frequentemente trancadas por MPs não votadas no prazo de 45 dias (Pereira, Poder e Rennó, 2008). Em 2002, por exemplo, 76% das sessões plenárias ordinárias da Câmara foram trancadas. Uma solução adotada tanto pela Câmara quanto pelo Senado para contornar o trancamento das sessões plenárias foi a transferência de decisões finais sobre projetos para o sistema de comissões,

o que contribuiu para trazer as comissões permanentes para a vanguarda do processo legislativo (Machiaveli, 2009, p. 123-128; Santos, 2007, p. 56).

No entanto, há evidências de que o fortalecimento do sistema de comissões já estava em curso muito antes da reforma de 2001 e que tem persistido por conta própria. O gráfico 4 mostra, para a Câmara, as porcentagens anuais de leis não orçamentárias que foram conclusivamente votadas em comissão – em relação a todas as leis que poderiam ter sido submetidas a este processo – e de sessões plenárias trancadas. Fica claro que, antes mesmo de o trancamento tornar-se um problema, as leis eram aprovadas cada vez mais exclusivamente pelo sistema de comissões. Além disso, apesar de o trancamento ter diminuído abruptamente nos anos 2013 e 2014, a tendência de delegar as decisões finais para as comissões permanece.

**GRÁFICO 4**

**Porcentagens de leis que foram aprovadas conclusivamente em comissão e de sessões plenárias trancadas – Câmara dos Deputados (1990-2013)**  
(Em %)



Fonte: Brasil ([s.d.]a), Cebrap ([s.d.]) e Brasil ([s.d.]b).

Elaboração do autor.

Em suma, a transformação das instituições legislativas no Brasil pós-1988 apresenta vários elementos que a tornam um caso promissor para a aplicação da abordagem da complexidade. A evolução do jogo da produção legislativa é cheio de adaptações desencadeadas por comportamentos desviantes e que pareciam funcionar bem para os interesses de uma maioria no Congresso. Além disso, o fortalecimento do sistema de comissões tem sido um processo gradual de longo prazo, mas que provavelmente foi – involuntariamente – turbinado na sequência da reforma de 2001, e que parece persistir por conta própria.

## 6 RESUMO

Este capítulo fez o ponto de que legislativos são sistemas adaptativos complexos. Estes são complexos porque são compostos por muitos e diversos agentes interdependentes (os legisladores), que não estão sujeitos a um controle centralizado. Para que legislativos não se tornem disfuncionais ou caóticos, seus membros precisam superar uma série de dilemas de escolha social e ação coletiva. Para este objetivo, eles adotam instituições legislativas, que são regras formais ou informais que estruturam o processo de produção de leis – ou seja, que definem quem pode fazer o que e quando.

Instituições legislativas variam de acordo com o grau em que se concentram os direitos de interferência na agenda, com o modelo de comissão no extremo mais descentralizado e o modelo de partido-cartel no mais centralizado. Duas importantes questões teóricas e ainda não resolvidas relativas às instituições legislativas são por que e como estas mudam ao longo destes dois extremos. Este capítulo explorou as contribuições de teorias dinâmicas, evolucionárias de mudança institucional – teorias que focam a natureza adaptativa de sistemas complexos, como legislativos.

A evolução das instituições legislativas brasileiras após 1988 foi oferecida como estudo de caso potencialmente interessante para explorar a aplicação das teorias evolucionárias de mudança institucional. Observou-se que o caso apresenta diversos elementos que o tornam promissor para a aplicação da teoria evolucionária e, mais geralmente, da abordagem da complexidade.

## REFERÊNCIAS

- ALDRICH, J. A. A model of a legislature with two parties and a committee system. *Legislative Studies Quarterly*, v. 19, n. 3, p. 313-339, 1994.
- AMORIM NETO, O.; COX, G. W.; MCCUBBINS, M. D. Agenda power in Brazil's Câmara dos Deputados, 1989-98. *World Politics*, n. 55, p. 550-578, 2003.
- AMORIM NETO, O.; TAFNER, P. Governos de coalizão e mecanismos de alarme de incêndio no controle legislativo das medidas provisórias. *Dados*, v. 45, n. 1, p. 5-28, 2002.
- ARROW, K. J. **Social choice and individual values**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Wiley, 1963.
- BLACK, D. One the rationale of group decision-making. *Journal of Political Economy*, v. 56, n. 1, p. 23-34, 1948.
- BLYTH, M. *et al.* Introduction to the special issue on the evolution of institutions. *Journal of Institutional Economics*, v. 7, n. 3, p. 299-315, 2011.

BRADY, D. W.; MCCUBBINS, M. D. Afterword: history as a laboratory. In: \_\_\_\_\_. (Eds.). **Party, process, and political change in Congress**. Stanford: Stanford University Press, 2002.

BRASIL – CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Sistema de tramitação das proposições legislativas (Sileg)**. Disponível em: <[www.camara.leg.br/sileg](http://www.camara.leg.br/sileg)>.

CEBRAP – CENTRO BRASILEIRO DE ANÁLISE E PLANEJAMENTO. **Banco de dados legislativos Cebrap**. Disponível em: <<https://goo.gl/iISg4g>>.

COX, G. W. The organization of democratic legislatures. In: WEINGAST, B. R.; WITTMAN, D. A. (Eds.). **The Oxford handbook of political economy**. New York: Oxford University Press, 2006.

COX, G. W.; MCCUBBINS, M. D. **Legislative leviathan**: party government in the House. New York: Cambridge University Press, 1993.

EIDELSON, R. J. Complex adaptive systems in the behavioral and social sciences. **Review of General Psychology**, v. 1, n. 1, p. 42-71, 1997.

FIGUEIREDO, A. C.; LIMONGI, F. Instituições políticas e governabilidade: desempenho do governo e apoio legislativo na democracia brasileira. In: MELO, C. R.; SÁEZ, M. A. (Orgs.). **A democracia brasileira: balanço e perspectivas para o século 21**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

GREIF, A.; LAITIN, D. D. A theory of endogenous institutional change. **American Political Science Review**, v. 98, n. 4, p. 633-652, 2004.

HELMKE, G.; LEVITSKY, S. Introduction. In: HELMKE, G.; LEVITSKY, S. (Eds.). **Informal institutions and democracy**: lessons from Latin America. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2006.

HOLLAND, J. H. Complex adaptive systems. **Daedalus**, v. 121, n. 1, p. 17-30, 1992.

KNIGHT, J. **Institutions and social conflict**. New York: Cambridge University Press, 1992.

KREHBIEL, K. **Information and legislative organization**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1991.

LEWIS, O.; STEINMO, S. Taking evolution seriously in political science. **Theory in Biosciences**, v. 129, n. 2-3, p. 235-245, 2010.

\_\_\_\_\_. How institutions evolve: evolutionary theory and institutional change. **Polity**, v. 44, n. 3, p. 314-339, 2012.

LUTSTICK, I. S. Taking evolution seriously: historical institutionalism and evolutionary theory. **Polity**, v. 43, n. 2, p. 179-209, 2011.

MACHIAVELI, F. **Medidas provisórias: os efeitos não antecipados da EC 32 nas relações entre Executivo e Legislativo**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MAHONEY, J.; THELEN, K. A theory of gradual institutional change. In: \_\_\_\_\_. (Eds.). **Explaining institutional change**: ambiguity, agency, and power. New York: Cambridge University Press, 2010.

MARCH, J. G.; OLSEN, J. P. Elaborating the “New institutionalism”. In: RHODES, R. A. W.; BINDER, S. A.; ROCKMAN, B. A. (Eds.). **The oxford handbook of political institutions**. New York: Oxford University Press, 2006.

MATTSON, I.; STROM, K. Parliamentary committees. In: DORING, H. (Ed.). **Parliaments and majority rule in Western Europe**. Frankfurt: Campus, 1995.

MCKELVEY, R. Intransitivities in multidimensional voting models and some implications for agenda control. **Journal of Economic Theory**, n. 12, p. 472-482, 1976.

NORTH, D. C. **Institutions, institutional change, and economic performance**. New York: Cambridge University Press, 1990.

OSTROM, E. **Understanding institutional diversity**. Princeton: Princeton University Press, 2005.

PEREIRA, C.; MUELLER, B. A theory of executive dominance of congressional politics: the committee system in the Brazilian Chamber of Deputies. **The Journal of Legislative Studies**, v. 10, n. 1, p. 9 - 49, 2004.

PEREIRA, C.; POWER, T. J.; RENNÓ, L. R. Agenda power, executive decree authority, and the mixed results of reform in the Brazilian Congress. **Legislative Studies Quarterly**, v. 37, n. 1, p. 5-33, 2008.

PIERSON, P. The limits of design: explaining institutional origins and change. **International Journal of Policy and Administration**, v. 13, n. 4, p. 475-499, 2000.

PLOTT, C. A notion of equilibrium and its possibility under majority rule. **American Economic Review**, n. 57, p. 787-806, 1967.

ROHDE, D. W. **Parties and leaders in the postreform House**. Chicago: University of Chicago Press, 1991.

SANTOS, F. **O poder legislativo no presidencialismo de coalizão**. Belo Horizonte: Editora UFMG; Rio de Janeiro: IUPERJ, 2003.

SANTOS, F.; ALMEIDA, A. Urgency petitions and the informational problem in the Brazilian Chamber of Deputies. **Journal of Politics in Latin America**, n. 3, p. 81-110, 2009.

SANTOS, L. I. C. **Características e perspectivas do poder conclusivo das comissões permanentes da Câmara dos Deputados do Brasil**. 2007. Monografia (Especialização) – Centro de Formação, Treinamento e Aperfeiçoamento (Cefor) da Câmara dos Deputados, Brasília, 2007.

SCHICKLER, E. **Disjointed pluralism**: institutional innovation and the development of the U.S. Congress. Princeton: Princeton University Press, 2001.

BRASIL – SENADO FEDERAL. **Portal atividade legislativa**. Disponível em: <[www.senado.leg.br/atividade](http://www.senado.leg.br/atividade)>.

SHEPSLE, K. A. Institutional arrangements and equilibrium in multidimensional voting models. **American Journal of Political Science**, n. 23, p. 27-59, 1979.

SHEPSLE, K. A.; WEINGAST, B. R. Positive theories of congressional institutions. **Legislative Studies Quarterly**, v. 19, n. 2, p. 149-179, 1994.

STEINMO, S.; THELEN, K.; LONGSTRETH, F. (Eds.). **Structuring politics**: historical institutionalism in comparative analysis. New York: Cambridge University Press, 1992.

THELEN, K. Historical institutionalism in comparative politics. **Annual Review of Political Science**, n. 2, p. 369-404, 1999.

TULLOCK, G. Why so much stability? **Public Choice**, n. 37, p. 189-205, 1981.

WEINGAST, B. R.; MARSHALL, W. T. The industrial organization of Congress: or, why legislatures, like firms, are not organized as markets. **Journal of Political Economy**, v. 96, n. 1, p. 132-163, 1988.



## O TERRITÓRIO COMO UM SISTEMA SOCIAL COMPLEXO<sup>1</sup>

Marcos Aurélio Santos da Silva<sup>2</sup>

### 1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais a noção de território como uma construção social, delimitada por um espaço geográfico, predomina no processo de elaboração de políticas públicas para o desenvolvimento sustentável regional (Saquet, 2010; Boueri e Costa, 2013). É na dimensão social que se encontra a gênese dos processos de desenvolvimento originários da base, assim como é a partir das políticas de desenvolvimento que essas bases se organizam e se articulam para iniciar os desdobramentos sócio-político-econômicos territoriais (Claval, 2008).

O território surge, então, como o meio de integração das ações públicas, pois considera-se que, em algum momento, todas as interferências governamentais terão efeito e serão influenciadas por ele. O caráter espacial das políticas públicas é uma realidade, principalmente quando tratamos de questões de desenvolvimento regional. No Brasil, diferentes ministérios têm usado o enfoque territorial como meio de alavancagem das suas políticas, planos e programas de desenvolvimento, com destaque para: a Política Nacional de Desenvolvimento Regional do Ministério da Integração Nacional (MIN), o Plano Nacional de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente, e o Programa de Desenvolvimento Territorial do Ministério do Desenvolvimento Agrário (Matteo *et al.*, 2013).

No entanto, não se compartilha a mesma concepção de território em todos os ministérios. Enquanto o MIN desenvolve a sua política nacional de desenvolvimento regional amparada na promoção do dinamismo econômico das micro e mesorregiões brasileiras, o Ministério do Meio Ambiente trabalha com o recorte territorial por bacia hidrográfica e tem como metas, dentre outras, a diminuição de eventos hidrológicos críticos e de conflitos pelo uso da água. O Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA), por meio da sua Secretaria de Desenvolvimento Territorial (SDT), tem como objetivo o desenvolvimento sustentável de zonas

1. Tradução do autor.

2. Pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros. E-mail: <marcos.santos-silva@embrapa.br>.

eminentemente rurais, com forte presença da agricultura familiar, com baixa densidade demográfica (inferior a 80hab./km<sup>2</sup>) e com sociedade civil ativa. Com base nesses indicadores a SDT/MDA criou os *territórios rurais* que constituem grupos de municípios afins e vizinhos e que possuem algum tipo de identidade econômica, cultural ou histórica (Brasil, 2005).

