



Dinâmica espacial de polinização e fluxo de pólen: uma abordagem baseada em Autômatos Celulares

Rhwan de Freitas Heráclio Lucena¹,

¹Departamento de Estatística e Informática – Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – Pernambuco – Brazil

{Rhwan.lucena}@ufrpe.br

A polinização é vital para a biodiversidade e segurança alimentar, mas a sua modelagem em paisagens complexas enfrenta desafios de escalabilidade. Enquanto Modelos Baseados em Agentes (ABM) oferecem detalhe biológico, o seu custo computacional é elevado para grandes escalas. Propomos aqui um modelo baseado em Autômatos Celulares (CA) para simular a propagação da polinização. Os resultados demonstram que o modelo reproduz fielmente o decaimento da eficiência por distância (distance decay) e o impacto de barreiras físicas na conectividade ecológica. Esta abordagem oferece uma ferramenta ágil para o manejo sustentável em agroecossistemas.

palavras-chave: Autômatos celulares; Polinização; Propagação ;conectividade ecológica.

Abstract

Pollination is vital for biodiversity and food security, yet its modeling in complex landscapes faces significant scalability challenges. While Agent-Based Models (ABM) provide high biological detail, their computational cost is prohibitive at large spatial scales. Here, we propose a Cellular Automata (CA)-based model to simulate the propagation of pollination. The results demonstrate that the model faithfully reproduces distance-decay effects in pollination efficiency and captures the impact of physical barriers on ecological connectivity. This approach offers an agile and computationally efficient tool for sustainable management in agroecosystems.

Keywords: Cellular automata; Pollination; Propagation; Ecological connectivity.

1. Introdução

A polinização mediada por abelhas é um serviço ecossistêmico crítico, sensível à fragmentação do habitat e à estrutura espacial da paisagem. Determinar a área de influência de uma colmeia é complexo devido à natureza estocástica do voo e à distribuição floral. Enquanto ABMs detalham comportamentos individuais, sua aplicação em larga escala é proibitiva. Este estudo utiliza Autômatos Celulares para modelar a difusão da polinização como um fenômeno emergente, focando na eficiência espacial.

2 Resultados e Discussão

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos a partir da execução do modelo computacional desenvolvido em Python, utilizando uma abordagem de Autômatos Celulares (CA) sobre um grid bidimensional. Para garantir a robustez estatística e mitigar a estocástica os dados discutidos abaixo refletem a consolidação de 50 simulações independentes (Método de Monte Carlo), conforme detalhado na metodologia.

2.1 Padrões Espaciais Emergentes

A simulação computacional validou a arquitetura do modelo ao demonstrar que a interação entre agentes (abelhas) e recursos (flores) gera **comportamentos ecológicos complexos** a partir de regras locais simples. Os resultados destacam três fenômenos principais:

1. **Emergência de Gradientes:** O modelo reproduziu naturalmente o *distance decay* (maior polinização próxima à colmeia), sem a necessidade de fórmulas de custo explícitas.
2. **Eficiência Energética:** A dispersão não uniforme dos agentes refletiu limitações reais de forrageamento, combinando busca estocástica e disponibilidade de recursos.
3. **Impacto da Fragmentação:** A inserção de obstáculos revelou zonas de exclusão e desvios de rota, comprovando a sensibilidade do modelo à conectividade espacial e à fragmentação da paisagem.

2.2. Análise da Eficiência por Distância (Distance Decay)

A análise quantitativa confirma um **decaimento não linear da eficiência de polinização** com o aumento da distância à colmeia. Próximo à fonte (0–5 células), observa-se **alta eficiência** (80–100%), caracterizando saturação de visitas. Entre 5 e 20 células ocorre um **decaimento rápido**, com alta variabilidade atribuída à estocasticidade do forrageamento, à distribuição floral e aos obstáculos. Além de 20 células, a eficiência torna-se **praticamente nula (<5%)**, definindo a **Área de Influência Efetiva** da colmeia para os parâmetros adotados. Esses resultados demonstram que o modelo de Autômatos Celulares reproduz de forma emergente a função de decaimento com a distância utilizada em modelos consolidados (e.g., InVEST), sem recorrer a equações complexas, validando a abordagem baseada em regras locais simples.

