

Inteligência Coletiva: Rotação da Direção de Busca de Presas em uma Colônia de Formigas (*Eciton burchelli*)

Raul Abreu de Assis¹,

Dep. de Matemática, UNEMAT, 78390-000 – Barra do Bugres/MT.

Wilson Castro Ferreira Jr.²,

DMA, IMECC–UNICAMP, 13.083-970 – Campinas/SP.

Resumo. Neste trabalho estendemos o modelo de correção de Denebourg *et al.* para estudar a escolha da direção de busca de presas em uma colônia de formigas (*Eciton Burchelli*). Os resultados das simulações do modelo sugerem que a espécie é capaz de escolher eficientemente a direção de busca de presas, através de um processo auto-organizado. Essa eficiência é uma propriedade emergente do sistema, indicando que a espécie biológica pode estar empregando uma estratégia de “Inteligência de Bando”.

Palavras-chave: *Forrageamento; Modelagem; Colônia de Formigas.*

1 Introdução

Sob diversas circunstâncias, colônias de insetos sociais, em particular, colônias de formigas, devem tomar “decisões”. Um novo local para o ninho,

¹raulassis@yahoo.com

²wilson@ime.unicamp.br

uma direção para a busca de presas, qual dentre várias fontes de alimento deve ser explorada, são exemplos de opções que são feitas pela colônia. Entretanto, as formigas e os insetos sociais de uma maneira geral, apresentam uma característica interessante em sua estrutura social: a ausência de um gerenciamento, de um comando central de onde partem essas “decisões” da colônia. Na verdade, em muitos casos, ficou demonstrado que essas decisões são alcançadas através da própria dinâmica de interação dos agentes entre si e com o meio, através de um processo auto-organizado (Bonabeau et al., 1999; Camazine e Sneyd, 1991; Deneubourg et al., 1989).

Observamos que, além de tomar uma “decisão”, as colônias de insetos sociais o fazem, de modo geral, de maneira *eficiente*, pois, caso contrário, não seriam capazes de sobreviver ao processo de seleção natural. Nosso objetivo neste artigo é estudar o processo de escolha de uma direção coletiva de busca de presas na espécie *Eciton burchelli*, mostrando que um processo de tomada de decisão eficiente pode emergir da própria dinâmica do sistema.

2 O Fenômeno de Correição

2.1 Formigas-Correição

O fenômeno de correição é tido como um dos mais impressionantes do mundo dos insetos. Durante uma correição da espécie *Eciton burchelli*, cerca de 200 mil indivíduos se engajam na busca de presas, realizando verdadeiros “arrastões”, capturando várias espécies de insetos (formigas, vespas, gafanhotos) e até mesmo pequenos vertebrados (Gotwald Jr., 1995). Durante a correição, os indivíduos criam uma frente de busca, que avança, capturando presas, formando atrás dela uma fila organizada, onde os indivíduos transportam presas de volta ao ninho, como na figura 1- c).

Para coordenar as ações dos indivíduos, as formigas utilizam uma substância química, denominada feromônio. Esse feromônio é a principal fonte de orientação dos indivíduos, uma vez que eles são praticamente cegos (Franks

et al., 1991). Dessa maneira, o padrão de correição é um resultado da interação dos agentes, que depositam feromônio e o utilizam para se orientar.

