

Simulação do Crescimento Fúngico em Queijos Azuis Utilizando Autômatos Celulares

Lucas Paulo de Araújo Silva

UFRPE, DEINFO, Recife, Brasil
lucas.pauloaraus@ufrpe.br

ABSTRACT

Este trabalho apresenta um modelo computacional para a dinâmica do crescimento do fungo durante o processo de maturação de queijos azuis, baseado em um autômato celular tridimensional. A abordagem proposta permite representar de forma discreta a interação entre fatores essenciais ao desenvolvimento fúngico, como a disponibilidade de oxigênio, a presença de nutrientes, a estrutura interna do queijo e a distribuição das perfurações ao longo da massa. Por meio da definição de estados celulares e regras de transição locais, o modelo é capaz de reproduzir padrões emergentes de propagação fúngica observados em queijos azuis reais, evidenciando a influência da oxigenação interna e da densidade da coalhada no processo de maturação. Dessa forma, o autômato celular se mostra uma ferramenta adequada para a análise sistemática do impacto de diferentes parâmetros de produção, oferecendo uma alternativa computacional de baixo custo para o estudo e a compreensão da maturação de queijos azuis.

Introdução

Segundo Ardö (2007), os queijos azuis adquirem sua aparência característica devido ao crescimento do fungo *Penicillium roqueforti*, sendo algumas das variedades mais conhecidas o Gorgonzola, o Roquefort, o Stilton e o Danablu. Os veios azulados observados no interior desses queijos resultam da maturação controlada do fungo, processo conduzido pelos queijeiros por meio do controle das condições ambientais.

Conforme a elaboração de um queijo azul descrita por Rufino et al. (2022), a produção envolve a adição da cultura fúngica ao leite após seu aquecimento e antes da coagulação. Após as etapas subsequentes de processamento, ocorre a fase de maturação, na qual o queijo permanece em repouso sob condições controladas, possibilitando o crescimento do fungo em seu interior. A disponibilidade de oxigênio é essencial para o desenvolvimento do mofo; para conduzir esse gás ao interior da massa do queijo, realizam-se perfurações com agulhas. Além da disponibilidade de oxigênio, o crescimento do mofo durante a maturação depende da presença de nutrientes na matriz do queijo, os quais influenciam diretamente no seu desenvolvimento.

A maturação de queijos azuis constitui um fenômeno biológico complexo, o que dificulta a previsão do estado final do produto. Diversos parâmetros influenciam esse processo, como a frequência das perfurações, a densidade da coalhada e o tempo de maturação. No Brasil, esse período pode variar significativamente conforme a classificação do queijo, sendo de aproximadamente 35 dias para queijos azuis e de, no mínimo, 90 dias para queijos tipo Gorgonzola, o que torna a realização de testes experimentais custosa tanto em termos financeiros quanto de tempo (BRASIL, 2007).

Nesse sentido, este trabalho propõe a utilização de autômatos celulares como simuladores do processo de maturação de queijos azuis, visando a análise do crescimento fúngico sob diferentes condições de maturação.

Popularizados pelos estudos de Stephen Wolfram, autômatos celulares são modelos computacionais discretos compostos por uma grade de células, nas quais cada célula assume um estado que evolui ao longo do tempo segundo regras locais, definidas a partir da interação com células vizinhas. Apesar de sua simplicidade estrutural, esses modelos são capazes de reproduzir comportamentos complexos e emergentes, o que os torna especialmente adequados para a simulação de processos naturais. Nesse contexto, a utilização de autômatos celulares permite representar de forma abstrata e controlada a dinâmica do crescimento fúngico durante a maturação de queijos azuis, viabilizando a análise da influência de diferentes parâmetros do sistema de maneira sistemática e computacional.

Metodologia

Para garantir a reprodutibilidade dos experimentos, o código foi executado em um ambiente Python controlado por uma semente aleatória (`random.seed`) fixa. O modelo foi implementado em Python utilizando as bibliotecas Pygame e Pandas para a representação da grade e manipulação de dados, respectivamente.

