

Autômatos Celulares: seleção e mutação genética em um Ambiente Tridimensional

ANDRÉ FELIPE WONSIK ALVES, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil

ACM Reference Format:

André Felipe Wonsik Alves. 2025. Autômatos Celulares: seleção e mutação genética em um Ambiente Tridimensional. 1, 1 (November 2025), 11 pages. <https://doi.org/10.1145/nnnnnnn.nnnnnnn>

O presente trabalho tem como principal objetivo analisar a viabilidade de um modelo delimitador de existência para *Cellular Automatas* por meio de mutação e seleção genética. Para tanto, foi criado um algoritmo que simula e exemplifica o processo.

The main objective of this work is to analyze the feasibility of a delimiting existence model for Cellular Automata through mutation and genetic selection. To this end, an algorithm was created that simulates and exemplifies the process.

0.1 Área

Pode se encaixar na seguinte:

- CCS => Theory of computation => Formal languages and automata theory => Automata extensions => Quantitative automata

0.2 Orientador

Professor Rogério Aparecido Gonçalves

1 Introdução

Este texto integra todas as entregas do um estudo sobre simulações de Autômatos Celulares em ambientes regidos pela evolução Darwiniana. De modo geral, o trabalho tem como objetivo identificar e analisar conceitos chave presentes na literatura sobre evolução, autômatos celulares, modelos darwinianos, localizar lacunas relevantes e, a partir delas, propor um modelo de autômato celular tridimensional implementado no motor gráfico Godot. A pesquisa é guiada pela questão de se é possível utilizar a mutação genética como parâmetro delimitador de existência das células em um ambiente discreto, controlado e não heurístico.

Author's Contact Information: André Felipe Wonsik Alves, aalves.2020@alunos.utfpr.edu.br, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Paraná, Brasil.

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for components of this work owned by others than the author(s) must be honored. Abstracting with credit is permitted. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee. Request permissions from permissions@acm.org.

© 2025 Copyright held by the owner/author(s). Publication rights licensed to ACM.

ACM XXXX-XXXX/2025/11-ART

<https://doi.org/10.1145/nnnnnnn.nnnnnnn>

2 Fundamentação teórica

2.1 Evolução segundo Darwin

Em *A origem das espécies*, Darwin [4] organiza uma explicação causal para a adaptação e a diversidade biológica, fundada em quatro pilares: variação entre indivíduos da mesma espécie, superprodução de descendentes, *seleção natural* e herança. Nela, a seleção opera sobre diferenças de aptidão relativas; por isso, a sua ação é contextual, sujeita a diferentes restrições.

2.1.1 Variação hereditária.

Mutação. Mutações são alterações herdáveis na sequência de DNA que introduzem *novos* alelos. Quanto ao espectro de efeitos na aptidão, a grande maioria é *neutra* ou levemente *ruim*; raras são aquelas *benéficas*. Assim, a mutação é a fonte primária de novidade genética sobre a qual a seleção atua.

Recombinação. A recombinação genética *embaralha* alelos parentais, gerando combinações inéditas sem necessariamente criar novos alelos. A recombinação modula o *desequilíbrio de ligação* e pode quebrar combinações nocivas, acelerar a adaptação, ao aproximar mutações benéficas e, em contraponto, desfazer combinações boas.

2.1.2 Herança, aptidão e mudança.

Aptidão e modos de seleção. Define-se *aptidão (fitness)* como contribuição relativa de um genótipo aos grupos da geração seguinte.

2.1.3 Outras forças evolutivas.

Deriva genética. Em populações finitas, a amostragem aleatória altera frequências alélicas independentemente do valor adaptativo; a deriva gera variação e aumenta a diferenciação entre os indivíduos.

2.1.4 Hierarquia e seleção. A seleção pode ser analisada em múltiplos níveis (genes, indivíduos, grupos, espécies). O gene é muitas vezes a unidade mais útil de rastreamento causal, sem exclusão de efeitos de seleção em níveis superiores quando há herança de traços grupais e variação entre grupos.

2.1.5 Seleção sexual. Darwin [4] reconheceu que traços que aumentam o sucesso de acasalamento, ainda que custosos à sobrevivência, podem ser favorecidos (*seleção sexual*). Em genética quantitativa, isso se traduz em componentes de aptidão diferentes (sobrevivência, fecundidade, sucesso de cópula) que podem ter correlações.