Analisar o território sob o viés da sua dimensão social impõe alguns desafios. Apesar de ser um conceito forte na geografia, o território ainda precisa desenvolver suas bases em outras disciplinas como a sociologia e a economia (Abramovay, 2007; Signoret, 2011). De fato, o território pode ser considerado um sistema complexo com o sujeito, o ator social ou o conjunto de atores sociais, estando no centro do processo de territorialização (Moine, 2006; Leloup, 2010; Queirós, 2010; Encarnação *et al.*, 2010; Lima, 2011; Signoret, 2011). Signoret (2011) defende o território como um processo de adesão da coletividade a um projeto comum ligado a atividades econômicas ou simplesmente a um legado histórico-cultural que reforça os elementos de identidade e pertencimento. No entanto, apesar dos avanços, muitas questões ainda estão em aberto quando se trata da análise de sistemas territoriais: quais seriam as bases teórico-metodológicas para este estudo? Se o território é um constructo social difuso, como mapear esses fenômenos sociais espacialmente localizados? Neste capítulo integram-se alguns conceitos da geografia, da sociologia e da computação no intuito de auxiliar a estruturação de bases científicas para o estudo do território a partir da abordagem sistêmica.

Assim, o território será analisado como um sistema socioterritorial complexo, no qual as relações sociais serão estudadas à luz da Sociologia da Ação Organizada (Crozier e Friedberg, 1977; Moine, 2006; 2007). Essa teoria social foi formalizada em termos matemáticos – *Soclab (Sociology laboratory) framework* –<sup>3</sup> de maneira a permitir que os sistemas sociais possam ser observados de forma sistemática (Sibertin-Blanc, Amblard e Maillard, 2006; Sibertin-Blanc *et al.*, 2013). O processo de modelagem social usando o método Soclab foi aplicado em alguns problemas de análise da ação coletiva territorial como a gestão de recursos hídricos na França (Adreit *et al.*, 2009; Casula, 2011; Baldet, 2011) e o mapeamento das relações sociais institucionais no Território Rural Sul Sergipano (Silva, Sibertin-Blanc e Gaudou, 2011; Silva *et al.*, 2014).

3. A expressão *Sociology laboratory framework* (*Soclab framework*) corresponde a um método de investigação sociológica baseado na modelagem sistêmica e na simulação computacional. No entanto, o termo Soclab também é usado para designar o software que auxilia nesse processo. Logo, temos o método Soclab e o software Soclab.

Por meio dos conceitos e técnicas abordadas, pretende-se contribuir para a elaboração de uma proposta de quadro teórico-metodológico para a avaliação de sistemas socioterritoriais que permita a elaboração de diagnósticos, assim como a análise das consequências de políticas públicas com enfoque territorial. Também deseja-se: demonstrar como o território e sua componente social podem ser analisados a partir da abordagem sistêmica, por meio da definição de sistema socioterritorial; apresentar o método Soclab, que é uma formalização da Sociologia da Ação Organizada usada para análise dos sistemas socioterritoriais; e mostrar aplicações de análise socioterritorial por meio do método Soclab.

O capítulo está organizado da seguinte forma: na seção 2, sobre sistemas socio-territoriais, o território é tratado como conceito e definido à luz da teoria dos sistemas; na seção 3, Sociologia da Ação Organizada, apresenta-se a teoria social que será usada como referência em nossa análise sociológica territorial; na seção 4, o método Soclab, serão descritos o metamodelo SAO/SAC, a sua formalização matemática, os métodos de modelagem (identificação dos atores sociais, recursos e suas relações) e a simulação social (jogo social); na seção 5, analisa-se o dilema dos prisioneiros a partir do método Soclab; na seção 6, um exemplo de modelagem e simulação de um sistema socioterritorial hipotético é mostrado; na seção 7, apresentam-se algumas aplicações do método Soclab em sistemas socioterritoriais reais, com destaque para a análise das relações sociais de poder no Território Rural Sul Sergipano; na seção 8 estão as considerações finais.

## 2 SISTEMA SOCIO TERRITORIAL

Esta seção apresenta uma definição de território com base na abordagem sistêmica social, o sistema socioterritorial. De fato, a dimensão social desempenha um papel fundamental no desenvolvimento territorial moderno. Logo, é necessário tratar o território como um conceito e investigá-lo por meio de uma perspectiva sociológica.

A importância da descentralização das decisões nas ações voltadas para o desenvolvimento regional é crescente, haja vista a complexidade presente nas interdependências entre os diversos atores sociais e entre as diversas escalas de atuação do poder público (Claval, 2008). Uma das premissas básicas desse novo modelo é o desenvolvimento endógeno, originário da base, emergente das ações e concertações locais, além dos acordos e equilíbrios das forças políticas antagônicas que se nutrem dos diferenciais regionais, como a identidade cultural e histórica. Evidentemente, faz-se necessário estudar o território de forma a considerar a dinâmica da sua dimensão social, além dos seus atributos biofísicos e de suas divisões político-administrativas.

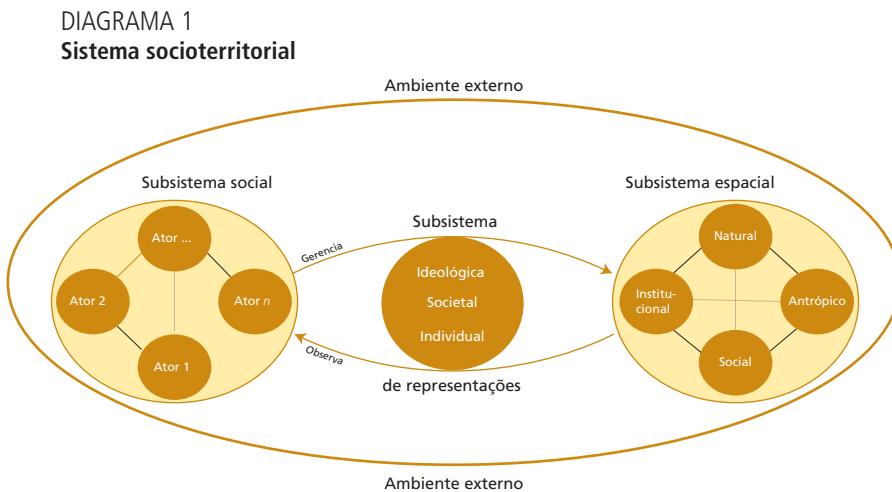
Saquet (2010) elaborou uma profunda análise da evolução do território como conceito e conclui que é necessário um enfoque sobre as relações sociais, dando clara ênfase às abordagens integrativas e sistêmicas. Leloup (2010) destaca a importância das relações sociais no estudo analítico territorial assim como a coordenação entre os atores no processo de desenvolvimento territorial. A autora, assim como Lima (2011), destaca os seguintes requisitos para a composição de um território: o sujeito, os atores sociais com certa autonomia; um projeto comum; um limite geográfico; e algum processo de regulação ou controle territorial. Segundo Signoret (2011), só existirá território se houver um projeto coletivo que agregue as pessoas em torno de um tema comum e que aumente a interdependência social. O território não é, somente, a paisagem onde se inserem as relações sociais, mas também o próprio resultado dessa complexa rede social que o compõe.

No modelo conceitual sistêmico territorial proposto por Moine (2006; 2007) (diagrama 1), observam-se três subsistemas que se comunicam entre si e que formam o sistema socioterritorial. São eles: o subsistema de atores, que agrupa os processos comunicacionais, decisionais estratégicos e de governança; o subsistema espacial, que agrupa componentes do espaço vivido; e o subsistema de representações, que atua como um filtro ideológico, societal e individual entre os outros dois subsistemas. Segundo Moine (2006, p.126), “o território é um sistema complexo evolutivo que associa um conjunto de atores de um lado, [e] o espaço geográfico que esses atores utilizam, modificam e gerem do outro lado”.<sup>4</sup>

Os três subsistemas concebidos por Moine integram a dimensão espacial (local, onde os atores sociais atuam sobre o espaço real; e global, onde os atores sociais decidem sobre o espaço concebido); a temporal (passado, presente e futuro); e a organizacional, condicionada pelo sistema de governança. O sistema socioterritorial pode então ser observado como um sistema social complexo, relativamente estável, onde o jogo social ocupa um espaço central. Segundo Moine (2007, p. 41) “trata-se de um aglomerado humano estruturado que coordena as ações de seus membros por meio de mecanismos de jogos [sociais], relativamente estáveis, e que mantém a sua estrutura, ou seja, a estabilidade desses jogos e as relações entre eles, por mecanismos de regulação que constituem outros jogos”.<sup>5</sup>

4. No original: “*le territoire est un système complexe évolutif qui associe un ensemble d’acteurs d’une part, l’espace géographique que ces acteurs utilisent, aménagent et gèrent d’autre part*”.

5. No original: “*il s’agit d’un ensemble humain structuré qui coordonne les autres actions de ses participants par des mécanismes de jeux relativement stables et qui maintient sa structure, c’est-à-dire la stabilité de ses jeux et les rapports entre ceux-ci, par des mécanismes de régulation qui constituent d’autres jeux*”.



Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2014).  
Elaboração do autor.

Ao contrário de outras abordagens sistêmicas na geografia (Cole, 1972; Christofoletti, 1979), o método aqui discutido centra-se nos atores sociais, que são os responsáveis pela governança territorial, seja ela pública ou privada. Os sistemas do espaço geográfico como as cidades, florestas e zonas agrícolas, por exemplo, apresentam as seguintes propriedades da complexidade: indeterminação das causas do fenômeno observado, impossibilidade de compreensão do problema pelo estudo isolado das suas partes constituintes, a auto-organização a partir da interação entre as diversas partes do sistema, a retroalimentação como mecanismo de reorientação em torno do objetivo do sistema, a autorregulação como forma de manutenção do sistema, e a recursão, que é a definição do sistema pelo próprio sistema.

O estudo dos sistemas socioterritoriais implica adição da dimensão social (sistemas sociais) aos sistemas geográficos. Isso significa que novos elementos de complexidade adicionam-se nessa análise. São eles: o caráter indefinido, instável e pouco estruturado das relações entre pessoas e grupos, condicionados por diferentes sistemas de valor e cognitivos; a presença constante de efeitos contra intuitivos e não esperados das ações sociais; o conflito como uma constante; e um alto grau de subsistemas aninhados e de elevada variabilidade temporal.

O sistema socioterritorial difere dos sistemas socioecológicos em alguns aspectos. Os sistemas socioecológicos possuem um escopo eminentemente local, geralmente tratam sobre a otimização do uso de um único recurso natural e são bem definidos como os sistemas de irrigação, de pesca, manejo florestal

e atividades extrativistas, por exemplo. Nestes casos, é possível a modelagem e simulação do sistema de ação coletiva decisional com base em critérios precisos como, por exemplo, o fluxo de água, a disponibilidade de peixes, a taxa de desmatamento ou a taxa limite de coleta em atividades extrativistas. Poteete, Janssen e Ostrom (2010) elaboraram uma obra extensa sobre a modelagem e simulação de sistemas socioecológicos. Na mesma vertente, segue a modelagem de acompanhamento que tem como instrumento o jogo de papéis e a simulação de sistemas socioecológicos com o objetivo de facilitar o processo de negociação entre os atores sociais (Étienne, 2010).

Os sistemas socioterritoriais possuem fronteiras com menor definição e envolvem diversos recursos, além dos naturais. Aqui, a questão central é a governança, as relações sociais de poder político num sentido amplo. Os processos decisionais não são completamente conhecidos e as relações informais possuem um grande peso. Não cabe, nos sistemas socioterritoriais, soluções otimizadoras, o que se pretende da modelagem e simulação de sistemas socioterritoriais é compreender a sua estrutura social, as relações entre os atores sociais, e o seu funcionamento sobre questões que afetam a coletividade.

Conclui-se que o sistema socioterritorial pode ser definido como um sistema complexo que tem como objetivo principal o desenvolvimento sustentável regional, além de ser composto por três subsistemas: o social, o de representação, e o espacial. O fenômeno a ser observado é a emergência e manutenção das relações sociais de poder que dão estrutura de governança e coesão social ao território. Apesar de apresentar fronteiras difusas e poucas regras formais, o sistema socioterritorial pode ser analisado como um todo pouco coeso, mas com objetivos claros.

Diante da necessidade de se analisar o território como um sistema social por meio de um processo de modelagem sistêmica, fez-se necessária a escolha de uma teoria social que atendesse aos seguintes requisitos: fosse aderente ao pensamento sistêmico, desse ênfase ao sistema social político, e fosse suficientemente abrangente para auxiliar no processo de compreensão de sistemas sociais não fortemente estruturados. A Sociologia da Ação Organizada (SAO) ou Análise Estratégica proposta inicialmente por Crozier e Friedberg (1977) e desenvolvida por Friedberg (1993) mostrou-se estar consonante com a teoria dos sistemas (Roggero, 2000); prioriza os aspectos não formais, ou seja, as práticas de gestão e comportamento não normatizadas dos sistemas sociais; e é suficientemente genérica para poder auxiliar o processo de construção de conhecimento sobre organizações com fronteiras difusas. Essa teoria já vem sendo aplicada na análise de problemas territorializados (Adreit *et al.*, 2009; Sibertin *et al.*, 2013; Casula, 2011; Baldet, 2011; Silva *et al.*, 2014; Silva, 2014).

### 3 SOCIOLOGIA DA AÇÃO ORGANIZADA (SAO)

Esta seção apresentará a teoria social denominada Sociologia da Ação Organizada, seus componentes, premissas e uma proposta de mecanismo de conexão com o sistema socioterritorial.