Table 1. Parâmetros do experimento base

Parâmetro	Descrição	Valor
-----------	-----------	-------

volume	Volume do autômato tridimensional (N x N x N)	70
density	Multiplica a distância de uma célula até a fonte de oxigênio mais próxima para a definição de sua oxigenação	10
to_pierce	Define a distância em pixels (células) entre cada centro de furo.	15
latent_factor	Pondera a quantidade de células que estarão no estado <i>latente</i> no início da simulação	0.05

Estrutura do Modelo e Estados

O queijo em processo de maturação é modelado como um autômato celular tridimensional estocástico, composto por agentes discretos organizados em um grid cúbico de dimensões $70 \times 70 \times 70$. Cada célula do autômato representa uma porção do queijo e pode assumir um entre seis estados distintos, os quais descrevem diferentes condições relacionadas ao crescimento e à dinâmica fúngica durante a maturação. Os estados considerados são:

- **Permissive:** células naturalmente suscetíveis à colonização do fungo.
- **Resistant:** células naturalmente resistentes à colonização do fungo.
- **Latent:** células colonizadas em estado inicial, ainda sem a capacidade de transmitir o fungo para as vizinhas.
- **Infectious:** células colonizadas capazes de transmitir o fungo para as vizinhas.
- **Pierced:** células que representam fontes de oxigênio. Estão localizadas nas perfurações e nas bordas do queijo.
- **Stagnant:** estado associado à ausência de crescimento fúngico.

Estado Inicial

O estado inicial do grid consiste em uma distribuição probabilística de células nos estados *Permissive*, *Resistant* e *Latent*. Para cada célula interna do grid, é gerado um número aleatório $P \in [0,1]$. Caso $P < 0,4$, a célula é atribuída ao estado *Resistant*; caso contrário, ao estado *Permissive*. A disponibilidade inicial de nutrientes é atribuída de forma estocástica, dentro de intervalos pré-definidos para cada tipo de célula. Em contraste, a disponibilidade de oxigênio não é estocástica, sendo determinada de forma determinística a partir da distância da célula no grid para uma fonte de oxigênio. A partir da combinação entre a disponibilidade de nutrientes e a disponibilidade local de oxigênio, calcula-se uma probabilidade de ativação inicial. Essa probabilidade é ponderada por um fator de escala *latent_scale* é utilizada para definir se a célula assume o estado *Latent* no estado inicial, representando regiões onde o fungo está presente, porém ainda não ativo no início da simulação.

A perfuração do queijo é modelada por meio da criação de colunas verticais regularmente espaçadas ao longo do grid. Especificamente, na camada superior ($z=0$), sempre que as coordenadas x e y são múltiplos do parâmetro de espaçamento pré-definido *to_pierce*, uma perfuração é feita. Essa perfuração se estende por toda a profundidade do grid, formando um canal contínuo no eixo z . As células pertencentes a esses canais são atribuídas ao estado *Pierced*, com disponibilidade máxima de oxigênio, representando regiões artificialmente oxigenadas resultantes do processo de perfuração do queijo.

Regras de Transição

O modelo opera em iterações onde cada uma representa um dia. A cada iteração, as seguintes transições ocorrem com base nas interações locais (vizinhança de Moore) e em parâmetros probabilísticos:

- **Consumo de Nutrientes:** a cada iteração, células no estado *Latent* ou *Infectious* consomem uma quantidade fixa de nutrientes.
- **Período de Latência:** uma célula permanece no estado *Latent* por um número fixo de iterações antes de transitar para o estado *Infectious*.
- **Infecção:** a cada iteração, células no estado *Infectious* que possuem disponibilidade mínima de nutrientes tentam infectar células vizinhas nas direções horizontal e vertical. Para cada tentativa de infecção, é calculada uma probabilidade de sucesso que depende do estado da célula vizinha (*Permissive* ou *Resistant*), da disponibilidade local

de oxigênio e nutrientes, bem como de um fator de competição associado à quantidade de células fúngicas (*Latent* ou *Infectious*) na vizinhança. Células *Permissive* apresentam maior suscetibilidade à infecção do que células *Resistant*. Caso a infecção seja bem-sucedida, a célula vizinha passa para o estado *Latent*, iniciando seu período de latência. Durante o processo, a célula infecciosa consome nutrientes, interrompendo novas tentativas caso a disponibilidade nutricional caia abaixo de um limiar mínimo.

- **Estagnação:** caso o número de nutrientes de uma célula no estado *Latent* ou *Infectious* fique abaixo de uma quantidade mínima, a célula transita para o estado *stagnant*.

