

Autômato celular no estudo da reocupação de formigas cortadeiras em regiões de forrageamento

Guilherme T. Teixeira¹

FECIV – UFU, 38.408-902 - Uberlândia/MG,

Rosana S. M. Jafelice², César G. Almeida³

FAMAT – UFU, 38.408-902 - Uberlândia/MG,

Heraldo L. Vasconcelos⁴

Instituto de Biologia – UFU, 38.408-902 - Uberlândia/MG.

Resumo. Neste trabalho utilizando Autômato Celular e Sistema Baseado em Regras Fuzzy, simulamos a reocupação de uma trilha de formigas cortadeiras. Esta trilha possui uma bifurcação que levam a duas diferentes regiões de atração: uma superior (acima da bifurcação) e uma inferior (abaixo da bifurcação). No início da simulação as formigas se deslocam para a região de atração superior e retornam para o formigueiro transportando alimento. Quando ocorre escassez de alimento na região de atração superior as formigas se deslocam para a região inferior. Após a coleta de alimento nesta região as formigas deslocam-se para o formigueiro.

Palavras-chave: *Autômato Celular; Formigas Cortadeiras; Simulação Computacional.*

1. Introdução

As formigas cortadeiras são insetos eusociais, ou seja, possuem um alto grau de organização social dividido em castas que desempenham tarefas específicas (Hölldobler e Wilson, 1990). Existem dois gêneros de formigas cor-

¹gt.teixeira@hotmail.com

²rmotta@ufu.br

³cesargui@ufu.br

⁴heraldo@umuarara.ufu.br

tadeiras, *Atta*, popularmente conhecidas como saúvas, e *Acromyrmex*, popularmente conhecidas como quenquéns. Estes insetos são encontrados exclusivamente em regiões tropicais e subtropicais das Américas. Dependendo da espécie, um ninho adulto pode conter milhares de formigas, sendo estas, em sua maioria, fêmeas operárias estéreis.

O Autômato Celular (AC) foi introduzido na década de 50 pelo matemático John von Neumann, que considerou as sugestões de Stanislaw Ulam, numa tentativa de modelar processos naturais de autorreprodução (Wolfram, 1994). Os AC consistem em simulações discretas no tempo, espaço e no estado do sistema. A ideia básica destes sistemas consiste em considerar cada posição (ou região) do domínio espacial como sendo uma célula, na qual é atribuído um estado. O estado de cada célula é modificado de acordo com o seu estado e dos seus vizinhos na etapa de tempo anterior, através de uma série de regras simples que imitam as leis físicas ou biológicas que regem o sistema (Ermentrout e Edelstein-Keshet, 1993). A principal característica dos AC é a facilidade com que podem ser implementados em virtude da simplicidade de sua formulação e o surpreendente retorno visual capaz de reproduzir equilíbrios estáveis ou periódicos, padrões complexos e estruturas organizadas como formações de ondas, entre outras. Além disto, os AC podem fornecer muitas informações sobre a dinâmica temporal e espacial de sistemas biológicos, sendo uma alternativa importante na descrição de processos espaciais acoplados a interações locais. O objetivo final dos AC é uma descrição do comportamento macroscópico do fenômeno e não uma descrição exata e fiel do processo microscópico. Não são, em geral, instrumentos de previsão, devendo ser abordados como um meio de experimentação.

A seguir apresentamos um breve relato de artigos relacionados com o tema abordado neste trabalho. A referência (Fitzgerald et al., 2012) apresenta um modelo para identificar como as características do habitat influenciam a invasão e a desocupação das formigas argentinas em áreas de concentração humana, *Linepithema humile*, através de um modelo similar a um AC que apresenta células vizinhas quadradas. Em (Watmough e Edelstein-Keshet, 1995), estuda-se o papel da comunicação química na formação de trilhas de formigas cortadeiras. Para isto foi utilizado um modelo de autômato celular que simula o movimento das formigas, as quais interagem entre si de acordo com um algoritmo comportamental simples. Diferentemente do trabalho citado anteriormente, o foco do artigo de John et al. (2004) é o tráfico de formigas em

trilhas pré-existentes. O modelo do tráfico de formigas consiste em duas faixas de células de formigas. De acordo com estes autores, estas duas faixas não necessitam se corresponder com as vias rígidas fisicamente separadas em espaço real; estas são, no entanto, conveniente para descrever os movimentos de formigas em dois sentidos opostos.