A Sociologia da Ação Organizada (SAO) fundamenta-se sobre o estudo da organização como um sistema político constituído de relações de poder entre os atores sociais constituintes. A SAO parte dos seguintes princípios (Sibertin-Blanc *et al.*, 2013): *i*) a organização é um constructo social, produzido pelos atores sociais, ou seja, é autodeterminada e independente do ambiente externo – a organização não é somente o produto de normas formais, mas sim a integração de regras informais e formais; *ii*) o ator social sempre terá uma margem de manobra para atingir os seus próprios objetivos; assim, jamais se tornará um mero instrumento organizacional; *iii*) as estratégias do ator social são caracterizadas pela mobilização de recursos para exercer alguma forma de poder sobre os demais, de forma a obter ajuda para atingir os próprios objetivos, que nem sempre estão consonantes com os da organização; e *iv*) supõe-se um mínimo de ordem coletiva, que é estabelecida pelas diversas interdependências entre as relações de poder e dependência.

Crozier e Friedberg (1977) observaram a organização, seja ela formal ou informal, como um constructo social, não natural ou espontâneo, constituído de um conjunto finito de atores sociais que compartilham um ou mais objetivos. As ações dos atores sociais são limitadas ou moldadas pelas normas formais da organização e pelas tradições culturais que se desenvolveram historicamente em torno dos atores sociais. As escolhas pessoais advindas de situações circunstanciais exteriores ou motivadas por valores internos também limitam a ação de cada ator social, que disporá de uma determinada capacidade de ação a qual guiará a definição de suas estratégias para participar do jogo social interno da organização que, por sua vez, procura equilibrar os objetivos coletivos e as aspirações individuais.

Evidentemente, a ação coletiva coordenada necessita de um mecanismo de estabilização que auxilie o equilíbrio de forças no jogo social. Neste caso, o poder atua como meio regulador e é definido pelos autores como “a possibilidade de certos indivíduos ou grupos de agirem sobre outros indivíduos ou grupos”<sup>6</sup> (Crozier e Friedberg, 1977, p. 65). Essa ação sobre outro indivíduo significa estabelecer uma ligação, um acordo, um contrato entre os dois. O poder pode ser encarado como uma relação consentida e não como um atributo, estático e imutável, de cada ator social. Essas relações de poder serão, portanto, a estrutura pela qual os atores sociais atuarão. No entanto, a componente mais importante desta formulação teórica é a “zona de incerteza”.

6. No original: “la possibilité pour certains individus ou groupes d’agir sur d’autres individus ou groupes” .

De fato, cada ator social disporá de uma ou mais zonas de incerteza que atuarão como fator de integração deste no campo estruturado de ação no jogo social. As zonas de incerteza podem ser interpretadas como recursos controlados por um ator social e necessário por outros, como, por exemplo, um conhecimento técnico específico, a ascendência moral de um indivíduo sobre um determinado grupo, a capacidade de punir etc. Considerando que nesse jogo social não há submissão absoluta de nenhum ator social, tem-se que, por mais frágil que seja, cada ator social disporá de pelo menos um elemento de persuasão, zona de incerteza, que o mesmo explorará no momento de definição de suas estratégias. As zonas de incerteza são um conceito chave na SAO, em que quanto mais os atores sociais criam interdependência em função dessas zonas, mais haverá engajamento e coesão social. São essas zonas de incerteza que estruturam as relações de poder que podem se cristalizar ao longo do tempo e gerar resistência a mudanças.

Segundo Crozier e Friedberg (1977), o jogo social se desenvola por meio de um Sistema de Ação Concreta (SAC), que nada mais é do que o contexto em que se inserem os atores sociais e suas relações de interdependência. Segundo Silva *et al.* (2014, p. 67).

SAC é um sistema aberto, que desconsidera os outros sistemas cujos atores fazem parte (ambiente) e que representa uma simplificação inteligível do mundo real a partir da formalização da estrutura do campo de ação em estudo. O SAC supõe um mínimo de circulação de informação e de conhecimento mútuo entre os atores. Um dos pressupostos do SAC é que o ator é heuristicamente racional e busca a realização de seus objetivos que são definidos dentro de um contexto variável. O ator social age, de maneira calculista, em função de suas hipóteses sobre seus parceiros e de suas interpretações sobre as ações dos mesmos. O foco do SAC é sobre as ações locais que são, ao final do processo, responsáveis pela emergência da regulação do sistema social. Para modelar um SAC é necessário identificar os atores e suas intenções, as relações de controle e de dependência em relação às zonas de incerteza, além do repertório de estratégias de comportamentos possíveis.

Importante destacar que a maioria das políticas públicas territoriais tem como objetivo, em última análise, o desenvolvimento territorial sustentável. Esse desenvolvimento estaria baseado na descentralização da governança, no aumento do engajamento social nas decisões sobre o território, na ampliação do nível de comunicação entre os atores sociais e na construção e ampliação de redes sociais. De fato, além do sistema econômico e do sistema homem-natureza, tem-se o sistema político territorial como regulador das relações de poder que condicionam a forma de governança (Silva *et al.*, 2014).

Observa-se, portanto, que o jogo social é o elemento de conexão entre o sistema socioterritorial e o SAC. O sistema socioterritorial pode ser observado como uma organização caracterizada pela nebulosidade de suas fronteiras e regras

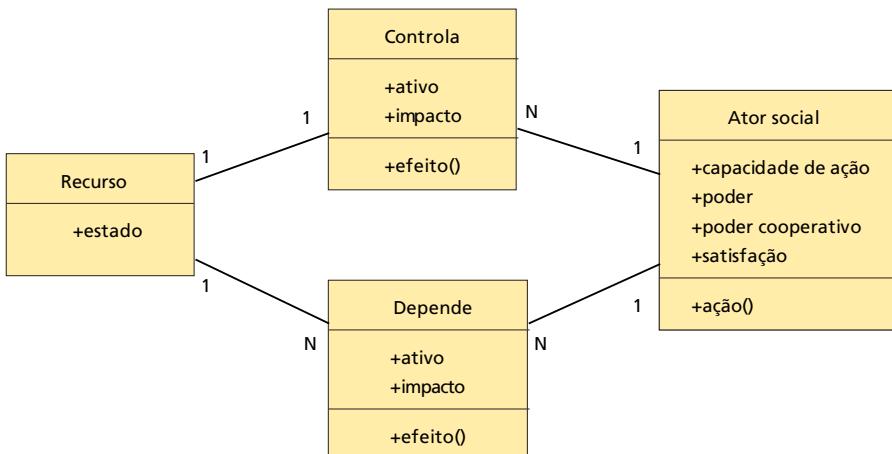
internas. Nesse sistema as regras informais ou comportamentos histórico-culturais são mais relevantes que qualquer estrutura ou regra formal.

Um dos desafios de aproximação dos sistemas socioterritoriais e a SAO/SAC é a correspondência desta com o subsistema espacial. O espaço geográfico ou o sistema espacial pode ser considerado de três formas: como elemento promotor da dependência espacial das ações sociais, contribuindo para a cooperação ou não por meio da proximidade física entre os atores sociais, podendo ser representado pelas relações sociais; como recurso ou objeto geográfico, podendo ser representado por meio das “zonas de incerteza”; e como uma externalidade que pressiona o sistema socioterritorial que pode ser outro sistema social, uma zona de incerteza controlada por um ator social externo ao sistema ou uma relação entre um elemento do sistema e outro externo.

A próxima seção mostrará como esta formulação sociológica pode ser estudada por meio de sua especificação formal, o método Soclab.

**DIAGRAMA 2**

**Diagrama de classe, segundo a Linguagem Unificada de Modelagem (UML, do inglês *Unified Modeling Language*), esquemático do metamodelo da SOA/SAC**



Fonte: Adaptado de Sibertin-Blanc et al. (2013).

#### 4 O MÉTODO SOCLAB

O Sistema de Ação Concreta foi formalizado por Sibertin-Blanc, Amblard e Mailliard (2006) e Sibertin-Blanc et al. (2013), por meio do método Soclab, de forma a permitir o estudo teórico da modelagem social computacional de organizações, assim como atuar como referência para elaboração de pesquisas empíricas sobre o tema. O metamodelo da SOA/SAC (diagrama 2) é composto de duas

entidades centrais, ator social e recurso<sup>7</sup> (“zona de incerteza”), e duas entidades que as relacionam denotando a dependência e o controle de um ou mais atores sociais com relação a um determinado recurso (Sibertin-Blanc, Amblard e Mailliard, 2006). A entidade recurso representa as zonas de incerteza da SAO/SAC e tem como atributo o seu estado, que indica o grau de acesso dos atores sociais a ele.

#### 4.1. Notação e terminologia<sup>8</sup>

Formalmente o Soclab pode ser definido da seguinte forma:

- um conjunto  $A$  de  $N$  atores sociais,  $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\}$ ;
- um conjunto  $R$  de  $M$  recursos,  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_M\}$ , representados pelo vetor de estados  $\mathbf{r} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M]^T$ , onde  $\lambda_m$  representa o nível de acesso ao recurso  $r_m$ ,  $\lambda_m \in [-10, 10]$ . O valor  $\lambda_m$  indicará o espaço de comportamento ou o nível de acesso ao recurso  $r_m$  pelos demais atores sociais. Apesar de numérico o valor  $\lambda_m$  tem interpretação qualitativa, ou seja, valores próximos de -10 denotam dificuldades no acesso ao recurso, valores em torno de zero indicam a neutralidade do acesso ao recurso, e os valores próximos a 10 denotam um bom nível de acesso a este mesmo recurso.
- as relações de controle:  $A \rightarrow R$ , se  $\alpha_n \rightarrow r_m$  então  $\alpha_n$  controla  $r_m$ , ou seja, o valor  $\lambda_m$  do recurso  $r_m$  é determinado por  $\alpha_n$ . Cada ator social deve controlar pelo menos um recurso;
- as relações de dependência:  $A \leftarrow R$ , se  $\alpha_n \leftarrow r_m$ , então  $\alpha_n$  depende de  $r_m$ ;
- uma matriz de ativos  $\mathbf{S}$ , onde  $s_{mn} \in [0, 10]$  e  $\sum_{m=1}^M s_{mn} = 10$ , onde para cada relação de dependência entre um ator social  $\alpha_n$  e um recurso  $r_m$  será atribuído um ativo  $s_{mn}$  de forma que o somatório de todos os ativos para cada ator social seja igual a 10. Cada ator social será responsável pela distribuição dos ativos;
- Um conjunto  $E$  de  $F$  funções de efeito,  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_F\}$ , uma para cada relação de dependência e controle. Todas as funções são contínuas com domínio  $D \in [-10, 10]$  e Imagem  $I \in [-10, 10]$ . Para cada relação de dependência a função de efeito computará o efeito do recurso  $r_m$  sobre o ator social  $\alpha_n$ , tendo como variável independente o estado do recurso

7. Na proposição original, o que aqui chamamos recurso é nomeado relação. No entanto, preferiu-se o termo recurso por ser um termo mais claro e remeter diretamente ao que ele de fato representa. A relação social se dá por meio dos recursos compartilhados, ou seja: quando um ator social se relaciona com outro significa dizer que ele controla um recurso que é utilizado pelo outro ou vice-versa.

8. A notação adotada neste trabalho difere daquela apresentada em Sibertin-Blanc, Amblard e Mailliard (2006) e Sibertin-Blanc et al. (2013). As mudanças ocorreram com o intuito de proporcionar maior concisão às equações e proporcionar maior clareza ao algoritmo de simulação social.

$\lambda_m$ . Para cada relação de dependência é possível calcular o impacto  $I_{mn}$ , do recurso  $r_m$  sobre o ator social  $\alpha_n$  da seguinte forma,  $I_{mn} = e_{mn}(\lambda_m)s_{mn}$ .

- Uma matriz  $\mathbf{W}_{N \times N}$  de solidariedade onde  $w_{ij} \in (-1, 1)$ ,  $\sum w_{ij} = 1$ . Sendo que valores próximos de -1 simbolizam uma certa hostilidade do ator social  $\alpha_i$  para com o ator  $\alpha_j$ , o valor zero denota indiferença, e valores em torno de 1 significam alto grau de solidariedade. A matriz  $\mathbf{W}$  não é simétrica, pois cada ator social define um grau de solidariedade em relação aos demais, ou seja, cada linha  $i$  da matriz representa como o ator social  $\alpha_i$  observa o grau de solidariedade dele com relação aos demais.

