

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

ENGENHARIA AMBIENTAL

DENNER AUGUSTO DE BARROS FABIANO

**MODELOS BASEADOS EM AGENTES E APLICAÇÕES EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

BURI – SP

2021

DENNER AUGUSTO DE BARROS FABIANO

MODELOS BASEADOS EM AGENTES E APLICAÇÕES EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Ambiental pela  
Universidade Federal de São Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Emmanuel de Paula  
Ferreira.

BURI – SP

2021

DENNER AUGUSTO DE BARROS FABIANO

**MODELOS BASEADOS EM AGENTES E APLICAÇÕES EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Ambiental pela  
Universidade Federal de São Carlos.

Aprovado em: 11/11/2021.

FOLHA DE APROVAÇÃO

**DENNER AUGUSTO DE BARROS FABIANO**

MODELOS BASEADOS EM AGENTES E APLICAÇÕES EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como exigência parcial para a obtenção do grau  
de Bacharel em Engenharia Ambiental na  
Universidade Federal de São Carlos. Buri, 11 de  
novembro de 2021.

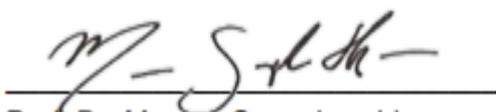
Orientador(a)



Dr. Iuri Emmanuel de Paula Ferreira

Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino

Examinador



Dr. Marcos Gonçalves Lhano

Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino

Examinador



Dr. Alexandre Camargo Martensen

Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino

Dedico este trabalho à minha maior apoiadora desse mundo,

minha mãe.

## **AGRADECIMENTOS**

Às forças maiores por me dar saúde.

À minha mãe Beatriz que tanto se sacrificou para que não me faltasse nada, e sempre incentivou meus estudos.

À Universidade Federal de São Carlos, pela oportunidade de me graduar em um curso em uma universidade de ponta.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa, auxiliando-me financeiramente.

Ao meu orientador Iuri Emmanuel de Paula Ferreira, por acreditar no meu potencial, e por ter me ajudado a descobrir o amor pela pesquisa. Sou extremamente agradecido por todos os ensinamentos e paciência. Sempre que eu falar de pessoas que me inspiram, me lembrarei dele.

Aos meus irmãos da República, formada por meus amigos do coração, que me proporcionaram anos de felicidade, amor, companheirismo e, principalmente muito aprendizado.

À Miho e Taynara por me apoiarem nas minhas dificuldades

À minha segunda família, João Pedro, Maristela, Felipe, Matheus, Miro e Zezé, pessoas que sempre me acolheram e que admiro muito.

A todos meus amigos.

**OBRIGADO POR TUDO!**

## RESUMO

O emprego dos Modelos Computacionais (MCs) nas áreas da Engenharia vem ganhando cada vez mais notoriedade. Esse destaque se deve principalmente à crescente busca por métodos que minimizem o tempo, recursos e custos que são despendidos em ensaios e testes empíricos. Neste trabalho, o enfoque foi o de explorar e apresentar métodos computacionais de simulação aplicados em Engenharia Ambiental, com destaque aos modelos de Autômatos Celulares (ACs) e aos Modelos Baseados em Agentes (MBAs). Como motivação prática, neste trabalho introduziu-se um MBA para simular o forrageamento de néctar das abelhas *Apis mellifera L.* em diferentes ambientes (paisagens). As análises comparativas consideraram aspectos como o padrão de voo, a frequência das danças (taxa de sinalização), a taxa de recrutamento, de repouso e de coleta de néctar. As diferentes paisagens foram construídas através da variação de parâmetros associados aos arranjos florais, tais como o número de fragmentos florais (NF), a densidade floral dos fragmentos (D, flores por m<sup>2</sup>), a qualidade do recurso (doçura) e a quantidade máxima de flores por fragmento (QF). O algoritmo foi implementado em linguagem R e um pacote com código livre foi desenvolvido para facilitar a distribuição e o uso da tecnologia. O programa permite a composição de diferentes paisagens florísticas e a avaliação da dinâmica espaço-temporal em cada cenário simulado.

**Palavras-chave:** Modelagem matemática, Autômatos celulares, Modelos de agentes, Simulação computacional

## ABSTRACT

Recently, computational models (CMs) have gained more notoriety in Engineering. This highlight is mainly due to the growing search for methods that minimize the time, resources, and costs, usually spent on empirical tests. The focus was to explore and present computational simulation methods applied in Environmental Engineering, focused on Cellular Automata (ACs) and Agent-Based Models (MBAs). As a practical motivation, an example of MBA to simulate the nectar foraging of *Apis mellifera L.* bees in different environments (landscapes) was introduced. The comparative analysis considered aspects such as the flight pattern, the frequency of dances (signaling rate), the rate of recruitment, resting and nectar collection. We built different landscapes through by varying parameters associated with the floral arrangements, such as the number of fragments (NF), the fragment density (D, flowers per m<sup>2</sup>), the quality of the resource (sweetness) and the maximum quantity of flowers per fragment (QF). The algorithm has been implemented in R language and distributed the software in an open-source package to promote the use of the technology. The program allows the composition of different floral landscapes and the evaluation of the spatiotemporal dynamics in each simulated scenario.

**Keywords:** Mathematical modeling, Cellular automata, Agent based model, Computational simulation.

# Sumário

<u>1 INTRODUÇÃO</u> .....	10
<u>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u> .....	12
<u>2.1 Autômatos Celulares</u> .....	12
<u>2.1.1 Contexto histórico</u> .....	12
<u>2.1.2 Geometria, formato e dimensão dos autômatos celulares</u> .....	14
<u>2.1.3 Regras de transição</u> .....	16
<u>2.1.4 Exemplo 1: Jogo da Vida</u> .....	17
<u>2.1.5 Exemplo 2: Propagação de incêndios florestais</u> .....	18
<u>2.2 Modelagem Baseado em Agentes</u> .....	19
<u>2.2.1 Exemplo: MBA para simular o forrageamento de abelhas <i>Apis mellifera L.</i></u> .....	20
<u>3 METODOLOGIA</u> .....	22
<u>3.1 Regras do modelo de forrageamento</u> .....	23
<u>3.2 Simulação do voo das batedoras</u> .....	24
<u>3.3 Reconhecimento da fonte de recurso</u> .....	24
<u>3.4 Atributos e rentabilidade dos arranjos florais</u> .....	25
<u>3.5 Condições de abandono do arranjo floral</u> .....	26
<u>3.6 Limites de voo e descanso</u> .....	27
<u>3.7 Atratividade das fontes de recurso</u> .....	28
<u>3.8 Estágios da dinâmica</u> .....	29
<u>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</u> .....	31
<u>4.1 Cenários com variação da quantidade de flores por fragmento (QF)</u> .....	33
<u>4.2 Cenários com variação da densidade floral (D)</u> .....	34
<u>4.1 Cenários com variação do número de fragmentos florais (NF)</u> .....	34
<u>5 CONCLUSÃO</u> .....	39
<u>REFERÊNCIAS</u> .....	39

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o emprego dos Modelos Computacionais (MCs) na área da Engenharia vem ganhando cada vez mais notoriedade. E esse destaque se deve principalmente à crescente busca por métodos que minimizem o tempo, recursos e custos que são despendidos em ensaios e testes empíricos (JAHANGIRIAN *et al.*, 2010). Essa problemática pode ser contornada utilizando-se modelagens e simulações computacionais, que por sua vez permitem avaliar e prever resultados para diferentes tipos de situações, auxiliando em tomadas de decisões mais rápidas e assertivas (JAHANGIRIAN *et al.*, 2010). Além disso, os MCs permitem a repetição do experimento por diversas vezes, sem utilizar e desperdiçar recursos ou gerar custos, apenas necessitando do despendimento de processamento computacional (JAHANGIRIAN *et al.*, 2010).

A abordagem computacional pode ser aplicada em modelos climáticos, epidêmicos, para dispersão de reagentes em efluentes, dispersão de fungos, propagação de incêndios em florestas, autorreplicação biológica etc. (CLARKE, 2017). Apesar da grande vantagem que se tem ao utilizar MCs, o principal empecilho está relacionado com a necessidade de um amplo conhecimento sobre as ferramentas, bem como sobre as equações que envolvem o ambiente físico que se deseja modelar. Além disso, há o custo computacional que também deve ser planejado e estruturado. Vale frisar que o emprego de MCs requer validação através de dados reais, para garantir resultados precisos e representativos (CLARKE, 2017).

Neste trabalho, o enfoque foi o de explorar e apresentar métodos computacionais de simulação aplicados em Engenharia Ambiental, com destaque aos Modelos de Autômatos Celulares (ACs) e aos Modelos Baseados em Agentes (MBAs). Resumidamente, os ACs são utilizados para modelar de forma simplificada os fenômenos do meio ambiente, podendo ser físicos, químicos ou biológicos. Os ACs foram definidos pela primeira vez em 1940, por John von Neumann e Stanislaw Ulam, em uma tentativa de representar matematicamente a evolução de sistemas autorreplicantes – como um robô que é capaz de fazer cópias de si mesmo (SLIMI *et al.* 2009). A proposta consistia em uma grade (matriz) de cujas células poderiam apresentar entidades (os autômatos) ou espaços vazios; e a progressão espaço-temporal do sistema era conduzida por regras simples, bem definidas, que consideravam apenas o estado prévio da célula e as suas relações de vizinhança imediata (SLIMI *et al.* 2009).

Os MBAs por sua vez, podem ser entendidos como uma extensão dos modelos de ACs, sendo utilizados para simular fenômenos físicos pela implementação de agentes (ou entidades),

os quais seguem regras específicas e que podem interagir tanto entre si quanto com o ambiente. As interações que ocorrem entre os agentes podem ocasionar em diversos fenômenos e comportamentos coletivos, como, por exemplo, a divisão eficaz de trabalho e a inteligência coletiva de grupos (LÉVY, 2003).

O presente trabalho expõe, através de uma fundamentação teórica, como a Modelagem Computacional vem evoluindo e auxiliando o campo das Engenharias, em especial à Engenharia Ambiental. Aborda-se a implementação de MCs para a representação do meio físico, de fenômenos naturais e de interações entre organismos e o meio ambiente. Neste trabalho também é explorada a utilidade dos ACs e MBAs como ferramentas para elucidar questões de cunho teórico, através da abordagem de simulação computacional. Como motivação prática, o trabalho introduz um MBA para simular o forrageamento de néctar de abelhas africanizadas polihíbridas de *Apis mellifera Linnaeus, 1758 (Hymenoptera: Apidae)* em diferentes paisagens.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Autômatos Celulares**

#### **2.1.1 Contexto histórico**

Os autômatos celulares (ACs) são amplamente utilizados para representações de sistemas naturais complexos. Nos modelos de ACs, os elementos alocados em uma rede discreta (grade) evoluem no tempo de acordo com regras simples e pré-determinadas, simulando a evolução espaço-temporal de algum fenômeno natural (DILÃO, 1993).

Os ACs são sistemas dinâmicos discretos, ou seja, tanto o tempo quanto espaço são discretizados. Os elementos básicos em sua composição são as células, os estados possíveis e um conjunto de regras predefinidas para a atualização do sistema. A alternância entre os estados é realizada conforme as regras, que levam em consideração o estado atual da célula-alvo e o de suas vizinhas (LEITE *et al.*, 2007). Os modelos de ACs são aplicados em diversas áreas, como na construção de modelos de sistemas geográficos (MIRANDA *et al.*, 2016), no estudo das mudanças no uso do solo (FURTADO; DELDEN, 2011), das movimentações humanas (ROGSCH *et al.*, 2009), do crescimento das cidades e urbanização (FALAH *et al.* 2020), do

espalhamento de doenças (FERREIRA, 2008), da previsão de formações geológicas (SALLES *et al.* 2006) etc.