2.1.6 Espécies como consequência da divergência. A especiação ocorre quando barreiras reprodutivas impedem o fluxo gênico efetivo entre populações. Sob o *Conceito Biológico de Espécie*, novas espécies emergem pela evolução do isolamento reprodutivo, frequentemente em contextos de isolamento geográfico. A seleção natural pode, portanto, tanto *produzir* adaptações quanto *manter* fronteiras específicas.

3 Análise crítica

3.1 Evolving Hierarchical Neural Cellular Automata [2]

Quando fiz o levantamento bibliográfico, imaginei que esse seria o artigo basilar do meu trabalho. Portanto, foi um dos que realmente estudei. Contudo, percebi que, infelizmente, o escrito não era tão relacionado aos *ambientes darwinianos* como imaginei.

Apesar de trabalhar alguns conceitos fundamentais da teoria darwiniana — por exemplo, evolução hierárquica, aptidão, mutação, entre outros —, o objetivo do texto é mostrar as capacidades de uma *Hierarchical Neural Cellular Automata*, e não de simulá-la em um ambiente vivo. Assim, o *Evolving* presente no título indica mais uma evolução de acordo com regras artificiais do que algo realmente semelhante às naturais.

3.2 Hierarchical Neural Cellular Automata [1]

Esse artigo cumpriu seu propósito de explicar, teoricamente, como é o funcionamento de uma *HNCA*. Mesmo que eu não tenha conseguido compreender vários conceitos apresentados nele, ainda assim foi suficiente para que eu conseguisse mapear as vantagens e desvantagens de uma implementação assim. Dessa maneira, foi importante para que eu pudesse entender alguns pontos deixados de lado no trabalho de Gaylinn [2].

3.3 Simulation of Somatic Evolution Through the Introduction of Random Mutation to the Rules of Conway's Game of Life [6]

Se comparado aos outros, esse trabalho foi mais fraco — se pensarmos em uma perspectiva baseada na evolução darwiniana. Ainda assim, o artigo faz o que propõe: introduz uma espécie de mutação genética nas células do algoritmo *Conway's Game of Life*. Uma funcionalidade assim é essencial para o meu tema.

3.4 Survival and Evolutionary Adaptation of Populations Under Disruptive Habitat Change: A Study With Darwinian Cellular Automata [5]

Artigo extremamente interessante que apresenta o comportamento de uma população de *CA* ao ser submetida a uma mudança abrupta de condições (nesse caso, algo parecido com “temperatura”). Portanto, trabalha um conceito primário da evolução: a *adaptação*. As células, após uma série de gerações, começam a se adaptar a esse ambiente novo. Infelizmente, precisarei revisitar esse trabalho com uma base de conhecimento um pouco mais consolidada, pois o achei complexo de entender.

3.5 Towards Large-Scale Simulations of Open-Ended Evolution in Continuous Cellular Automata [3]

De todos os que li, confesso que esse foi o mais abstrato. Sinceramente, o texto trabalha mais com questões arquiteturais de código do que com conceitos de simulação. Ao pensar em construir um algoritmo com evolução em muitas iterações, talvez valha a pena revisitar esse artigo para tomar decisões otimizadas.

3.6 Self-Reproduction and Evolution in Cellular Automata: 25 Years after Evoloops [8]

Essa foi a *survey* escolhida por fim e me considero totalmente satisfeito com a escolha. Apesar de o texto não trabalhar especificamente com algoritmos darwinianos, ele consegue explicar muito bem termos análogos na área. Também faz um levantamento histórico muito interessante e destaca os principais trabalhos da área. Foi por meio dele que descobri o texto de Hiroki [7], um estudo essencial no meu contexto.

3.7 Self-Replicating Worms That Increase Structural Complexity through Gene Transmission [7]

Não é possível falar de evolução e replicação genética sem citar o trabalho de Hiroki. A construção dos *Evoloops* foi algo inovador para a área, mostrando uma transmissão genética entre indivíduos em um ambiente por meio da autorreplicação, como visto na Figura 1. Sinceramente, por conta da minha

falta de domínio e pelo artigo ser antigo, confesso que não considero meu saber suficiente para reproduzir a implementação de um *Evoloops*. Ainda assim, o trabalho apresenta a implementação de conceitos fundamentais na área.

