

Modelagem de Propagação de Agricultores e Degradação do Solo: Simulação Baseada em Autômatos Celulares para Avaliação de Cenários de Agricultura Sustentável

Aurilene Silva Bagagi

RESUMO

A degradação do solo causada por práticas agrícolas não sustentáveis constitui um dos principais desafios ambientais contemporâneos, comprometendo a segurança alimentar e a resiliência dos ecossistemas. Neste trabalho, é apresentado um modelo computacional baseado em autômatos celulares capaz de simular a propagação de agricultores, a degradação do solo e sua regeneração, considerando a expansão agrícola, a degradação por uso prolongado e a regeneração natural ou induzida por intervenção humana. O modelo utiliza uma matriz bidimensional para representar a paisagem, onde cada célula pode assumir estados de solo fértil, agricultor ou solo degradado. A dinâmica de transição entre estados é regida por regras locais e probabilísticas. Os resultados obtidos demonstram padrões dinâmicos que variam desde o colapso do solo fértil até cenários de equilíbrio sustentável, dependendo das taxas de regeneração e da intensidade de intervenção. Este modelo oferece uma ferramenta flexível para compreensão de dinâmicas ambientais e para o desenvolvimento de estratégias de manejo agrícola sustentável.

INTRODUÇÃO

O uso intensivo da terra para a produção agrícola é uma das principais causas da degradação dos solos em escala global. A expansão desordenada da agricultura, aliada à ausência de práticas sustentáveis, resulta na redução da fertilidade, erosão, salinização e perda de biodiversidade, comprometendo a capacidade produtiva das áreas afetadas¹. A degradação do solo é um processo frequentemente cumulativo, cujos efeitos podem perdurar por décadas ou séculos, dependendo da intensidade da pressão antrópica e das condições ambientais locais².

Ferramentas de modelagem computacional têm se mostrado essenciais para o estudo de processos ambientais complexos, permitindo a simulação de cenários futuros e a avaliação de estratégias de mitigação³. Entre essas ferramentas, os autômatos celulares destacam-se pela simplicidade estrutural e pela capacidade de gerar comportamentos emergentes a partir de regras locais⁴. Modelos de autômatos celulares já foram aplicados com sucesso em estudos de dinâmica populacional, propagação de incêndios florestais e evolução de ecossistemas⁴.

O presente trabalho apresenta um modelo de autômato celular bidimensional para simular a interação entre agricultores e o solo, com ênfase na degradação e regeneração, junto a visualização de um gráfico de evolução temporal. O modelo incorpora um parâmetro de regeneração induzida por intervenção humana (**PROB_REG_FATOR_HUMANA**), permitindo a análise de diferentes cenários de manejo, incluindo ausência total de intervenção

(0%) e níveis variáveis de recuperação ativa. Considerando que cada geração simulada representa um intervalo de 20 a 30 anos, a análise possibilita avaliar tendências de longo prazo sobre o impacto de práticas sustentáveis na preservação da fertilidade do solo.

METODOLOGIA

Estrutura e Estado do Modelo

O modelo de autômato celular é implementado em Python, utilizando as bibliotecas NumPy para manipulação da grade e Matplotlib para visualização. A grade de simulação é uma matriz bidimensional de 50×50 células. Cada célula pode assumir um de três estados discretos:

- **Estado 0: Solo Fértil:** Áreas com potencial para cultivo.
- **Estado 1: Agricultor:** Solo fértil ocupado e cultivado.
- **Estado 2: Solo Degradado:** Solo que perdeu fertilidade por cultivo intensivo.

A simulação possui 100 gerações e é inicializada com 90% das células como "Solo Fértil" e 10% como "Agricultor", distribuídas aleatoriamente. Um mapa de idade (*idade_agrics*) rastreia o tempo de ocupação de cada célula por um agricultor. Contém um registro visual por animação e gráfico temporal, mostrando evolução das proporções dos três estados.