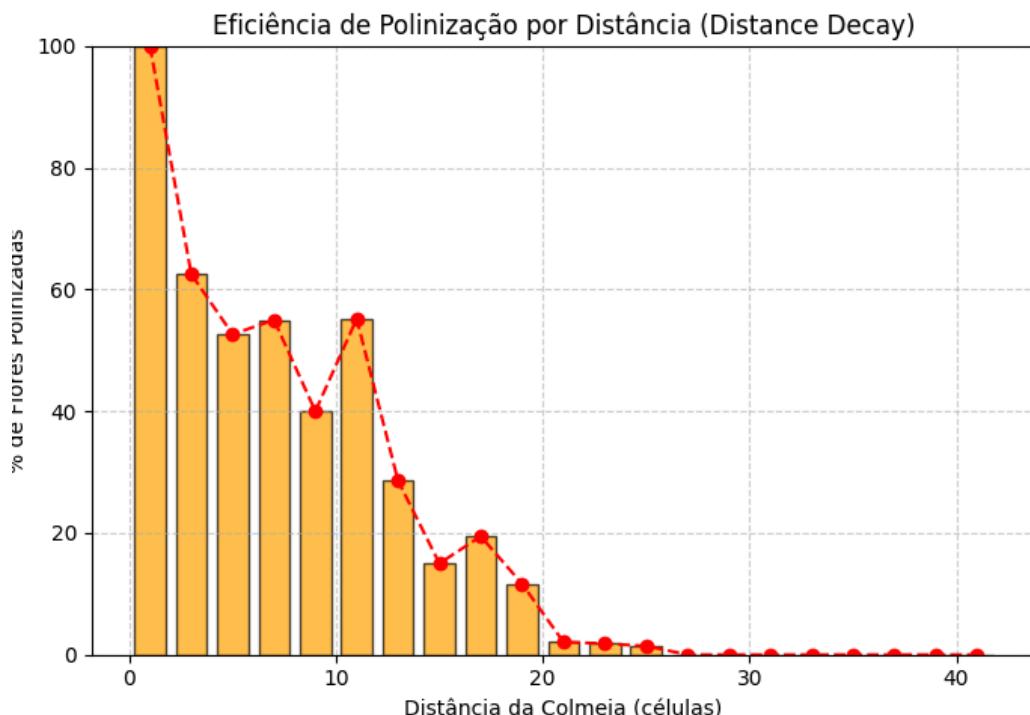


Figura 2 - Eficiência de Polinização por Distância

Fonte: Autor(2025)

2.3. Dinâmica Temporal do Serviço Ecossistêmico

A evolução temporal (Figura 3) apresenta o acúmulo de flores polinizadas ao longo dos 150 passos de simulação (ticks). A curva exibe um crescimento quase linear após uma breve fase de latência inicial. A ausência de um platô (estabilização total) no final do gráfico sugere que, no tempo $t = 150$, o sistema ainda não havia atingido a saturação completa da paisagem disponível dentro do raio de voo. Os "degraus" observados na linha verde refletem a natureza discreta do CA, onde múltiplos eventos de polinização podem ocorrer simultaneamente em um único passo de tempo.

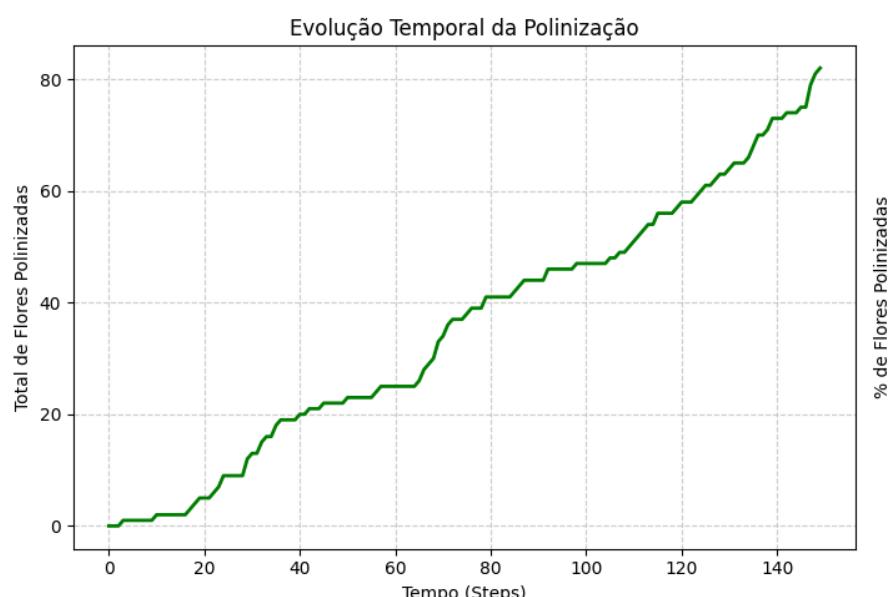


Figura 3

Fonte: Autor(2025)