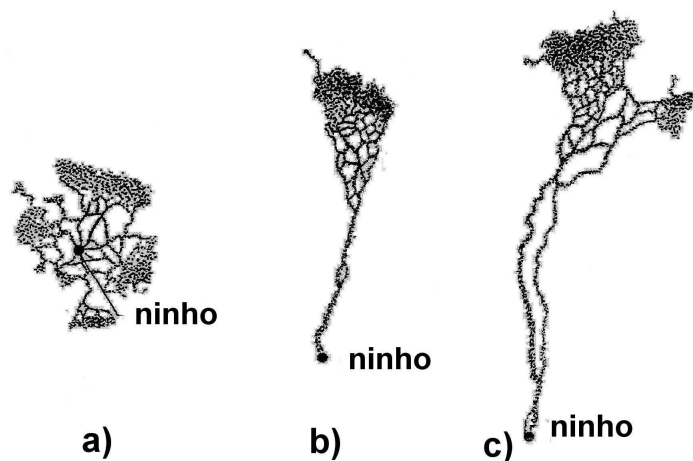


Figura 1: Formação do padrão de correição na espécie *Eciton Burchelli*, extraído de (Gotwald Jr., 1995, p. 114). **a)** Durante o início da correição ainda não há uma direção coletiva bem estabelecida. **b) e c)** Os indivíduos se concentram em apenas *uma* direção de busca, criando uma direção coletiva.

Uma característica que se observa nos padrões de correição dessa espécie é a emergência de uma direção coletiva de correição, como ilustrado na figura 1. Durante o período estacionário (que dura aproximadamente três semanas), a colônia realiza diversas correições, geralmente uma por dia, devendo, a cada nova correição “escolher” uma direção coletiva de busca de presas (Hölldobler e Wilson, 1990).

Estudos sobre a seqüência de escolha de direções da espécie *Eciton burchelli* (Franks e Fletcher, 1983), sugerem que a escolha *não* é aleatória, senão que a colônia evita repetir correições em direções já utilizadas. Dessa forma, a espécie exibe um comportamento eficiente, evitando regiões com baixa densidade de presas.

A questão que nos ocupa então, é a compreensão do processo de escolha de direção, considerando-se que os indivíduos são extremamente simples sob

o ponto de vista comportamental. Isto é, não deve ser incluída nenhuma percepção teleológica e nem capacidades modulares para resolução individual de problemas complexos constituídos de várias etapas. Enfim, as formigas são diligentes e sistemáticas, mas não criativas.

2.2 O Modelo

O modelo proposto é uma extensão dos trabalhos de Bonabeau et al. (1999); Denebourg et al. (1989) e Franks et al. (1991). A seguir, listamos as principais hipóteses do modelo.

1. Por simplicidade, representamos o plano bidimensional onde ocorre a correição como uma malha discreta. Utilizamos uma matriz $A(i, j)$ para representar a quantidade de feromônio em cada ponto e uma matriz $C(i, j)$ para representar a quantidade de presas em cada ponto da malha. A atualização temporal do sistema é feita de maneira discreta
2. Agentes que não estão carregando presas depositam F_s unidades de feromônio ao se movimentar para qualquer ponto da malha. Agentes carregando presas depositam F_c unidades de feromônio ao se movimentar, simulando o recrutamento de indivíduos para regiões com presas. Há um limite de saturação de F_{sat} unidades de feromônio por ponto da malha, acima dessa quantidade não há mais o depósito de feromônio. Uma fração σ do feromônio evapora por iteração do modelo.
3. Ao deixar o ninho, cada agente escolhe uma direção principal de busca (de 1 a 8), de acordo com a quantidade de feromônio nos pontos adjacentes à colônia, conforme figura 2. A probabilidade de escolha de cada direção é determinada pela expressão a seguir:

$$P_i = \frac{(F_i + \bar{k})^{\bar{n}}}{\sum_{j=1}^8 (F_j + \bar{k})^{\bar{n}}} \quad i = 1, \dots, 8. \quad (2.1)$$

onde \bar{k} e \bar{n} são parâmetros.

4. Uma vez definida a direção principal de busca, o agente passa a escolher somente entre *três* possíveis direções de movimentação, conforme figura 2- b). A probabilidade de escolha dessas direções é dada por:

$$P_i = \frac{(F_i + k)^n}{\sum_{j=-1}^1 (F_{p+j} + k)^n} \quad i = p - 1, p, p + 1. \quad (2.2)$$

onde p denota o índice da direção principal de forrageamento escolhida pelo agente, k e n são parâmetros do modelo. O formato específico das expressões (2.1) e (2.2) é baseado em experimentos com formigas realizados em laboratório Bonabeau et al. (1999); Denebourg et al. (1989).