A elaboração teórica desse tipo de sistema foi introduzida pela primeira vez na década de 1940 por John von Neuman e Stanislaw Ulam. Porém sua aplicação só foi realizada em 1970 por John Conway, no seu trabalho conhecido como “O Jogo da Vida” (*The Game of Life*) (GARDNER, 1970). O jogo proposto por Conway consiste em células dispostas em um sistema de malha (ou matriz), com  $n$  células no total. As células podem apresentar-se em dois estados, sendo eles vivo (estado 1) ou morto (estado 2). Nesse jogo, a vizinhança de primeira ordem de Moore é utilizada e, dessa forma, a atualização de estado de uma célula em questão depende do estado das oito células adjacentes a ela (CASTRO; CASTRO, 2008).

Apesar da simplicidade do jogo, principal característica da maioria dos sistemas de autômatos, os resultados obtidos nestes modelos são, em muitos casos, inusitados e singulares (CASTRO; CASTRO, 2008). A depender das condições iniciais, pode-se observar a formação de estruturas regulares que transitam na rede, aparecem e desaparecem (CASTRO; CASTRO, 2008). Algumas estruturas podem produzir cópias de si mesmas (autorreplicação), como previsto por John von Neumann (GARDNER, 1970). Outras estruturas maiores são capazes de gerar estruturas menores, de forma consistente. Às vezes a dinâmica é extremamente ordenada, às vezes caótica. E transientes entre ordem e caos podem ser observados, tanto com o passar do tempo como na alteração da escala de observação. A riqueza dos sistemas de autômatos celulares foi extensivamente explorada por Stephen Wolfram em seu livro seminal – *A New Kind of Science* (WOLFRAM, 2002).

Ao observar o funcionamento do Jogo da Vida é possível notar os elementos-chave de um sistema de autômatos celulares: uma grade (ou malha); as células; uma relação de vizinhança; um conjunto de estados possíveis; e regras de atualização de estados (MELOTTI, G, 2009). De acordo com White e Engelen (1993), “os Autômatos Celulares podem ser pensados como sistemas espaciais dinâmicos simples em que o estado de cada célula na malha depende do último estado das células com base na sua vizinhança, respeitando um grupo de regras de transição”.

Já Batty (2005), apresenta os ACs como “objetos computacionais que existem no tempo e espaço nos quais suas características, geralmente chamadas de estados, mudam de forma discreta e uniforme em função dos estados de sua vizinhança”, sendo esta uma definição mais generalizada desse tipo de sistema.

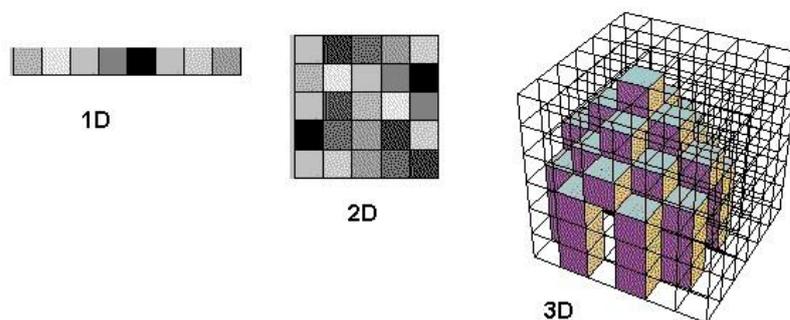
A essência dos modelos de ACs é capturada por Portugali (2000, p. 66) através deste breve excerto:

A dinâmica de um modelo é gerada a partir de um processo de iterações, em que para cada iteração, o estado de cada célula é determinado novamente por uma regra de transformação. As regras são locais e elas se referem às relações entre células e vizinhanças adjacentes. O objetivo do jogo é entender como, o que, e em quais circunstâncias as interações locais e interações entre as células interferem na estrutura global, no comportamento e nas propriedades do sistema como um todo.

### 2.1.2 Geometria, formato e dimensão dos autômatos celulares

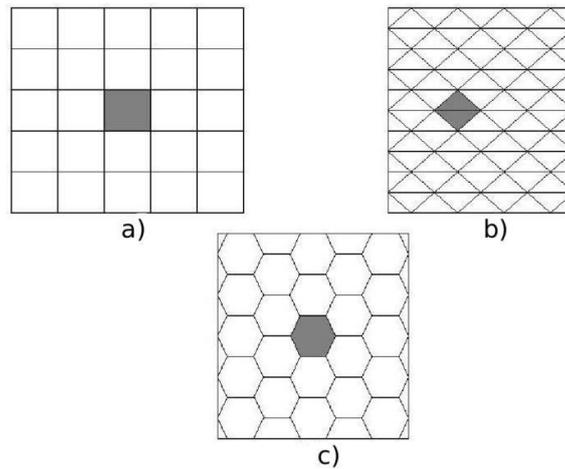
Um dos primeiros pontos necessários para a montagem de um AC é a escolha de uma geometria tida como regular. São três pontos que precisam ser caracterizados para a montagem do sistema: sua dimensão, formato e geometria de acordo com Leite *et al.* (2007). Os autômatos podem ocupar malhas unidimensionais, bidimensionais e até tridimensionais. Para uma dimensão (Figura 1, 1D) o sistema é disposto de forma linear com a vizinhança das células dispostas à direita e esquerda. Com duas dimensões (2D), a distribuição é dada em um plano, onde as células podem possuir vizinhas à esquerda, direita, acima, abaixo e nas diagonais. E para três dimensões (3D), as células conseguem vizinhas à esquerda, direita, acima, abaixo, nas diagonais, à frente e atrás, ou seja, são dispostas em um arranjo espacial. Na figura 1 são exemplificadas algumas das configurações mencionadas acima (LEITE *et al.*, 2007).

**Figura 1.** Possíveis dimensões dos autômatos celulares



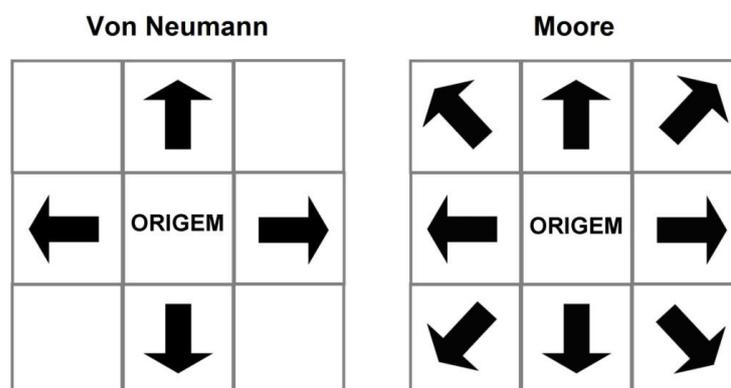
**Fonte:** Leite *et al.* (2007)

Ainda segundo Leite *et al.* (2007), formato da célula, por sua vez, pode apresentar variadas formas, desde que estas sejam regulares e de mesmo tamanho, como por exemplo, hexagonais, quadrangulares, triangulares e entre outras (Figura 2).

**Figura 2.** Formatos dos autômatos celulares

Fonte: Leite *et al.* (2007)

Por fim, também é necessário definir o tipo de vizinhança das células para a implementação das regras de atualização. As principais vizinhanças para redes retangulares são a de von Neumann e Moore (ZAITSEV, 2017). A principal diferença pode ser observada facilmente na figura 3, onde para a vizinhança de Neumann apenas as células à esquerda e direita, superior e inferior são consideradas nas regras de atualização, enquanto a vizinhança de Moore inclui as células adjacentes localizadas nas diagonais como observado por Braga *et al.* (2016).

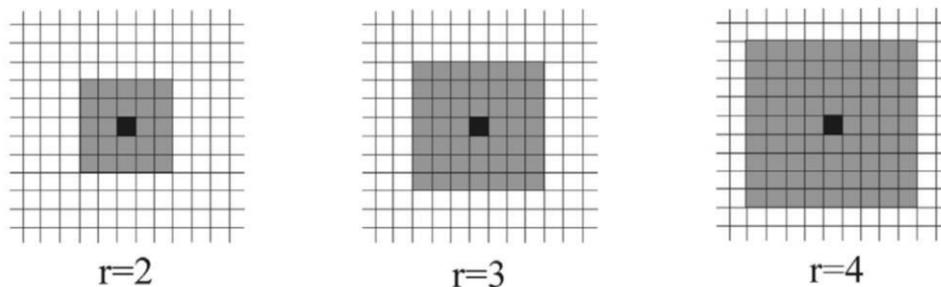
**Figura 3.** Tamanho das vizinhanças dos autômatos celulares

Fonte: Braga *et al.* (2016)

De acordo com Braga *et al.* (2016), ambas as configurações, há variações no raio de abrangência (ordem) das vizinhanças. Na figura 3, foi mostrada uma vizinhança de raio ( $r$ ) igual

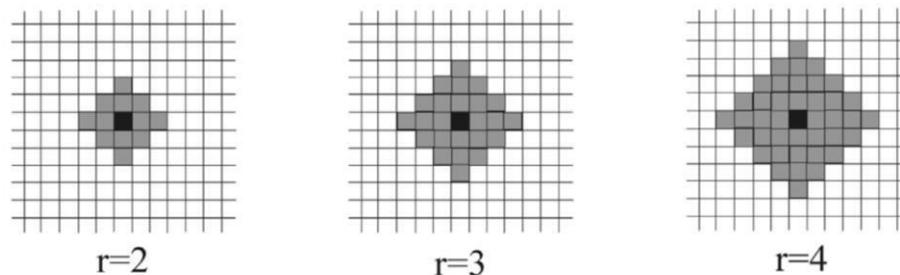
à 1 para os dois casos. Por sua vez, é possível observar os raios de vizinhança maiores (2, 3 e 4) para a vizinhança de Moore e Neumann nas figuras 4 e 5 respectivamente.

**Figura 4.** Tamanho das vizinhanças dos autômatos celulares (Moore)



Fonte: Zaitsev (2017)

**Figura 5.** Tamanho das vizinhanças dos autômatos celulares (von Neumann)

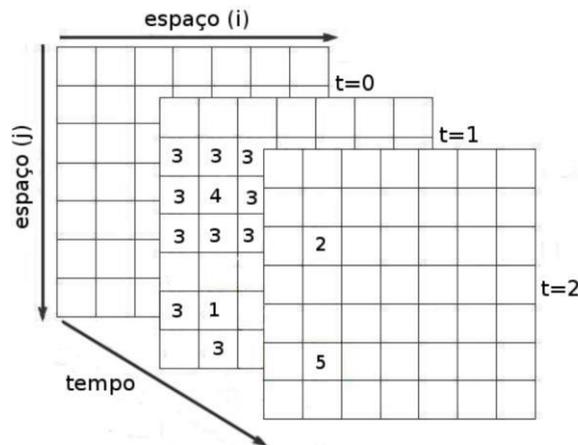


Fonte: Zaitsev (2017)

### 2.1.3 Regras de transição

A evolução dos ACs ocorre respeitando condições que se aplicam à todas as células de maneira homogênea, porém a atualização pode ser síncrona ou sequencial. De acordo com as regras definidas, o sistema pode apresentar configurações complexas, auto-organização e caos. (MELOTTI, 2009). As regras de transição podem ser classificadas de três formas: determinísticas, probabilísticas e temporais. Em um sistema com regras determinísticas, a transição de estados da célula-alvo da atualização depende apenas do próprio estado e dos estados das suas vizinhas. Por outro lado, em um sistema com regras probabilísticas, as relações de vizinhança determinam as probabilidades de transição de estado, sendo o estado futuro da célula-alvo incerto, determinado por sorteio. Por fim, em sistemas com regras temporais, o tempo cronológico é considerado como um fator influente na transição de estados. A figura 6 mostra a evolução dos estados ao longo de dois passos de tempo (MELOTTI, 2009).

