

JÚLIO CÉSAR MANSUR FILHO

MODELOS COMPUTACIONAIS PARA O PROCESSO DE  
FORRAGEAMENTO E FACILITAÇÃO SOCIAL EM  
CUPINS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2007

**JÚLIO CÉSAR MANSUR FILHO**

**MODELOS COMPUTACIONAIS PARA O PROCESSO DE  
FORRAGEAMENTO E FACILITAÇÃO SOCIAL EM CUPINS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Física Aplicada,  
para obtenção do título de *Magister  
Scientiae*.

APROVADO: 30 de julho de 2007

---

Prof. Silvio da Costa Ferreira Júnior  
(Co-orientador)

---

Prof. Og Francisco Fonseca de Souza  
(Co-orientador)

---

Prof. José Arnaldo Redinz

---

Prof. Eraldo Rodrigues de Lima

---

Prof. Marcelo Lobato Martins  
(Orientador)

À minha família

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde.

Aos meus pais por terem me ensinado que a vida é feita com amor, educação, honestidade, respeito, humildade e esperança.

Às minhas irmãs Sabrina, Lygiana e Stéfane e ao meu irmão André por existirem e fazerem minha vida mais feliz.

À todos os familiares que me ajudaram alcançar objetivos; em especial a vó Terezinha e a tia Lourdes.

Ao avô Rodolfo, avó Castorina, tio Reinaldo e ao amigo Edinaldo Duque, que já se foram, mas me deixaram grandes ensinamentos.

A todos os amigos, inimigos, colegas, funcionários e professores por fazerem parte da minha história.

A Tatiana, amor da minha vida, por ter me encontrado e por me amar.

Ao Prof. Marcelo Lobato, por ter me orientado durante dois anos e meio na graduação e dois anos no mestrado, e ao Prof. Sílvio, pelas inúmeras discussões sobre a minha dissertação.

A CAPES pelo suporte financeiro e à Universidade Federal de Viçosa.

## **BIOGRAFIA**

JÚLIO CÉSAR MANSUR FILHO, filho de Myrian Pereira da Silva e Júlio César Mansur, nasceu em Curvelo, Minas Gerais, em 23 de Janeiro de 1983. Aos dezesseis anos deixou a escola Estadual Padre Simim em Acaiaca, onde estudou desde a infância, para se formar no colégio Salesiano Dom Helvécio na cidade de Ponte Nova. Aos dezessete anos ingressou no curso de física pela Universidade Federal de Viçosa, onde formou-se bacharel em Julho de 2005 e obteve o título de mestre em física aplicada em Julho de 2007.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xiii</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1 Dispersão - imigração e emigração como um processo de busca</b>	<b>4</b>
1.1 Estratégias de otimização em forrageamento . . . . .	5
1.1.1 A caminhada dos Collembolas . . . . .	9
1.1.2 Um modelo de caminhada . . . . .	10
<b>2 A comunicação em insetos eusociais</b>	<b>12</b>
2.1 O processo de forrageamento em cupins . . . . .	13
2.2 Facilitação social . . . . .	19
<b>3 Processo de contato, gás de rede conservativo e transições de fases</b>	<b>23</b>
3.1 Processo de Contato e gás de rede conservativo . . . . .	24
3.2 Teoria de escala e análise de tamanho finito . . . . .	26
3.3 Método para simular o estado quasi-estacionário . . . . .	30
3.3.1 Descrição do método . . . . .	30

<b>4</b>	<b>Modelo para o processo de forrageamento</b>	<b>32</b>
4.1	O ambiente das iscas . . . . .	33
4.2	A formação dos túneis . . . . .	34
4.3	Resultados . . . . .	39
4.3.1	O ambiente das iscas . . . . .	39
4.3.2	A formação dos túneis . . . . .	41
4.4	Conclusão . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Modelo para a Facilitação social</b>	<b>54</b>
5.1	Modelo . . . . .	54
5.2	Resultados . . . . .	56
5.3	Conclusão . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Conclusões gerais</b>	<b>62</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Otimização do processo de forrageamento com vôos de Lévy . . . . .	7
1.2	Ângulos de bifurcação das formigas <i>Pharaoh's</i> . . . . .	8
1.3	Trilhas formadas por formigas <i>Pharaoh's</i> . . . . .	8
1.4	Padrão de movimento de um Collembola . . . . .	9
1.5	Padrões de caminhada gerados por modelo de forrageamento . . . . .	10
1.6	Constante de difusão $\times P_g$ . . . . .	11
2.1	Representação esquemática de um cupim depositando feromônio de trilha.	14
2.2	Túneis exploratórios da espécie <i>Reticulitermes santonensis</i> . . . . .	16
2.3	Ineficiência das espécies <i>R. flavipes</i> e <i>C. formosanus</i> em encontrar ali- mentos . . . . .	16
2.4	Padrões de forrageamento formados por <i>Coptotermes gestroi</i> e <i>Hetero- termes tenuis</i> . . . . .	17
2.5	Padrões de forrageamento formados por <i>R. flavipes</i> e <i>C. formosanus</i> . .	18
2.6	Número de cupins trabalhadores em atividade durante o forrageamento	18
2.7	Facilitação social em cupins. . . . .	20
2.8	Modelo para a facilitação social . . . . .	21
2.9	Comparação qualitativa entre experimento e modelo de facilitação social	22