5. Quando um agente encontra uma presa no ponto (i, j) da malha, atualizamos C , fazendo $C(i, j) \leftarrow C(i, j) - 1$ e invertemos sua direção principal de movimentação, que passa a se movimentar na direção de *retorno* à colônia.
6. A cada iteração, cada agente deve decidir entre mover-se ou ficar parado, simulando a velocidade dos agentes, que depende da quantidade de feromônio percebida pelos mesmos. Um agente que percebe uma grande quantidade de feromônio se movimenta rapidamente, pois a trilha está bem marcada, todavia, se o estímulo químico é reduzido, sua velocidade diminui. A função escolhida e ajustada a dados experimentais por Franks *et al.* Franks et al. (1991) foi a seguinte:

$$P(T) = [1 + \tanh(T/100 - 1)]/2 \quad (2.3)$$

onde T é a quantidade de feromônio percebida pelo agente e $P(T)$ é a probabilidade do agente se mover. Em nosso modelo $T = F_{p-1} + F_p + F_{p+1}$, onde p é o índice de sua direção principal de movimentação. No caso da figura 2- b), $T = F_2 + F_3 + F_4$.

7. Há um limite máximo de 20 agentes por ponto da malha. Caso um agente escolha se movimentar para um ponto lotado, então ele é deslo-

cado para um ponto livre adjacente ao mesmo. Se todos os pontos adjacentes estiverem lotados, o agente permanece parado.

8. A cada iteração, uma quantidade Q de novos agentes deixa a colônia. Esses agentes são introduzidos no ponto da malha onde se localiza a colônia. Caso o mesmo se encontre lotado, nenhum agente é introduzido.

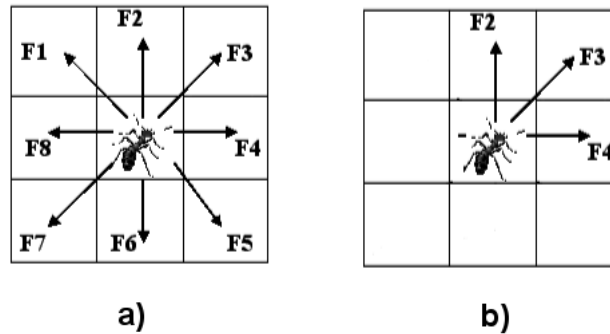


Figura 2: **a)** No espaço discretizado, o agente que deixa a colônia pode escolher entre oito direções principais de busca. A probabilidade de escolha de cada direção é dada por $P_i = (F_i + \bar{k})^{\bar{n}} / [\sum_{j=1}^8 (F_j + \bar{k})^{\bar{n}}]$. **b)** Uma vez escolhida a direção principal de busca de presas, o agente passa a escolher entre apenas três direções possíveis de movimento. No caso acima a direção 3 foi escolhida como principal, a movimentação é regida pela expressão 2.2.

Com esses ingredientes é fácil construir um programa de maneira a simular o processo de correição, cujos resultados das simulações apresentamos a seguir. Para maiores detalhes a respeito do modelo e da implementação computacional, indicamos Assis (2003).

3 Simulações

3.1 Emergência de uma Direção Coletiva

Em primeiro lugar, antes de verificarmos se a dinâmica do sistema pode levar a uma seqüência de escolhas de busca eficiente, devemos antes mostrar que o modelo apresenta a propriedade da emergência de uma direção coletiva de correição.