Regras de Transição

As regras de transição são aplicadas sincronamente a todas as células em cada geração, utilizando a Vizinhança de Moore (oito vizinhos):

1. **Propagação de Agricultores:** Uma célula de "Solo Fértil" (Estado 0) transita para "Agricultor" (Estado 1) se tiver dois ou mais vizinhos no estado "Agricultor". Esta regra simula a expansão agrícola para terras férteis adjacentes.
2. **Degradação do Solo:** Uma célula "Agricultor" (Estado 1) transita para "Solo Degradado" (Estado 2) após um TEMPO_DEGRADACAO (5 gerações). A idade do agricultor para essa célula é resetada. Isso representa a perda de fertilidade por cultivo contínuo.
3. **Regeneração do Solo:** Uma célula "Solo Degradado" (Estado 2) tem a probabilidade de transitar de volta para "Solo Fértil" (Estado 0) a cada geração. Esta probabilidade (Pregeneracao) é calculada com base na seguinte fórmula:

$$Pregeneracao = (Psolo \times (1 + Fadj \times Nferteis)) + Phumana$$

onde:

- *Psolo* (*PROBABILIDADE_REGENERACAO_SOLO*) é a probabilidade base de regeneração natural do solo, definida como 0.005 (0.5%).
- *Fadj* (*FATOR_AUMENTO_ADJACENTE*) é o fator de aumento de *Psolo* por cada vizinho fértil, definido como 0.1 (10%).
- *Nferteis* é o número de células de Solo Fértil (Estado 0) na vizinhança de Moore

da célula degradada.

- *Phumana* (*PROBABILIDADE_FATOR_HUMANO*) é uma probabilidade adicional de regeneração devido a intervenções humanas, definida como 0.3 (30%), e que pode ser ajustada para representar ausência (0%), baixa, média ou alta intervenção.

RESULTADOS

Os resultados gerados pelo mapa dinâmico com a evolução espacial dos agricultores, solos férteis e degradados ao longo das gerações, e pelos gráficos temporais com a quantidade de células em cada estado, revelou comportamentos distintos conforme o valor de *PROB_REG_FATOR_HUMANA*:

1. **Sem intervenção humana** (*PROB_REG_FATOR_HUMANA* = 0): o solo fértil entra em colapso após sucessivas expansões agrícolas, restando majoritariamente áreas degradadas e sem agricultores após cerca de 10 gerações (200–300 anos).