3.1	Taxas de infecção para o processo de contato em uma dimensão . . . . .	25
3.2	Transição de fase para o processo de contato . . . . .	26
3.3	Leis de escala . . . . .	29
3.4	Comparação entre resultados obtidos pelo método de simulação quase-estacionária e por métodos convencionais . . . . .	30
4.1	Esquema do ambiente onde as trajetórias serão analisadas . . . . .	34
4.2	Ângulo mínimo entre túneis iniciais . . . . .	35
4.3	Construção de um túnel . . . . .	38
4.4	Ambiente de isca onde as caminhadas são analisadas . . . . .	39
4.5	Probabilidade de bifurcação $\times$ número de cupins dentro de um túnel . . . . .	42
4.6	Número de passos dados antes da atividade do cupim atingir um valor mínimo . . . . .	42
4.7	Função atividade para diferentes valores do parâmetro $g_k$ . . . . .	43
4.8	Padrões típicos de forrageamento gerados com $N_{ot} = 5$ . . . . .	46
4.9	Túneis que pararam de evoluir em razão da perda de feromônio de trilha em seu interior . . . . .	47
4.10	Quantidades analisadas para $N_{ot} = 5$ em função do ângulo de desvio $\alpha$ . . . . .	48
4.11	Padrões de túneis gerados com $\alpha = 5^\circ$ e diferentes valores de $N_{ot}$ . . . . .	49
4.12	Quantidades analisadas para $t_d = 0.01$ em função do ângulo de desvio $\alpha$ . . . . .	50
4.13	Quantidades analisadas para $t_d = 0.05$ em função do ângulo de desvio $\alpha$ . . . . .	51
5.1	Esquema da evolução temporal do modelo de facilitação social . . . . .	55

5.2	Quantidade de passos que um cupim poderá dar antes da sua atividade alcançar um valor mínimo . . . . .	56
5.3	Padrões espaço-temporais do modelo de facilitação social para diferen- tes valores de $g_m$ . . . . .	57
5.4	Densidade de cupins ativos em função do tempo . . . . .	58
5.5	Padrões espaço-temporais do modelo de facilitação social para difer- entes valores de $\zeta_i$ . . . . .	58
5.6	Densidade quase-estacionária para $\delta = 0$ em função do tamanho $L$ da rede . . . . .	59
5.7	Leis de escala para $\delta = 0.1$ . . . . .	60

## LISTA DE TABELAS

2.1	Tipos de comunicação durante o forrageamento de abelhas, formigas e cupins . . . . .	13
3.1	Expoentes críticos para os modelos DP, CP e CLG em uma dimensão . . . . .	29
5.1	Comparação dos expoentes críticos encontrados nesta dissertação e os expoentes dos modelos DP, CP e CLG em uma dimensão . . . . .	59

## RESUMO

MANSUR FILHO, Júlio César, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2007.

**Modelos computacionais para o processo de forrageamento e facilitação social em cupins.** Orientador: Marcelo Lobato Martins. Co-Orientadores: Silvio da Costa Ferreira Jr. e Og Francisco Fonseca de Souza.

Há um grande interesse no entendimento dos princípios dinâmicos que dão origem aos padrões espaço-temporais gerados por organismos vivos. Padrões auto-organizados complexos são vistos desde colônias de bactérias, de insetos sociais até a sociedade humana. Entre eles encontram-se os padrões de forrageamento animal associados a estratégias de busca sistemática por fontes de alimento. Nesta dissertação propomos um modelo para o forrageamento de cupins subterrâneos; tal modelo consiste de cupins que constroem túneis em um plano bidimensional infinito sujeito a uma densidade fixa de alimento distribuída aleatoriamente. Cada túnel avança por sucessivos segmentos lineares de comprimento unitário cujas direções desviam-se dos seus antecessores por um ângulo aleatório distribuído uniformemente entre  $-\alpha$  e  $\alpha$ . Cada cupim é caracterizado por um fator de ganho  $g_k$  e uma atividade  $A(t)$  que evolui no tempo de acordo com a expressão:  $A_k(t+1) = \tanh(A_k(t)g_k)$ . Se essa atividade atingir um valor mínimo, o cupim volta para o ninho, restaurando sua atividade

ao máximo ( $A=1$ ). Cada túnel é caracterizado por uma quantidade de feromônio de trilha que aumenta quando um cupim encontra comida ou entra nesse túnel. Porém, a quantidade de feromônio no túnel é reduzida em uma dada taxa depois de cada passo de tempo, isto é, após ser feito o avanço de todos os túneis. A cada  $t_l$  passos de tempo, novos cupins penetram nos túneis; a escolha em qual deles entrar é proporcional à quantidade de feromônio. Finalmente um túnel poderá bifurcar, dando origem a um novo túnel, se a quantidade de cupins neste superar um valor fixado. Além da estrutura dos túneis de forrageamento, modelamos a facilitação social em cupins dentro de um túnel de tamanho  $L$ . Nesse modelo um cupim ficará inativo se sua atividade atingir um valor mínimo  $A_{min}$ . Caso dois cupins se encontrem, suas atividades são restauradas ao máximo. A eficiência do forrageamento por meio de túneis é caracterizada em função do ângulo máximo de desvio  $\alpha$ , da taxa de decaimento de feromônio e do número de cupins dentro de um túnel necessários para a criação de um novo túnel. Para o processo de facilitação social apresentamos como a densidade de cupins ativos variam no tempo. Os padrões espaço-temporais tanto para a formação de túneis quanto para o processo de facilitação social também são apresentados.

## ABSTRACT

MANSUR FILHO, Júlio César, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2007.

**Computer Models to social facilitation and foraging process in termites.**

Adviser: Marcelo Lobato Martins; Co-advisers: Silvio da Costa Ferreira Jr. and Og Francisco Fonseca de Souza.