A seguir, apresentamos o conjunto de parâmetros utilizado nas simulações do modelo:

$\bar{n} = 4$	$n = 2$	$\bar{k} = 60$	$k = 5$	$Q = 10$
$P(T) = \text{eq. (2.3)}$	$F_{sat} = 1000$	$F_c = 10$	$F_s = 1$	$\sigma = 1/30$

onde k , n , $P(T)$, σ , F_{sat} , F_c , F_s , Q são os parâmetros utilizados (alguns estimados experimentalmente) por Denebourg *et al.*, enquanto \bar{n} e \bar{k} foram obtidos através de repetidas simulações do modelo, de maneira a obter o comportamento desejado.

A figura 3 apresenta o fenômeno da emergência de uma direção coletiva no modelo. Convém mencionar a propriedade de auto-organização do sistema que, sem nenhuma influência externa é capaz de “escolher” uma direção coletiva de forrageamento.

3.2 Rotação da Direção Coletiva de Busca

Para investigar se a colônia representada pelo modelo matemático é capaz de evitar direções de busca utilizadas previamente, realizamos repetidas simulações computacionais, observando, finalmente, dois principais mecanismos através dos quais a espécie pode estar implementando a “escolha inteligente” de direção de busca:

1. “Taxia” da frente de correição para regiões de maior densidade de presas.

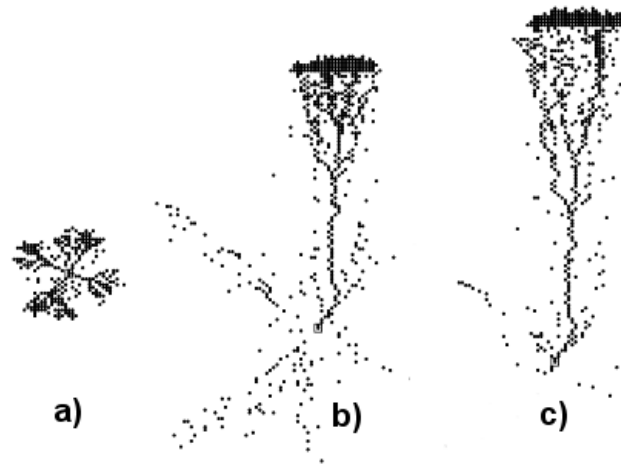


Figura 3: Emergência de uma direção coletiva de correição em simulações do modelo matemático. **a)** Assim como no fenômeno biológico, não há uma direção coletiva estabelecida durante o início do processo de correição, com 100 iterações do modelo. **b)** e **c)** Os agentes passam a se concentrar em apenas uma direção, padrões obtidos com 400 e 500 iterações do modelo, respectivamente.

2. Processo de “prospecção local” durante o início da correição, elegendo direções de maior densidade de presas como direção coletiva de busca.

Para constatar o mecanismo 1, construímos o seguinte cenário de simulação:

- Criamos uma distribuição aleatória de presas, $C(i, j)$. Cada ponto da malha com probabilidade $1/2$ de conter uma presa.
- Fazemos com que a colônia de agentes realize uma correição, escolhendo uma direção coletiva e atuando sobre a distribuição de presas $C(i, j)$, removendo parte delas.
- Utilizamos a distribuição $C(i, j)$ *modificada* pela simulação anterior, obrigando a colônia a realizar uma correição na *mesma* direção que a

correição da simulação anterior. Isso é feito para observar o comportamento dos agentes ao se deparar com regiões de baixa densidade de presas.

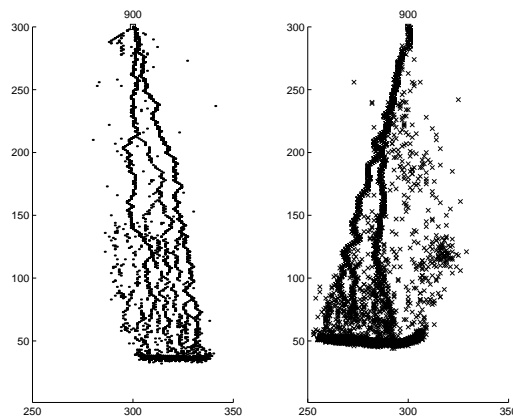


Figura 4: A colônia é “forçada” a efetuar duas correições consecutivas na mesma direção. a) Padrão de correição obtido na primeira simulação. b) Durante a segunda correição, os agentes desviam da área utilizada pela primeira, evitando regiões de baixa densidade de presas.