**Figura 6.** Atualização de um sistema de Autômatos Celulares (von Neumann)



Fonte: Melotti (2009)

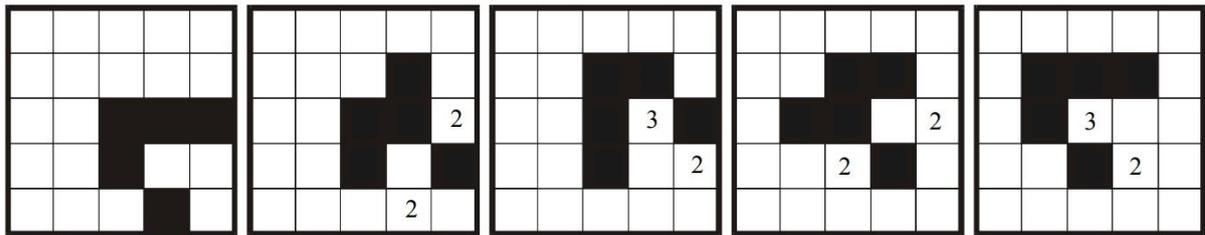
### 2.1.4 Exemplo 1: Jogo da Vida

Como já citado brevemente anteriormente, o Jogo da Vida desenvolvido por John Conway em 1970 e apresentado por Gardner na *Scientific American*, é um sistema amplamente conhecido no campo dos autômatos celulares (GARDNER, 1970). Sua evolução envolve células que transitam entre dois estados: vivo e morto, ou ocupado e vazio. Sua vizinhança é determinada pela configuração de Moore, ou seja, contém oito células imediatamente adjacentes à célula-alvo (CASTRO; CASTRO, 2008). As regras do Jogo da Vida de Conway são:

- A célula viva morre (por solidão) se há apenas um, ou nenhum vizinho vivo;
- A célula viva morre (por superpopulação) se há mais do que três vizinhos vivos;
- A célula viva sobrevive (no próximo passo de tempo) se há dois ou três vizinhos vivos;
- A célula surge (nasce) se há três vizinhos vivos ao redor de um espaço desocupado.

A estrutura mais conhecida e fácil de reproduzir nessas condições é a estrutura de “*glider*”, a qual oscila à medida que o modelo evolui, porém, caminha intacta e suavemente sobre a grade no decorrer da simulação. Esta é apenas uma das configurações finais que o Jogo da Vida pode apresentar (SALDANA *et al.*, 2002). Na figura 7 é possível observar como ocorre essa transição de estados.

**Figura 7.** Estrutura de “glider” movimentando-se sobre a grade de um sistema de Autômatos Celulares



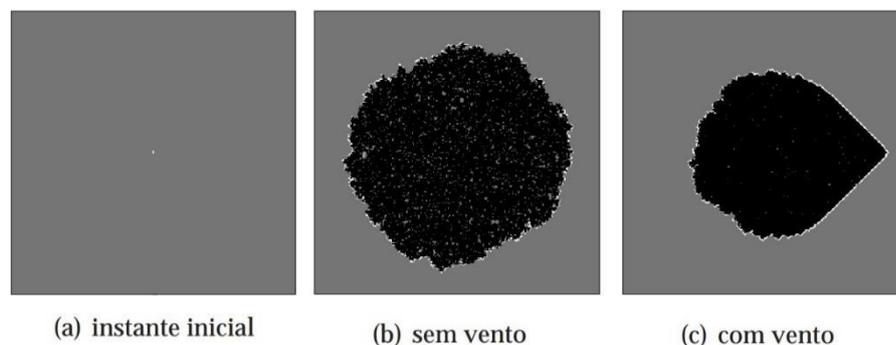
Fonte: Melotti (2009)

Durante as simulações, diversas estruturas podem ser formadas e isso a depender da regra de atualização e da condição inicial do sistema. No Jogo da Vida as estruturas podem transitar na rede, interagir com estruturas maiores, aparecem e depois desaparecerem, apresentar movimentos repetitivos e oscilatórios. Em resumo, há uma gama imensa de configurações possíveis (MELOTTI, 2009).

### 2.1.5 Exemplo 2: Propagação de incêndios florestais

Os incêndios florestais podem ser afetados por diversos fatores como, por exemplo, a presença de ventos, a distância entre as árvores, a quantidade de água em forma de vapor, formação de fagulhas causadas por temperaturas elevadas, relevo do terreno, dentre muitas outras causas. Essas inúmeras variáveis fazem com que a modelagem de um evento natural como este seja extremamente difícil e, por conta disso, os ACs aparecem como uma opção de representação desse tipo de sistema complexo (DILÃO, 1993).

**Figura 8.** Simulação da propagação de incêndios florestais através de Autômatos Celulares



Fonte: Melotti (2009)

Na simulação apresentada por Melotti (2009), a propagação do incêndio ocorre a partir um único foco de incêndio centrado na malha (figura 8 a). Duas condições são exploradas: propagação sem vento b) e com vento c). Algumas considerações citadas por Melotti (2009) e importantes para esse modelo são:

- A célula cinza (árvore viva) muda para preto (árvore queimada) se uma das suas vizinhas está no estado branco (árvore incendiada), isso levando em consideração uma probabilidade de propagação;
- A transição de cinza para branco é maior se existir vento em direção e sentido que favorecem à propagação das chamas;
- Uma célula em estado preto (incendiada), continua neste estado indefinidamente;
- Uma célula recém incendiada demora dois passos de tempo até tornar-se uma célula morta (árvore queimada);
- A vizinhança utilizada é a de von Neumann.

Este tipo de modelo pode ser aplicado e aprimorado para a analisar o efeito de incêndios florestais em áreas vulneráveis, considerando as especificidades da cobertura vegetal e climáticas. Assim, o modelo favorece a compreensão do processo e contribui com o planejamento de ações mitigadoras (MELOTTI, 2009).

## **2.2 Modelagem Baseado em Agentes**

Os modelos baseados em agentes são descritos como a representação computacional de um conjunto de indivíduos (agentes) autônomos, os quais conseguem interagir entre si e com o ambiente (BONABEAU, 2002). Na literatura, também é possível encontrar algumas variações para o termo, como por exemplo, sistemas baseados em agentes ou modelagem baseada em indivíduos (BONABEAU, 2002). As simulações de MBAs tem como principal objetivo representar, através da abordagem computacional, os indivíduos e o ambiente de um sistema natural (AGUILAR *et al.*, 2002). Segundo Bonabeau (2002), a modelagem baseada em agentes é mais do que uma técnica, é uma mentalidade sobre como descrever o sistema a partir das suas unidades constituintes.

O sucesso da simulação computacional por MBAs dependem de diversos fatores. Macal e North (2005) explicam que os MBAs podem ser aplicados quando:

- Os indivíduos da dinâmica podem ser representados através de agentes (*self-contained*, modular, autônomo etc.);

- Os comportamentos, estados e condições ambientais podem ser discretizados;
- Há a necessidade de modelar adaptações de grupo e comportamentos emergentes a partir das interações individuais;
- As relações de vizinhança são transitórias, mudando com o passar do tempo;
- As relações agente-agente e agente-ambiente são necessárias para a representação realista do fenômeno em estudo;
- Os comportamentos modelados apresentam grande complexidade, exigindo regras mais sofisticadas para governar a ação dos agentes;
- Simular a organização do sistema através do aprendizado dos agentes é relevante.

Nos modelos de ACs, os indivíduos permanecem alocados em células da grade durante toda a simulação e, dessa maneira, as relações de vizinhança são fixas (MACAL; NORTH, 2005). Diferentemente, nos MBAs os agentes podem movimentar-se livremente pelo espaço, interagindo com outros agentes e coletando informações de diferentes pontos do ambiente simulado (MACAL; NORTH, 2005). Condições do ambiente e o tempo cronológico podem ser representados continuamente, e as regras de atualização de estados podem ser customizadas para abarcar uma grande gama de comportamentos, sendo possível ainda usar regras distintas para agentes e localidades diferentes (MACAL; NORTH, 2005). Em suma, os agentes podem apresentar comportamento reativo, são orientados às metas, com continuidade temporal, com aptidão de aprendizado (Batty, 2005), além de apresentar mobilidade e flexibilização (FURTADO; DELDEN, 2011).

### **2.2.1 Exemplo: MBA para simular o forrageamento de abelhas *Apis mellifera L.***

Segundo Lévy (2003), na natureza é muito comum notar que algumas espécies apresentam a tendência de se submeter a um rigoroso padrão de trabalho em conjunto, visando o benefício de todos os indivíduos da população. No caso das abelhas, essa padronização do comportamento é definida como inteligência do enxame (do Inglês: *swarm intelligence*) (LÉVY, 2003).

As abelhas, por conta do seu comportamento natural de visitação (YOKOI; FUJISAKI, 2011), apresentam um importante papel como polinizadoras (FERNANDES et al. 2012). Elas interagem de forma frequente com o ambiente ao redor das colmeias e são responsáveis por grande parte da polinização na natureza, conseqüentemente, estas se tornam fundamentais para a manutenção do ecossistema e, conseqüentemente, para a sobrevivência humana segundo Fernandes *et al.*, (2012). O termo citado por SILVA et al. (2014) “sem abelha, sem alimento”,

acaba por se tornar uma realidade a partir do momento que estudos comprovaram que 88% das plantas com flores e frutos apresentavam dependência de animais polinizadores, além disso,  $\frac{3}{4}$  da comida produzida pelo homem também têm essa mesma dependência.

Para sua comunicação, as abelhas utilizam de diversos recursos, tais como sons, trocas de essências e até mesmo contatos físicos (SEELEY, 1994; VRIES; BIESMEIJER, 1998; ADEVA, 2012; BEEKMAN, 2005). Por essas e outras razões considera-se a comunicação desses seres como bem aprimorada (FRISCH, 1953). Vale ressaltar que por conta do elevado número de espécies de abelhas, contando com mais de 20.000 espécies diferentes, também há inúmeras formas de interação e comunicações que se diferem consideravelmente (DORNHAUS; CHITTKA, 2004).

Karl von Frisch foi um zoólogo alemão o qual teve uma influência de suma importância no campo da Etologia, ciência que estuda o comportamento dos seres vivos. No caso das abelhas, mais especificamente a *Apis mellifera L.*, Frisch associou o comportamento padronizado com a busca de alimento e realizou variados experimentos utilizando-se de colmeias com poucos favos e vidros em suas laterais, além de alimentadores com xaropes de açúcar para tornar possível a observação (VIEIRA, 1989). A sinalização que induzia a exploração do ambiente foi chamada de dança das abelhas. A demonstração experimental de que as abelhas, ao se depararem com uma fonte de alimento, realizam uma sequência padronizada de movimentos a fim de informar a localização desta fonte de forma precisa, associando os movimentos à direção e à distância da fonte, foi primeiramente conduzida por von Frisch (1953).