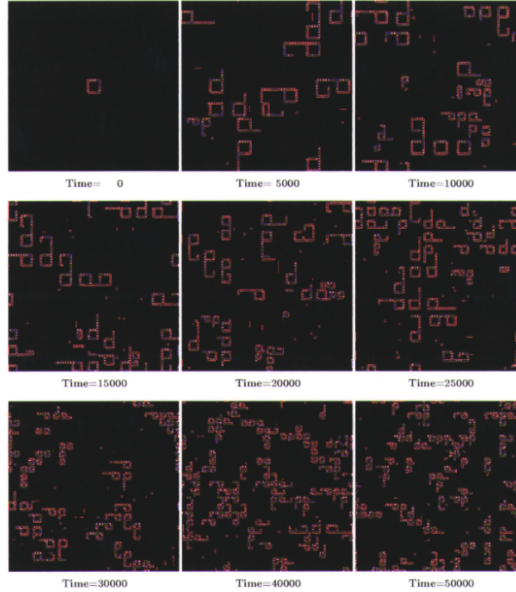


Fig. 1. Evolução espontânea de um *Evoloop*

3.8 Theory of Self-Reproducing Automata [9]

Como é um livro, não consegui ler completamente o texto. Mesmo assim, acredito que este foi um texto para me contextualizar historicamente no assunto. Aqui, Neumann não cita diretamente o termo *Cellular Automata* ou algo do tipo, mas apresenta uma proposta teórica para uma máquina que consegue se replicar indefinidamente; sua implementação pode ser vista na Figura 2.

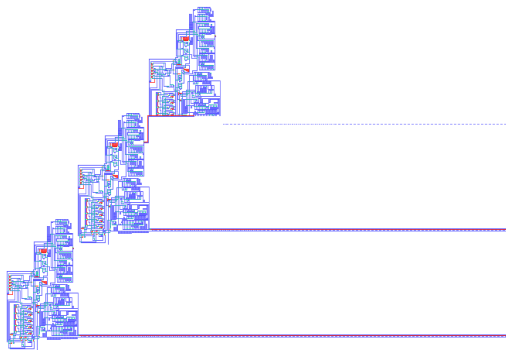


Fig. 2. Primeira implementação do conceito introduzido por Neumann

4 Lacunas encontradas

Durante a leitura dos trabalhos, consegui pensar em duas lacunas para o desenvolvimento de um artigo científico: uma *HNCA* que engloba todos os preceitos da evolução Darwiniana ou uma *CA* com alguns aspectos Darwinianos em um ambiente tridimensional. Apesar de ambos serem temas complexos, sinceramente, acredito que o primeiro seja inviável na minha situação atual. Tentar programar cada elemento influenciador do DNA é algo, claramente, inalcançável para mim; mesmo que eu tente reduzir as variáveis à menor parte, o ambiente ainda precisaria de comportamentos complexos como visto na Figura 3.

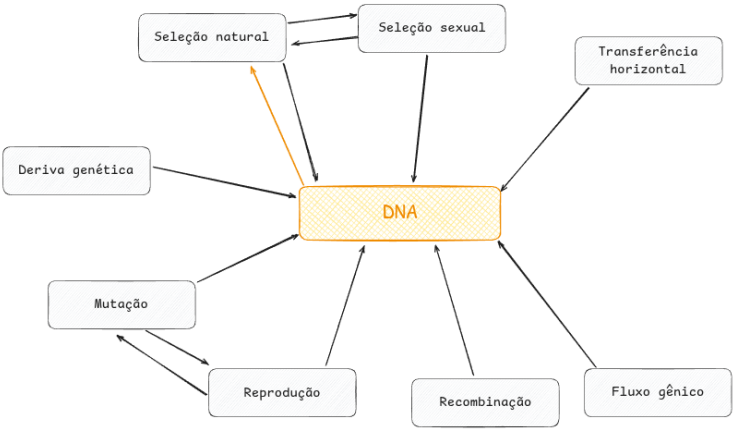


Fig. 3. Interações entre o DNA e elementos da evolução

Portanto, ao meu ver, é muito mais tangível a **implementação de uma CA tridimensional com alguns elementos de mutação** em alguma engine gráfica moderna, como o *Godot*, por exemplo. Dessa maneira, consigo explorar uma lacuna simplificada do meu tema.