Na figura 4 ilustramos os dois padrões de correição obtidos através da simulação desse cenário. Observamos que na segunda correição a maioria dos agentes desvia da área que foi utilizada pela primeira, evitando regiões de baixa densidade de presas. Esse comportamento é extremamente robusto e foi observado em todas as simulações do modelo com esses parâmetros. Convém mencionar que essa robustez provém, em parte, do fato de que a colônia não depende sensivelmente do comportamento de *um* agente. Se um indivíduo falha em encontrar o caminho para uma região de maior densidade de presas, isso não afeta o comportamento *coletivo* da colônia. Ou seja, a propriedade de taxia da frente de correição é uma propriedade coletiva, emergente da dinâmica do sistema e não uma propriedade proveniente das habilidades de um indivíduo isolado, super dotado, ou líder.

Durante o início do processo de correição, existe uma fase em que a colônia ainda não estabeleceu uma direção coletiva de busca, que pode ser observada tanto no fenômeno biológico (figura 1- a)), quanto nas simulações do modelo matemático (figura 3- a)). Através do mecanismo 2 (prospecção local) a colônia utiliza essa fase inicial de “indecisão” para estabelecer uma escolha eficiente de direção coletiva de busca, conforme as seguintes propriedades do modelo:

1. Maiores concentrações de presas em uma direção acarretam uma maior probabilidade de escolha daquela direção.
2. Existe uma “região de influência”, determinada por um valor r_{max} (distância da colônia), onde a distribuição de presas tem relevância para a escolha da direção coletiva de correição. Presas além dessa região têm pouca ou nenhuma influência na escolha da colônia.
3. Ao realizar uma correição em uma direção específica, a colônia reduz significativamente a concentração de presas naquela direção, resultando em uma menor probabilidade de uma escolha consecutiva da mesma direção.

Para constatar o comportamento 1 acima, simulamos o seguinte cenário:

- Dividimos a distribuição de presas no plano em quatro setores: $C1$, $C2$, $C3$ e $C4$, cada uma ocupando um quadrante como na figura 5, e *sem* sobreposição.
- Associamos à distribuição da direção 2, isto é, aquela referente ao quadrante norte, uma probabilidade fixa $S = 1/2$ de cada ponto da malha conter uma presa, relacionando às demais uma probabilidade s , de tal forma que $S/s = \gamma > 1$. Dessa forma, criamos uma direção que é mais rica em presas em relação às outras (figura 5).

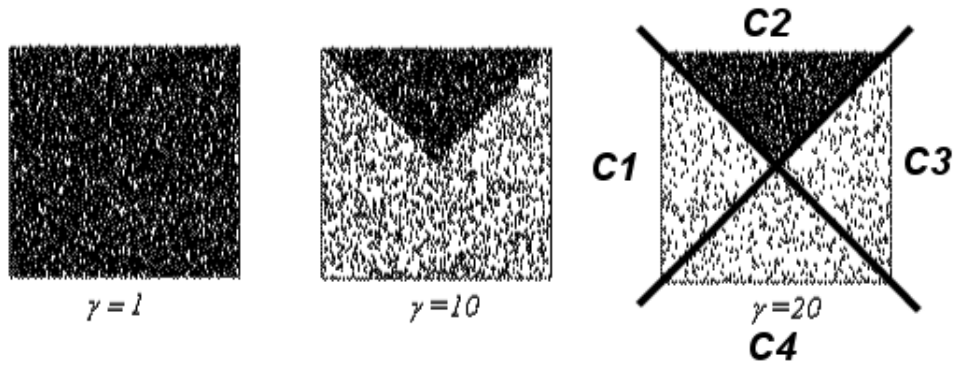


Figura 5: Cenário de simulação para correção, os pontos pretos representam a distribuição de presas. Varia-se o valor de γ , que representa o quanto o setor $C2$ é mais rico que os outros setores.