A dança das abelhas é uma “língua”, realizada e compreendida apenas pelas abelhas operárias. São considerados três tipos de dança, sendo estes: dança em foice, requebrado e em círculo (GONÇALVES, 2018). Quando a fonte se localiza em distâncias entre 25 e 100 metros, as operárias realizam a dança em foice, que é uma transição entre a dança em círculo e do requebrado. Se a fonte de alimento se localiza a mais de 100 metros da colmeia, é realizada a dança do requebrado (do inglês: *waggle dance*), a qual informa a distância com base na quantidade de requebrados em um dado intervalo de tempo (COUVILLON et al., 2012). De acordo com WOLFF et al. (2008) depois de observada a dança, zumbidos e aromas emitidos pela abelha dançarina são registrados antes da saída para a coleta de alimento.

São apresentados diversos trabalhos que simulam a ação das forrageiras a partir de modelos de agentes ou equações diferenciais, porém, poucos destes trabalhos estudaram a importância da paisagem na atividade de forrageamento (HENRY et al., 2012; ADEVA, 2012).

Além disso, dentre os trabalhos encontrados, nenhum relaciona a composição da paisagem com os movimentos padronizados (dança) a partir de simulações computacionais.

Neste trabalho foi elaborado um MBA para simular o comportamento de forrageamento das abelhas *Apis mellifera L.* quando submetidas a diferentes paisagens. O programa foi implementado em linguagem R e será disponibilizado em repositórios públicos futuramente.

### 3 METODOLOGIA

O modelo computacional é uma versão compilada de regras de forrageamento introduzidas por diversos autores (SEELEY et al., 1991; SEELEY, 1994; VRIES; BIESMEIJER, 1998; COX e MYERSCOUGH, 2003; DORNHAUS & CHITTKA, 2004; SCHMICKL e CRAILSHEIM, 2004; BEEKMAN, 2005; SCHMICKL et al., 2005; DORNHAUS et al., 2006; BEEKMAN e LEW, 2007; BEEKMAN et al., 2007; JOHNSON, 2010; QUIJANO e PASSINO, 2010; EDWARDS e MYERSCOUGH, 2011; ADEVA, 2012; DORNHAUS, 2012; HENRY et al., 2012; WAGNER *et al.*, 2012; BECHER et al., 2014; BAILIS e LIFLAND, 2018) e que foram inspiradas em muitos estudos teóricos e experimentais. O comportamento da casta das forrageiras é simulado neste modelo dentro de uma colmeia hipotética, centrada na origem de um plano cartesiano, que representa um espaço bidimensional pelo qual as abelhas podem voar livremente e explorar recursos (paisagem).

Durante as simulações, as abelhas voam em busca de fragmentos florais de forma aleatória (agem como batedoras) ou são recrutadas por outras forrageiras. Quando uma abelha forrageira encontra uma fonte de recurso lucrativa (em termos do balanço energético), ela frequentemente realiza a dança do requebrado (*waggle dance*) para informar às demais forrageiras a posição do recurso no espaço.

Uma das principais características do modelo, é que as fontes de néctar não são exploradas de maneira ilimitada. Ao pré-definir um cenário, arranjos florais com quantidades de recurso limitadas são alocados (de maneira aleatória ou sistemática) no espaço. Os arranjos florais possuem diversos atributos, tais como abundância, qualidade do recurso (doçura do néctar), tempo de manuseio (facilidade em coletar o recurso) e dimensões espaciais, tornando a simulação o mais realista possível.

As simulações correspondem a um dia de forrageamento, considerando-se o fotoperíodo de 12h. A cada passo de tempo (10s), valores relativos aos estados das abelhas e dos arranjos florais são registrados e atualizados.

### 3.1 Regras do modelo de forrageamento

O número de abelhas forrageiras é mantido constante durante as simulações, para este trabalho, foram simuladas 400 abelhas forrageando o ambiente. No decorrer do forrageamento, cada abelha pode mostrar um dos seguintes estados:

- (i) **Abelhas em repouso** - são aquelas que permanecem inativas no salão das forrageiras até o instante em que começam uma busca individual por alimento ou participam de uma dança do requebrado;
- (ii) **Escoteiras (ou batedoras)** - abelhas que realizam buscas individuais, voando aleatoriamente ao redor das proximidades da colmeia;
- (iii) **Abelhas dançarinas** - elas executam a dança do requebrado para recrutar outras abelhas até arranjos florais atrativos e recém-explorados;
- (iv) **Recrutadas** - são abelhas reativadas pela dança das abelhas, que podem acompanhar a dança (seguindo as abelhas) ou voar para os arranjos florais previamente visitados;
- (v) **Abelhas exploradoras** - são aquelas abelhas que se encontram em arranjos florais viáveis, a coletar alimentos;
- (vi) **Abelhas em retorno** - representam as abelhas que retornam à colmeia depois de terem coletado quantidade suficiente de alimento e/ou voado o suficiente.

O primeiro estágio da dinâmica é o momento em que um pequeno grupo de batedoras decola e executa busca individual e aleatória por alimento. No início, todas essas abelhas estão em repouso e, gradualmente, elas são ativadas com uma probabilidade constante de  $\lambda = 0,05$  por minuto (BEEKMAN *et al.* 2007), valor o qual é estimado com base nos dados de Seeley *et al.* (1991). Desta forma, a probabilidade de uma abelha em repouso ser ativada no  $t$ -ésimo passo do tempo é dada pela distribuição geométrica:

$$P(T = t) = \lambda (1 - \lambda)^{t-1}, t = 1, 2, \dots$$

(Eq. 1)

Consequentemente, o tempo médio (esperado) para ativação das abelhas em repouso é  $E[T] = 1 / \lambda = 20$  minutos.

Qualquer conhecimento prévio ambiental das abelhas é negligenciado no início de cada simulação. Essa situação representa, por exemplo, o comportamento de uma colmeia recém instalada na área. Como as abelhas não têm informações sobre o meio, elas se comportam como batedoras logo após serem ativadas.

### 3.2 Simulação do voo das batedoras

As batedoras movimentam-se de acordo com os voos de Lévy (VISWANATHAN; FOSTER, 1996), isto é, a cada momento elas mudam aleatoriamente a direção do voo e percorrem distâncias com frequência inversamente proporcional ao comprimento do passo  $\Delta$  (distância percorrida) em 10s, isto é:

$$P(\Delta) \propto \Delta^{-\mu}$$

(Eq. 2)

em que  $\mu = 2$  (BAILIS *et al.*, 2010). É escolhida uma distribuição para o comprimento do passo  $\Delta$  que fornece um comprimento médio  $E[\Delta]$  de cerca de 70 m para garantir a velocidade média de 25 km/h (aproximadamente 7 m/s) mencionada por Dornhaus *et al.* (2006) e Bailis *et al.* (2010).

### 3.3 Reconhecimento da fonte de recurso

Quando as abelhas batedoras se aproximam de arranjo floral, elas o inspecionam. A distância suficiente para uma abelha reconhecer um arranjo floral é dada como uma função da distância de reconhecimento de cada flor (aproximadamente 24 m de acordo com Bailis *et al.* (2010) e Dornhaus *et al.* (2006)) e a extensão espacial do arranjo floral. Os arranjos florais são representados por regiões quadradas, com área igual à razão entre o número de flores viáveis ( $N_f$ ) e densidade floral ( $\gamma$ ). O tamanho do arranjo é definido pela metade de seu diâmetro (diagonal do quadrado), de tal forma que a distância de reconhecimento é expressa por:

$$dr = 24 + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2 N_f}{\gamma}}$$

(Eq. 3)

Essa distância é atualizada em cada etapa de tempo, conforme os recursos são coletados ou quando novas flores estão florescendo. No modelo assume-se que os arranjos florais são compostos por flores semelhantes, pertencentes à mesma espécie vegetal. Assim, seus recursos são iguais em relação à qualidade que, no caso do néctar, é a doçura (SEELEY, 1994).

### 3.4 Atributos e rentabilidade dos arranjos florais

Apesar das flores do mesmo arranjo apresentarem qualidade semelhante, a quantidade de recursos varia de flor para flor, fazendo com que os arranjos contenham flores viáveis e inviáveis. Outra característica das flores é o tempo de manuseio, o qual é o tempo que uma abelha gasta para explorar algum tipo de flor (SRINIVASAN, 2011). O tempo de manuseio é introduzido no modelo como o número de passos de tempo necessários para uma abelha coletar a carga de forrageamento máxima de algum tipo de recurso em um arranjo floral onde todas as flores são viáveis. Assim, o tempo de manuseio é proporcional ao número de flores que uma abelha deve visitar para completar sua capacidade de carga durante um percurso colmeia-flores-colmeia. É razoável supor que as abelhas coletam a mesma quantidade de alimento ( $q$ ) a cada passo de tempo enquanto estão explorando um arranjo floral. No modelo, essa quantidade é dada por:

$$q = C_0 \cdot a_b / m \quad (\text{Eq. 4})$$

em que: o parâmetro  $a_b$  ( $0 \leq a_b \leq 1$ ) é a abundância do arranjo floral, ou seja, a proporção de flores viáveis na área; o parâmetro  $C_0$  é a capacidade de carga, a quantidade de um certo tipo de recurso que uma abelha pode transportar em um carregamento (25 - 40 mg para néctar); o parâmetro  $m$  é o tempo de manuseio, que é comum para flores no mesmo arranjo floral. A quantidade de alimento coletado é um fator chave para determinar a rentabilidade (*profitability*) de um arranjo floral. No caso do néctar, pode-se formular uma relação para modelar o ganho energético. O açúcar obtido a partir de um carregamento de néctar é expresso por:

$$q_t = q_v [s] \quad (\text{Eq. 5})$$

em que:  $[s]$  é a concentração de açúcar do néctar, medida em  $\mu\text{M}$ ; e o parâmetro  $q_v$  é o volume de néctar correspondente à carga, em  $\mu\text{L}$ . O valor padrão para a equivalência energética da sacarose é cerca de  $C_e = 5,8 \text{ J} / \mu\text{mol}$  (SEELEY, 1994), então a taxa de ganho energético (em

Joules) por carregamento obtida pela exploração de um arranjo é determinada por  $Ce \cdot qt$  (assumindo a densidade de néctar como um  $1\text{mg}/\mu\text{L}$ ).

### 3.5 Condições de abandono do arranjo floral

Durante as simulações, as abelhas que estão a explorar um arranjo floral devem decidir a cada passo de tempo se dão prosseguimento à atividade ou se procuram flores mais rentáveis nas proximidades, ou ainda se retornam à colmeia. Quando o arranjo floral é rentável, as abelhas sobrevoam a área até completarem sua capacidade máxima de carga. Se assim for, elas serão obrigadas a voltar para a colmeia a fim de depositar suas cargas.

Por outro lado, as abelhas certamente deixarão o arranjo floral se sua abundância for baixa. Neste caso, podemos imaginar uma abelha que visita consecutivamente muitas flores inviáveis, de tal forma que perceberá a busca de outros arranjos florais como uma estratégia mais vantajosa. Mas quantas flores uma abelha deve inspecionar para decidir se é melhor abandonar determinado arranjo floral? É uma questão complicada e a resposta deve variar de acordo com a espécie floral e quão grande é a recompensa se o alimento é encontrado.