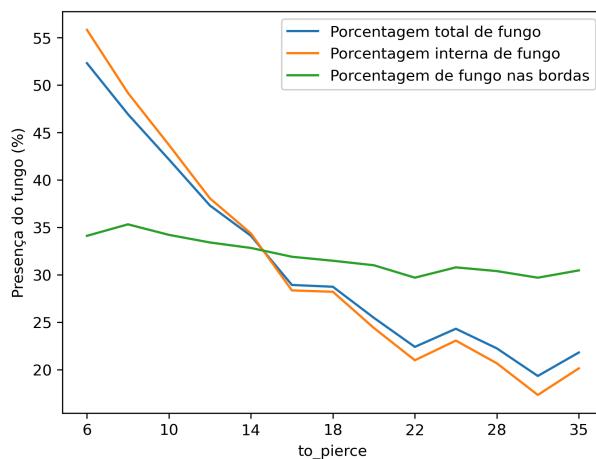
Resultados

As simulações exploram a dinâmica da maturação de um queijo azul em uma grade tridimensional de autômatos celulares, variando a densidade da coalhada, a quantidade de perfurações e o fator de latência do fungo, que modula a probabilidade inicial de surgimento de células no estado latente a partir da disponibilidade local de nutrientes e oxigênio. Os resultados evidenciam padrões de propagação espacial visualmente semelhantes às estruturas filamentosas das hifas observadas durante a maturação de queijos reais.

Análise do Impacto da Quantidade de Perfurações

A análise das curvas indica que a presença de fungo tende a diminuir à medida que o valor de *to_pierce* aumenta, refletindo uma menor frequência de perfurações no queijo, como observado na Figura 1. Esse parâmetro mostra-se mais crítico para as porcentagens total e interna de colonização, enquanto exerce menor influência sobre o desenvolvimento do fungo nas regiões de borda. Tais resultados reforçam a importância da oxigenação do interior do queijo para a propagação do fungo e evidenciam como a escolha adequada de *to_pierce* pode ser utilizada para obter uma maturação mais controlada.

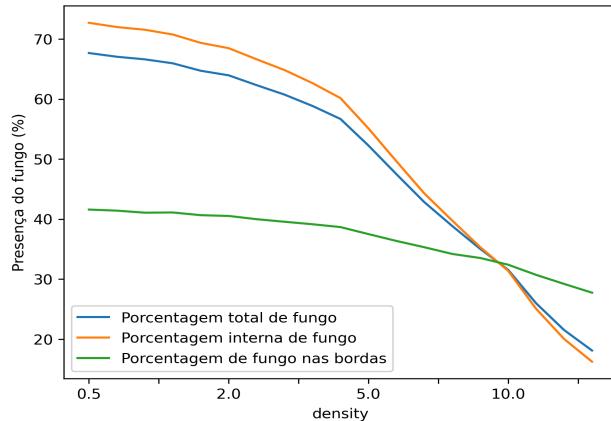
Figura 1 - Presença de fungo em relação ao parâmetro *to_pierce*



Análise do Impacto da Densidade

A análise das curvas indica que a presença de fungo tende a diminuir à medida que o valor de *density* aumenta, refletindo a redução da oxigenação conforme o queijo se torna mais denso, como observado na Figura 2. As porcentagens total e interna de fungo mostram-se mais sensíveis a essa variação, apresentando uma queda acentuada para valores mais elevados de *density*. Em contraste, a presença de fungo nas bordas sofre uma redução mais gradual, sugerindo que essas regiões permanecem relativamente menos dependentes da porosidade interna do queijo. Esses resultados reforçam a importância da estrutura interna para a difusão de oxigênio e evidenciam que o aumento da densidade afeta de forma mais significativa o desenvolvimento do fungo no interior do queijo.

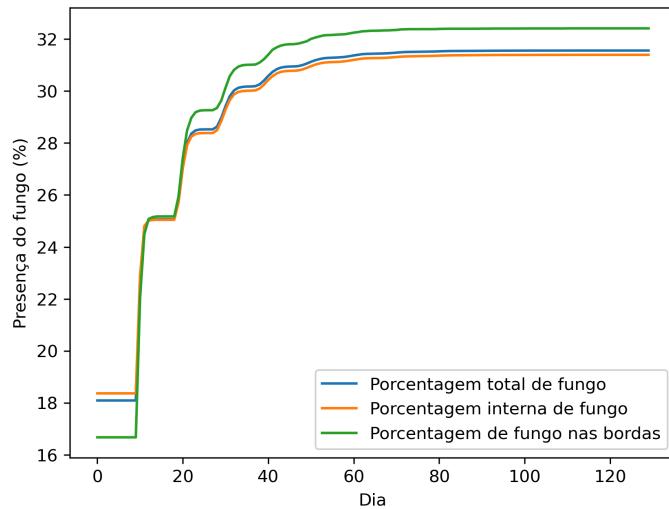
Figura 2 - Presença de fungo em relação ao parâmetro *density*



Análise da Propagação do Fungo no Experimento Base

A análise das curvas indica que a presença de fungo cresce rapidamente nos primeiros dias, seguida por uma desaceleração progressiva ao longo do tempo, como observado na Figura 3. O desenvolvimento mais acentuado nas bordas sugere a influência da maior disponibilidade de oxigênio nessas regiões, enquanto o interior apresenta um crescimento ligeiramente mais lento. A partir de um determinado ponto, a porcentagem de fungo permanece aproximadamente constante, indicando que a expansão do fungo passa a ser limitada principalmente pelo consumo de nutrientes, e não pela restrição espacial do meio, visto que o gráfico sugere que ainda há espaço disponível para ocupação.