O objetivo do presente trabalho é utilizar AC para simular o deslocamento das formigas do tipo saúva em busca de alimentos. Especificamente, foi abordado a reocupação de duas trilhas que foram anteriormente desbravadas. Este procedimento é realizado pelas forrageadoras que seguem em busca de alimento nas regiões de atração. A simulação do autômato celular foi realizada utilizando parâmetros obtidos de um Sistema Baseado em Regras Fuzzy (SBRF), onde as variáveis linguísticas de entradas são a obstrução do terreno e o sinal químico e a variável de saída é o acesso da formiga. No autômato celular este acesso está relacionada ao deslocamento da formiga de uma célula para as células vizinhas.

Na próxima seção apresentamos uma breve introdução à teoria dos conjuntos fuzzy e, em seguida, exibimos o modelo de bifurcação de trilha de formigas.

2. Conjuntos Fuzzy

A Teoria de Conjuntos Fuzzy foi introduzida por L.A. Zadeh com o objetivo de fornecer um ferramental matemático para o tratamento de informações de caráter impreciso ou vago.

Um subconjunto fuzzy F do universo \mathcal{U} é definido em termos de uma função de pertinência μ que a cada elemento x de \mathcal{U} , associa um número $\mu(x)$, entre zero e um, chamado de grau de pertinência de x a F . Assim, o conjunto fuzzy F é simbolicamente indicado por sua função de pertinência

$$\mu_F : \mathcal{U} \longrightarrow [0, 1].$$

Os valores $\mu_F(x) = 1$ e $\mu_F(x) = 0$ indicam, respectivamente, a pertinência plena e a não pertinência do elemento x a F .

O SBRF para conjuntos fuzzy contém quatro componentes: um processador de entrada que realiza a fuzzificação dos dados de entrada, uma coleção de regras nebulosas chamada base de regras, uma máquina de inferência fuzzy e um processador de saída que fornece um número real como saída. O método

de inferência utilizado neste trabalho é o Método de Inferência de Mamdani e o método de defuzzificação é o Centro de Gravidade (Barros e Bassanezi, 2010).

3. Modelo de Bifurcação de Trilhas de Formigas

A pesquisa de Vasconcelos (1990) foi realizada na Floresta Amazônica com uma colônia da formiga cortadeira *Atta cephalotes*. O estudo, realizado de julho de 1985 a janeiro de 1986 e de setembro de 1986 a março de 1987, determinou as trilhas mostradas na figura 1.

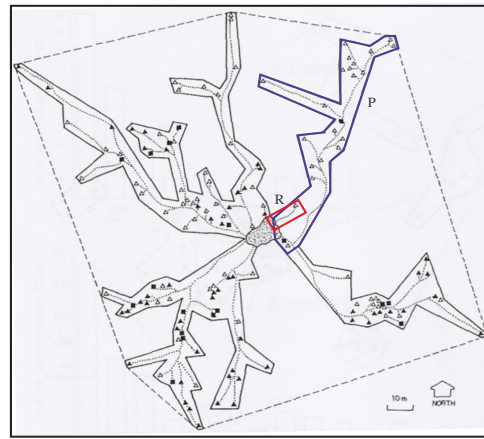


Figura 1: Trilhas e território de forrageamento (Vasconcelos, 1990).