## 4.2 O ator social

O ator social é o agente que controla determinada zona de incerteza, ou recurso na terminologia adotada. Ele pode ser um indivíduo ou um grupo, tem interesses próprios e colabora com o sistema socioterritorial direta ou indiretamente. Quanto mais um ator social depende de um conjunto de recursos, mais estará vinculado ao sistema social. Para cada ator social pode-se computar a sua capacidade de ação  $C_n$  (equação 1) e o seu poder  $P_n$  (equação 2), sendo o primeiro o somatório de seus efeitos,  $e_{mn}$ , ponderados pelos respectivos ativos das relações das quais depende, e o segundo o somatório de seus efeitos ponderados pelos respectivos ativos das relações que controla. O poder cooperativo  $P_n^c$  (equação 3) pode ser calculado de forma análoga a  $P_n$ , mas considerando somente a soma dos efeitos positivos. Esses valores devem ser computados e comparados considerando-se um mesmo valor de  $\mathbf{r}$ .

$$C_n = \sum_{\forall r_m \in R | a_n \leftarrow r_m} I_{mn}. \quad (1)$$

$$P_n = \sum_{\forall r_m \in R | a_n \rightarrow r_m} I_{mn}. \quad (2)$$

$$P_n^c = \sum_{\forall r_m \in R | a_n \rightarrow r_m \wedge I_{mn} > 0} I_{mn}. \quad (3)$$

$$S_n = \sum_{j=1}^N C_n w_{nj}. \quad (4)$$

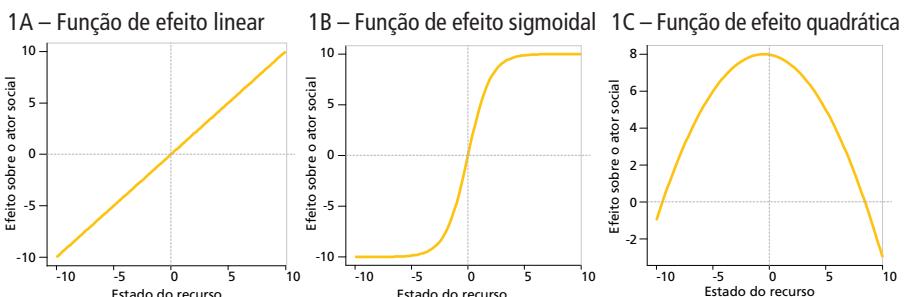
Quando se considera a matriz de solidariedade  $\mathbf{W}$ , pode-se computar os valores de satisfação  $S_n$  percebida pelo ator  $\alpha_n$  (equação 4). Enquanto a capacidade de ação quantifica a liberdade de ação do ator social, a satisfação corresponde ao valor que guiará o seu comportamento com base nas capacidades dos demais atores. No entanto, se as solidariedades não forem consideradas,  $\mathbf{W} = \text{diag}(1)$  e  $S_n = C_n$ .

### 4.3 O recurso (“zona de incerteza”) e as funções de efeito

Os recursos podem ser elementos concretos como recurso financeiro, material ou humano, mas também serviços como consultorias, suporte técnico, apoio político etc. Como estamos tratando de questões localizadas no espaço geográfico, pode-se mapear os elementos espaciais como recursos desde que estes sejam controlados por um ator social e que sejam compartilhados diretamente ou indiretamente por um conjunto de outros atores sociais. O recurso é o meio pelo qual se estabelece as relações de controle e dependência, e o seu estado definirá o nível de seu acesso junto aos demais atores sociais.

Para cada recurso, o ator social estipulará um valor,  $s_{mn}$ , que corresponderá ao seu nível de necessidade do recurso para o atingimento dos seus objetivos específicos, medido pelo nível de satisfação ou capacidade de ação. Para computar o efeito deve ser definida uma função, chamada de função de efeito, que, para cada relação recurso-ator social, definirá o nível de efeito no intervalo [-10, 10] baseado no estado do recurso, que também varia no intervalo [-10, 10]. A rigor, a curva da função de efeito pode assumir qualquer formato. No entanto, para simplificação do processo de interpretação desta, pode-se restringi-los para os formatos linear, sigmoidal ou parabólica (gráfico 1).

**GRÁFICO 1**  
**Alguns exemplos de funções de efeito**



Elaboração do autor.

A função de efeito deve ser interpretada da forma que segue. Para o caso de uma curva linear passando pela origem do gráfico (gráfico 1A): quanto maior for o acesso ao recurso maior será o efeito sobre o ator social, e vice-versa, sendo que na origem do gráfico tanto o acesso quanto o efeito podem ser encarados como indiferentes. Para o caso de uma curva sigmoidal (gráfico 1B), também passando pela origem: significa que se tem comportamento análogo à curva linear, porém com limites superior e inferior, significa que o ator é sensível às variações de acesso ao recurso próximo à origem do gráfico, além de apresentar uma transição mais curta entre os limites inferior e superior. Para o caso de uma curva parabólica com

a curva voltada para baixo e máximo no eixo dos  $y$  (gráfico 1C): temos que, nesse caso, o efeito sobre o ator social é máximo para o acesso indiferente ao recurso e tende a diminuir, seja para o aumento ou diminuição do acesso.

O processo de modelagem social a partir do método Soclab deve ser considerado em conjunto com os métodos tradicionais de investigação social. O Soclab, no entanto, facilita e sistematiza o processo de coleta e organização de dados sobre o sistema socioterritorial. No apêndice, tem-se um modelo de formulário para auxiliar no processo de coleta de dados via entrevistas, aplicação de questionário ou, até mesmo, baseado na experiência do modelador do sistema. O *software* Soclab<sup>9</sup> pode ser usado como suporte técnico ao desenvolvimento do modelo e, posteriormente, como o meio pelo qual as análises da estrutura, dos estados dos recursos e das simulações serão executadas.

#### 4.4 O jogo social (algoritmo de simulação social)

O método Soclab define a dinâmica social como sendo um processo interativo em que os atores sociais alteram o estado dos recursos que controlam, visando o atingimento de suas ambições. Esse processo tem como condição de parada uma determinada configuração de estados dos recursos em que não haja mais interesse, por parte do ator social, em alterar o seu comportamento baseado na sua satisfação atual. Em termos computacionais, esse comportamento é representado por um algoritmo de simulação social no qual os atores sociais podem ser implementados como objetos dotados de características como capacidade de ação, poder, poder cooperativo e satisfação. Cada ator social – ou objeto – agirá conforme um conjunto de regras criadas ao longo do processo de simulação por meio de uma técnica de aprendizagem por reforço. Cada regra é constituída de três componentes: um vetor  $\boldsymbol{\varepsilon}$ ,  $\boldsymbol{\varepsilon} = [e_1, e_2, \dots, e_q]^T$ , cujos valores correspondem ao valor da função de efeito sobre os recursos dos quais depende; outro vetor  $\boldsymbol{\delta}$ ,  $\boldsymbol{\delta} = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_p]^T$ , cujos valores correspondem ao incremento, positivo ou negativo, sobre os estados dos recursos que controla; e uma variável  $F$  que indica a força da regra. Os valores dos incrementos e da força são atualizados a cada passo do algoritmo por meio das equações 5-7, respectivamente.

$$\delta_{qn}(t) = 2TX(t)\omega, \omega \in [-1,1], \quad (5)$$

$$f_1(t) = (1 - TX_n(t))f(t - 1) + TX_n(t)RR_1\Delta S_n(t), \quad (6)$$

$$f_2(t) = f(t - 1) + TX_n(t)(1 - RR_2)\Delta S_n(t), \quad (7)$$

---

9. Ver: <<http://soclabproject.wordpress.com/>>.

onde  $\Delta S_n(t)$  representa a variação da satisfação do ator após a aplicação da regra no tempo  $t$ , e  $\omega$  um valor aleatório entre -1 e 1. A função  $f_1(t)$  é aplicada para calcular a força das regras aplicadas no tempo  $t-1$ , enquanto a função  $f_2(t)$  é aplicada para atualizar a força das regras aplicadas no tempo  $t-2$ .

#### 4.4.1 Parâmetros psico-cognitivos

O método Soclab inclui, no seu algoritmo de simulação, quatro parâmetros psico-cognitivos: tenacidade,  $T_n$ ; reatividade,  $R_n$ ; discernimento,  $D_n$ ; e repartição de reforço,  $\{RR_1, RR_2\}$ , para cada ator social  $\alpha_n$ . A tenacidade assume valores inteiros entre um e dez e determina o quanto o ator social explorará novas regras para atingir a sua ambição  $K_n(t)$ . Quanto maior  $T_n$  maior será o tempo de processamento do algoritmo na busca por uma solução. A reatividade também é uma constante inteira, assume valores entre um e dez e determina a importância que o ator social atribui ao presente e ao passado no processo de aprendizagem. Quanto maior o valor de  $R_n$ , menor será a memória que atualiza a taxa de exploração  $TX_n$  e a sua ambição  $K_n(t)$ , e quanto menor o valor de  $K_n$ , maior será a importância do passado. O discernimento é uma constante inteira, assume valores entre um e cinco e é usada para calcular o limite  $\gamma$  (equação 8), que será usado para definir se uma regra é utilizável ou não. Ou seja, se a distância euclideana ponderada pelos ativos entre a situação corrente do ator social<sup>10</sup> e a situação da regra for menor que  $\gamma$ , então essa regra poderá ser escolhida como adequada ou aplicável. A repartição do reforço indica a porcentagem da recompensa que será atribuída às regras que levaram o ator social a uma boa situação, próxima da ambição. No momento  $t+1$  o ator social percebe o efeito da ação passada via a sua satisfação ou capacidade de ação, e, no momento  $t+2$ , o ator percebe como os demais reagiram à sua ação em  $t$ . Logo, a repartição do reforço de cada regra será dividido para esses dois momentos,  $RR_1$  e  $RR_2$ , de forma que se pode privilegiar a percepção imediata atribuindo uma porcentagem maior para  $RR_1$ , ou vice-versa, atribuindo um maior valor percentual para  $RR_2$ . Os valores *default* são 50% e 50%.

$$\gamma = \frac{\|S_{n \max} - S_{n \min}\|}{D_n} \quad (8)$$

$$C_{n \max} = \sum_{a_n \leftarrow r_n} \max\{I_{mn}\} \quad (9)$$

$$S_{n \max} = \sum_j^N C_{n \max} w_{nj} \quad (10)$$

$$C_{n \min} = \sum_{a_n \leftarrow r_n} \min\{I_{mn}\} \quad (11)$$

$$S_{n \min} = \sum_j^N C_{n \min} w_{nj} \quad (12)$$

10. Entenda-se como situação corrente do ator social o vetor contendo os valores dos efeitos relativos às relações com os recursos dos quais depende.

#### 4.4.2 Taxa de exploração e ambição do ator social

A taxa de exploração,  $TX_n(t)$ , de um ator social,  $TX_n(t) \in [0,1; 0,9]$  (equação 13), determina a forma como o valor da ambição, da força de cada regra e da intensidade de ação de uma nova regra serão calculadas. A taxa de exploração é calculada a partir da taxa de exploração instantânea  $TXI_n(t)$  (equação 14) calculada a cada etapa da simulação em função da distância entre a situação atual e a ambição do ator social, assim como de sua tenacidade.

$$TX_n(t) = \left(1 - \frac{R_n}{10}\right) TX_n(t-1) + \frac{R_n}{10} TXI_n(t). \quad (13)$$

$$TXI_n(t) = 0.1 + \left[ \frac{0.8}{1+e^{(-(T_n*(10-T_n)+10)*(dif_n(t)-\frac{10-T_n}{10}))}} \right]. \quad (14)$$

A ambição de um ator social,  $K_n(t)$ , é o nível de satisfação ou capacidade de ação desejado por ele e varia ao longo do tempo. A ambição é iniciada com o valor máximo da sua satisfação (equação 15) ou capacidade de ação (equação 16). Para as demais etapas considera-se duas situações. Na primeira o ator social não atingiu a sua ambição, que diminuirá em função da distância entre a situação atual e a ambição, assim como da taxa de exploração de acordo com a equação 17. Caso o ator social tenha atingido ou superado a sua ambição, esta irá aumentar conforme a equação 18.

$$K_n(0) = C_{n max}. \quad (15)$$

$$K_n(0) = S_{n max}. \quad (16)$$

$$K_n(t) = K_n(t-1) - \left[ \left(1 - TX_n(t)\right) * \left(\frac{R_n}{100}\right) * dif_n(t) \right]. \quad (17)$$

$$K_n(t) = K_n(t-1) + \left[ (S_n(t) - K_n(t-1)) * \left(\frac{R_n}{100}\right) \right]. \quad (18)$$

A diferença entre ambição e satisfação,  $dif_n(t)$ , é calculada como uma proporção entre a satisfação e a ambição que indica a parte da satisfação cujo o ator dispõe em relação à sua ambição (equação 19).

$$dif_n(t) = \frac{K_n(t-1) - S_n(t)}{K_n(t-1) - S_{n min.}} \quad (19)$$

#### 4.4.3 ALGORITMO DE SIMULAÇÃO

O algoritmo de simulação social é baseado no paradigma da aprendizagem por reforço, é orientado pela tentativa e erro e pode ser resumido em três etapas: *i*) percepção do ator social; *ii*) tomada de decisão pelo ator social; e *iii*) execução da ação pelo ator social. O objetivo final do algoritmo é encontrar uma situação

final dos estados dos recursos  $r$ , tal que não haja mais interesse de cada ator em agir, ou melhor, alterar os estados dos recursos que controla. Na fase de percepção o ator calcula sua satisfação e a compara com a sua ambição  $K_n(t)$ . A distância entre um e outro determinará a forma como o ator se comportará na próxima fase. Na fase de decisão o ator avalia qual regra aplicar a partir de uma lista elaborada ao longo do processo de aprendizagem por reforço. Na fase de execução da ação o ator aplica a regra escolhida e altera os valores dos estados dos recursos que controla.