5 Metodologia

A metodologia proposta é orientada pela seguinte pergunta de pesquisa: *é possível utilizar a mutação genética como parâmetro delimitador de existência em uma Cellular Automata inserida em um ambiente tridimensional no motor gráfico Godot?*. A partir dessa questão central, serão definidos o tipo de estudo, o artefato computacional a ser desenvolvido, os procedimentos de simulação, as estratégias de coleta e a análise de dados do modelo adotado.

5.1 Tipo de pesquisa

É uma pesquisa de natureza metodológica, com abordagem quantitativa, fundamentada no desenvolvimento e experimentação de um código implementado no motor gráfico *Godot*. O estudo não se concentra na validação exata de fenômenos naturais específicos, mas sim na concepção de um modelo de autômato celular tridimensional em que a introdução da mutação genética atua como mecanismo de controle da população. Essa ferramenta de controle foi pensada se baseando no trabalho de King[6].

5.2 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é investigar como a introdução de um parâmetro de mutação atua como fator delimitador na existência das células em um autômato celular tridimensional e seu desempenho médio na *engine*. Em termos específicos, busca-se:

- Implementar um autômato celular em um ambiente tridimensional discreto;
- Associar a cada célula viva um gene simples, representado por um valor numérico inteiro;
- Estabelecer e integrar ao modelo uma regra de mutação genética aplicada no momento de criação de novas células;
- Definir regras de existência em que a sobrevivência e/ou o surgimento de células dependam do gene associado;
- Registrar sistematicamente métricas quantitativas;

5.3 Procedimentos metodológicos

5.3.1 Modelagem do autômato celular tridimensional. O sistema será modelado como uma matriz tridimensional discreta de dimensão $N \times N \times N$, na qual cada posição representa uma célula potencial do autômato. Cada célula assume um estado binário, viva (1) ou morta (0), atualizado em passos de tempo discretos. Para o cálculo das regras de transição entre estados será adotada a vizinhança de Moore tridimensional, demonstrada na Figura 4. Essa estrutura será implementada no *Godot*, primeiramente por causa da minha familiaridade com a ferramenta e, secundamente, por causa de sua baixa presença nos trabalhos da área.

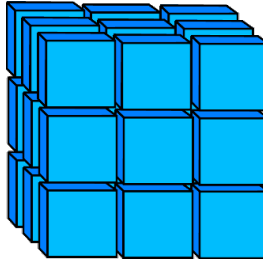


Fig. 4. Vizinhança de Moore em um espaço tridimensional

5.3.2 Definição do gene e da mutação. A cada célula viva será associado um gene g , representado por um número inteiro pertencente ao intervalo $g \in \{0, \dots, 5\}$. Quando uma nova célula nasce em uma posição "morta", seu gene será determinado por um critério de herança simples: o valor de g será herdado de uma célula vizinha viva responsável pelo nascimento. Sobre esse processo incide uma probabilidade de mutação p , tal que o gene herdado é substituído por um valor aleatório dentro do intervalo definido. Assim, a mutação é introduzida como um mecanismo controlado, permitindo avaliar o impacto de diferentes taxas de alteração genética sobre a dinâmica global do autômato.

5.3.3 Regra de existência baseada no gene. Será definido um parâmetro global g_{alvo} que representará o gene considerado mais adaptado ao ambiente simulado. A lógica de existência das células será então condicionada à relação entre o gene da célula e g_{alvo} . Células cujo gene seja igual ou suficientemente próximo de g_{alvo} terão maior probabilidade de nascer e permanecer vivas, enquanto células com genes mais distantes de g_{alvo} terão maior probabilidade de morrer ou de não serem geradas nas regras de nascimento.

Essa relação será implementada por meio da adaptação das regras clássicas de nascimento e sobrevivência do autômato celular, de forma que o gene funcione, efetivamente, como critério

delimitador de existência. Com isso, busca-se observar se a estrutura genética incorporada ao modelo é capaz de se adaptar, ao longo das gerações, à composição genética alvo do sistema.