Figura 3 - Presença do fungo com o passar dos dias



Análise Visual

A visualização da camada 35 do autômato celular após o período de maturação evidencia um padrão de crescimento fúngico heterogêneo e fragmentado, como visto na Figura 4. Observa-se que a formação do fungo é mais abundante nas bordas laterais, em função do contato direto com o oxigênio, enquanto, no interior do queijo, o crescimento ocorre de forma mais concentrada ao redor das perfurações (células brancas), que atuam como canais de difusão de oxigênio.

A comparação com um queijo azul real, como o apresentado na Figura 5, reforça essa interpretação, uma vez que, na prática, a perfuração do queijo durante o processo de maturação é justamente o fator que possibilita a oxigenação interna e o desenvolvimento dos veios característicos. Dessa forma, a maior concentração de fungo nas proximidades das células brancas no autômato celular evidencia que o modelo é capaz de reproduzir, de maneira qualitativa, o papel estrutural das perfurações na formação dos padrões fúngicos observados empiricamente. Além disso, a predominância do crescimento fúngico nas regiões de borda, identificada nos experimentos simulados, encontra correspondência direta no queijo azul real, no qual essas áreas também apresentam maior incidência de fungo.

Figura 4 - Camada 35 pós-maturação

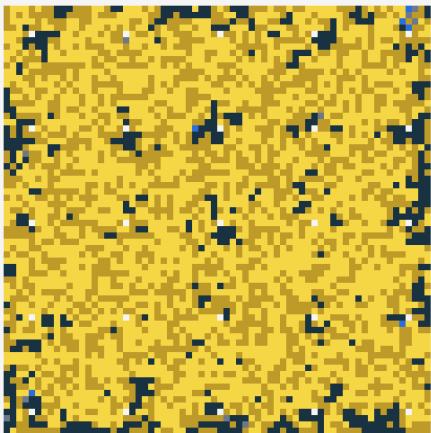


Figura 5 - Queijo azul



Conclusão

Este trabalho apresentou um modelo de autômato celular tridimensional para simular o processo de maturação de queijos azuis, demonstrando que essa abordagem é capaz de reproduzir, de forma qualitativa, padrões de crescimento do *Penicillium roqueforti* observados em sistemas reais. Os resultados evidenciam o papel central da oxigenação na propagação fúngica, mostrando que a redução no número de perfurações e o aumento da densidade da coalhada limitam principalmente o crescimento no interior do queijo, enquanto as bordas permanecem menos sensíveis a essas variações.

A correspondência entre os padrões espaciais simulados e aqueles observados em queijos azuis reais reforça o potencial dos autômatos celulares como ferramenta computacional para investigar a maturação desse tipo de queijo, oferecendo uma alternativa de baixo custo e alto controle experimental, com perspectivas de aprimoramento futuro por meio da incorporação de dados empíricos e mecanismos biológicos mais detalhados.

References

1. Ardö, Y. (2007). *Introduction: What are blue cheese varieties?* In P. L. H. McSweeney (Ed.), *Cheese Problems Solved* (pp. 137–145). Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
2. Rufino, J. V. A., Alexandre, L. T. C., Silva, R. G., Barbosa, N. M. dos S., & Leite, M. A. G. (2022). *Caracterização físico-química e elaboração de queijo azul*. Revista Brasileira de Agrotecnologia, 12(3), 7–16.
3. Ferreira, I. E. P., Moral, R. de A., Ferreira, C. P., & Godoy, W. A. C. (2013). *Modelling fungus dispersal scenarios using cellular automata*. Ecological Informatics, 14, 53–58.
4. Schiff, J. L. *Cellular Automata: A Discrete View of the World* (John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2008).

Disponibilidade de dados e código

O código-fonte completo e os dados gerados pela simulação estão disponíveis publicamente no repositório GitHub: <https://github.com/lpauloaraujo/bluecheese-ca>