- Para cada valor de γ , realizamos um grande número de simulações, registrando as direções escolhidas em cada uma. Observa-se que, a cada nova simulação, renovam-se as distribuições $C1, \dots, C4$.

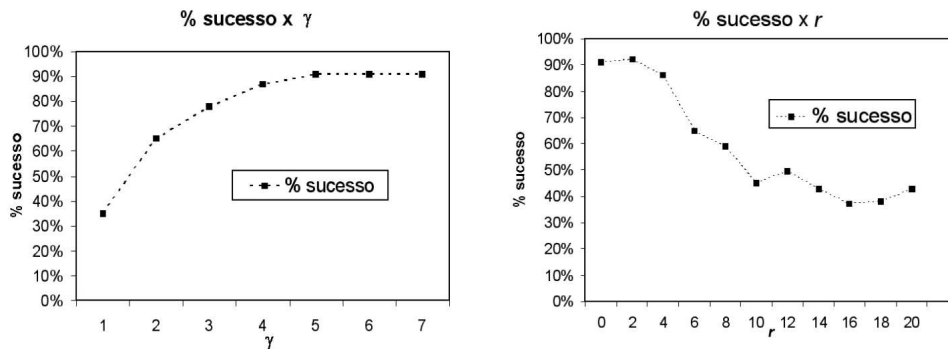


Figura 6: **a)** Índice de “sucesso” da colônia em detectar uma direção mais rica em função de $\gamma = S/s$. **b)** Índice de “sucesso” da colônia em detectar região mais rica em função da distância mínima das presas à colônia (r).

Dessa maneira, podemos estimar um índice de “sucesso” da colônia em detectar a presença de uma região mais rica em presas. Definimos o índice de sucesso como a percentagem das simulações em que a correção foi efetuada

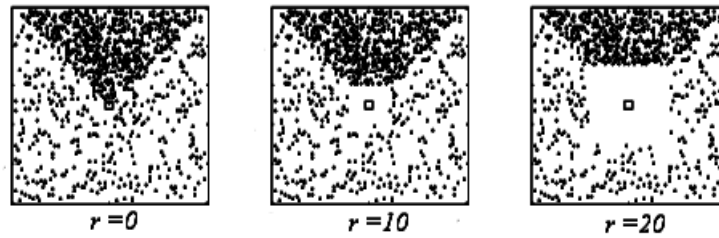


Figura 7: Cenários com r variável. As presas estão presentes apenas a uma distância maior que r , medido em pontos da malha. Estuda-se qual é o valor máximo de r em que as presas influenciam a direção de forrageamento da colônia.

nas direções 1, 2 ou 3, que são as direções que incluem o quadrante $C2$. O índice de sucesso em função de γ aparece na figura 6- a), indicando que a colônia do modelo é capaz de detectar direções com maior densidade de presas.

Para constatar a propriedade 2, realizamos simulações da seguinte maneira:

- Da mesma maneira que no cenário anterior, divide-se a distribuição de presas no plano em quatro: $C1, C2, C3$ e $C4$. Escolhe-se então uma direção principal (direção 2) para distribuir as presas, de forma que essa região seja mais rica que as outras ($\gamma = 5$).
- As distribuições são diferentes de zero apenas a partir de um certo r variável, isto é, as presas devem estar a uma distância mínima r da colônia como na figura 7 (r medido em pontos da malha).
- Para cada r , realizam-se várias simulações, verificando a direção escolhida pela colônia e a frequência com que a colônia é capaz de detectar a abundância de presas na direção que contém maior densidade de presas (direção 2).