No modelo considera-se que se a abelha executar um determinado número  $N$  de inspeções falhas consecutivas, deixará em seguida o arranjo floral. Como não temos informações suficientes sobre esse comportamento, o valor de  $N$  é escolhido arbitrariamente nas simulações. Assumindo sucesso e falhas na busca de alimentos durante a inspeção como processos independentes de Bernoulli, verifica-se que o número de inspeções falhas até a primeira descoberta (denotada como  $X$ ) tem sua probabilidade modelada pela distribuição geométrica, expressa por:

$$P(X = x) = a_b (1 - a_b)^{x-1}, x = 1, 2, 3, \dots$$

(Eq. 6)

em que  $a_b$  é a abundância do arranjo floral. Assim, o número médio de inspeções até a primeira descoberta é  $E[X] = 1 / a_b$ . Por exemplo, uma abelha executa em média cinco inspeções para encontrar algum alimento em um arranjo floral com 20% de flores viáveis.

Dado um momento, a distribuição geométrica permite-nos avaliar a probabilidade de uma abelha exploradora deixar o arranjo floral após  $N$  intervalos de tempo. Uma condição para a abelha continuar a explorar o arranjo é que o número de inspeções até o primeiro sucesso ( $X$ ) deve ser igual ou menor que o limite para inspeções falhas ( $N$ ). Por outro lado, se  $X > N$ , a

abelha deve abandonar o arranjo floral após  $N$  visitas malsucedidas. Uma vez que a função de distribuição cumulativa geométrica é expressa por

$$P(X \leq x) = 1 - (1 - a_b)^x$$

(Eq. 7)

a probabilidade de abandono é  $P(X > N) = 1 - P(X \leq N) = (1 - a_b)^N$ . Por exemplo, com um valor fixo de  $N = 5$ , a probabilidade de uma abelha abandonar o arranjo floral após uma sequência de  $N$  inspeções malsucedidas é de cerca de 32,8% se a sua abundância for de 20%.

Quando uma abelha exploradora abandona um arranjo floral, ela se torna uma batadora e, em seguida, executa voos aleatórios nos arredores do local recém explorado. Eventualmente, as batadoras não encontram arranjos florais viáveis ao longo de suas trajetórias e, portanto, são obrigadas a retornar à colmeia sem recursos ou informações úteis sobre o meio ambiente. As batadoras não podem voar por muito tempo e, portanto, há um alcance de atuação para as abelhas forrageiras em torno de sua colmeia. Alguns estudos relatam abelhas encontradas em distâncias variando de 2 a 6 km. Mas as abelhas não voam necessariamente em trajetórias retas e, portanto, percorrem distâncias maiores que seu raio de atuação (STEFFAN-DEWENTER E KUHN, 2003; DORNHAUS & CHIKTTA, 2004).

### 3.6 Limites de voo e descanso

No modelo é indicado um limite de voo (distância máxima) durante o forrageamento. Esse limite é escolhido com base em dados sobre o tempo de forrageamento e a velocidade média relatados por Winston (2014), Dornhaus *et al.* (2006) e Bailis *et al.* (2010). As abelhas retornam imediatamente à colmeia quando ultrapassam o limite de voo e, nessa etapa de retorno, sua trajetória é linear para garantir a menor distância. No modelo o limite de voo é fixado em 12 km para abelhas de néctar e em 6 km para as de pólen, uma vez que trabalhos experimentais indicam um raio de atuação menor para as últimas (GARY *et al.*, 1972). Depois que as abelhas voltam para as colmeias, elas decidem se levantam voo novamente ou descansam por algum tempo. As abelhas que executaram um voo com falha e não coletaram nenhum recurso se tornarão abelhas inativadas (em repouso), descansando até o momento da reativação, tal como é descrito pela distribuição geométrica na Eq. (1). Se uma abelha em retorno tiver completado sua capacidade de carga, então, após o descarregamento, ela poderá dançar para sinalizar o local recém explorado. De acordo com Seeley (1994), a força e a duração da dança das abelhas dependem da rentabilidade do arranjo floral recém visitado.

### 3.7 Atratividade das fontes de recurso

De acordo com Srinivasan (2011) a atratividade de uma flor pode depender da doçura do néctar das flores, do tempo (ou energia) requerido para o voo até a flor e do tempo de manuseio. Srinivasan (2011) relata que a atratividade de uma flor aumenta de acordo com a qualidade de seu recurso e sua proximidade à colmeia, mas diminui conforme o tempo de manuseio aumenta. Torna-se claro que a noção de atratividade posta por Srinivasan (2011) pode ser estendida para arranjo florais. Tal formulação, no entanto, deve levar em conta a abundância de recursos em cada arranjo, visto que as abelhas geralmente visitam diversas flores em uma localidade e guardam informações a respeito da distribuição dos recursos (BAILIS *et al.*, 2010). Neste trabalho, a atratividade das fontes de recurso é formulada a partir da função:

$$A = ([s] \cdot a_b) / (2d \cdot m)$$

(Eq. 8)

em que  $[s]$  é a doçura,  $a_b$  é a abundância,  $m$  é o tempo de manuseio,  $d$  é a distância entre colmeia e arranjo floral, sendo  $2d$  o menor caminho que a abelha deve percorrer ao explorá-lo quando recrutada. Ressalta-se que a distância foi incluída por ser proporcional ao tempo de voo.

Nas execuções das simulações, fica claro que o recrutamento está ligado à quantidade de informação transmitida no salão das forrageiras. Podemos conceber cada um dos ciclos da dança do requebrado como uma unidade fundamental de informação que é transmitida entre as abelhas. A fração das abelhas recrutadas para um determinado arranjo floral corresponde à parcela da informação corrente no salão das forrageiras a respeito da referida fonte de recursos. Consideremos que em um dado período  $n$  abelhas executam a dança do requebrado, sendo que  $n_i$  o número de abelhas dançando para o  $i$ -ésimo arranjo floral. Então, a probabilidade de uma recruta ser destinada ao  $j$ -ésimo arranjo floral é:

$$P_j = n_j \cdot A_j \sum_{i=1}^I n_i A_i$$

(Eq. 9)

na qual  $I$  e  $A_i$  são, respectivamente, o número de abelhas dançando e a atratividade do arranjo floral número  $i$ . A atratividade é incluída na expressão (9) uma vez que o número de ciclos da dança é proporcional ao seu valor.

As abelhas que decidem alçar voo, o fazem de acordo com a informação corrente no salão das forrageiras. Elas podem fazer voos de reconhecimento como batedoras ou seguirem as posições determinadas pela dança do requebrado. Se o número de abelhas realizando a dança do requebrado é reduzido, maior é a probabilidade de a abelha reativada agir como batedora.

### 3.8 Estágios da dinâmica

A fim de facilitar o entendimento dos estágios de estados do algoritmo, foi elaborado um fluxograma, onde podem ser observados os processos e estados que as abelhas passam desde a sua saída, até o retorno para a colmeia (Fig. 9).

O código implementado na linguagem R é carregado automaticamente após a instalação do pacote *abelhabase.zip*, ao acessar as bibliotecas do R com o comando abaixo:

```
# Carregamento
library(abelhabase)
```

Para a inicialização das simulações, o usuário precisa definir alguns parâmetros da paisagem e da colmeia, como ilustrado a seguir:

```
# Início

NG<- 400

NF<- 100

D<-1.5

QF<-1000

Fx<-rnorm(NF, -2000, 2000)

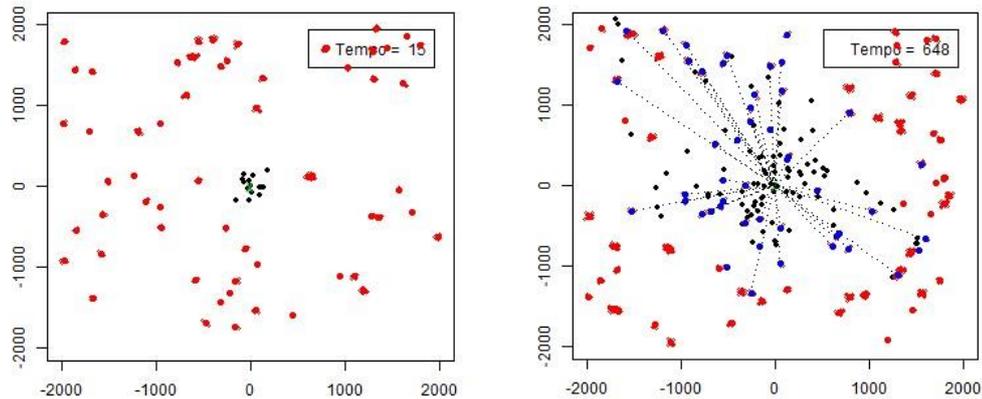
Fy<- rnorm(NF, -2000, 2000)

# Execução obj<-
VIDEO(NG, NF, D, QF, Fx, Fy)
```



distância total percorrida (voo das abelhas) a cada passo de tempo, o total de recurso (néctar coletado) e o balanço energético líquido do forrageamento. Dessa forma, torna-se possível a elaboração de estatísticas de resumo e gráficos que descrevam, de maneira abrangente, o desempenho da colmeia. Um exemplo da distribuição das abelhas em função do tipo de atividade é apresentado na Figura 10.

**Figura 10** - Representação do forrageamento em uma simulação



Pontos em vermelho representam flores, pontos em azul são flores visitadas, pontos em preto são abelhas na atividade de forrageamento. As linhas pontilhadas são trajetórias preferenciais usadas pelas recrutas. **Fonte:** Próprio Autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise comparativa de cenários, 10 combinações de parâmetros foram consideradas. Os cenários são apresentados na Tabela 1 e consideram três estudos comparativos: influência da quantidade de flores em cada fragmento (QF), da densidade floral (D) e do número de fragmentos florais no ambiente (NF).

Para as simulações de base, considerou-se:

- QF = 1000
- D = 1,5
- NF = 100
- NG = 400

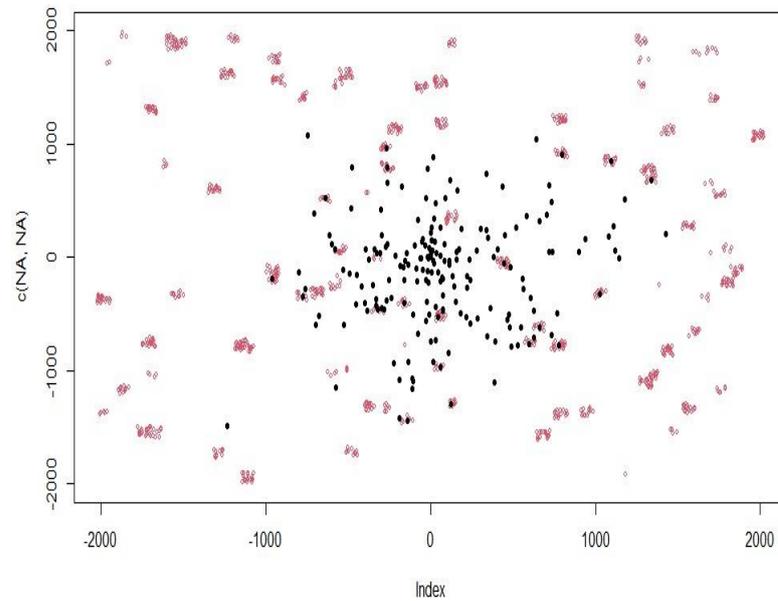
E os resultados obtidos nela são apresentados nas Figuras 10 e 11.