There is much current interest in understanding the dynamic principles that generate patterns in space and time. In biology, the complexity of self-organized patterns are seen from colonies of bacterias, of social insects to the human society. Among these, animal foraging patterns associated to the strategies of systematic search for food sources are included. In this dissertation we propose a model for the foraging of underground termites; such model consists of termites that build tunnels in a infinite two-dimensional space subject to a fixed density of food distributed at random. Each tunnel advances for successive segments of unitary length, with directions deviating from that of it predecessor for an aleatory angle evenly distributed between  $-\alpha$  and  $\alpha$ . Each termite is characterized by a gain factor  $g_k$ , and an activity  $A(t)$  that evolves in time according to expression:  $A_k(t + 1) = \tanh(A_k(t)g_k)$ . If this activity reaches a minimum value, the termite returns to the nest, restoring your activity to the maximum ( $A=1$ ). Each tunnel is characterized by quantity of pheromone trail that

increases when a termite finds food or enters in that tunnel. However, the quantity of pheromone in a tunnel is reduced at a given rate after each time step, that is, after the progress of all tunnels. After  $t_l$  time steps, new termites penetrate in tunnels; the choice in which of them to enter is proportional to the amount of pheromone. Finally a tunnel can bifurcate, creating a new one, if the amount of termites in it overcome a fixed value. In addition to the structure of the foraging tunnels, we modeled the social facilitation in termites inside a tunnel of size  $L$ . In this model, a termite will be inactive if your activity reach a minimum value  $A_{min}$ . If two termites encounter, their activities are restored to the maximum. The foraging efficiency associated to the tunnels is characterized as a function of the maximum deviation angle  $\alpha$ , the pheromone decay rate and the number of termites inside of a tunnel necessary for the creation of a new one. For the process of social facilitation we presented the evolution in time of density of active termites. The spatio-temporal patterns for tunnels formation and social facilitation process are also presented.

# INTRODUÇÃO

A natureza exhibe uma grande diversidade e complexidade de estruturas físico-químicas e biológicas, tais como padrões formados por eletrocristalização, rupturas em papéis, padrões de forrageamento de cupins subterrâneos, o movimento sincronizado do peixe escola, etc. Além desses exemplos, todos os dias nos deparamos com exemplos de grupos formados por indivíduos autônomos, seja um bando de pássaros voando em círculos no céu, uma multidão deixando uma estação de metrô, formigas marchando em uma linha contínua ou o começa e pára de de carros em um engarrafamento no trânsito. Em todos esses exemplos, cada indivíduo não tem uma visão global da sua posição em toda a estrutura formada pelo grupo. No entanto, padrões complexos emergem desse comportamento, nos fazendo sentir que deve haver leis que unifiquem e governem tais fenômenos. Mais ainda, existe um senso comum de que todos esse padrões são regulares e até mesmo previsíveis [23].

Algumas explicações atribuem a complexidade dos padrões biológicos à complexidade interna da informação genética codificada nos cromossomos [1]. Apesar de alguns elementos básicos da formação desses padrões serem codificados geneticamente, seria muito difícil descrever a diversidade dessas estruturas usando somente a informação de seus genes [1]. Sob um conjunto particular de condições iniciais,

padrões complexos poderiam surgir espontaneamente (a partir de escalas individuais) através de interações físicas e (ou) químicas internas do sistema [1].

Os campos da ecologia e dinâmica de populações têm tentado explicar a auto-organização de padrões espaço-temporais em espécies que interagem entre si e com o ambiente que os cerca, com base em quatro processos: nascimento, morte, imigração e emigração [2]. Os dois últimos processos são comumente nomeados de dispersão.

Por sua vez, a teoria do movimento e de facilitação social em insetos têm recebido uma grande atenção ao longo dos últimos anos, uma vez que o conhecimento sobre os padrões de movimento gerados por estes organismos é decisivo para o entendimento e a predição de sua dinâmica no espaço e no tempo [3]. Vários dados empíricos para o caso especial de animais forrageadores têm sido obtidos [4–10] e com eles surgiram diversos modelos teóricos [11–18] numa tentativa de explicar e prever o comportamento de tais animais.

O principal objetivo desta dissertação é estudar o movimento exploratório de cupins num habitat fragmentado sujeitos a uma baixa densidade de alimentos, levando à formação de padrões característicos da espécie. Tais padrões originam-se basicamente do processo de dispersão e de comunicação, que serão apresentados e discutidos nos capítulos 1 e 2. Outro objetivo, não menos importante que o citado acima, é estudar o efeito da facilitação social na atividade de cupins em um túnel de tamanho  $L$ . Do ponto de vista da teoria de facilitação social, a densidade de animais influencia no tempo de vida e na dinâmica do grupo. Também no capítulo 2 apresentamos um experimento com cupins que evidencia o processo de facilitação social entre eles [22].

Na seção 1.1 apresentamos o padrão de movimento encontrado para Collem-

bolas *Protaphorura armata* [3] e um modelo de caminhada [28] proposto por nós para descrevê-lo. A motivação para estudar o movimento exploratório associado ao forrageamento surgiu do modelo citado acima, uma vez ele evidencia que um caminhante, ao descrever trajetórias circulares, está em melhores condições de encontrar comida do que um outro que descrever uma caminhada puramente aleatória.

Para estudar o comportamento dos cupins dentro de um túnel, utilizaremos um modelo com interações de curto alcance e número de partículas conservadas, podendo este ser comparado ao modelo de gás de rede conservativo, que será apresentado na fig.3.1. Serão usadas teoria de escala e análise de tamanho finito para determinar a qual classe de universalidade o modelo proposto nesta dissertação pertence. A análise do processo de facilitação social em cupins será feito com base em simulações do estado quase-estacionário através do método proposto recentemente por M. M. de Oliveira e R. Dickman [36]. Toda a análise prosposta está descrita no capítulo 3.