5.3.4 Planejamento dos experimentos. Os experimentos serão organizados em cenários específicos, definidos a partir de diferentes valores para a probabilidade de mutação p , com o intuito de possibilitar a execução em tempo hábil e a comparação sistemática entre configurações. Inicialmente serão considerados:

- Cenário sem mutação;
- Cenário com mutação baixa;
- Cenário com mutação moderada;
- Cenário com mutação alta.

Para cada cenário serão mantidas a configuração inicial da matriz tridimensional, densidade inicial de células vivas e a distribuição inicial de genes, assegurando condições de comparação entre as execuções. A simulação será executada por um número fixo de gerações de modo a permitir a observação de possíveis padrões de estabilização, expansão, extinção ou oscilação.

5.3.5 Coleta de dados. A coleta de dados será realizada de forma automatizada pelo próprio artefato computacional implementado no Godot. Em cada geração da simulação, serão registradas métricas quantitativas relevantes, incluindo: o número total de células vivas, a frequência relativa de cada gene presente na população de células e a ocorrência de eventos globais como extinção total, estabilização da população ou dominância de determinados genes ao longo do tempo. Dados relativos ao consumo do computador também serão capturados.

5.3.6 Análise dos dados. A análise dos dados consistirá, inicialmente, na construção de gráficos descritivos que relacionem o número de células vivas com o número de gerações, bem como a distribuição dos genes em função do tempo, para cada cenário de mutação considerado. Por fim, será analisado o desempenho médio do motor gráfico na realização de tarefas intensivas.

6 Resultados

6.1 Resultados esperados

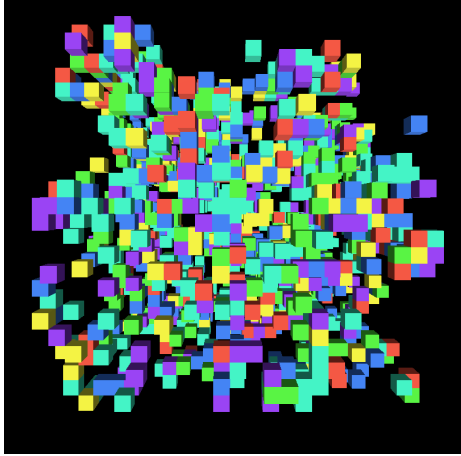
Considerando a pergunta de pesquisa "*é possível utilizar a mutação genética como parâmetro delimitador de existência em uma Cellular Automata inserida em um ambiente tridimensional no motor gráfico Godot?*", é esperado que seja possível selecionar as células dentro de um ambiente não eurístico, controlado e discreto. Assim, a saída deve ser capaz de apresentar os indivíduos com um gene desfavorável sendo eliminados do sistema e, caso contrário, que haja a manutenção e reprodução de genótipos capazes.

6.2 Resultados obtidos

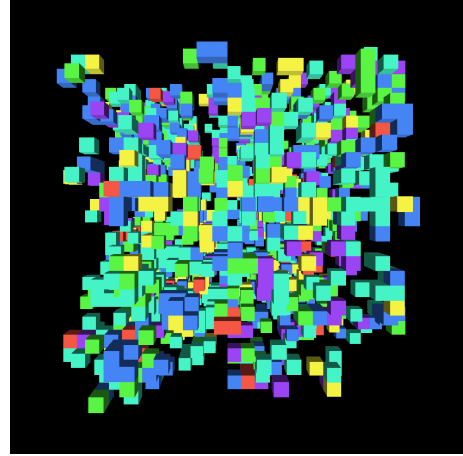
Para a análise dos resultados, foi necessário executar o ambiente e verificar, de forma comparativa, a evolução de duas *Cellular Automatas* tridimensionais: uma versão "normal", sem qualquer mecanismo explícito de mutação genética, e outra em que cada célula possui um gene sujeito a mutação e seleção ao longo das gerações. Em ambos os casos, as regras locais de atualização foram mantidas idênticas às do *Conway's Game of Life*, de forma que a única diferença relevante entre os ambientes fosse a presença, ou não, do mecanismo genético.

Nas primeiras gerações, já é possível observar uma diferença de organização espacial entre os ambientes. Na terceira geração (Figura 5), o autômato sem mutação apresenta uma distribuição de células vivas mais dispersa e com agregados pouco definidos, enquanto o ambiente com mutação

começa a concentrar células em regiões específicas, sugerindo uma pressão seletiva inicial em torno de configurações mais estáveis.