**Tabela 1** – Valores adotados nos parâmetros para cada simulação.

<b>Tipo de análise</b>	<b>Simulação</b>	<b>QF</b>	<b>D</b>	<b>NF</b>	<b>NG</b>
Base	0	1000	1,5	100	400
	1	100	1,5	100	400
QF	2	5000	1,5	100	400
	3	10000	1,5	100	400
D	4	1000	0,02	100	400
	5	1000	20	100	400
	6	1000	1000	100	400
NF	7	1000	1,5	10	400
	8	1000	1,5	1000	400
	9	1000	1,5	5000	400

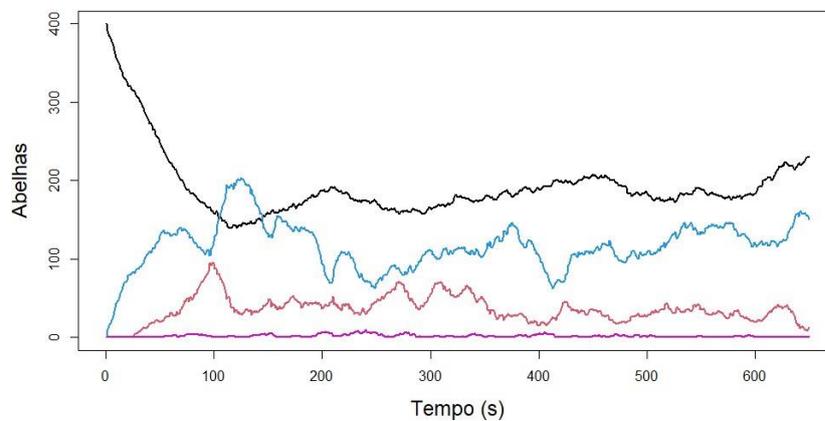
**Fonte:** Próprio Autor.

**Figura 11.** - Representação bidimensional da simulação base (0)



Fonte: Próprio Autor

**Figura 12** - Representação gráfica dos estados das forrageiras



Linhas em preto, azul, vermelho e rosa, representam as abelhas em repouso, batedoras, explorando e dançando respectivamente.

Fonte: Próprio Autor.

#### 4.1 Cenários com variação da quantidade de flores por fragmento (QF)

As simulações 1, 2 e 3 permitiram comparar como as abelhas se comportam em paisagens com fragmentos pobres e abundantes em recurso (1 – pobres, 2 – intermediários, 3 – ricos).

Nota-se, de acordo com o modelo adotado, que o número de abelhas explorando recurso aumenta à medida que a quantidade de recurso é incrementada de uma simulação para outra e, por consequência, o número de batedoras e abelhas em repouso tende a diminuir. Além disso, a sinalização pela dança também aumenta com valores de QF cada vez maiores (Figura 13).

#### **4.2 Cenários com variação da densidade floral (D)**

Já as simulações 4, 5 e 6 permitiram a comparação entre fragmentos com densidades florais diferentes, e a distribuição da organização de trabalho em cada cenário é apresentada na Figura 14.

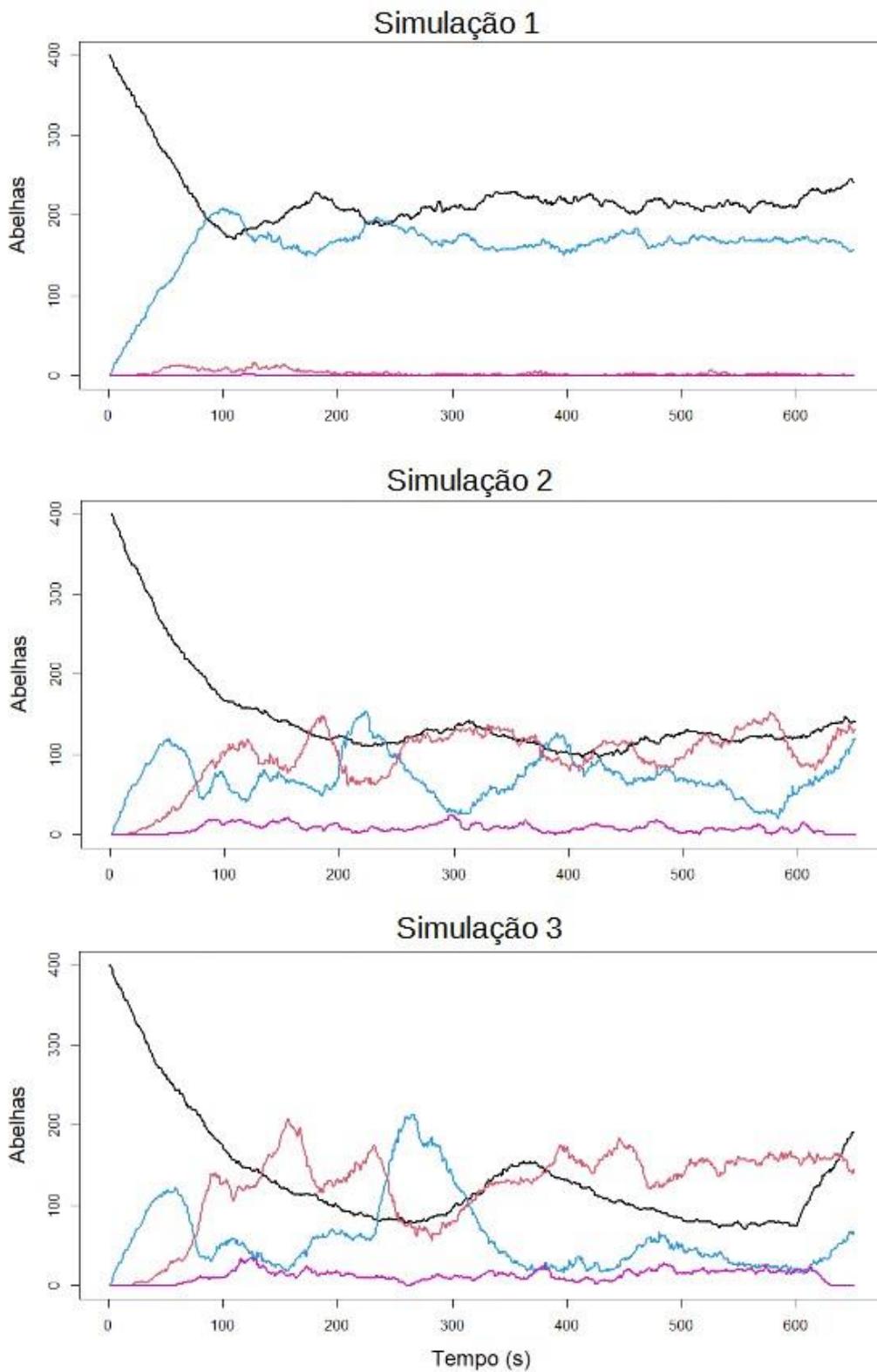
Observa-se que, de acordo com o modelo proposto, a densidade floral é influente sobre o número de abelhas explorando os fragmentos, mesmo que o total de recursos no ambiente se mantenha constante. Quanto menor é a densidade, mais abelhas precisam explorar o ambiente a fim de coletar os recursos necessários. Isso, no entanto, não implica em alterações notáveis no número de abelhas batedoras, em repouso ou que realizam a dança.

#### **4.1 Cenários com variação do número de fragmentos florais (NF)**

Nas simulações 7, 8 e 9 foram comparados os estados, porém, alterando a o número de fragmentos florais no ambiente (Figura 15).

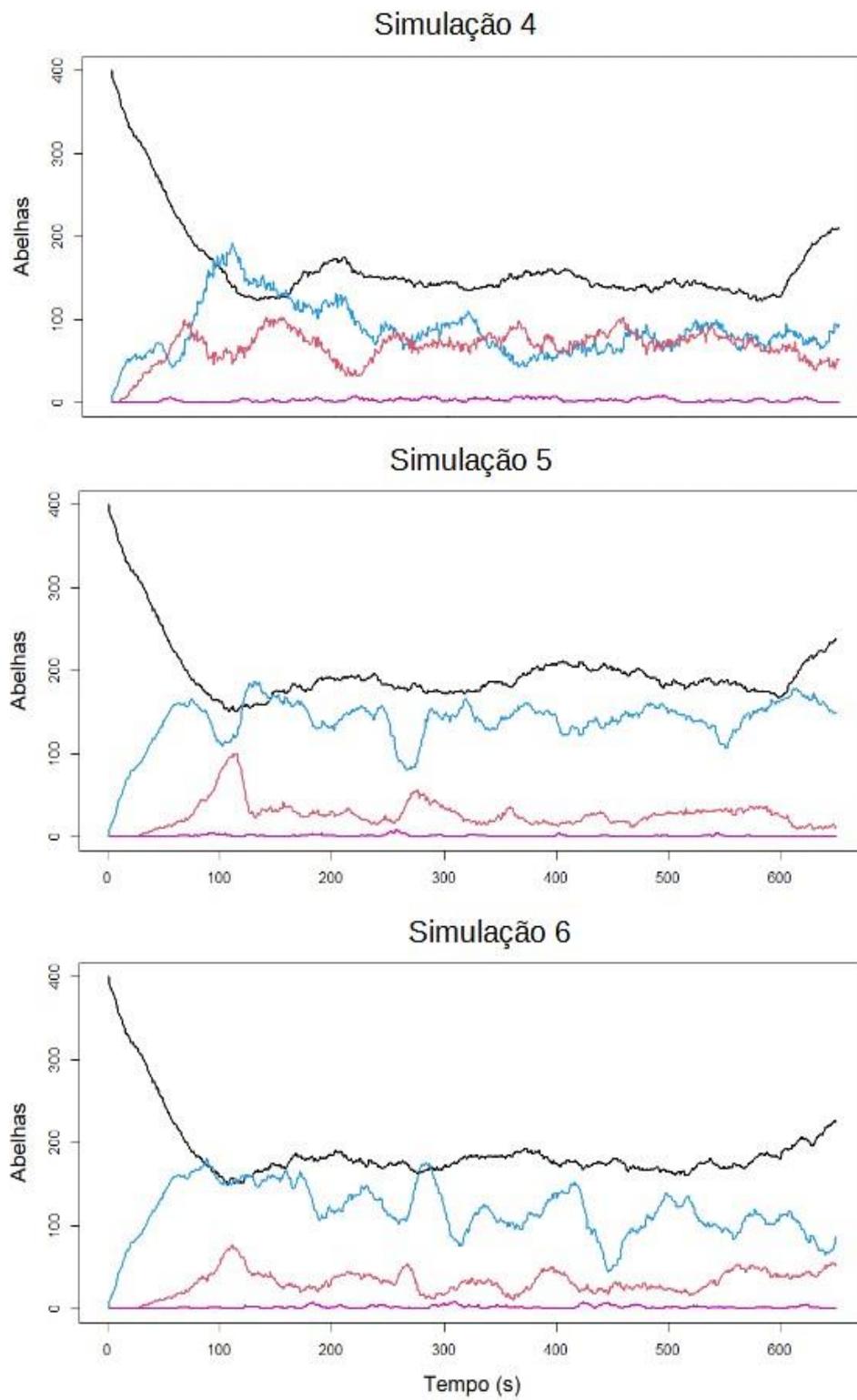
Outro ponto que foi observado com o modelo proposto, é que houve um drástico aumento da exploração com o número de fragmentos, além de afetar a intensidade da dança, garantindo maior fluxo de informações no salão das forageiras.