Os modelos propostos são apresentados nos capítulos 4 e 5 juntamente com os resultados e conclusões. Finalmente, no capítulo 6 apresentamos uma conclusão geral dos resultados encontrados nesta dissertação.

# Capítulo 1

## Dispersão - imigração e emigração como um processo de busca

O processo de busca por comida, abrigo ou parceiros sexuais é uma das tarefas mais freqüentes dos organismos vivos. Nestes processos o tempo de busca é um fator que tem que ser otimizado para a sobrevivência da espécie [17]. De fato, animais devem encontrar comida eficientemente, caso contrário terão que usar, para sua sobrevivência, parte da energia armazenada para a sua reprodução [13].

Quando há uma fragmentação do habitat, pequenas populações locais e isoladas surgem. Nessas circunstâncias, a recolonização e a expansão da colônia local para outras regiões do ambiente é baseada na estratégia de dispersão dos indivíduos que a compõem [20].

Em termos ecológicos, a dispersão afeta a sobrevivência e a dinâmica da população, a distribuição e abundância das espécies e a estrutura da comunidade [8]. Em termos evolutivos, esse processo determina o fluxo de genes entre as populações,

influencia a adaptação local e a formação de uma espécie e caracteriza a dinâmica evolutiva da população [8]. Em resumo, dificilmente existe qualquer processo evolutivo ou ecológico que não seja afetado pela dispersão [8].

Nas últimas décadas, o movimento de dispersão era tratado como sendo puramente aleatório pela falta de evidências que mostrassem o contrário. No entanto, mostrou-se que duas espécies de borboletas voavam em sucessivas voltas elipsoidais que aumentam com o tempo, numa busca sistemática por um habitat melhor [8]. Mais tarde, estratégias de busca desse tipo foram confirmadas para outros tipos de animais, como formigas, esquilos, algumas espécies de pássaros, etc. [8]. Desde então, modelos teóricos de caminhadas aleatórias e caminhadas correlacionadas têm sido propostos para explicar o comportamento de dispersão de várias espécies de animais.

## **1.1 Estratégias de otimização em forrageamento**

O forrageamento é frequentemente entendido como um processo de busca biológica onde os objetos que estão sendo buscados são sítios com fontes de comida (sítios alvos). No entanto o processo de forrageamento pode ser interpretado num contexto mais amplo, como por exemplo, policiais procurando por criminosos ou na busca por crianças perdidas [19].

Ecólogos em todo o mundo tentam entender como os animais tomam decisões de como se mover no ambiente. Muitos autores concordam que um fator chave para a dinâmica de população seria a habilidade que os animais tem de se movimentar no espaço [12]. Para qualquer conjunto de condições, a melhor estratégia de busca

seria determinada em parte pelo custo da dispersão, uma vez que, sem esta, qualquer estratégia de busca seria eficiente [12]. Os custos de dispersão são muitos e podem incluir o risco de morte por fome ou por predação, e até mesmo a distância entre sítios alvos, ficando evidente que a distribuição do habitat também é um fator determinante para a dispersão. Estes custos deveriam ser também uma função do organismo em consideração, de suas habilidades e do seu comportamento [12].

Podemos descrever quantitativamente a eficiência em localizar sítios alvos espalhados aleatoriamente usando idéias de passeios aleatórios. Tais passeios podem ser classificados como passeio aleatório Browniano, que tem uma escala característica para o comprimento  $l_j$  dos passos, e passeio de Lévy, onde o comprimento dos passos não possuem uma escala característica [19]. Uma definição da distribuição de Lévy pode ser dada por

$$P(l_j) \sim l_j^{-\mu} \quad (1.1)$$

onde  $P(l)$  é a distribuição densidade de probabilidade de passos de comprimento  $l$  [19]. Teoricamente o valor  $\mu = 2.0$  é o valor que otimiza a busca de animais que realizam caminhadas de Lévy, como mostrado na figura 1.1. De fato, a distribuição de comprimentos de vôos de abelhas decai como na eq. (1.1). Similarmente, os tempos de forrageamento dos albatrozes e de veados também possuem  $\mu = 2.0$  [18, 19].

Por sua vez, sociedades de insetos são comumente vistos como o melhor modelo alcançado de vida social [1]. Como abelhas ou cupins, as formigas são famosas por sua ótima organização estrutural. Para isso, as formigas usam estímulos visuais, químicos e até magnéticos para se orientarem corretamente no seu ambiente de forrageamento