Nesta figura as linhas tracejadas representam a região que foi utilizada na pesquisa mencionada anteriormente e as linhas contínuas representam o território que, efetivamente, foi ocupado pelas formigas. Os triângulos preenchidos com a cor preta representam as plantas que foram atacadas pelas formigas no período de julho de 1985 e janeiro de 1986; os triângulos sem preenchimento de cor representam as plantas que foram atacadas no período de setembro de 1986 e março de 1987. Os quadrados representam as plantas que foram atacadas em ambos os períodos. Finalmente, as linhas pontilhadas representam as trilhas formadas pelas formigas a partir do formigueiro (área hachurada). Estudos realizados anteriormente ((Jafelice et al., 2009) e (Jafelice et al., 2011)) utilizaram equações diferenciais parciais com parâmetros fuzzy para modelar e simular computacionalmente o comportamento das formigas na região R des-

tacada na figura 1. Nesta mesma figura observa-se a região poligonal P na qual os autores se basearam para efetuar o cálculo da dispersão populacional.

O modelo utilizado neste trabalho apresenta uma bifurcação de trilha de formigas como mostra a figura 2. No início das simulações as formigas estão todas concentradas no interior do formigueiro. No processo de construção de trilhas é comum observarmos que as formigas saem do seu formigueiro em direção as várias regiões de atração e depois formam bifurcações. Denominamos B_1 a trilha superior e B_2 a trilha inferior, conforme a figura 2. A cada região desta figura corresponde uma cor: a preta representa o terreno, a cinza escuro a trilha, a cinza claro o formigueiro e a branca as regiões de atração. Essas cores são representadas por números inteiros que são armazenados em uma matriz denominada principal do AC.

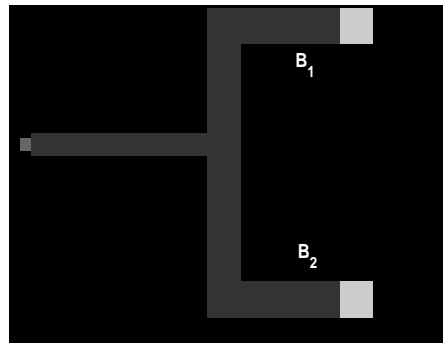


Figura 2: Nesta figura regiões nas cores preta, cinza escuro, cinza claro e branco representam o terreno, a trilha, o formigueiro e as regiões de atração, respectivamente.

4. Descrição do AC

No autômato celular, a cada iteração, a matriz principal com dimensões 130×120 é atualizada com base em cálculos que são influenciados pelo sinal químico (feromônio), pela obstrução do terreno, pela densidade de formigas na trilha e pelo acesso das formigas na região. Dessa forma, é possível uma representação visual do deslocamento das formigas que será descrita a seguir.

4.1 Influência do Sinal Químico e Obstrução do Terreno

Biologicamente, o sinal químico e a obstrução do terreno estão relacionados da seguinte forma, quando o sinal químico é máximo a obstrução do terreno é mínima e quando o sinal químico é mínimo a obstrução do terreno é máxima.

O sinal químico assume valores no intervalo fechado $[0,1]$. A intensidade máxima do sinal químico é representada pelo valor 1; a intensidade mínima é representada pelo 0. Do formigueiro até a bifurcação o valor do sinal químico é constante e não é atualizado a cada iteração, devido à proximidade do formigueiro e à intensa circulação de formigas. Na trilha superior B_1 e na inferior B_2 , o sinal químico é atualizado a cada iteração por uma função gaussiana. Em B_1 utilizamos a função $s_1(t) = e^{-\frac{(t-250)^2}{20000}}$ e em B_2 a função $s_2(t) = e^{-\frac{(t-650)^2}{20000}}$, onde t é o número de iterações.

Inicialmente, o valor do sinal químico nas regiões de atração é igual a 1 e cada região de atração possui uma quantidade Q de alimento. Supondo que cada formiga transporta uma unidade de alimento da região de atração para o formigueiro e que f é a quantidade de formigas carregadas com alimentos que saíram da região de atração, podemos utilizar a seguinte função $s(f) = 1 - \frac{f}{Q}$ para atualizar o sinal químico na região de atração.