**Figura 13** - Comparação entre as três simulações referentes à variação de quantidade máxima de flores por fragmentos



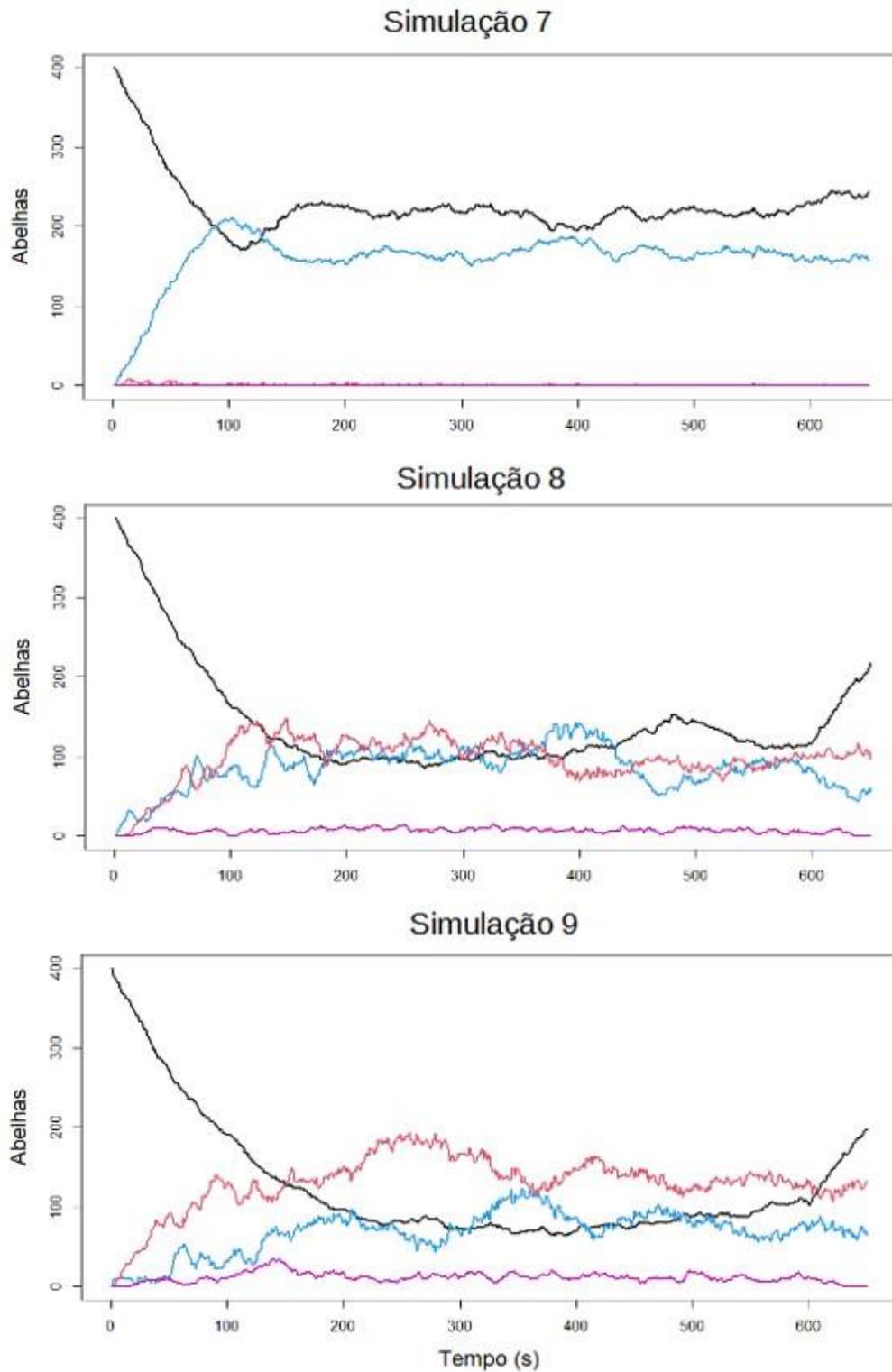
Fonte: Próprio Autor.

**Figura 14** - Comparação entre as três simulações referentes à variação de densidade floral dos fragmentos



**Fonte:** Própria Autor.

**Figura 15** - Comparação entre as três simulações referentes à variação do número de fragmentos florais



Fonte: Próprio Autor.

Para uma boa interpretação dos resultados, a análise de trabalhos que analisem a influência que os parâmetros variados acima tem sobre os comportamentos observados durante o forrageamento das abelhas. De acordo com Seeley *et al.* (1991), os comportamentos da colônia como um todo, podem variar de acordo com a intensidade da dança, o número de visitas em uma fonte de recurso, ou até mesmo à probabilidade de retorno à fonte de alimento.

Em estudos apontados por Frisch (1967), também foram observados padrões de comportamento relacionados à atividade da dança. Estes padrões foram associados com variáveis que descrevem o ambiente, onde para estes estudos, foi denotado que quanto mais lucrativa a fonte de recurso, maior a duração e atividade da dança nas colmeias (SEELEY *et al.*, 1991). No modelo construído, esta maior atividade pode ser observada com as simulações em que foram variados os parâmetros de quantidade máxima de flores por fragmento, e número de fragmentos florais, mostrando que o modelo de certa forma condiz com a realidade.

São diversos os estudos que ajudam a explicar o comportamento das abelhas, principalmente com relação à atividade da dança (DONALDSON-MATASCI E DORNHAUS, 2014; DORNHAUS E CHITTKA, 2004; DORNHAUS E DONALDSON-MATASCI, 2012; DORNHAUS *et al.*, 2006), estes mostram que há uma forte relação entre a densidade, distribuição e qualidade dos recursos, com a atividade da dança. Esta relação pode ser observada facilmente qual é realizado o aumento de QF e NF, porém, ao se analisar a atividade da dança e exploração dos *patches* mediante à alteração do parâmetro referente à densidade, as taxas relacionadas à essas variáveis pouco se alteram o que distoa do que é encontrado na literatura, a qual cita que a densidade do arranjo tem influência na informação passada através da dança.

Outra questão importante de se observar é quanto a heterogeneidade da paisagem. Como já supracitado, este modelo apresenta uma composição de arranjos florais que representam uma mesma espécie para as flores, formando uma paisagem mais homogênea. Esse tipo de configuração difere bastante do que é comumente encontrado na natureza, onde as paisagens podem apresentar variações na proporção e distribuição espacial de recursos dependendo do habitat em que se encontram (TSCHARNTKE *et al.*, 2005).

É de se esperar que em modelos baseados em regras de forrageamento, apresentem uma menor atividade da dança em ambientes que não apresentem uma alta heterogeneidade, isso porque pode existir uma maior facilidade em encontrar o recurso, independente na quantidade do mesmo, o que explica bem a baixa atividade da dança nos cenários onde apenas a densidade de flores foi alterada (BEEKMAN E LEW, 2008).

É importante ressaltar que por se tratar de um modelo, muitas das respostas obtidas durante as simulações precisam de outras validações empíricas para que os resultados possam de fato representar a realidade. Isso porque para a construção do mesmo, não foram consideradas todas as variáveis possíveis que podem compor um ambiente, fato que pode tornar o modelo mais complexo e por consequência com maior acúmulo de erros (HELBING, 2012).

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, uma revisão sobre os modelos computacionais e aplicações na simulação de sistemas ambientais foi apresentada. Um modelo baseado em agentes foi formulado para representar o voo das abelhas *Apis mellifera L.* na sua atividade de forrageamento de néctar. O algoritmo foi implementado em linguagem R e um pacote com código livre foi desenvolvido para facilitar a distribuição e o uso da tecnologia. Com a ferramenta desenvolvida foi possível compor paisagens florísticas de diferentes características (número de flores, qualidade do recurso, abundância, nível de fragmentação, distribuição dos fragmentos etc.) e avaliar a dinâmica de forrageamento em cada cenário simulado. O modelo proposto pode ser útil no planejamento ambiental e compreensão das interações das abelhas *Apis mellifera L.* com o meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

- ADEVA, J. J. G. Simulation modelling of nectar and pollen foraging by honeybees. **Biosystems Engineering**, v. 112, n. 4, p.304-318, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.05.002>.
- AGUILAR, J. A. R.; PINYOL, F., N. X.; SANCHEZ, M. L. State-of-the-art of software tools for agent-based simulations. **Research Report D30**, 2002.
- BAILIS, P.; LIFLAND, P. **The Hive is Hungry: Exploring Bee Colony Search and Foraging Behavior through Agent-Based Simulation**, 2009.
- BALIS, P.; NAGPAL, R.; WERFEL, J. Positional Communication and Private Information in Honeybee Foraging Models. **International Conference on Swarm Intelligence**, v 6234, 2010. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-15461-4\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-642-15461-4_23)
- BATTY, M. **Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals**, MIT Press (MA). 2005. [https://10.1007/978-3-642-15461-4\\_23](https://10.1007/978-3-642-15461-4_23)
- BECHER, M.; GRIMM, A. V.; KNAPP, J.; HORN, J.; TWISTON-DAVIES, G.; OSBORNE, J. L. BEESCOUT: A model of bee scouting behaviour and a software tool for characterizing nectar/pollen landscapes for BEEHAVE. **Ecological Modelling**, v. 340, p.126-133, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.09.013>.
- BEEKMAN, M.; GILCHRIST, A. L.; DUNCAN, M; SUMPTER, D. J. T. What makes a honeybee scout? **Behavioral Ecology And Sociobiology**, [s.i.], p. 985-995, 2007.
- BEEKMAN, M.; LEW, J. B. Foraging in honeybees—when does it pay to dance? **Behavioral Ecology**, v. 19, n. 2, p.255-261, 2007. <http://dx.doi.org/10.1093/beheco/arm117>.
- BEEKMAN, M. How long will honey bees (*Apis mellifera L.*) be stimulated by scent to revisit past-profitable forage sites? **Journal Of Comparative Physiology A**, v. 191, n. 12, p.1115-1120, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s00359-005-0033-1>.
- BONABEAU, E. Agent-Based Modelling: Methods and Techniques for Simulating, Human Systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA (PNAS)**, p. 7280-7287, 2002.

BRAGA, H. C.; MOITA, G. F.; ALMEIDA, P. E. M. DE. Comparação entre os Algoritmos de Busca pela Vizinhança de Von Neumann ou de Moore para Geração do Mapa de Distâncias em um Ambiente Construído. **Abakós**, v. 4, n. 2, p. 20-40, 2016.

CASTRO, M. L. A; CASTRO, R. DE O. Autômatos Celulares: Implementações de Von Neumann, Conway e Wolfram. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 3, n. 3, 2008. <https://doi.org/10.17921/1890-1793.2008v3n3p89-106>

CLARKE, K. Cellular Automata. **The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge**, v. 3, 2017. 10.22224/gistbok/2017.3.9.

COUVILLON, M. J.; PEARCE, F. C. R.; HARRIS-JONES, E. L.; KUEPFER, A. M.; MACKENZIE-SMITH, S. J.; ROZARIO, L. A.; SCHÜRCH, R.; RATNIEKS, F. L. W. Intra-dance variation among waggle runs and the design of efficient protocols for honey bee dance decoding. **Biol Open**, p. 467–472, 2012. Disponível em: <http://bio.biologists.org/content/1/5/467>.