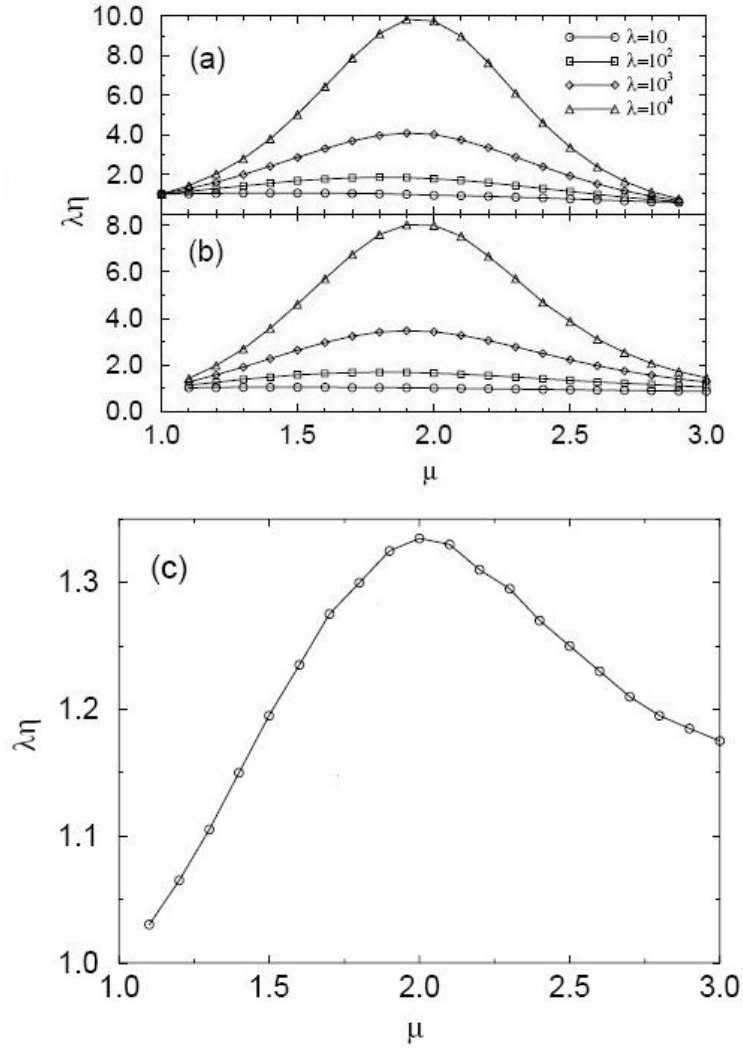


Figura 1.1: Produto da eficiência  $\eta = \frac{1}{\langle l \rangle N}$  e do livre caminho médio  $\lambda$  do forrageador entre sucessivos sítios alvos em função do parâmetro  $\mu$  que caracteriza a distribuição de Lévy. Resultados para uma dimensão [18] foram obtidos a partir de dados analíticos (a) e por meio de simulações (b). (c) Resultados de simulações em duas dimensões [18]. Na definição de eficiência,  $\langle l \rangle$  é a distância média entre vôos e  $N$  é o número de vôos dados entre dois alvos sucessivos.

[7]. Muitas espécies de formigas usam feromônio de trilha para indicar a direção do ninho e da comida. A figura 1.2 mostra que há um ângulo de bifurcação ( $\sim 60^\circ$ ) preferencial entre as formigas Pharaoh's, indicando que a geometria das trilhas podem dar a direção do ninho e da comida. Dessa forma as formigas ao desviarem na trilha com ângulos de aproximadamente  $30^\circ$  estão se direcionando entre a fonte de alimento e

o ninho [7]. Note que no retorno ao ninho as formigas tem duas escolhas: desviar-se por ângulos pequenos ( $\sim 30^\circ$ , direção do ninho) ou por ângulos grandes ( $\sim 120^\circ$ , direção do alimento). Na figura 1.3 são mostradas trilhas de forrageamento das formigas *Pharaoh's*

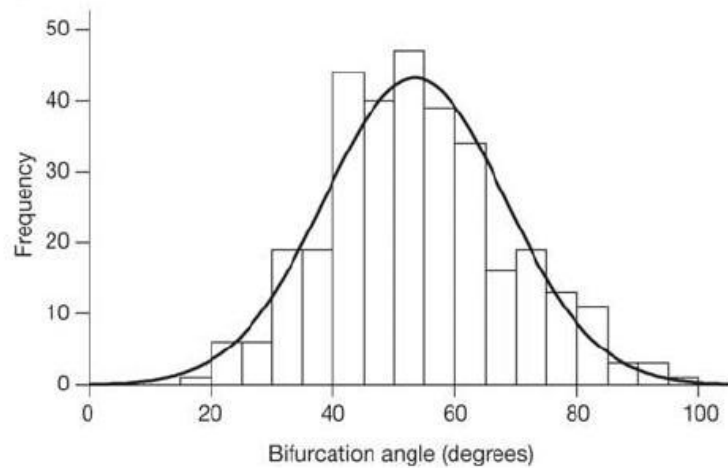


Figura 1.2: Análise dos ângulos de bifurcação para quatro trilhas das fomigas *Pharaoh's* [7].