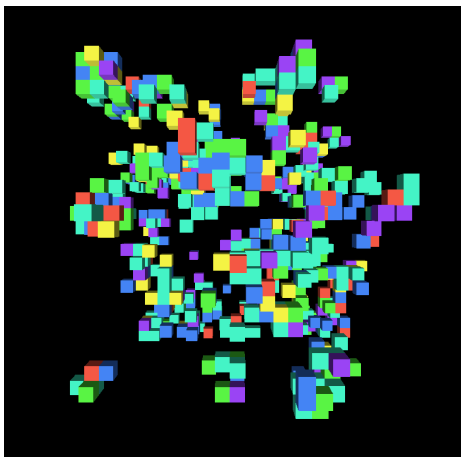
(a) Ambiente sem mutação



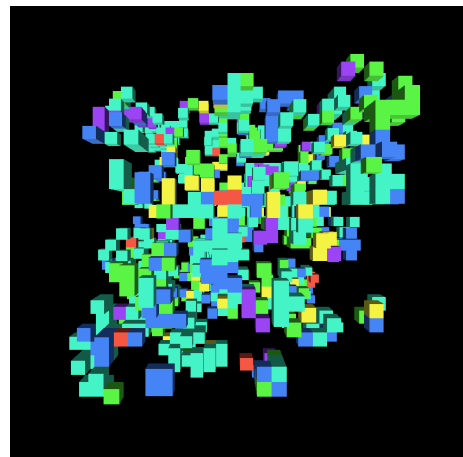
(b) Ambiente com mutação

Fig. 5. Terceira geração

À medida que o sistema evolui, essas diferenças se tornam mais evidentes. Nas gerações intermediárias, como a quinta, sétima e nona (Figuras 6, 7 e 8), o ambiente sem mutação tende a perder diversidade: muitas estruturas colapsam rapidamente, resultando em padrões mais simples, com regiões praticamente vazias ou compostas por poucos agrupamentos estáticos. Já no ambiente com mutação, observa-se a manutenção e reorganização contínua de conjuntos de células, com blocos que se redistribuem e se recompõem ao longo do tempo. Esse comportamento indica que genótipos desfavoráveis são gradualmente eliminados, enquanto combinações mais adequadas às regras locais tendem a permanecer e se reproduzir.