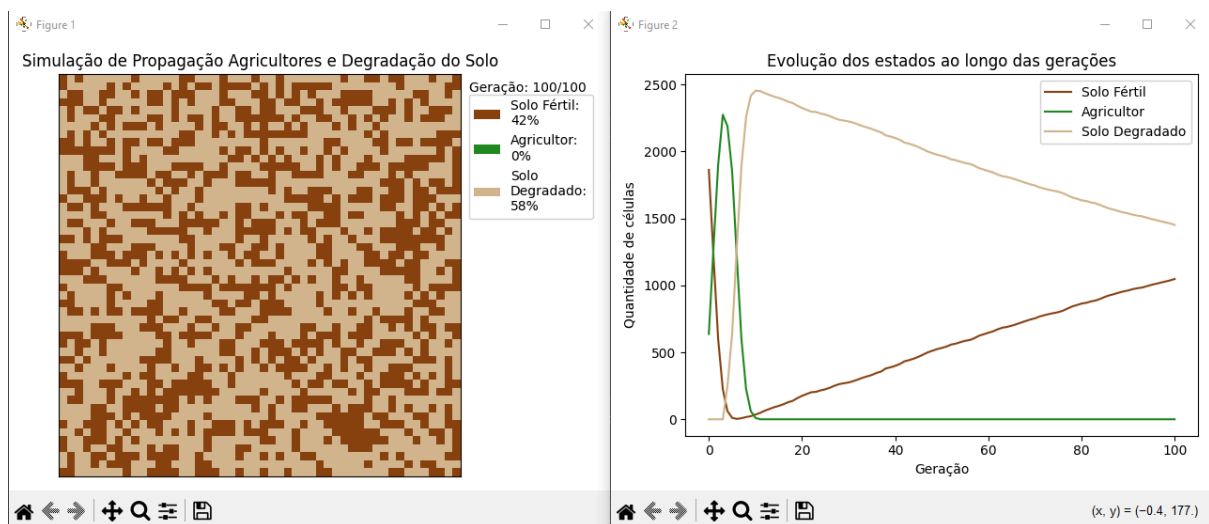


Figura 1: *PROB_REG_FATOR_HUMANA* = 0. Fonte: Autoria Própria

2. **Intervenção moderada** (*PROB_REG_FATOR_HUMANA* = 0,3): após um período inicial de degradação acelerada, observa-se estabilização na proporção entre solo fértil, agricultores e áreas degradadas.

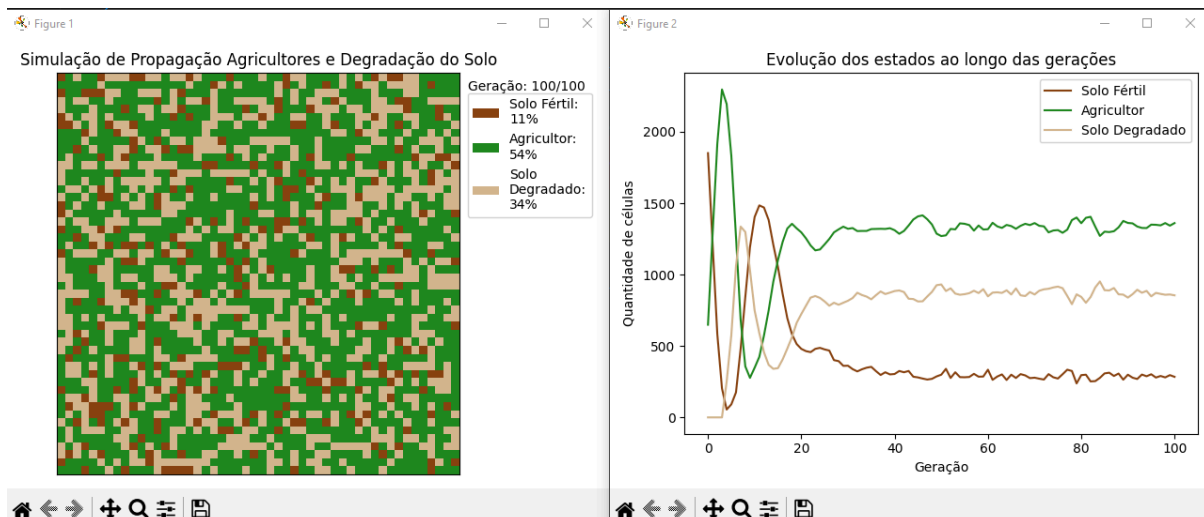


Figura 2: $PROB_REG_FATOR_HUMANA = 0.3$. Fonte: Autoria Própria

3. **Intervenção intensa** ($PROB_REG_FATOR_HUMANA \geq 0,6$): manutenção de altos níveis de solo fértil, com ciclos sustentáveis de uso agrícola e regeneração.