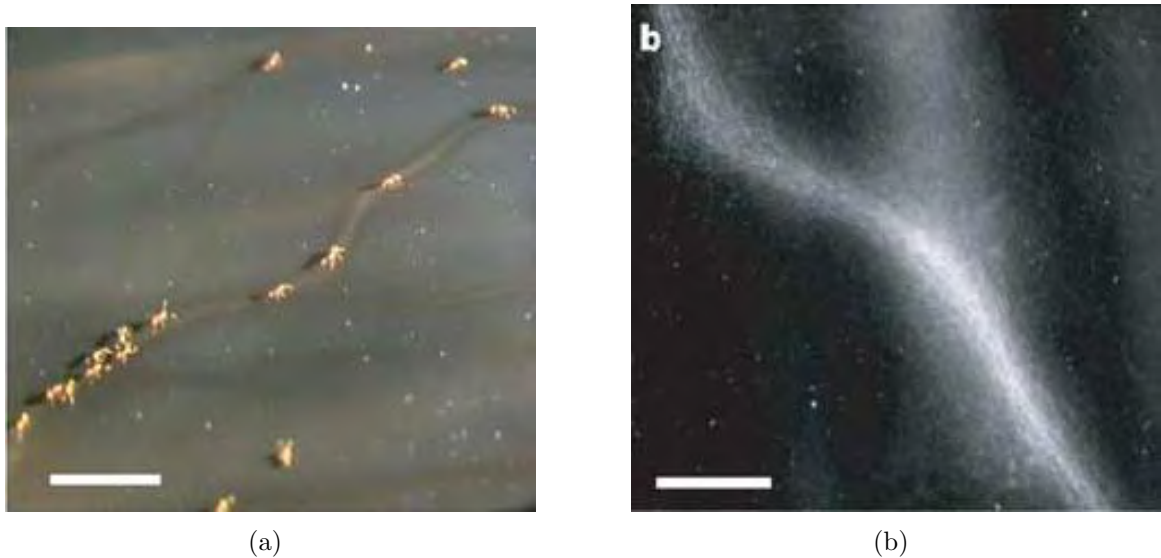


Figura 1.3: (a) Parte de uma rede de trilha de formigas *Pharaoh's* mostrando pequenas bifurcações (barra de escala  $1\text{cm}$ ) e (b) zoom de uma única bifurcação (barra de escala  $0.5\text{cm}$ ) [7].

### 1.1.1 A caminhada dos Collembolas

O movimento de Collembolas (*Protaphorura armata*), ilustrado na figura 1.4, é constituído por dois tipos de caminhadas distintos: circulares e reversos, que levam o indivíduo a retornar à sua própria trilha, seguidos por períodos curtos ou grandes de passos aleatórios. A intensidade das trajetórias circulares varia entre indivíduos, e a maior parte deles prefere descrever essa trajetória em um único sentido ao invés de caminhar ora no sentido horário e ora anti-horário [3].



Figura 1.4: Padrão de movimento de um indivíduo de *P. armata* monitorado por 1000s na ausência de obstáculos [3].

Alguns autores argumentam que as trajetórias circulares, especialmente por voltarem à mesma região, são vantajosas em ambientes onde a distância entre “boas” regiões pode ser grande. Sendo assim, um indivíduo que falhar em encontrar a “melhor” região poderá, pelo seu comportamento de busca, retornar ao seu local original alimentando-se lá, e então partir para uma nova busca [3].

### 1.1.2 Um modelo de caminhada

Esse modelo [28], originalmente proposto para simular a trajetória de partículas carregadas em vórtices gerados por eletroconvecção próximo às ramificações de um eletrodepósito quasi-bidimensional na presença de um campo magnético externo, exibe características que se assemelham às trajetórias descritas por Collembolans [3].



Figura 1.5: Padrões de caminhada gerados com  $10^4$  passos de tempo,  $r_g = 5$  e  $\theta = 0.4rad$ . Da esquerda para a direita temos  $P_g = 0.0, 0.8$  e  $0.99$ .

O modelo consiste de uma caminhada bidimensional fora de rede, na qual o caminhante tem uma probabilidade  $P_g$  de descrever um arco de circunferência de raio  $r_g$  e ângulo  $\theta$  e probabilidade  $1 - P_g$  de dar um passo unitário em qualquer direção do espaço. Padrões típicos destas trajetórias para valores distintos de  $P_g$  são exibidos na figura 1.5.

Um indivíduo, ao realizar esse tipo de caminhada terá vantagem de busca sobre outro que se dispersar segundo uma caminhada puramente aleatória. De fato, nestas buscas a constante de difusão aumenta em mais de seis vezes (Fig. 1.6) assim como o número de sítios distintos visitados. Este fato aumenta a chance do indivíduo em encontrar sítios ótimos, reduzindo-se o risco de mortalidade freqüentemente associado

à dispersão.

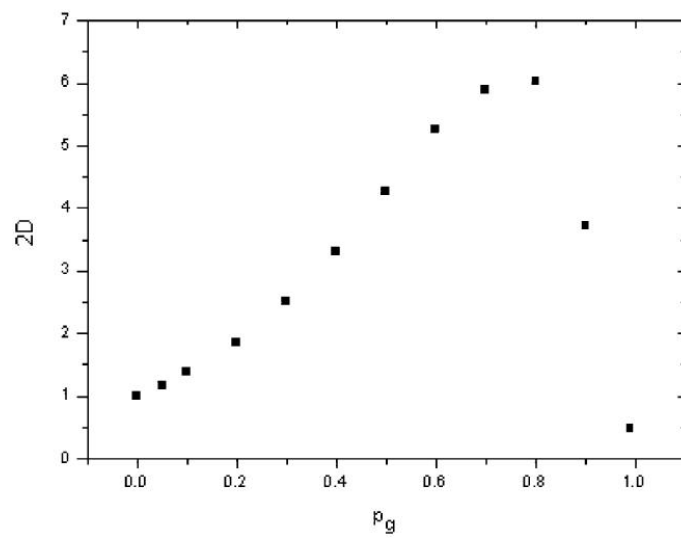


Figura 1.6: Aumento da constante de difusão até um valor limite de  $P_g$ .

## Capítulo 2

# A comunicação em insetos eusociais

Com exceção dos humanos, os sinais de forrageamento mais sofisticados de comunicação capazes de indicar a localização e a qualidade da fonte de alimento são exibidos em insetos eusociais. O termo eusocial é aplicado a grupos ou espécies que possuem três características: cuidado cooperativo com o grupo, superposição de gerações e divisão reprodutiva de trabalho [24]. A tabela 2.1 mostra um conjunto de mecanismos de comunicação usados por espécies de abelhas, formigas e cupins.

A linguagem da dança das abelhas e as trilhas de forrageamento químico de cupins e formigas são vastamente estudadas e reconhecida como os sinais de forrageamento mais usados por insetos eusociais [24].