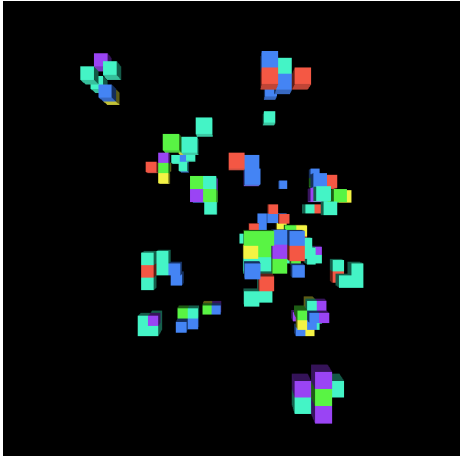


(a) Ambiente sem mutação

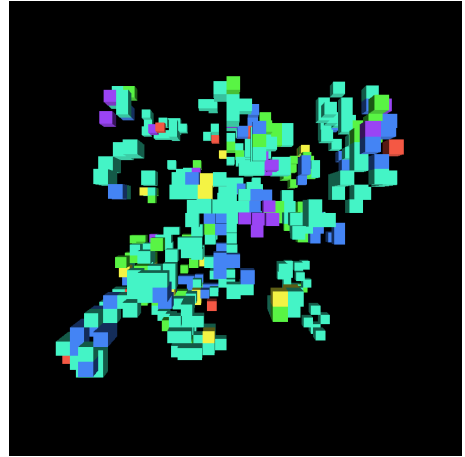


(b) Ambiente com mutação

Fig. 6. Quinta geração

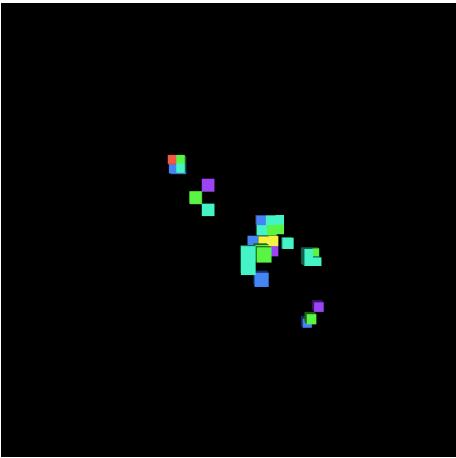


(a) Ambiente sem mutação

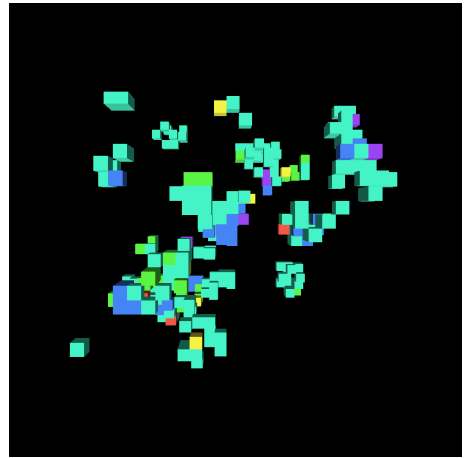


(b) Ambiente com mutação

Fig. 7. Sétima geração



(a) Ambiente sem mutação



(b) Ambiente com mutação

Fig. 8. Nona geração

Na décima primeira geração (Figura 9), essa diferença de dinâmica fica ainda mais nítida. O ambiente sem mutação se aproxima de um estado quase estacionário, com pouca atividade e baixa variabilidade estrutural. Em contraste, o ambiente com mutação apresenta um padrão que combina estabilidade global com variação local: determinadas regiões se mantêm ocupadas de forma persistente, enquanto pequenas alterações continuam ocorrendo nas bordas desses agregados.

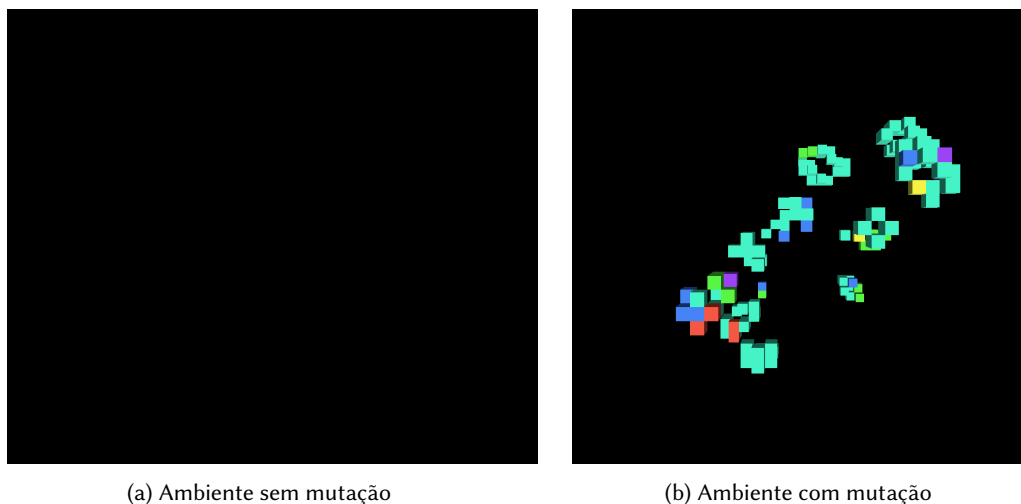


Fig. 9. Décima primeira geração

Esse comportamento pode ser descrito como uma condição de *homeostase*, ilustrada na Figura 10.