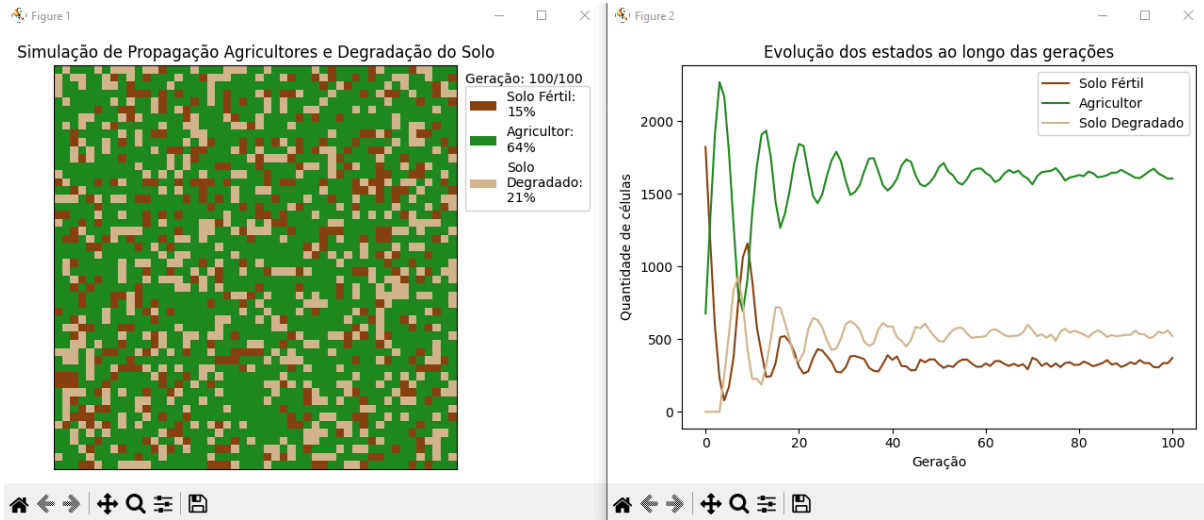


Figura 3: $PROB_REG_FATOR_HUMANA = 0.6$. Fonte: Autoria Própria

DISCUSSÃO

O modelo confirma que a ausência de práticas sustentáveis leva ao colapso da fertilidade, enquanto níveis moderados de intervenção mantêm equilíbrio ecológico. Os resultados são coerentes com estudos prévios sobre degradação e regeneração do solo², e ilustram o papel crucial de políticas ativas no manejo de recursos agrícolas.

Em contextos reais, políticas agrícolas sustentáveis, reflorestamento e técnicas de manejo do solo podem desempenhar papel equivalente ao parâmetro $PROB_REG_FATOR_HUMANA$, mitigando a degradação e favorecendo o equilíbrio ecológico.

Apesar de simplificado, o modelo pode ser expandido para incluir fatores climáticos, diversidade de culturas, impacto econômico e políticas públicas, tornando-se uma ferramenta de apoio à tomada de decisão.

CONCLUSÃO

O modelo apresentado oferece uma abordagem simples, visual e flexível para explorar conceitos de agricultura sustentável, degradação e regeneração do solo. Ao utilizar um autômato celular bidimensional, a simulação demonstra como interações locais podem gerar padrões espaciais e temporais complexos, reforçando a importância de práticas agrícolas que preservem a capacidade produtiva do solo.

A constante $PROB_REG_FATOR_HUMANA$ representa um ponto de ajuste crítico para a análise de cenários, permitindo quantificar e visualizar o papel da intervenção humana na reversão da degradação. Essa capacidade de comparação entre diferentes contextos torna a

ferramenta especialmente útil em ambientes acadêmicos e de formulação de políticas públicas.

O modelo tem potencial para aplicações educacionais, conscientização ambiental e suporte exploratório em planejamento agrícola sustentável.

REFERÊNCIAS

1. FAO. *Status of the World's Soil Resources*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (2021).
2. Lal, R. Soil degradation by erosion. *Land Degrad. Dev.* **12**, 519–539 (2001).
3. Grimm, V. & Railsback, S. F. *Individual-based Modeling and Ecology*. Princeton University Press (2005).
4. Schiff, J. L. *Cellular Automata: A Discrete View of the World*. Wiley-Interscience (2008).
5. NumPy Developers. *NumPy Documentation*. Disponível em: <https://numpy.org/> (acesso em 10 ago 2025).
6. Matplotlib Developers. *Matplotlib Documentation*. Disponível em: <https://matplotlib.org/> (acesso em 10 ago 2025).