Como vemos da tabela 2.1, os cupins, dentre os insetos citados, são os que possuem menos recursos de comunicação durante a busca por fontes de alimento, inclusive não possuindo qualquer recurso de comunicação visual. Exatamente por terem recursos de comunicação limitados e por construírem galerias de forrageamento altamente complexas e organizadas, os mecanismos de forrageamento de cupins se

	Tipos de comunicação durante o forrageamento			
	Olfativos	Auditivos	Táteis	Visuais
Abelhas	✓ feromônios recursos do ambiente	✓ “waggle dance” “shaking signal” sinal de parada “tremble dance”	✓ antenação “shaking signal” bater “tremble dance”	✓ “waggle dance” “shaking signal” sinal de parada “tremble dance”
Formigas	✓ feromônios recursos do ambiente	✓ estridulação	✓ “tandem running”  antenação bater	✓ “ritualized motor displays”
Cupins	✓ feromônios recursos do ambiente	✓ vibração	✓ antenação vibração	x

Tabela 2.1: Resumo do sinais conhecidos de forrageamento que são usados por abelhas, formigas e cupins [24].

tornam objeto de grande interesse científico.

## 2.1 O processo de forrageamento em cupins

Cupins são insetos eusociais que abrangem o grupo Isoptera. Os indivíduos são distinguíveis dentro de várias formas morfológicas, ou castas, que exibem divisão de trabalho, desenvolvem funções biológicas diferentes e vivem em unidades integradas e altamente organizadas: as colônias ou sociedades [26].

Uma colônia de cupins consiste de reprodutores funcionais, trabalhadores, soldados e larvas. A função dos trabalhadores (maioria da população na colônia) é de supervisionar os ovos e as larvas, buscar por comida, alimentar e limpar os indivíduos de outras castas e contruir e reparar o ninho. Os soldados tem a função de proteger a comunidade contra predadores [26].

A busca por comida em cupins subterrâneos envolve dois princípios básicos [4]:

1. Construção de um sistema de ramificação de túneis acima ou abaixo do solo, permitindo então a comunicação do ninho com as fontes de comida.
2. Deposição de um feromônio de trilha no substrato, permitindo a orientação e o recrutamento de trabalhadores e soldados para o sítio onde a comida foi encontrada.

Além disso, algumas espécies de cupins procuram por comida no subsolo, construindo galerias a partir do trabalho de um determinado número de cupins em cada túnel. Esta estratégia faz com que várias fontes de comida sejam exploradas simultaneamente [4, 25]. Dessa forma, a organização e o sistema de criação de túneis de cupins subterrâneos determinará a eficiência de exploração e de busca por fontes de alimentos.



Figura 2.1: Representação esquemática de um cupim (A) durante uma atividade normal e (B) durante a formação de uma trilha. Note que durante a formação da trilha, a glândula colocada sobre o esterno é comprimida [26].

Estudos mostram que a substância dodecatrienol têm sido associada ao feromônio de trilha de muitas espécies de cupins [25]. Mostrou-se também que é necessário um mínimo dessa substância para induzir respostas significativas em cupins trabalhadores. Repetitivas passagens de um mínimo de 28 cupins foram necessárias para estabelecer uma trilha que induzisse os outros cupins a segui-la. Caso a trilha não recebesse

reforços permanentes, ela perderia seu efeito em menos de 48 horas [25]. De fato, o tempo que o feromônio faz com que a trilha fique ativa, depois de estabelecida, depende do substrato onde o feromônio foi depositado (trilhas formadas em superfícies de vidro permanecem ativas somente por 5 minutos [25] enquanto outras podem durar pouco menos que uma hora [27]). Além do feromônio de trilha, as fezes dos cupins também são usadas para manter as trilhas ativas por longos períodos (mais de três meses) [27].

Sob condições naturais, a trilha mais usada é aquela que leva diretamente do ninho à fonte de alimento [25]. Naturalmente, outros fatores tais como o estímulo de contato com trabalhadores retornando da fonte de alimento, secreções salivares usadas na construção de túneis, níveis de umidade, e a idade do túnel podem fornecer sinais adicionais. A figura 2.1 mostra um cupim durante uma atividade normal e durante a formação de uma trilha.

Algumas espécies de cupins subterrâneos são capazes de detectar a presença de comida em laboratório a uma distância de até  $15\text{cm}$  (Fig. 2.2) [10], outros são incapazes de perceber fontes de comida a menos de  $2.5\text{mm}$  (Fig. 2.3) [5], alterando o número e o tamanho das ramificações construídas na rede de túneis. Portanto os padrões das galerias subterrâneas variam entre espécies.

Estudos mostram que algumas espécies de cupins usam um sistema de busca sistemática, dividindo a área de exploração uniformemente, evitando sítios já explorados [4, 6, 9]. Outros ensaios sugerem a possibilidade de adaptação para localizar fontes de comida com distribuição em agregados. Dessa maneira, quando um forrageador encontra um agregado, ele esperaria encontrar mais comida em sua vizin-