Na simulação, utilizamos o critério $s(f) \leq 0.05$ para indicar a escassez de alimento na região de atração, levando as formigas a procurarem outra região de atração ou a retornarem para o formigueiro. Se $s(f) > 0.05$ dizemos que a região é viável para procura de alimento, caso contrário, a região não é viável.

O valor da função $s(f)$ somente será alterado, em cada iteração, se a formiga sair carregada da região de atração. Para decidir se uma formiga que chega à região de atração transportará alimento comparamos, em cada iteração t , o valor da função $s(f)$ com um valor aleatório entre 0 e 1 denotado por p , obtido para cada formiga. Se $s(f) \geq p$ então a formiga transportará alimento, caso contrário, não transportará alimento nesta iteração. Note que mesmo a região de atração sendo inviável, pode ocorrer que formigas que estejam deixando a região transportem alimento, pois $s(f)$ não é nulo.

A obstrução do terreno também assume valores no intervalo fechado $[0,1]$. A obstrução do terreno assume valor máximo igual a 1 e mínimo igual a 0. Do formigueiro até a bifurcação o valor da obstrução do terreno é constante e não é atualizado a cada iteração. Na trilha superior B_1 e na inferior B_2 , a obstrução do terreno é atualizada a cada iteração por uma função exponencial. Em B_1

utilizamos a função $o_1(t) = e^{-\frac{t}{40}}$ e em B_2 a função $o_2(t) = e^{-\frac{1}{40}(t-400)}$ se $t \geq 400$ e $o_2(t) = 1$ se $t < 400$, onde t é o número de iterações.

Os gráficos das funções s_1 (sinal químico B_1), s_2 (sinal químico B_2), o_1 (obstrução do terreno B_1), o_2 (obstrução do terreno B_2) são exibidos na figura 3.

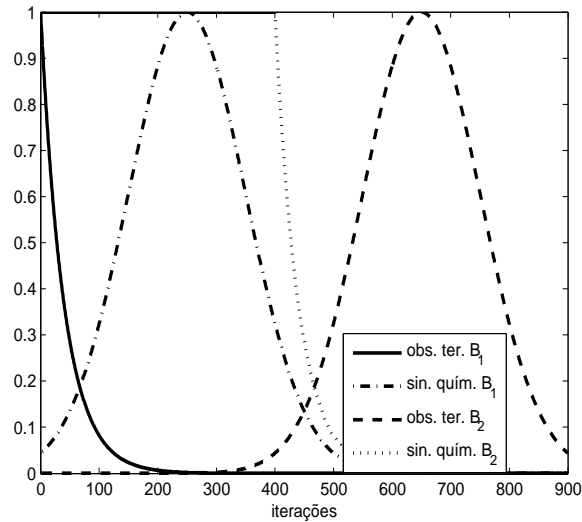


Figura 3: Gráficos do sinal químico (sin. quím.) e da obstrução do terreno (obs. ter.) em função do número de iterações.

4.2 Densidade e Acesso das Formigas

Em cada região da trilha, isto é, do formigueiro até a bifurcação, na trilha superior e na trilha inferior calculamos a densidade populacional das formigas; ou seja, contamos o número de formigas em cada iteração e dividimos esse número pela área da região. Esse valor será utilizado para a tomada de decisão em relação ao deslocamento das formigas.

O acesso das formigas é a variável de saída de um SBRF onde as variáveis de entrada são sinal químico e obstrução do terreno.

As funções de pertinência das variáveis linguísticas de entrada e de saída são trapezoidais; os termos linguísticos da obstrução do terreno são pequena, média e grande; e do sinal químico são fraco, médio e forte, que são apresentadas

nas figuras 4 e 5. As funções de pertinência da variável linguística acesso das formigas é mostrada na figura 6; os termos linguísticos são baixíssimo, muito baixo (M. Baixo), baixo, médio baixo (med. Baixo), médio, alto e muito alto (M. alto).