O algoritmo de simulação pode ser resumido da seguinte forma (El Gemayel, 2013, p. 99):

```

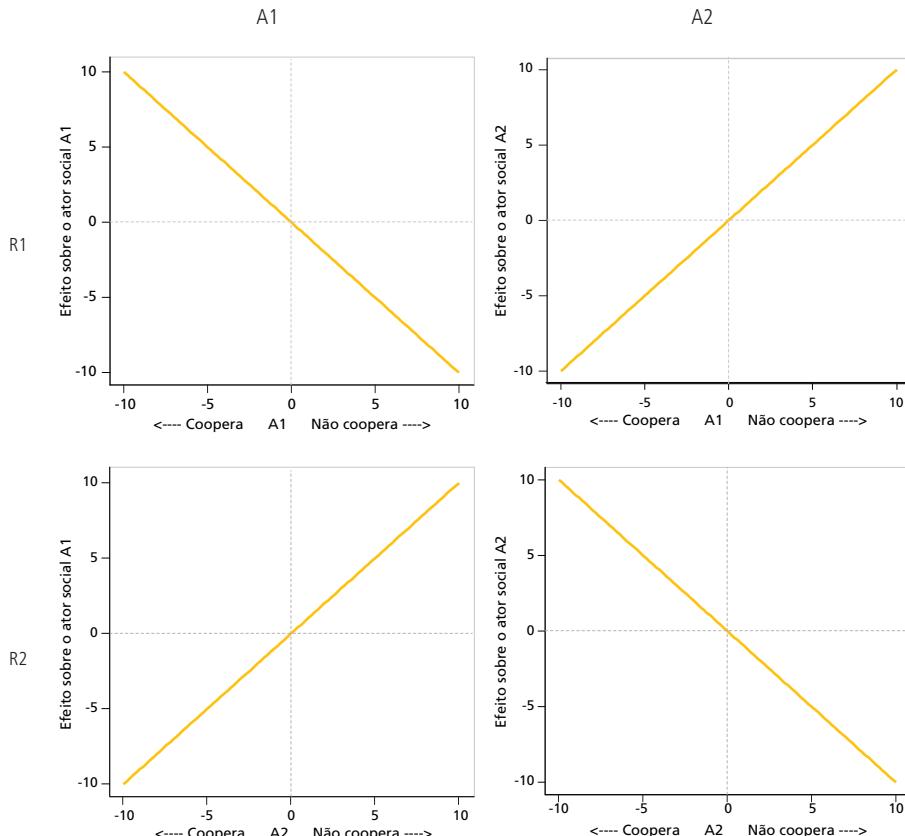
defina  $T_n, R_n, D_n$  e  $\{RR_1, RR_2\}$  para cada ator social  $\alpha_n$ 
inicie  $r$  de forma aleatória
compute a satisfação  $S_n(0)$  para cada ator social (equação 4)
compute a ambição  $K_n(0)$  (equações 15-16)
compute  $dif_n(0)$  (equação 19)
inicie  $TX_n(0) = TXI_n(0)$  (equações 13-14)
para cada tempo discreto  $t$  faça
    para cada ator social  $\alpha_n$  faça
        calcule  $S_n(t)$  (equação 4);  $dif_n(t)$  (equação 19)
        atualize  $K_n(t)$  (equações 17-18);  $TX_n(t)$  (equação 13)
        atualize a força das ações já aplicadas (equações 6-7)
        selecione regras aplicáveis onde  $\|situação-atual_n - regra.\mathcal{E}\| \leq \gamma$ 
        se nenhuma regra selecionada então
            crie nova regra
             $regra.\mathcal{E} \leftarrow situação-atual_n$ 
             $regra.\sigma \leftarrow \sigma(t)$  (equação 5)
             $regra.Força \leftarrow 0$ 
        escolha uma regra entre as escolhidas com maior Força ou a regra recém-criada
    fim-para
    para cada recurso  $r_n$  faça
        altere os valores dos estados dos recursos conforme os valores  $\sigma$  das
        regras escolhidas
    fim-para
fim-para

```

## 5 ANÁLISE DO DILEMA DOS PRISIONEIROS POR MEIO DO SOCLAB

Pode-se interpretar as funções de  $C_n$  e  $S_n$  como funções de utilidade, assim como são definidas na teoria dos jogos. Logo, é pertinente a análise do dilema dos prisioneiros a partir do método Soclab (El Gemayel, 2013). Considere, portanto, dois atores sociais, A1 e A2, suspeitos e presos em celas separadas e incomunicáveis. Ambos podem confessar (C) ou não confessar (NC) o delito, sendo que para cada combinação de escolhas dos dois prisioneiros haverá um retorno positivo ou negativo em termos de tempo de condenação para cada um deles. Se ambos negam o crime, a pena conjunta atribuída aos dois será a mínima, quando os dois confessam a pena conjunta é máxima, quando um confessa e o outro não o primeiro receberá a pena mínima e o outro a pena máxima.

**GRÁFICO 2**  
**Funções de efeito para todas as relações**



Elaboração do autor.

Nessa situação, a zona de incerteza controlada por cada ator social é a sua escolha em confessar ou não. Ao mesmo tempo que controla a sua zona de incerteza, o ator social dependerá do estado da situação da zona de incerteza controlada pelo outro; temos então uma situação de interdependência entre os atores sociais. A distribuição dos ativos seguirá, pois, esta situação, dado que pouco importa a decisão solitária de A1, apesar de controlar a sua zona de incerteza; será o estado da zona de incerteza de A2 que definirá a sua capacidade de ação.

Dessa forma A1 atribui o peso (ativo) um para o recurso que controla R1, e o peso nove para o recurso controlado por A2, e vice-versa. Os recursos R1 e R2 assumirão estados no intervalo [-10,10], sendo que valores negativos significam confessar e valores positivos significam não confessar. Optou-se por funções de efeito lineares que se comportam de forma inversa para cada recurso e para cada ator social, conforme o gráfico 2. Considerando R1, tem-se que A1 terá efeitos mais positivos à medida que confessa, independentemente da escolha de A2, estado de R2. O mesmo acontece com A2 para R2 e R1 (El Gemayel, 2013).

A tabela 1 mostra as capacidades de ação ( $C_n$ ) calculadas para uma combinação de valores característicos dos estados de R1 e R2. Se considerarmos a capacidade de ação global, que é a soma algébrica das capacidades de ação dos atores, tem-se que o melhor caso acontece quando ambos não confessam (80,80) e o pior caso quando confessam (-80,-80), que corresponde ao equilíbrio de Nash (Dutta, 1999).

**TABELA 1**  
**Capacidade de ação dos atores A1 e A2 para estados característicos de R1 e R2**

|               |     | Estados de R2 |        |          |
|---------------|-----|---------------|--------|----------|
|               |     | -10           | 0      | 10       |
| Estados de R1 | -10 | -80/-80       | 10/-90 | 100/-100 |
|               | 0   | -90/10        | 0/0    | 90/-10   |
|               | 10  | -100/100      | -10/90 | 80/80    |

Elaboração do autor.

A simulação social, considerando diferentes valores para os ativos, mostra que o jogo social muda de acordo com a forma como os atores sociais ponderam a relevância dos recursos que eles controlam e dos quais dependem. A tabela 2 apresenta os resultados das simulações realizadas utilizando o software Soclab para o sistema social apresentado anteriormente. De acordo com El Gemayel (2013), foram considerados os mesmos valores de discernimento ( $D_n = 1$ ), tenacidade ( $T_n = 5$ ), reatividade ( $R_n = 5$ ) e distribuição de reforço  $\{RR_1 = s_{NRI} * 10\%, RR_2 = s_{NR2} * 10\%\}$  para ambos os atores sociais. A simulação foi realizada uma centena de vezes, com 200 mil etapas cada uma, no máximo.

A distribuição dos ativos denota como um ator social enfrentará o jogo social. Se o mesmo aloca mais ativos sobre os recursos dos quais ele depende, significa que ele espera um jogo cooperativo; caso contrário, se ele aloca mais ativos sobre os recursos que ele controla, o jogo será não cooperativo. As simulações foram realizadas variando os ativos para cada ator social de zero a um, totalmente cooperativo (0/10), para totalmente não cooperativo (10/0), de acordo com a tabela 2. Os resultados mostraram que: a capacidade de ação é máxima nos extremos e diminui até o valor mínimo, zero, quando os ativos são igualmente distribuídos; os estados finais para os recursos estabiliza positivamente para jogos sociais cooperativos e negativamente para os não cooperativos; e são necessários mais passos de simulação para atingir o equilíbrio quando a distribuição dos ativos é equitativa.

TABELA 2

**Resultados da simulação social para o dilema do prisioneiro tendo em consideração a variação da distribuição dos ativos**

|  | Distribuição dos ativos do ator social A1 para os recursos R1/R2 |      |       |       |                    |       |       |                            |       |      |     |
|--|--|------|-------|-------|--------------------|-------|-------|----------------------------|-------|------|-----|
|  | <- Totalmente cooperativo  |      |       |       | Equilíbrio de Nash |       |       | Totalmente não cooperativo |       |      |     |
|  | Capacidade de ação de A1 (média)                                 | 0/10 | 1/9   | 2/8   | 3/7                | 4/6   | 5/5   | 6/4                        | 7/3   | 8/2  | 9/1 |
| 100  | 80   | 60   | 40    | 20    | 0                  | 20    | 40    | 60                         | 80    | 100  |     |
| Estado da relação R1 (média)                             | 10   | 10   | 10    | 10    | 10                 | -10   | -10   | -10                        | -10   | -10  |     |
| Número de etapas necessárias para a convergência (média) | 1060   | 5646 | 13644 | 18446 | 19486              | 21183 | 17232 | 14766                      | 11888 | 6320 | 25  |

Elaboração do autor.

Obs.: Mostram-se apenas os resultados para o ator social/recurso A1/R1, pois este jogo social é simétrico – logo, os resultados para A2/R2 são exatamente os mesmos.

É importante notar que o jogo social no Soclab tenta chegar a um estado estável observando a soma da capacidade de ação/satisfação de todos os atores sociais. A tabela 2 mostra que, neste jogo social, essa estabilidade é equivalente ao equilíbrio de Nash só quando os ativos estão igualmente distribuídos.

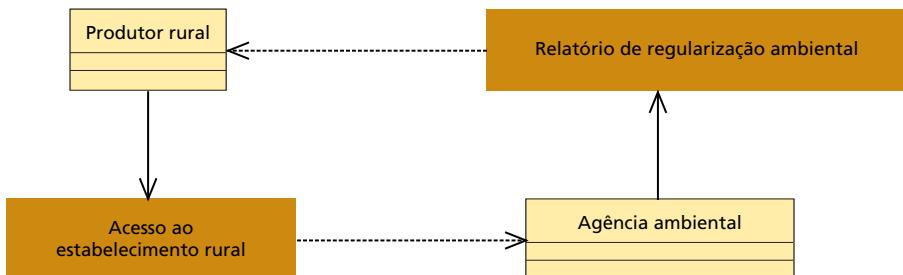
Em suma, este exercício mostrou que o método Soclab pode ser uma ferramenta adequada para projetar jogos sociais e, por meio das funções de efeito, gerar matrizes de compensações.

## 6 EXEMPLO DE UM SISTEMA SOCIO TERRITORIAL HIPOTÉTICO

Considere-se um sistema socioterritorial composto de dois atores sociais, o produtor rural e a agência de fiscalização ambiental. O primeiro controla o recurso “acesso ao estabelecimento rural”, enquanto o segundo controla o recurso “relatório de regularização ambiental” (diagrama 3). A agência ambiental precisa ter acesso físico ao recurso

controlado pelo produtor rural, enquanto o produtor rural precisa regularizar sua propriedade para ter acesso a fontes de financiamento. Embora pareça uma relação ganha-ganha, se o produtor facilitar plenamente o acesso da agência ambiental poderá comprometer sua produção e, consequentemente, o seu rendimento; se bloquear completamente, não disporá dos meios para financiar a sua atividade. Do outro lado, a agência ambiental não pode exercer plenamente o seu poder de fiscalização pois poderá despertar a desconfiança do produtor rural que acabará bloqueando o acesso ao estabelecimento rural. A agência ambiental então procurará manter um nível de acesso tal, ao recurso controlado pelo produtor rural, que permita alcançar, ao menos, as metas internas da agência.

**DIAGRAMA 3**  
**Diagrama esquemático UML para o modelo do sistema socioterritorial**



Elaboração do autor.

Uma vez definidos os atores sociais e os recursos que compõem o sistema, faz-se necessária a distribuição de ativos para cada recurso, ou seja, o peso de cada recurso para cada ator social dentro do sistema socioterritorial (tabela 3). Apesar de depender da regularização ambiental, o produtor rural atribui mais ativos (seis) para o recurso “acesso ao estabelecimento rural”, pois o risco de ter sua atividade econômica bloqueada pela fiscalização o impede de dar maior atenção ao recurso controlado pela agência ambiental (quatro). Por sua vez, a agência ambiental depende quase que plenamente do “acesso ao estabelecimento rural” (oito) para atingir as metas internas da agência por meio de emissão de “relatórios de regularização ambiental” (dois).