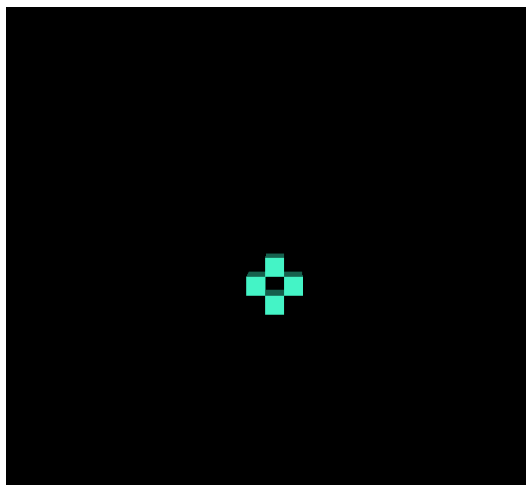


Fig. 10. Ambiente homeostático

De forma geral, os resultados preliminares sugerem que a introdução de mutação e seleção genética na *Cellular Automata* tridimensional foi válida para a pesquisa proposta. Mesmo utilizando as mesmas regras clássicas do *Conway's Game of Life*, o mecanismo genético permitiu o surgimento e a manutenção de comportamentos mais interessantes e complexos, com estruturas que persistem, se reorganizam e exibem um grau maior de auto-organização em comparação ao sistema sem mutação. Esses achados indicam que a mutação genética pode, de fato, atuar como um parâmetro delimitador de existência dentro de um ambiente discreto, controlado e não heurístico, abrindo espaço para experimentos futuros com variações de parâmetros e funções de seleção.

7 Cronograma

Para a pesquisa ser completa, o código precisa de uma melhoria na otimização, para possibilitar o aumento na quantidade de células por geração. Ainda, é visado realizar uma **simulação de Monte Carlo** no ambiente, para que melhores dados possam ser capturados. Como a otimização é um trabalho complexo e o Monte Carlo é demorado, acredito que seria necessário cerca de 6 meses para a finalização do trabalho.

8 Conclusão

Os resultados preliminares obtidos a partir da comparação entre uma Cellular Automata tridimensional sem qualquer mecanismo explícito de mutação genética e uma versão em que cada célula possui um gene sujeito a mutação e seleção ao longo das gerações indicam que o modelo proposto é capaz de selecionar, dentro de um ambiente não eurístico, controlado e discreto, genótipos mais adequados às regras locais de atualização.

No cenário com mutação, observa-se a eliminação gradual de indivíduos associados a genes desfavoráveis e a manutenção de linhagens mais adaptadas, com o surgimento de um regime dinâmico homeostático em que o sistema não converge para o vazio, mas se estabiliza em um equilíbrio entre eliminação e permanência de células. Esses achados sugerem que a mutação genética pode, de fato, atuar como um parâmetro delimitador de existência em uma Cellular Automata tridimensional implementada no motor gráfico Godot, em consonância com a pergunta de pesquisa formulada.

A partir desta etapa, abrem-se possibilidades para experimentos futuros com diferentes configurações de probabilidade de mutação, regras de existência baseadas no gene e funções de seleção, aprofundando a investigação sobre como conceitos darwinianos podem ser explorados em ambientes computacionais baseados em Autômatos Celulares.

References

- [1] *Hierarchical Neural Cellular Automata* (07 2023), vol. ALIFE 2023: Ghost in the Machine: Proceedings of the 2023 Artificial Life Conference of *ALIFE 2022: The 2022 Conference on Artificial Life*.
- [2] BIELAWSKI, K., GAYLINN, N., LUNN, C., MOTIA, K., AND BONGARD, J. Evolving hierarchical neural cellular automata. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference* (New York, NY, USA, 2024), GECCO '24, Association for Computing Machinery, p. 78–86.
- [3] CHAN, B. W.-C. Towards large-scale simulations of open-ended evolution in continuous cellular automata. In *Proceedings of the Companion Conference on Genetic and Evolutionary Computation* (New York, NY, USA, 2023), GECCO '23 Companion, Association for Computing Machinery, p. 127–130.
- [4] DARWIN, C. *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. John Murray, London, United Kingdom, 1859.
- [5] DERETS, H., AND NEHANIV, C. L. Survival and evolutionary adaptation of populations under disruptive habitat change: A study with darwinian cellular automata. *Artificial Life* 31, 1 (02 2025), 106–123.
- [6] KING, M. R. Simulation of somatic evolution through the introduction of random mutation to the rules of conway's game of life. *Cellular and Molecular Bioengineering* 17, 6 (2024), 563–571.
- [7] SAYAMA, H. Self-replicating worms that increase structural complexity through gene transmission. In *Artificial Life VII: Proceedings of the Seventh International Conference on Artificial Life*. The MIT Press, 08 2000.
- [8] SAYAMA, H., AND NEHANIV, C. L. Self-reproduction and evolution in cellular automata: 25 years after evoloops. *Artificial Life* 31, 1 (02 2025), 81–95.
- [9] VON NEUMANN, J. *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Urbana, IL, 1966.