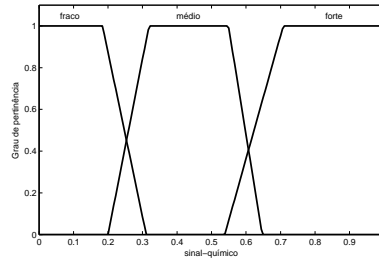
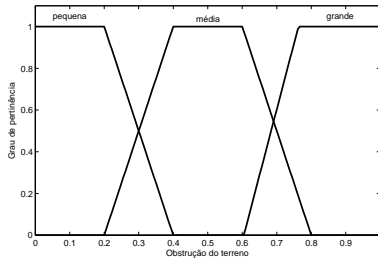


Figura 4: Funções de pertinência da obstrução do terreno. Figura 5: Funções de pertinência do sinal químico.

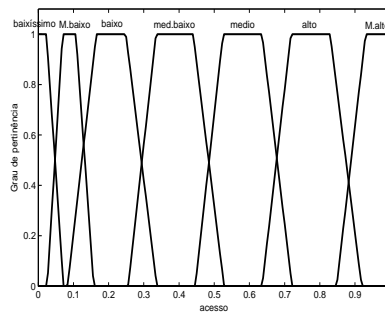


Figura 6: Funções de pertinência do acesso das formigas.

A base de regras foi construída com o auxílio do especialista na área de entomologia, o Prof. Dr. Heraldo L. Vasconcelos e é apresentada a seguir:

1. Se a obstrução é pequena e o sinal químico é fraco então o acesso é baixo (Este caso representaria uma trilha recém-abandonada pelas formigas e que portanto ainda está desobstruída porém já perdeu quase todos os sinais químicos);
2. Se a obstrução é pequena e o sinal químico é médio então o acesso é médio

(Este caso representaria uma trilha ainda ativa mas onde a atividade das formigas está diminuindo);

3. Se a obstrução é pequena e o sinal químico é grande então o acesso é muito alto (Este caso representaria uma trilha estabelecida em plena atividade);
4. Se a obstrução é média e o sinal químico é fraco então o acesso é muito baixo (Este caso representaria uma trilha que já foi abandonada há mais tempo do que na regra 1 e portanto a obstrução é um pouco maior);
5. Se a obstrução é média e o sinal químico é médio então o acesso é médio baixo;
6. Se a obstrução é média e o sinal químico é forte então o acesso é alto;
7. Se a obstrução é grande e o sinal químico é fraco então o acesso é baixíssimo;
8. Se a obstrução é grande e o sinal químico é médio então o acesso é baixo; (As regras de 7 e 8 representam a reocupação de uma trilha abandonada há muito tempo, enquanto 5 e 6 representam as fases seguintes dessa reocupação).

O especialista afirma que, em geral, no fenômeno biológico do deslocamento das formigas não ocorre o fato da obstrução do terreno ser grande e o sinal químico ser forte, assim apresentamos apenas 8 regras fuzzy. Para cada posição da região obtemos os valores da obstrução do terreno através das funções o_1 e o_2 e os valores do sinal químico através de s_1 , s_2 e $s(f)$; os quais são utilizados para determinar o acesso da formiga em cada posição, através do SBRF.

Consideramos que o deslocamento de uma formiga é favorável, se o valor do acesso for maior que o valor de densidade da região da trilha em que a formiga se encontra ou, se o valor do acesso for maior que um número aleatório entre 0 e 1, caso a formiga se encontre na região de atração. Caso contrário, o deslocamento é desfavorável e a formiga permanece parada. Mesmo o deslocamento sendo favorável, pode ocorrer da formiga não se deslocar, caso todas as células escolhidas, para as possíveis direções, estiverem ocupadas. Esse processo ocorre a cada iteração para todas as formigas e a cada 10 iterações ocorre o processo de saída de formigas do formigueiro, criando assim, um fluxo de deslocamento. Se a entrada do formigueiro estiver vazia, no máximo três formigas saem do formigueiro a cada 10 iterações, enquanto houver uma região de atração viável.