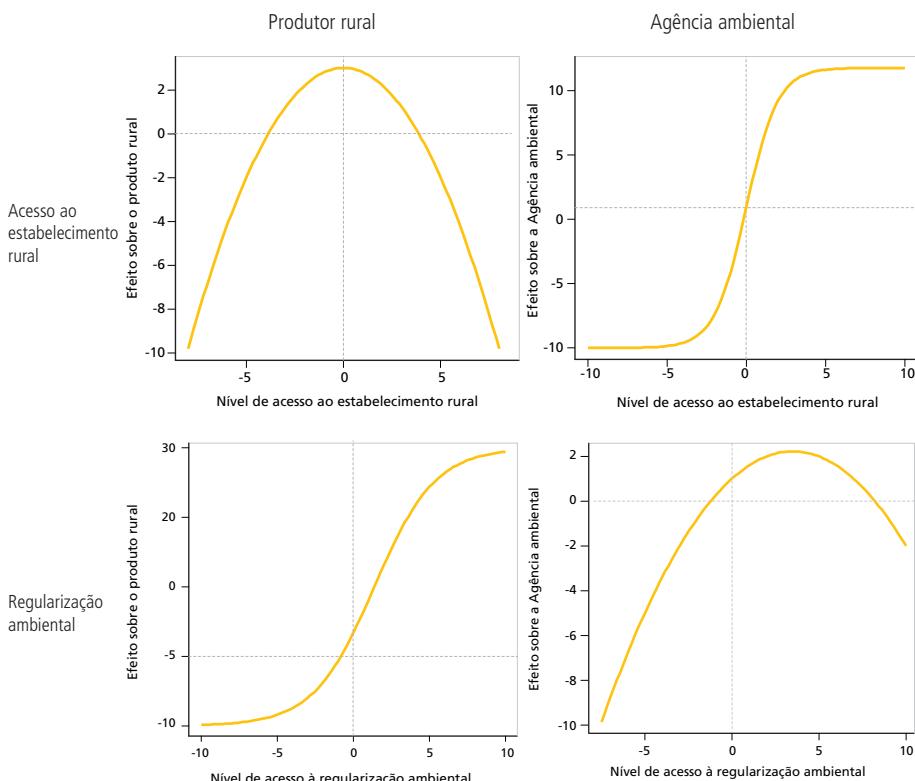
**TABELA 3**  
**Distribuição dos ativos por recurso**

|                                      | Produtor rural | Agência ambiental |
|--------------------------------------|----------------|-------------------|
| Acesso ao estabelecimento rural      | 6              | 8                 |
| Relatório de regularização ambiental | 4              | 2                 |

Elaboração do autor.

As funções de efeito descrevem, por meio de uma curva contínua com domínio e imagem no intervalo  $[-10,10]$ , o efeito do recurso para o ator social que depende deste recurso. Para este caso hipotético, temos quatro funções de efeito conforme o gráfico 3. A função de efeito do produtor rural para o recurso “acesso ao estabelecimento rural” é quadrática, e significa que haverá maior efeito para ele caso o acesso a esse recurso esteja próximo da neutralidade. A função de efeito do mesmo ator para o recurso “relatório de regularização ambiental” é sigmoidal, ou seja, quanto maior o acesso a esse recurso maior será o efeito sobre o produtor rural. Para o caso da agência ambiental, tem-se que a função de efeito para o recurso “acesso ao estabelecimento rural” também é sigmoidal com limites inferiores e superiores iguais a -8 e 8. Isto significa que quanto maior o acesso ao estabelecimento rural melhor será o impacto para a agência. No entanto, tem-se que para o recurso “relatório de regularização ambiental” a agência tem seu pico de retorno para um determinado valor de acesso, meta da agência ambiental, e decai para os demais estados.

**GRÁFICO 3**  
**Funções de efeito para cada relação ator social – recurso**



Elaboração do autor.

Ao executar o algoritmo de simulação social para este caso, tem-se que o sistema socioterritorial encontra sua estabilidade numa média de 11.843 etapas, para os estados de “acesso ao estabelecimento rural” e “relatório de regularização ambiental” iguais a 4,18 e 5,95, respectivamente, com capacidade de ação individual igual a 104,93 e 76,48 para os atores produtor rural e agência ambiental, respectivamente (tabela 4). Esses valores equivalem a 66% e 68% da porcentagem equivalente às máximas capacidades de ação possíveis para os respectivos atores.

A análise dos desvios dos valores para as capacidades de ação e estados para as diversas iterações do algoritmo de simulação (tabela 4) mostram que a agência ambiental tem menos margem de manobra, pois depende de um recurso até certo ponto restrito. O recurso “acesso ao estabelecimento rural” variou menos, pois será num limite estreito no qual o produtor rural alcançará as suas melhores capacidades de ação.

TABELA 4

**Média e desvio padrão para as capacidades de ação e os recursos para as situações de convergência do algoritmo de simulação**

|                               |                                 | Média  | Desvio padrão |
|-------------------------------|---------------------------------|--------|---------------|
| Capacidade de ação dos atores | Produtor rural                  | 104,93 | 5,26          |
|                               | Agência ambiental               | 76,48  | 2,19          |
| Estado dos recursos           | Acesso ao estabelecimento rural | 4,18   | 0,47          |
|                               | Regularização ambiental         | 5,95   | 1,20          |

Elaboração do autor.

## 7 APLICAÇÕES DO MÉTODO SOCLAB EM SISTEMAS SOCIO TERRITORIAIS

A origem empírica da SOA e sua formalização através do método Soclab permitiu a aplicação desse quadro teórico-metodológico em alguns problemas de análise da ação coletiva num determinado espaço geográfico (Adreit *et al.*, 2009; Casula, 2011; Baldet, 2011; Silva, Sibertin-Blanc e Gaudou, 2011; Silva *et al.*, 2014; Silva, 2014). Todas essas aplicações podem ser consideradas como análises de relações de poder em sistemas socioterritoriais e apresentam certas características gerais como: estão inseridas em contextos de investigação territorial multidisciplinar; possuem caráter exploratório e não conclusivo; de uma forma ou de outra, os atores sociais ligados à agricultura, principal atividade humana modificadora do ambiente natural, estão presentes na governança do sistema socioterritorial.

Nas próximas duas subseções será realizada uma breve revisão desses trabalhos e descrito, com algum pormenor, um estudo de caso sobre a análise das relações de poder no Território Rural Sul Sergipano, Brasil.

### 7.1 Uma breve revisão

Embora o método Soclab tenha sido elaborado para lidar com qualquer tipo de estudos sociais colaborativos, o foco principal de sua aplicação tem sido a análise de sistemas socioterritoriais. Casula (2011) usou essa abordagem para investigar a estrutura social em torno da gestão dos recursos hídricos na ilha de Córsega,

França, e mostrou que o método aumenta a nossa capacidade de compreender os microfundamentos do comportamento geral desse sistema social.

Adreit *et al.* (2009) aplicaram o Soclab na análise sociológica do comportamento dos atores sociais vinculados à agricultura e que atuam na bacia hidrográfica Adour-Garonne, no sudoeste da França. Esta é uma zona vulnerável em termos de poluição dos rios e seus afluentes, majoritariamente devido à atividade agrícola. De acordo com os autores, embora o método Soclab tenha vocação para a análise exploratória da estrutura social e suas relações de poder em torno de um determinado conjunto de recursos, é possível que os resultados da modelagem e simulação possam auxiliar tomadas de decisões concretas. Assim, a partir da análise da capacidade de ação e poder, segundo as definições do Soclab, os autores avaliaram a aceitabilidade e a aplicabilidade das políticas públicas elaboradas para diminuir a poluição dos rios junto aos principais atores sociais.

Baldet (2011) e Sibertin-blanc *et al.* (2013) analisaram as relações conflitantes entre atores sociais envolvidos na prevenção e gerenciamento de riscos de inundação na bacia do rio Touch, sudoeste da França. Neste cenário tem-se dois grupos de atores sociais distintos: aqueles que representam os municípios de áreas agrícolas, à montante, e os municípios da zona metropolitana de Toulouse, à jusante. Os primeiros são obrigados a alagar parte de sua área agricultável para evitar inundações nas áreas urbanas, representadas pelo segundo grupo. A solução adotada pelo conjunto de atores foi a mudança de perspectiva quanto à interpretação ou conceituação do rio Touch: o rio deveria ser, então, gerenciado como um elemento integrado e integrador do ecossistema, e não simplesmente como um fluxo contínuo de água. O ator social SIAH, associação intermunicipal para o gerenciamento do rio Touch, ficou responsável por essa mudança de perspectiva.

Neste estudo o método Soclab foi usado para avaliar quatro hipóteses: *i*) o ator social SIAH, segundo a análise ator-rede, é uma passagem obrigatória para os demais; *ii*) o ator social SIAH detém os meios para introduzir mudanças significativas no gerenciamento de risco de inundação; *iii*) o ator social SIAH tem aliados com suficiente poder para impor sua estratégia; *iv*) o acordo em torno do “interesse público territorial” extingue os principais conflitos no sistema socioterritorial. Os autores validaram as três primeiras hipóteses e concluíram que o ator SIAH tem poder suficiente para conduzir a mudança de paradigma e que esse poder é puramente cooperativo. Apesar disso a mudança de paradigma não encerrou o conflito entre os dois grupos antagônicos.

## 7.2 O Território Rural Sul Sergipano, Brasil

Silva *et al.* (2014) aplicaram o método Soclab na modelagem do Território Rural Sul Sergipano (TRSS), que faz parte do conjunto de territórios rurais que implementam a Política de Desenvolvimento Rural Sustentável do Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA). A pesquisa empírica teve como principal objetivo

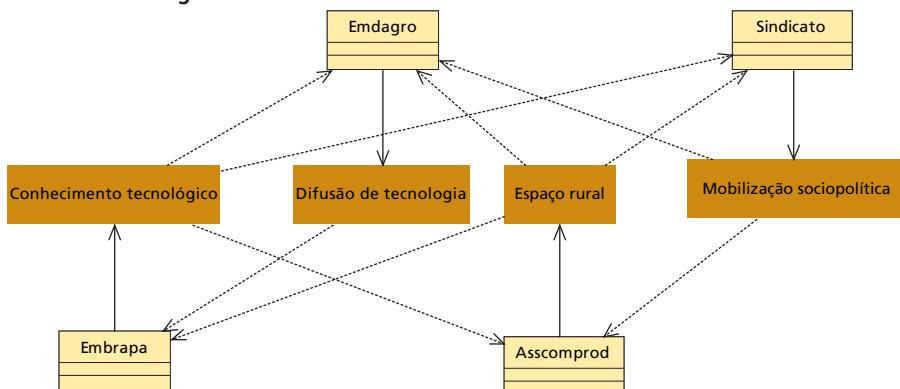
o levantamento dos principais atores e as suas relações de interdependência a fim de servir como possível linha de base para futuras análises do impacto da política pública territorial do MDA. A análise teve como ponto de partida o Colegiado Territorial responsável pela coordenação e governança do TRSS.

O Território Rural do Sul Sergipano, Brasil, inclui doze municípios. A população total compreende 278.955 habitantes, dos quais 44% residem em áreas rurais. O território tem mais de mil famílias assentadas e 20.599 propriedades rurais ligadas à agricultura familiar. A agricultura (destaque para a produção de laranja e coco) e pecuária são as principais atividades econômicas rurais (Siqueira, Silva e Aragão, 2010).

O Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA) criou os TRSS em 2007. Para governar esta nova entidade, criou um colegiado, composto por representantes de instituições ligadas à agricultura familiar, para elaborar um plano de desenvolvimento territorial sustentável. Apesar de algumas iniciativas, este processo ainda está em curso. Em geral, percebe-se um engajamento social frágil em torno do colegiado territorial e um viés setorial que impede a integração com outros setores da economia, do meio ambiente e de outras ações sociais.

A pesquisa foi realizada por meio de entrevistas, questionários e análise documental, sendo que o primeiro rascunho sobre os atores sociais e recursos tornaram-se visíveis em Silva *et al.* (2014), que mostrou que alguns atores sociais associados à conservação do meio ambiente e com as atividades econômicas não participam do colegiado do TRSS e que não havia um forte engajamento entre este e as associações comunitárias e rurais. Assim, decidiu-se modelar apenas as relações entre os atores sociais que estavam fortemente vinculados ao colegiado. As solidariedades não foram consideradas, assim  $S_n = C_n$ .

**DIAGRAMA 4**  
**Arte do diagrama classe UML do sistema socioterritorial**



Elaboração do autor.

### 7.2.1 O modelo

Assumiu-se que: o comportamento dos atores sociais que estão associados a um mesmo grupo é homogêneo o suficiente para permitir-nos representá-lo por apenas um ator social – por exemplo, associações, sindicatos, prefeituras, bancos e conselhos municipais; e que é possível identificar as relações informais entre os atores sociais por meio dos recursos institucionais. O diagrama 4 mostra parte do diagrama de classe UML do sistema socioterritorial TRSS. Neste gráfico alguns atores sociais foram representados (Emdagro, Sindicato, Embrapa e Asscomprod), bem como os seus recursos e as conexões entre eles.

O quadro 1 mostra os atores sociais do TRSS e os recursos controlados por eles (Silva, 2014). Para cada recurso foi definido um intervalo de acessibilidade.