2.4. Análise de Robustez e Variabilidade (Método Monte Carlo)

O experimento de Monte Carlo, com múltiplas simulações independentes, confirmou a **robustez** e **estabilidade** do modelo. A baixa variabilidade temporal em torno da média indica que a dinâmica de acumulação da polinização é previsível e pouco sensível às condições iniciais aleatórias. Em contraste, a análise espacial revelou um **padrão ecológico relevante**: a variabilidade da eficiência de polinização é mínima nas proximidades da colmeia, mas aumenta nas distâncias intermediárias. Esse comportamento indica uma **zona de transição sensível à fragmentação da paisagem**, onde a presença ou ausência de corredores ecológicos influencia fortemente o sucesso do forrageamento.

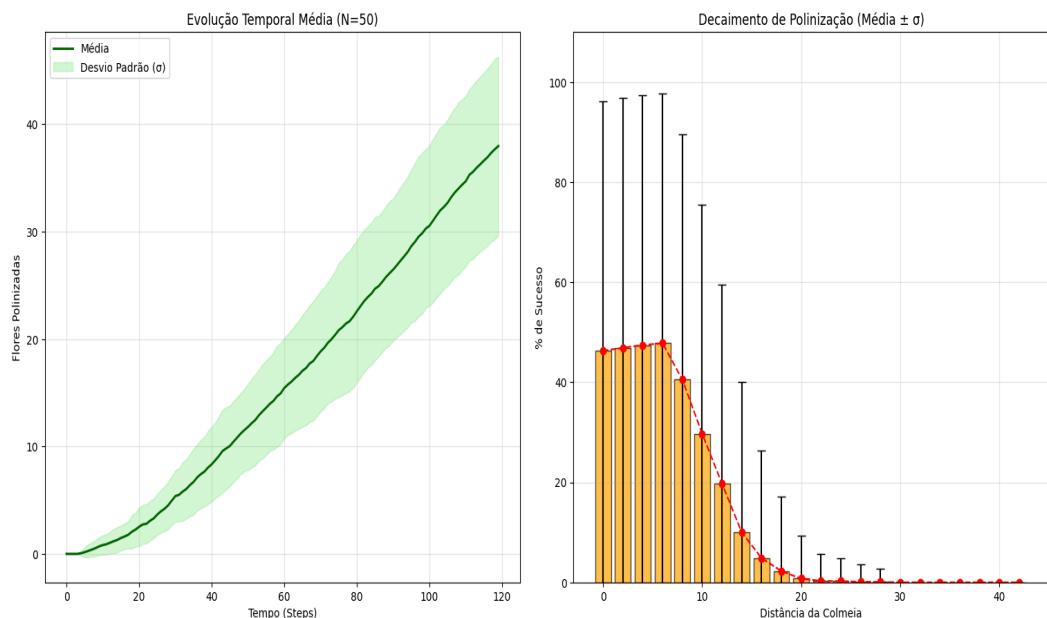


Figura 4 - Análise via Monte Carlos

Figura 4. Análise estatística de 50 simulações (Monte Carlo). (A) Evolução temporal do número de flores polinizadas; a sombra verde indica o desvio padrão. (B) Eficiência de polinização em função da distância; as barras de erro indicam a variabilidade (σ) decorrente da estrutura da paisagem. Fonte: Autor (2025).

3. Métodos

O modelo utiliza a grade bidimensional para estruturar o espaço discreto da paisagem, sendo a dinâmica de movimento, coleta e deposição de pólen gerenciada inteiramente pelas regras de transição de estado da célula.