COX, M. D; MYERSCOUGH, M. R. A flexible model of foraging by a honey bee colony: the effects of individual behaviour on foraging success. **Journal Of Theoretical Biology**, v. 223, n. 2, p.179-197, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/s00225193\(03\)00085-7](http://dx.doi.org/10.1016/s00225193(03)00085-7).

DILÃO, R. **Autômatos celulares, máquinas de Turing ou a natureza como máquina de cálculo**, v. 12, p. 3–20, 1993.

DORNHAUS, A.; CHITTKA, L. Bumble bees (*Bombus terrestris*) store both food and information in honeypots. **Behavioral Ecology**, v. 16, n. 3. 2005. <http://dx.doi.org/10.1093/beheco/ari040>.

DORNHAUS, A.; CHITTKA, L. Information flow and regulation of foraging activity in bumble bees (*Bombus* spp.). **Apidologie**, v. 35, n. 2, p.183-192, mar. 2004. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1051/apido:2004002>.

DORNHAUS, A.; DONALDSON-MATASCI, M. C. How habitat affects the benefits of communication in collectively foraging honey bees. **Behavioral Ecology And Sociobiology**, v. 66, n. 4, p.583-592, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s00265011-1306-z>.

DONALDSON-MATASCI MC, DORNHAUS A. Dance communication affects consistency, but not breadth, of resource use in pollen-foraging honey bees. **PLoS ONE**. 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107527>

DORNHAUS, A.; KLÜGL, F.; OECHSLEIN, C.; PUPPE, F.; CHITTKA, L. Benefits of recruitment in honey bees: effects of ecology and colony size in an individual based model. **Behavior Ecology**, v. 17, p. 336-344, 2006.

DYER, F. C. The Biology Of The Dance Language. Department of Zoology, **Michigan State University**. v. 47, p. 917-49, 2002. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.ento.47.091201.145306>.

DMITRY A. Z., A generalized neighborhood for cellular automata. **Theoretical Computer Science**, v. 666, p. 21-35, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.11.002>.

EDWARDS, J. R.; MYERSCOUGH, M. R. Intelligent decisions from the hive mind: Foragers and nectar receivers of *Apis mellifera L.* collaborate to optimise active forager numbers. **Journal Of Theoretical Biology**, v. 271, n. 1, p.64-77, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtbi.2010.11.027>.

FALAH, N., KARIMI, A. & HARANDI, A.T. Urban growth modeling using cellular automata model and AHP (case study: Qazvin city). **Model. Earth Syst. Environ.** v. 6, 235–248, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00674-z>

FERNANDES, F. C., CRUZ-LANDIM, C., MALASPINA, O. **Influence of the Insecticide**. 2012.

FERREIRA, I. E. P. **Modelagem matemática para a dispersão de fungos fitopatogênicos via autômatos celulares**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Física Médica) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Botucatu, 2008.  
Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/119046>>.

FRISCH. K. von. **The dancing bees**, Mathuen & Co. Ltda., 183 p, London: 1953.

FURTADO, B. A., DELDEN H. V. Modelagem urbana e regional com autômatos celulares e agentes: panorama teórico, aplicações e política pública. 2011. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1426/1/TD\\_1576.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1426/1/TD_1576.pdf)>

GARDNER, M. The fantastic combinations of John Conway’s new solitaire game “life”. **Mathematical Games**. 1970. Scientific American, 223, pp.120–123.

GARY, N. E.; WITHERELL, P. C.; MARSTON, J. Foraging Range and Distribution of Honey Bees Used for Carrot and Onion Pollination. **Environmental Entomology**, v. 1, n. 1, p.71-78, 1972. <http://dx.doi.org/10.1093/ee/1.1.71>.

GONÇALVES, L. S. **Como as abelhas se comunicam**. Ribeirão Preto-SP. Disponível em: <http://www.apacame.org.br/mensagemdoce/71/artigo2.htm>. Acesso em 04 de mar. 2008.

HELBING D. **Agent-Based Modeling**. In: Helbing D. (eds) Social Self-Organization. Understanding Complex Systems. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-24004-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-24004-1_2)

HENRY, M.; BÉGUIN, M.; REQUIER, F.; ROLLIN, O.; ODOUX, J. F.; AUPINEL, P.; APTEL, J.; TCHAMITCHIAN, S.; DECOURTYE, A. A Common Pesticide Decreases Foraging Success and Survival in Honey Bees. **Science**, v. 336, n. 6079, p.348-350, 2012. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1215039>.

JAHANGIRIAN, M., ELDABI, T., NASEER, A., STERGIIOULAS, L. K., YOUNG, T. Simulation in manufacturing and business: a review. **European Journal of Operational Research**, v. 203, p. 1–13, 2010.

JOHNSON, B. R. Task partitioning in honey bees: the roles of signals and cues in group-level coordination of action. **Behavioral Ecology**, v. 21, n. 6, p.1373-1379, 2010. <http://dx.doi.org/10.1093/beheco/arq138>.

LEITE, I. O. B., LINS, J. C. d. S., e CERQUEIRA, M. G. d. C. **Especificações na Construção de um Sistema Autômato Celular**. 2007. Disponível em: <http://www.di.ufpe.br/iobl/monografia/especificacoes.htm>

LÉVY, P. **A inteligência coletiva: por uma antropologia do ciberespaço**, 4. ed, São Paulo, Loyola, 2003.

MARTINS. A. C. da C. **Aplicação de Autômatos Celulares para Modelagem de Variáveis Regionalizadas na Mineração**. 2013. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MACAL, C. M. e NORTH, M. J. Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation, in Kuhl, M.E., Steiger, N.M, Armstrong, F.B and Joines, J. A. (eds.), **Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference**. 2005

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E.M. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados**. 6ª edição, São Paulo: Atlas, 2007.

MELOTTI, G. **Aplicação de Autômatos Celulares em Sistemas Complexos: Um Estudo de Caso em Espalhamento de Epidemias**. Universidade Federal de Minas Gerais. 2009. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/335M.PDF>>

MIRANDA, G., MACHICAO, J. & BRUNO, O. Exploring Spatio-temporal Dynamics of Cellular Automata for Pattern Recognition in Networks. **Sci Rep**. v. 6, 37329, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep37329>

WAGNER, A. E., NEST, B. N. V., HOBBS, C. N, MOORE, D. Persistence, reticence and the management of multiple time memories by forager honey bees. **Journal Of Experimental Biology**, v. 216, n. 7, p.11311141, 2012. <http://dx.doi.org/10.1242/jeb.064881>.

PORTUGALI, J. Self-organization and the city. **Springer-Verlag**, 2000.

QUIJANO, N.; PASSINO, K. M. Honey bee social foraging algorithms for resource allocation: Theory and application. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 23, n. 6, p.845-861, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2010.05.004>.

ROGSCH, C., SCHADSCHNEIDER, A., SEYFRIED, A. Simulation of Human Movement by Cellular Automata Models Using Different Update Schemes. **Jülich Supercomputing Centre**. 2009.

SALDANA, R., TABARES, W., e YU, W. Parallel implementations of cellular automata algorithms on the agila high performance computing system. **Parallel Architectures, Algorithms and Networks**, p. 110–116, 2002.

SALLES, T., LOPEZ, S., CACAS, M. C., GRANJEON, D., MULDER, T. **Geological Modelling Using Cellular Automata**. 2006.

SANTOS, E. T. L. ALMEIDA, R. Avaliação de modelo probabilístico de propagação de incêndios florestais utilizando autômatos celulares aplicado a pequenas áreas. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 4, 1685-1700. <https://doi.org/10.5902/1980509831126>

SCHMICKL, T.; THENIUS, R.; CRAILSHEIM, K. Simulating swarm intelligence in honey bees. **Proceedings Of The 2005 Conference on Genetic And Evolutionary Computation – Gecco**, p.273-274, 2005. <http://dx.doi.org/10.1145/1068009.1068052>.

SCHMICKL, T.; CRAILSHEIM, K. Inner nest homeostasis in a changing environment with special emphasis on honey bee brood nursing and pollen supply. **Apidologie**, v. 35, n. 3, p.249-263, maio 2004. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1051/apido:2004019>.

SEELEY, T. CAMAZINE, S., SNEYD, J. Collective decision-making in honey bees: how colonies choose among nectar sources. **Behavioral Ecology And Sociobiology**, v. 28, n. 4, p.277-289, 1991. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00175101>.

SEELEY, T. Honey bee foragers as sensory units of their colonies. **Behavioral Ecology And Sociobiology**, v. 34, n. 1, p.51-62, 1994. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00175458>

SEELEY, T., TOVEY C. A. Why search time to find a food-storer bee accurately indicates the relative rates of nectar collecting and nectar processing in honey bee colonies. **Behavioral Ecology And Sociobiology**, v. 34, n. 1, p.51-62, 1994. <https://doi.org/10.1006/anbe.1994.1044>.

SILVA, C. I., ALEIXO, K. P., NUNES-SILVA B., FREITAS, B. M., IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. **Guia ilustrado de abelhas polinizadoras no Brasil**. 1ª Edição. 2014. Disponível em: <[http://www.semabelhasemalimento.com.br/wp-content/uploads/2015/02/Guia\\_abelhas-polinizadoras\\_02\\_junho\\_2014-1\\_web.pdf](http://www.semabelhasemalimento.com.br/wp-content/uploads/2015/02/Guia_abelhas-polinizadoras_02_junho_2014-1_web.pdf)>.

SLIMI, R.; YACOUBI, S. E.; DUMONTEIL, E.; GOURBIÈRE, S. A cellular automata model for Chagas disease. **Applied Mathematical Modelling**, v. 33, n. 2, 2009.

SRINIVASAN, M. V., Honeybees as a model for the study of visually guided flight, navigation, and biologically inspired robotics. **Physiol Rev**. 2011. <https://doi.org/10.1152/physrev.00005.2010>

TRENTINI, M.; PAIM, L. **Pesquisa em Enfermagem. Uma modalidade convergenteassistencial**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1999.

VIEIRA, A. B. **Fundamentos Gerais da Etologia**. 1989.

VISWANATHAN, G. M., AFANASYEV, V., BULDYREV, S. V., MURPHY, E. J., PRINCE P. A., e STANLEY, H. E. Lévy flight search patterns of wandering albatrosses. **Nature**. 1996.

VRIES H.; BIESMEIJER J. C. Modelling collective foraging by means of individual behaviour rules in honey-bees. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, n. 44, p. 109-124, 1998.

WHITE, R.; ENGELEN, G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. **Environment and Planning A**, v. 25, p. 1.175-1.199, 1993.

WINSTON, M. L. **Bee Time: Lessons from the Hive**. London: Harvard University Press, 2014.

WOLFF, L. F.; DOS REIS, V. D. A.; SANTOS, R. S. S. Abelhas melíferas: bioindicadores e qualidade ambiental e de sustentabilidade da agricultura familiar de base ecológica. **Embrapa Clima Temperado**, p. 38, 2008.

WOLFRAM, S. **A New Kind of Science**. **Wolfram Media**, 2002.

YOKOI, T., FUJISAKI, K. To Forage or Not: Responses of Bees to the Presence of Other Bees on Flowers. **Ann. Entomol. Soc.** v. 104, p. 353-357. 2011.

ZAITSEV, D. A. A generalized neighborhood for cellular automata. **Theoretical Computer Science**, v. 666, p. 21-35, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tcs.2016.11.002>.