**QUADRO 1**  
**Lista dos atores sociais e dos seus recursos**

| Ator social  | Descrição do ator social   | Recurso   | Descrição dos recursos e intervalo de acessibilidade   |
|--------------|--|---|--|
| Pronese      | Empresa de Desenvolvimento Sustentável do Estado de Sergipe.   | Consultoria em sustentabilidade                                 | Consultoria em políticas públicas de desenvolvimento sustentável para as zonas rurais. Não há nenhuma restrição para acessar esse recurso, de modo que a acessibilidade está no intervalo [-10,10].            |
| Emdagro      | Empresa de Desenvolvimento Agropecuário de Sergipe.  | Assistência técnica e extensão rural                            | A falta de capacidade estrutural limita o acesso a este recurso. Acesso no intervalo [-8, 8].  |
|              |  | Difusão de tecnologia   | Faixa de acesso é [-10,6].   |
| Asscomprod   | Associações comunitárias ou de produtores agrícolas familiares.  | Espaço rural  | O acesso pode não ser completo, mas raramente é inacessível, [-9,9].   |
| Banco        | O Banco do Nordeste, o Banco Mundial e o Banco do Brasil financiam projetos de desenvolvimento local sustentável e de baixo custo. | Recursos financeiros  | O intervalo de acesso é [-6,6].  |
| Condem/ CMDS | Conselho Econômico para o Desenvolvimento Municipal/ Conselho Municipal para o Desenvolvimento Sustentável.                        | Plano de desenvolvimento municipal                              | O plano de desenvolvimento municipal por Condem (Conselho Econômico de Desenvolvimento Municipal) ou o CMDS (Conselho Municipal para o Desenvolvimento Sustentável). Pode assumir situações extremas [-10,10]. |
| Prefeitura   | Administração municipal  | Políticas públicas para o desenvolvimento municipal sustentável | Este recurso pode assumir situações extremas, com acesso no intervalo [-10,10].  |
| Sindicato    | Sindicato dos trabalhadores rurais   | Mobilização sociopolítica                                       | Entende-se mobilização sociopolítica como a capacidade do sindicato dos trabalhadores rurais para mobilizar pessoas para um engajamento político-ideológico. Intervalo de acesso é igual a [-9,9].             |
| Embrapa      | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  | Conhecimento tecnológico  | O acesso a este recurso é relativamente limitado [-5,5].   |

Fonte: Silva (2014).

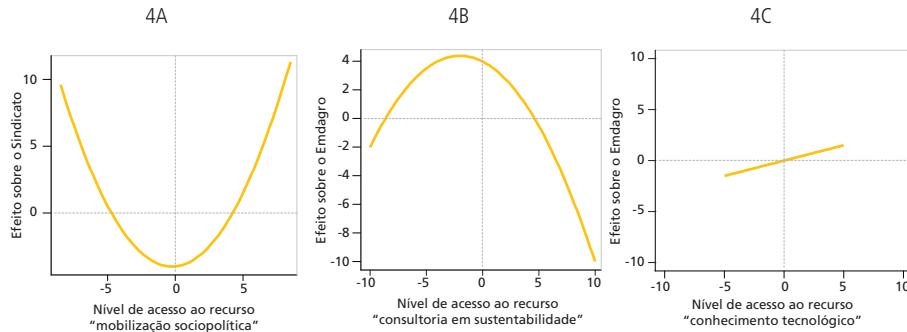
Elaboração do autor.

Os ativos dos atores sociais foram distribuídos de acordo com a expectativa de um jogo social cooperativo, de modo que cada um aloca mais ativos em recursos controlados pelos demais. Como esperado, a Embrapa é o menos dependente em relação aos demais. Como uma organização de pesquisa agropecuária, com uma capacidade limitada para a difusão de tecnologia, seus ativos foram colocados em recursos controlados pela Emdagro e no espaço rural, controlado pelo Asscomprod (Silva, 2014).

Algumas funções de efeitos são ilustradas no gráfico 4. O efeito do recurso “mobilização sociopolítica” sobre o ator social Sindicato mostra que o efeito será negativo apenas para uma situação em que haja apatia social, ou seja, com o valor deste recurso próximo de zero. Caso contrário, esse ator social, que representa a força de trabalho do meio rural, terá efeitos positivos para valores negativos do recurso, o que significa desmobilização sociopolítica ou vulnerabilidade, e para valores positivos, o que significa um engajamento social completo (gráfico 4A).

O gráfico 4B mostra o efeito do recurso “consultoria em sustentabilidade”, controlado pela Pronese, sobre a Emdagro. A curva parabólica revela que a dificuldade extrema de acesso a esse recurso afeta negativamente a Emdagro, assim como a oferta abundante, pois a Emdagro não teria os meios de atender a demanda gerada pelo acesso irrestrito ao recurso. O impacto será positivo somente para as situações intermediárias, de forma que o acesso restrito do recurso controlado pela Pronese pode gerar oportunidades para a Emdagro assumir o papel de consultora em sustentabilidade. O efeito também será positivo para situações de acesso levemente facilitado, pois isso geraria solicitações de ações exequíveis por parte da Emdagro.

**GRÁFICO 4**  
**Uma amostra das funções de efeitos do modelo**



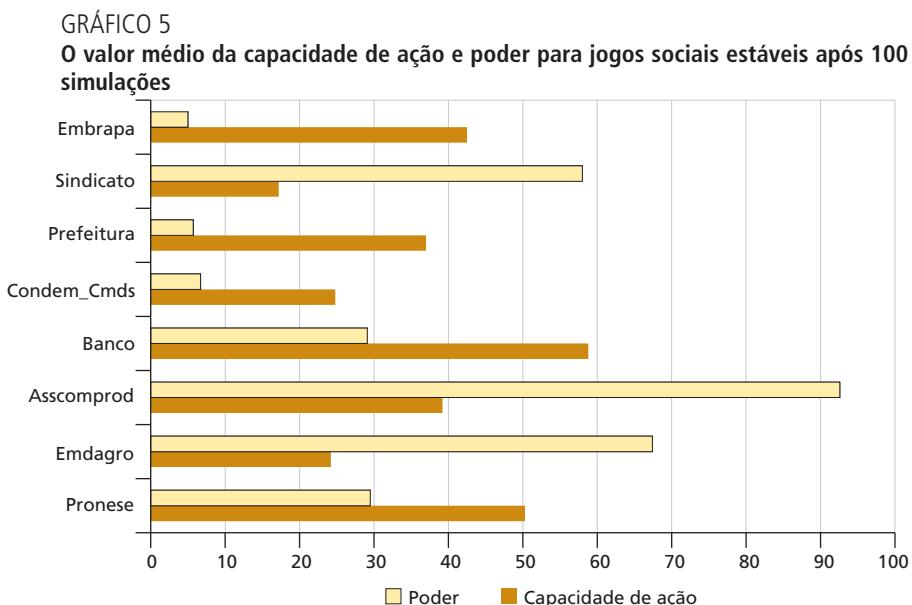
Fonte: Silva (2014).

Elaboração do autor.

O gráfico 4C é um bom exemplo de um recurso restrito, disponível no intervalo de -5 a 5. Esta linha reta e curta mostra que o efeito do conhecimento tecnológico sobre o Condem/CMDs é quase insignificante, ou seja, que este ator social não usa esse tipo de informação no processo de tomada de decisão.

### 7.2.2 As simulações

Para realizar a simulação social para verificar se este sistema socioterritorial é estável ou não, e para observar como é a distribuição de poder e a capacidade de ação entre os atores sociais, foi utilizado o *software* Soclabs. Foram considerados os valores padrão para todos os parâmetros psico-cognitivos, e realizada cem simulações com 200 mil etapas cada uma, no máximo. O algoritmo de simulação social atingiu a estabilidade em 98% das simulações, com uma média de 73.883 passos.



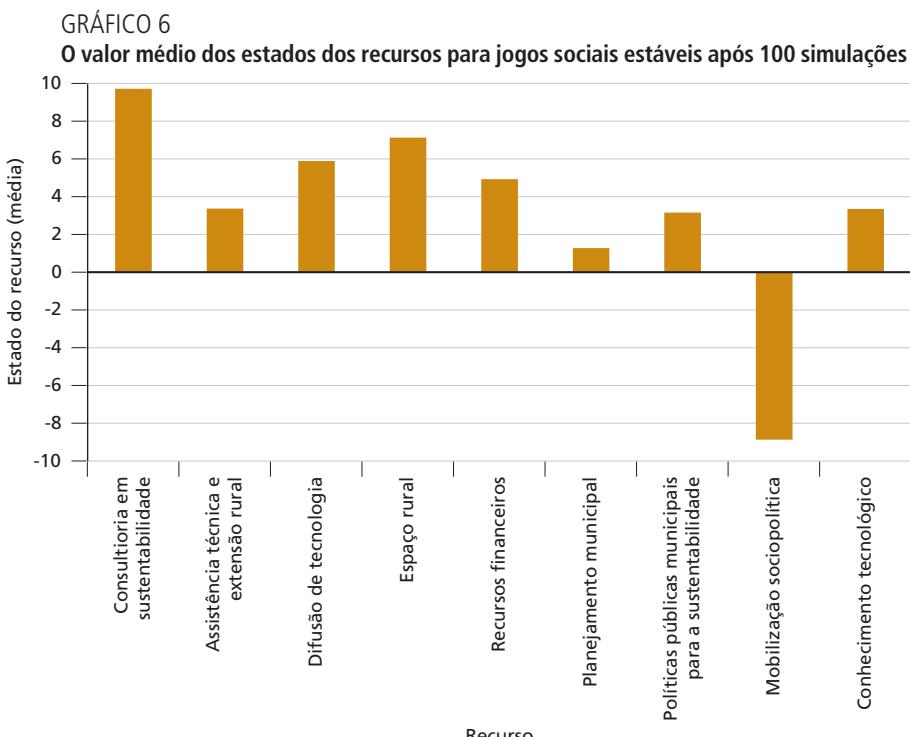
Elaboração do autor.

O gráfico 5 mostra os valores médios da capacidade de ação e poder para todos os atores sociais. O Banco, a Pronese e a Embrapa têm pontuações mais altas para a capacidade de ação (55,09; 49,30; e 41,23, respectivamente), o que significa que eles têm mais chances de cooperar com os outros. O Sindicato é o ator social com a pior capacidade de ação (16,70). Isso sugere que o Sindicato, de alguma forma, está bloqueado e com um espaço limitado de ação. Apesar de sua centralidade e importância, a Emdagro tem uma pequena capacidade de ação (20,62), ou seja, os dois recursos controlados por esse ator não lhe dão a capacidade de ação necessária

devido a sua oposição a outros atores e sua limitação para atender a demanda no campo da assistência rural. Analogamente, o mesmo ocorre com o Prefeitura e com o Condem/CMDS.

Os mais poderosos atores sociais são a Asscomprod (92,6), a Emdagro (67,4) e o Sindicato (58). Isso significa que eles controlam recursos importantes e que maximizam o impacto sobre cada um desses atores sociais. De fato, o Asscomprod controla um recurso chave, “espaço rural”. A Embrapa (5), a Prefeitura (5,7) e do Condem/CMDS (6,7) têm os piores valores para a variável poder.

Apenas dois recursos apresentaram maior acessibilidade após as simulações: “consultoria em sustentabilidade”, controlada pela Pronese, e “espaço rural”, controlado pela Asscomprod (gráfico 6). Na verdade, estes são atores sociais que compartilham sem restrições os seus recursos. Alguns recursos estabilizaram na região neutra, em torno de zero, o que significa que este sistema socioterritorial mostra algum tipo de indiferença em relação a iniciativas locais (plano de desenvolvimento municipal, políticas públicas para o desenvolvimento sustentável do município) e à evolução tecnológica.



Elaboração do autor.

### 7.2.3 A avaliação da política pública territorial e outras observações sobre o estudo de caso

A avaliação global de uma política pública territorial é uma tarefa difícil e exige uma abordagem multidimensional para se considerar o maior número possível de aspectos da realidade a ser compreendida. O método Soclab auxilia a enfrentar parte deste desafio, mas não oferece ainda um método verificável e conclusivo. No entanto, mostrou-se eficaz para sistematizar as informações de estudos sociológicos, mapeando as relações sociais, avaliando a estabilidade dessas interdependências, e construindo uma linha de base para comparações futuras dos diferentes estados relacionais para o mesmo sistema socioterritorial.

Em nosso estudo de caso, o método Soclab mostrou algumas evidências de que o sistema socioterritorial TRSS poderia ser interpretado como uma organização estável, que apresenta algumas características, tais como: *i*) em certa medida, setorial, assim privilegiando apenas as questões relacionadas com o grupo da agricultura familiar; *ii*) existem alguns recursos com acesso restrito; e *iii*) há um certo desequilíbrio entre os atores sociais quanto à potência e à capacidade de ação. Obviamente, uma maneira de mudar esse cenário é a adição de novos atores sociais de forma a criar uma nova estrutura para o jogo social, alterando as regras formais e informais do colegiado territorial.

Silva (2014) avaliou dois cenários para este sistema socioterritorial, mudando a função de efeito e o nível de acesso a um recurso. Todos os resultados foram avaliados/validados por pesquisadores com experiência suficiente para julgar a plausibilidade dos resultados da simulação.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora já existam mecanismos de observação territorial, é importante destacar a necessidade de métodos interdisciplinares que integrem os diferentes conceitos das áreas norteadores dos princípios do desenvolvimento sustentável. Neste capítulo a teoria dos sistemas é usada como fio condutor de ligação entre o sistema social de atores, suas relações de poder e o sistema espacial por meio do método Soclab. O sistema socioterritorial pode ser modelado para diferentes fins e mostrou-se aplicável em processos de avaliação de políticas públicas territoriais ou como fornecedor de subsídios para estas.

A análise de poder em sistemas socioterritoriais por meio da SAO permite o estabelecimento das interdependências entre os diversos atores sociais por meio das relações de controle e dependência sobre as “zonas de incerteza” que podem servir como subsídios para estudos nas áreas de redes sociais e coesão social. A análise estratégica não permite concluir categoricamente se determinado sistema socioterritorial atingirá ou não suas metas, mas se ele apresenta as condições necessárias para tal.