4.3 Direções do Deslocamento das Formigas

Inicialmente, convencionou-se que as formigas se direcionam e se deslocam em sentido à região de atração superior. Quando essa região deixa de ser viável, as formigas passam a se deslocar para a região de atração inferior. Quando a região de atração inferior também não é mais viável, todas as formigas se deslocam em sentido ao formigueiro.

O deslocamento das formigas pode ocorrer em três direções possíveis que dependem da região que elas se encontram. Essas direções podem ser: Norte (\uparrow), Sul (\downarrow), Leste (\rightarrow), Oeste (\leftarrow), Nordeste (\nearrow), Noroeste (\nwarrow), Sudeste (\searrow) e Sudoeste (\swarrow). Formigas sem carregamento estão sempre se dirigindo a uma das regiões de atração, já as formigas com carregamento estão sempre se dirigindo ao formigueiro. As tabelas 1 e 2 apresentam as direções nas regiões de deslocamento das formigas sem carregamento (a abreviação V. Fom. significa volta das formigas para o formigueiro) e com carregamento, respectivamente.

Tabela 1: Deslocamento das formigas sem carregamento.

| Regiões | Direções | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|------------|--------------|------------|
| | Ida B_1 | | | Ida B_2 | | | V. Fom. | | |
| Formigueiro-Bifurcação | \nearrow | \rightarrow | \searrow | \nearrow | \rightarrow | \searrow | \nwarrow | \leftarrow | \swarrow |
| Trilha Vertical-Acima Bifurcação | \nwarrow | \uparrow | \nearrow | \swarrow | \downarrow | \searrow | \swarrow | \downarrow | \searrow |
| Trilha Vertical-Abaixo Bifurcação | - | - | - | \swarrow | \downarrow | \searrow | \nwarrow | \uparrow | \nearrow |
| Trilha Horizontal-Superior | \nearrow | \rightarrow | \searrow | \nwarrow | \leftarrow | \swarrow | - | - | - |
| Trilha Horizontal-Inferior | - | - | - | \nearrow | \rightarrow | \searrow | \nwarrow | \leftarrow | \swarrow |

Tabela 2: Deslocamento das formigas com carregamento.

| Regiões | Direções |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| Formigueiro-Bifurcação | \nwarrow \leftarrow \swarrow |
| Trilha Vertical-Acima Bifurcação | \swarrow \downarrow \searrow |
| Trilha Vertical-Abaixo Bifurcação | \nwarrow \uparrow \nearrow |
| Trilha Horizontal-Superior | \nwarrow \leftarrow \swarrow |
| Trilha Horizontal-Inferior | \nwarrow \leftarrow \swarrow |

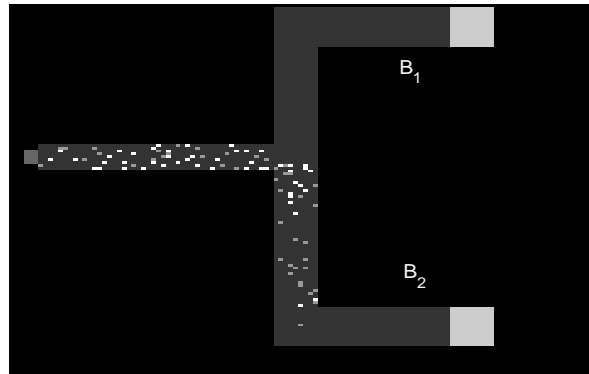


Figura 8: O deslocamento das formigas com carregamento e sem carregamento da região de atração inferior para o formigueiro.

Nas figuras 9 e 10 estão representados dois gráficos do número de formigas com carregamento em função do número de iterações; no gráfico de linha contínua as formigas carregadas coletaram alimento na região de atração superior (RA Superior) e no gráfico tracejado as formigas carregadas coletaram alimento da região de atração inferior (RA Inferior). A simulação realizada que resulta a figura 9 consideramos que a quantidade de alimentos (Q) disponível na RA Superior é maior do que na RA Inferior. Na figura 10, a simulação do AC foi realizada considerando-se que a quantidade Q disponível na RA Inferior é maior do que na RA Superior, assim, a coleta de alimentos na região de atração inferior é maior do que a coleta de alimentos na região de atração superior.