O índice de “sucesso” em função da distância r é apresentado na figura 6- b). De onde se estima, graficamente, que a maior distância (sob esse

conjunto de parâmetros!) que a colônia modelada pode detectar a presença de uma direção mais rica é $r_{max} \approx 16$, medido em pontos da malha.

Finalmente, confirmando a propriedade 3, verifica-se que a densidade de presas em uma direção que sofreu um processo de correção, dentro do raio de influência r_{max} é, em média, 2.7 vezes inferior à densidade das direções que não sofreram um processo de correção.

Dessa maneira, através das propriedades 1, 2 e 3, concluímos que a colônia do modelo exibe um mecanismo de “prospecção local” que evita repetir direções de correção, criando um comportamento coletivo eficiente. Vale notar que não assumimos nenhuma capacidade de memória por parte dos indivíduos, que obedecem apenas regras simples de movimentação, orientados pelo feromônio. Como resultado da interação dos indivíduos, temos uma propriedade emergente de “Inteligência coletiva”, onde “*o todo é mais do que a soma das partes*”.

4 Conclusão

A importância de se estudar mecanismos de auto-organização em insetos sociais não se restringe apenas à análise do fenômeno do ponto de vista biológico, na tentativa de compreender certos comportamentos das espécies. Se compreendermos as razões que levam à auto-organização dos indivíduos para desenvolverem certas tarefas coletivas, teremos condições de formular modelos matemáticos que poderão ser usados para simular situações análogas em áreas científicas diversas.

Algoritmos inspirados no comportamento de recrutamento das formigas foram implementados com sucesso para fazer o roteamento de dados em uma rede telefônica Bonabeau et al. (1999) e também aplicados a diversos problemas de otimização Dorigo e Di Caro (1999). Também a robótica está encontrando nos mecanismos de auto-organização e de “Inteligência Coletiva” uma alternativa para implementar conjuntos de robôs inteligentes Bonabeau et al. (1999). Agrupamento de objetos e transporte coletivo de um item são

exemplos de tarefas implementadas a partir de modelos do comportamento de insetos sociais.

Dessa forma, o modelo proposto além de contribuir com uma possível explicação para o comportamento para o comportamento da espécie *Eciton burchelli*, apresenta um método eficiente de procura pelo qual agentes de comportamento relativamente simples podem explorar recursos em uma vizinhança.

5 Agradecimentos

Agradecemos a Luiz Alberto Diaz Rodrigues, Diomar Cristina Mistro e Rodney Carlos Bassanezi pelas excelentes sugestões. Raul Assis agradece o apoio financeiro da CAPES que tornou possível a realização dessa pesquisa.

Referências

- Assis, R. A. (2003). Modelos em estratégias de forrageamento de formigas. Dissertação de Mestrado, IMECC – Unicamp.
- Bonabeau, E., Dorigo, M., e Theraulaz, G. (1999). *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, Oxford, UK.
- Camazine, S. e Sneyd, J. (1991). A model of collective nectar source selection by honey bees: self-organisation through simple rules. *J. Theor. Biol.*, 149:547–571.
- Deneubourg, J. L., Goss, S., Franks, N., e Pasteels, J. M. (1989). The blind leading the blind: modeling chemically mediated army ant raid patterns. *J. of Insect Behavior*, 2:719–725.
- Dorigo, M. e Di Caro, G. (1999). Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life*, 5:137–172.

Franks, N. R. e Fletcher, C. R. (1983). Spatial patterns in army ant foraging and migration: *Eciton burchelli* on Barro Colorado Island Panama. *Behavioral Ecol. Sociobiology*, 12:261–270.

Franks, N. R., Gomez, N., Goss, S., e Denebourg, J. L. (1991). The blind leading the blind in army ant raid patterns: testing a model of self-organization. *J. of Insect Behavior*, 4:583–607.

Gotwald Jr., W. H. (1995). *Army Ants: The Biology of Social Predation*. Cornell University Press, N. York, USA.

Hölldobler, B. e Wilson, E. O. (1990). *The Ants*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