3.1. Modelagem da Entidade Móvel e Estados de Polinização

O polinizador (abelha) não é um agente com lógica individual, mas sim um **Estado Móvel (Estado 5)** que se propaga na grade. A célula no Estado 5 carrega a informação de **Carga de Pólen**. A dinâmica de polinização é definida pela transição deste estado móvel entre células florais. **Capacidade Máxima de Transporte:** A Carga de Pólen do Estado Móvel é limitada por um valor máximo (C_{max}). **Tempo de Retenção do Pólen:** Se o Estado Móvel não interagir com uma flor em um número máximo de passos (Δt_{max}), sua carga de pólen é resetada, simulando a perda do recurs

3.2. Regras de Transição (Movimento e Interação)

Em cada passo de tempo discreto (Δt), as células na grade atualizam seu estado simultaneamente ou em ordem aleatória, com base nas regras locais aplicadas à sua vizinhança de Moore. Seja G a grade bidimensional onde cada célula (i, j) possui um estado $S_{i,j}^t$ no tempo t . O conjunto de estados possíveis é $\Omega = \{0, \dots, 6\}$, conforme definido anteriormente. A vizinhança de Moore de uma célula (i, j) , denotada por $N_{i,j}$, é o conjunto das 8 células adjacentes:

$$N_{i,j} = \{(x, y) \in G : \max(|x - i|, |y - j|) = 1\}$$

Para o **Estado Móvel** (Abelha), definimos uma variável adicional $L_{i,j}^t$, que representa a **Carga de Pólen** transportada pelo agente localizado na célula (i, j) no tempo t .

3.3. Regras de Movimento (Transição Probabilística)

O movimento do Estado Móvel da célula atual (i, j) para uma célula vizinha $(x, y) \in N_{i,j}$ é determinado por uma probabilidade de transição $P_{(i,j) \rightarrow (x,y)}$. Definimos uma função de peso $w(S)$ que atribui um valor de atratividade baseada no estado da célula vizinha:

$$w(S_{x,y}) = \begin{cases} \alpha & \text{se } S_{x,y} \in \{2, 3\} \quad (\text{Atrator por Flores}) \\ 1 & \text{se } S_{x,y} \in \{1\} \quad (\text{Explorar em Area Neutra}) \\ 0 & \text{se } S_{x,y} \in \{0, 4, 5\} \quad (\text{Obstaculos ou Ocupado}) \end{cases}$$

3.4. Regras de Interação (Transferência de Pólen)

Quando o **Estado Móvel** transicional para uma célula floral, ocorrem as seguintes transições de estado na nova célula (i', j') :

1. Transição de Coleta (Célula Doadora):

- **Condição:** Célula (i', j') é **Flor Doadora (2)**.
- **Regra:** O Estado Móvel absorve pólen (aumenta sua Carga de Pólen) da Flor Doadora. O estoque de pólen da célula doadora é reduzido. A Carga de Pólen do Estado Móvel é limitada pela C_{max} e pela $\tau_{collect}$ (eficiência de coleta).

2. Transição de Deposição (Célula Receptora):

- **Condição:** Célula $(i', j') > 0$.
- **Regra:** Uma Deposição é calculada:
Deposicao = $\tau_{depose} \times \text{Carga de Polen}_{\text{move}}.$ Se a deposição for bem-sucedida, a célula floral transiciona para o estado **Flor Polinizada (6)**. A Carga de Pólen do Estado Móvel é reduzida.

3. Transição de Recarga Floral:

- **Condição:** Célula floral (Doadora/Receptora/Polinizada) atingiu o tempo máximo de recarga ($\Delta t_{recarga}$).
- **Regra:** O estoque de recurso da célula floral é regenerado para seu valor inicial, e seu status de recarga é resetado.

4. Conclusão

A abordagem por CA provou ser uma alternativa eficaz aos ABMs, capturando o impacto da paisagem na oferta de serviços ecossistêmicos. Trabalhos futuros devem integrar fatores abióticos e competição entre colmeias

Referências

- POTTS, S. G. et al.** Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 25, n. 6, p. 345–353, 2010.
- GRIMM, V. et al.** A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, v. 198, p. 115–126, 2005.
- SHP UROV, I.; FROESE, T.** A critical phase transition in bee movement dynamics can be modeled using a 2D cellular automata. *arXiv preprint*, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/>. Acesso em: (15/10/2025).
- RAHIMI, E. et al.** Spatial Modeling of Insect Pollination Services in Fragmented Landscapes. *Land*, v. 13, n. (verificar número exato), MDPI, 2024. Disponível em: <https://mdpi.com/>. Acesso em: (20/10/2025).
- BROUSSARD, M. A. et al.** Using agent-based models to predict pollen deposition in a crop. *bioRxiv*, 2022. Disponível em: <https://www.biorxiv.org/>. Acesso em: (30/11/2025).
- BANKS, J., CARSON, J. e NELSON, B.** *Discrete-Event System Simulation*. 5. ed. Pearson Education, 2009