A conceituação territorial proposta por Moine mostra uma tendência em centrar as atenções da análise da interação homem-espacó geográfico no sistema de governança social. No entanto, esse novo direcionamento adiciona ao processo de análise territorial o desafio de integrar o sistema espacial aos processos inherentemente ligados ao sistema social. Neste trabalho, simplificou-se essa tarefa por meio do mapeamento dos elementos geográficos como relações e recursos do método Soclab.

O processo de modelagem através do método Soclab apresenta dificuldade crescente, à medida que o número de atores sociais e recursos são adicionados ao modelo. As principais dificuldades são a construção das funções de efeito que exige profundo conhecimento do problema e a análise dos resultados da simulação para os casos com vários atores e recursos. De fato, o algoritmo de simulação apresenta complexidade exponencial, o que impõe limitações de processamento à simulação computacional.

Uma das principais aplicações do Soclab é a análise exploratória das relações sociais, de forma que sejam verificados: se há ou não possibilidade de atingimento do equilíbrio ou convergência e em quais condições isso ocorre; se há desequilíbrio na distribuição do poder entre os atores sociais, que pode explicar, entre outros, o pouco engajamento ou indiferença de certos atores; e a criação de uma linha de base como referencial comparativo entre a situação, estrutura social, atual e futuras. Evidentemente, o uso do método Soclab cria, também, um meio padronizado de registro de investigações sociológicas territoriais.

Evidentemente o processo de modelagem e simulação social cria oportunidades e desafios de pesquisa e desenvolvimento em diversas áreas, como: a análise estatística multivariada dos resultados da simulação; a evolução do vínculo entre as componentes espaciais e o sistema social; a espacialização dos resultados e posterior conexão com modelos de uso da terra; a análise do sistema social por meio de outras teorias sociais; e a criação de sistemas de análise e acompanhamento de políticas públicas territoriais ou territorializadas.

Por fim, espera-se que o método de modelagem e simulação exposto neste capítulo possa colaborar no processo de compreensão dos sistemas sociais territoriais complexos, bem como auxiliar o poder público no processo de planejamento e elaboração de políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável territorial.

## REFERÊNCIAS

ABRAMOVAY, R. Para uma teoria dos estudos territoriais. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL SOBRE DESENVOLVIMENTO TERRITORIAL SUSTENTÁVEL, 1., 2007, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: UFSC, 2007.

ADREIT, F. *et al.* Prendre en compte la dimension sociale dans un projet de développement durable: fondements et utilisation du système soclab. In: SYSTÈMES D'INFORMATION ET DE DÉCISION POUR L'ENVIRONNEMENT, 2009, Toulouse. **Abstract...** Toulouse: Université de Toulouse, 2009.

BALDET, B. Positionnements stratégiques autour du risque d'inondation: modélisation et simulation du cas de la vallée du Touch en Haute-Garonne. In: CONGRÈS DE L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE SOCIOLOGIE, 2011, Grenoble. **Abstract...** Paris: Association Française de Sociologie, 2011.

BOUERI, R.; COSTA, M. A. (Eds.). **Brasil em desenvolvimento 2013:** Estado, planejamento e políticas públicas. Brasília: Ipea, 2013.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Referências para a gestão social de territórios rurais.** Brasília: SDT, 2005. (Série Documentos, n. 3).

CASULA, M. Innovation politique et changement organisationnel dans la gestion de l'eau: la création du comité de Bassin de Corse. In: CONGRÈS DE L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE SOCIOLOGIE, 2011, Grenoble. **Abstract...** Paris: Association Française de Sociologie, 2011.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de sistemas em geografia:** introdução. São Paulo: Hucitec, 1979.

CLAVAL, P. Espaces et territoire: les bifurcations de la science régionale, **Géographie Économie Société**, Cachan, n. 10, p. 157-184, 2008.

COLE, J. P. **Geografia quantitativa.** Rio de Janeiro: IBGE, 1972.

CROZIER, M.; FRIEDBERG, E. **L'acteur et le système.** Paris: Seuil, 1977.

DUTTA, P. K. **Strategies and games:** theory and practice. Cambridge: MIT Press, 1999.

EL GEMAYEL, J. **Un modèle par apprentissage de la rationalité des acteurs sociaux.** 2013. Thesis (Doctorat) – IRIT, Université de Toulouse 1 Capitole, 2013.

ENCARNAÇÃO, S. A. *et al.* Sistemas territoriais complexos – da não linearidade das dinâmicas territoriais à emergência de territórios auto-organizados. In: COLOQUIO IBERICO DE GEOGRAFIA, 12., 2010, Porto. **Anais...** Porto: Universidade do Porto, 2010.

ÉTIENNE, M (Org.). **La modélisation d'accompagnement:** une démarche participative en appui au développement durable. Versailles: Quae, 2010.

FRIEDBERG, E. **O poder e a regra:** dinâmicas da ação organizada. Lisboa : Instituto Piaget, 1993.

LELOUP, F. Le développement territorial et les systèmes complexes: proposition d'un cadre analytique, **Revue d'Économie Régionale & Urbaine**, v. 4, p. 687-705, 2010.

LIMA, I. Território autonômico como sistema, **Revista Geográfica de América Central**, v. 2, Número Especial Egal, p. 1-15, 2011.

MATTEO, M. *et al.* O Brasil em perspectiva territorial: regionalizações como uma estratégia do desenvolvimento emergente. In: BOUERI, R.; COSTA, M. A. (Eds.). **Brasil em desenvolvimento 2013**: Estado, planejamento e políticas públicas. Brasília: Ipea, 2013. v. 1, p. 49-87.

MOINE, A. Le territoire comme un système complexe: un concept opératoire pour l'aménagement et la géographie, **L'Espace Géographique**, Paris, n. 2, p. 115-132, 2006.

\_\_\_\_\_. **Le territoire**: comment observer un système complexe. Paris: L'Harmattan, 2007.

POTEETE, A. R.; JANSSEN, M. A.; OSTROM, E. **Working together**: collective action, the commons, and multiple methods in practice. Princeton: Princeton University Press, 2010.

QUEIRÓS, M. Teorias da complexidade: princípios para o ordenamento do território. In: SENDRA, J. B.; ESPINOSA, V. M. R. (Eds.). **La perspectiva geográfica ante los retos de la sociedad y el medio ambiente en el contexto ibérico**. Madrid: Universidad de Alcalá, 2010.

ROGGERO, P. **La complexité sociologique**: éléments pour une lecture complexe du système d'action concret. Toulouse: LEREPS, 2000. (Rapport n. LEREPS-CR-00-04).

SAQUET, M. A. **Abordagens de concepções de território**. 2. ed. São Paulo: Expressão Popular, 2010.

SIBERTIN-BLANC, C.; AMBLARD, F.; MAILLIARD, M. A coordination framework based on the sociology of organized action. In: BOISSIER, O. *et al.* (Eds.). Coordination, organizations, institutions and norms in multi-agent systems, **Lecture Notes in Computer Sciences**, Springer, n. 3.913, p. 3-17, 2006.

SIBERTIN-BLANC, C. *et al.* SocLab: a framework for the modeling, simulation and analysis of power in social organizations, **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 16, n. 4, p. 8, 2013.

SIGNORET, P. **Territoire, observation et gouvernance**: outils, méthodes et réalités. 2011. Thesis (Doctorat) – Université de Franche-Comté, **Ecole doctorale Langage**, Espace, Temps, Société, 2011.

SILVA, M. A. S.; SIBERTIN-BLANC, C.; GAUDOU, B. Modélisation des processus sociaux pour le développement rural durable: le territoire comme système complexe d'acteurs. In: COLLOQUE NATIONAL - Ecologisation des politiques et des pratiques agricoles, 2011, L'Isle sur la Sorgue. **Annales**... Avignon: Inra Paca, 2011.

SILVA, M. A. S. et al. Modelagem social computacional como instrumento de análise de sistemas sociais territoriais complexos: o caso do Território Sul Sergipano, Brasil. **Campo-Território**, v. 9, n. 17, p. 55-85, 2014.

SILVA, M. A. S. Modeling and simulation of a socioterritorial system: an exploratory analysis of the Southern Rural Territory of Sergipe, Brazil. In: BRAZILIAN WORKSHOP ON SOCIAL SIMULATION, 4., 2014, São Paulo. **Eletroonic proceedings**... São Paulo: USP, 2014.

SIQUEIRA, E. R.; SILVA, M. A. S.; ARAGÃO, A. G. **O território rural centro-sul de Sergipe**, 1. ed. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2010. v. 1.

## APÊNDICE

Sugestão simplificada de modelo de formulário para levantamento de dados para a construção do modelo socioterritorial baseado no Soclab (Sibertin-Blanc *et al.*, 2013).

| Ator social:  | Recursos ("zonas de incerteza") importantes para o ator social |   |   |
|---|--|---|---|
|   | A  | B | C |
| <p>1. Quais são os recursos necessários para a realização de suas tarefas e alcance de seus objetivos?</p> <p>2. Quem controla os recursos?</p> <p>3. O quanto importante é o recurso para a sua atividade? [0,10]</p> <p>4. Descreva o seu comportamento para o caso de acesso restrito ao recurso.</p> <p>5. Avalie o efeito do comportamento descrito no item 4 na sua atividade [-10,0].</p> <p>6. Descreva o seu comportamento para o caso de acesso irrestrito ao recurso.</p> <p>7. Avalie o efeito do comportamento descrito no item 6 na sua atividade [0,10].</p> <p>8. Descreva o seu comportamento para o caso de situação neutra com relação ao acesso ao recurso.</p> <p>9. Avalie o efeito do comportamento descrito no item 8 na sua atividade [-10,10].</p> <p>10. Qual a situação usual com relação ao acesso ao recurso?</p> <p>11. Avalie essa situação em termos de impacto na sua atividade [-10,10].</p> |  |   |   |

12. Cada ator social atribuirá um valor representativo do grau de solidariedade que mantém com os demais, sendo que valores próximos a -1 significam uma situação de conflito, valores próximos a zero denotam neutralidade ou imparcialidade, enquanto que valores próximos a 1 correspondem a uma relação de cooperação.

|               | Ator social A | Ator social B | Ator social C | Ator social D | Ator social E | Ator social F |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Solidariedade |               |               |               |               |               |               |

Obs.: Os valores da questão 3 devem ser normalizados de forma que a soma de todas as avaliações para o ator social seja igual a dez. As questões de 4 a 11 deverão ser usadas para a construção das funções de efeito. Os valores da questão 12 serão usados para construir a matriz  $W_{N \times N}$ .

## REFERÊNCIAS

SIBERTIN-BLANC, C. *et al.* SocLab: a framework for the modeling, simulation and analysis of power in social organizations, **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 16, n. 4, p. 8, 2013.



# Ipea – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

## EDITORIAL

### Coordenação

Cláudio Passos de Oliveira

### Supervisão

Everson da Silva Moura  
Reginaldo da Silva Domingos

### Revisão

Ângela Pereira da Silva de Oliveira  
Clícia Silveira Rodrigues  
Idalina Barbara de Castro  
Leonardo Moreira Vallejo  
Marcelo Araujo de Sales Aguiar  
Marco Aurélio Dias Pires  
Olavo Mesquita de Carvalho  
Regina Marta de Aguiar  
Erika Adami Santos Peixoto (estagiária)  
Jéssica de Almeida Corsini (estagiária)  
Laryssa Vitória Santana (estagiária)  
Manuella Sâmella Borges Muniz (estagiária)  
Thayles Moura dos Santos (estagiária)  
Thércio Lima Menezes (estagiário)

### Editoração

Bernar José Vieira  
Cristiano Ferreira de Araújo  
Daniella Silva Nogueira  
Danilo Leite de Macedo Tavares  
Diego André Souza Santos  
Jeovah Herculano Szervinsk Junior  
Leonardo Hideki Higa

*The manuscripts in languages other than Portuguese published herein have not been proofread.*

### Livraria Ipea

SBS – Quadra 1 – Bloco J – Ed. BNDES, Térreo  
70076-900 – Brasília – DF  
Tel: (61) 2026 5336  
Correio eletrônico: [livraria@ipea.gov.br](mailto:livraria@ipea.gov.br)







## Missão do Ipea

Aprimorar as políticas públicas essenciais ao desenvolvimento brasileiro por meio da produção e disseminação de conhecimentos e da assessoria ao Estado nas suas decisões estratégicas.



A list of names, likely contributors or advisors, arranged in two columns. The names are: Ali Kharrazi, Marcos Aurélio Santos da Silva; Acir Almeida, Marina Haddad Tóvolli; Bernardo Alves Furtado, Masaru Yarime; Bernardo Mueller, Matthew Koehler; Claudio J. Tessone, Michael J. Jacobson; Chris Glazner, Miguel Angel Fuentes; Dick Ettema, Orlando Manuel da Costa Gomes; Herbert Dawid, Patrícia Alessandra Morita Sakowski; James E. Gentile, Scott E. Page; Jaime Simão Sichman, William Rand; Luís M. A. Bettencourt, Yaneer Bar-Yam.

ISBN 978-85-7811-248-6



9788578112486

**ipea**

Instituto de Pesquisa  
Econômica Aplicada

Secretaria de  
Assuntos Estratégicos

GOVERNO FEDERAL  
**BRASIL**  
PÁTRIA EDUCADORA