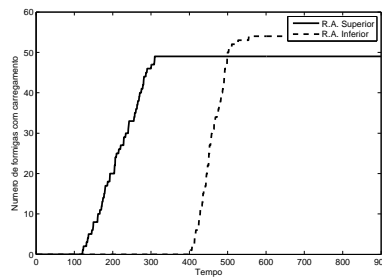
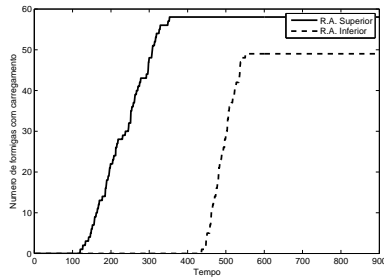


Figura 9: Maior número de formigas com carregamento em função do número de iterações na RA Superior.

Figura 10: Maior número de formigas com carregamento em função do número de iterações na RA Inferior.

6. Conclusões

A modelagem fuzzy permitiu que fossem incorporadas no AC questões complexas que influenciam o acesso das formigas, tais como: a obstrução do terreno e o sinal químico. Além disso, as informações do especialista foram fundamentais para a construção de funções que modelam a obstrução do terreno e o sinal químico em B_1 e em B_2 . O acesso das formigas foi comparado com a densidade demográfica para a tomada de decisão quanto ao deslocamento das formigas. A recuperação da trilha foi modelada considerando que as formigas possuem certa tendência a seguir o caminho marcado com o ferômonio e que as regiões menos visitadas possuem menos quantidade de feromônios (Dorigo e Stützle, 2004).

Um aperfeiçoamento do modelo pode ser realizado considerando-se outras regiões de atração ou que as regiões de atração podem ser renovadas, tornando-se novamente viáveis.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece o auxílio financeiro ao PIBIC-FAPEMIG da UFU (Processo n° IC-FAPEMIG2014-0105).

Referências

- Barros, L. e Bassanezi, R. (2010). *Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática*, volume 5. Coleção IMECC - Textos Didáticos, Campinas, SP, 2^a edição.
- Dorigo, M. e Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Ermentrout, G. e Edelstein-Keshet, L. (1993). Cellular automata approaches to biological modeling. *Journal Theoretical Biology*, 160:97–133.
- Fitzgerald, K., Hellerb, N., e Gordon, D. M. (2012). Modeling the spread of the argentine ant into natural areas: Habitat suitability and spread from neighboring sites. *Ecological Modelling*, 247:262–272.
- Hölldobler, B. e Wilson, E. O. (1990). *The Ants*. Springer, Berlin.
- Jafelice, R., Almeida, C., Meyer, J., e Vasconcelos, H. (2009). Dispersal of leaf-cutting ants: Fuzzy mathematical modeling, numerical approximation and simulations. In *2009 IFSA WORLD CONGRESS - 2009 EUSFLAT CONGRESS*, pag. 271–276, Lisboa-Portugal.
- Jafelice, R., Almeida, C., Meyer, J., e Vasconcelos, H. (2011). Fuzzy parameters in a partial differential equation model for population dispersal of leaf-cutting ants. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 12:3397–3412.
- John, A., Schadschneider, A., Chowdhury, D., e Nishinari, K. (2004). Collective effects in traffic on bi-directional ant-trails. *Journal Theoretical Biology*, 231(2):279–285.
- Vasconcelos, H. (1990). Foraging activity of two species of leaf-cutting ants (atta) in a primary forest of the central amazon. *Insectes Sociaux*, 37(2):131–145.
- Watmough, J. e Edelstein-Keshet, L. (1995). Modelling the formation of trail networks by foraging ants. *Journal Theoretical Biology*, 176:357–371.
- Wolfram, S. (1994). *Cellular Automata and Complexity*. Addison-Wesley publishing Company, N. York.