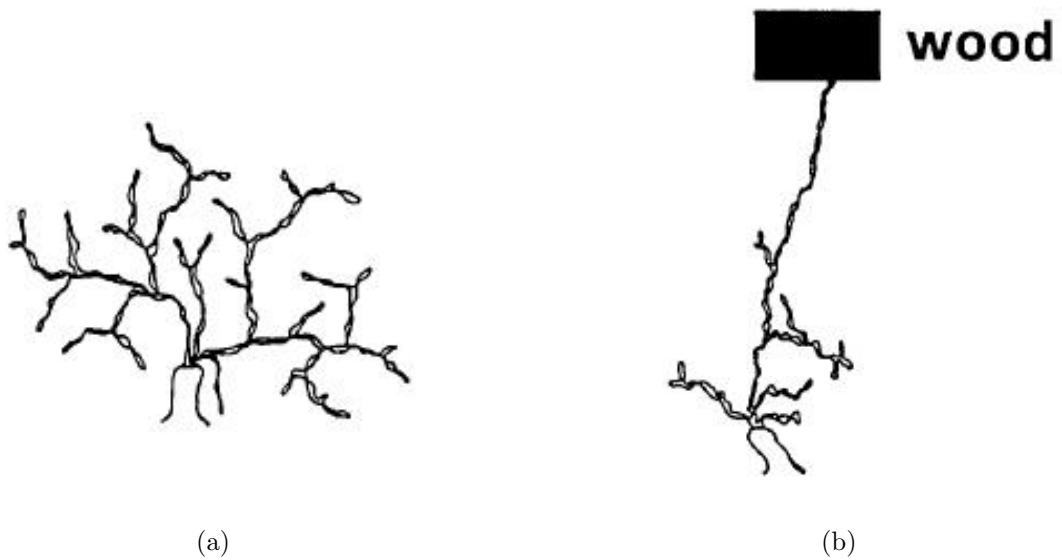


Figura 2.2: Padrões dos túneis exploratórios de *Reticulitermes santonensis* na ausência (a) e na presença de uma fonte de comida (b) [10].

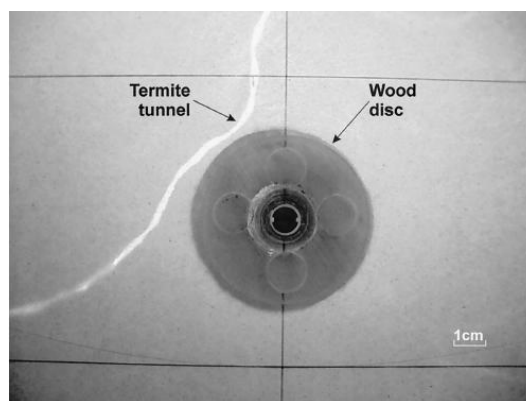


Figura 2.3: Ineficiência das espécies de cupim *R. flavipes* e *C. formosanus* em perceber a presença de comida em uma distância menor que 2,5mm [5].

hança [6].

Estudos de campo testando a busca sistemática de sítios alvos (fontes de alimentos) são muito raros e inconclusivos [6]. Em contrapartida, diversos experimentos têm sido produzidos em laboratórios a fim de se observar o comportamento da formação dos túneis de cupins sujeitos à variação de fatores como a densidade de população e de comida, temperatura, o tipo e a umidade do solo, etc. [4]. Com o

objetivo de determinar esse comportamento, arenas bidimensionais são construídas usando-se duas placas de vidro dispostas horizontalmente. Entre as placas, é colocado um substrato (mistura de areia e solo, ou um tipo específico de solo) com fontes de comida (discos de madeira) espalhadas em alguns pontos da arena. Os cupins são introduzidos na arena por meio de um orifício no centro da placa superior.

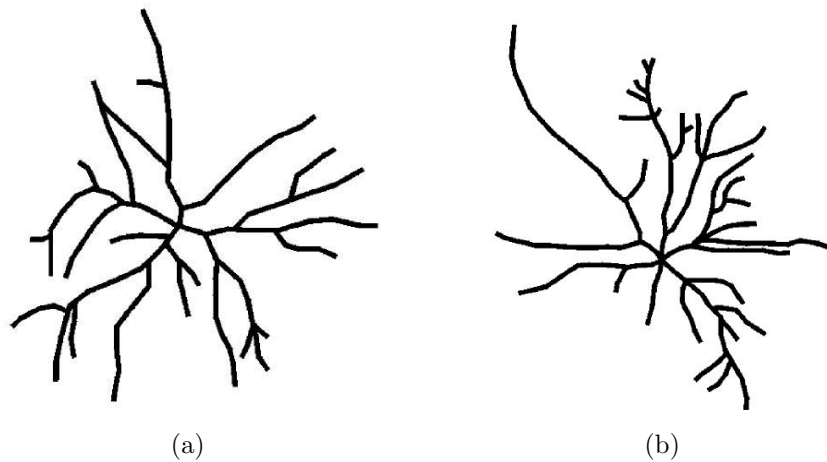


Figura 2.4: Rede de túneis construída por trabalhadores de *Coptotermes gestroi* (a) e *Heterotermes tenuis* (b) [4].

Galerias de túneis como aquelas mostradas na Fig. 2.4, foram produzidos numa arena com dimensões de  $35 \times 35 \times 0.4 \text{ cm}$ , com 500 indivíduos. A duração de cada experimento foi de 24 h na ausência de luz [4]. Já os padrões mostrados na Fig. 2.5, foram produzidos numa arena de  $105 \times 105 \times 0.2 \text{ cm}$ , com cerca de 1000 indivíduos e observados durante dez dias [9]. A figura 2.6 mostra que somente poucos trabalhadores fazem o trabalho de forrageamento antes de encontrarem alimento.

Dependendo da espécie estudada em laboratórios e o tipo de elaboração do experimento, o número de túneis primários (túneis que deixam o ninho e dão origem às galerias) pode variar entre 2 e 15 túneis [4,6,9]. A largura dos túneis pode variar aproximadamente entre  $0.440 \pm 0.081 \text{ cm}$  e  $1.739 \pm 0.770 \text{ cm}$  [5] e a velocidade de

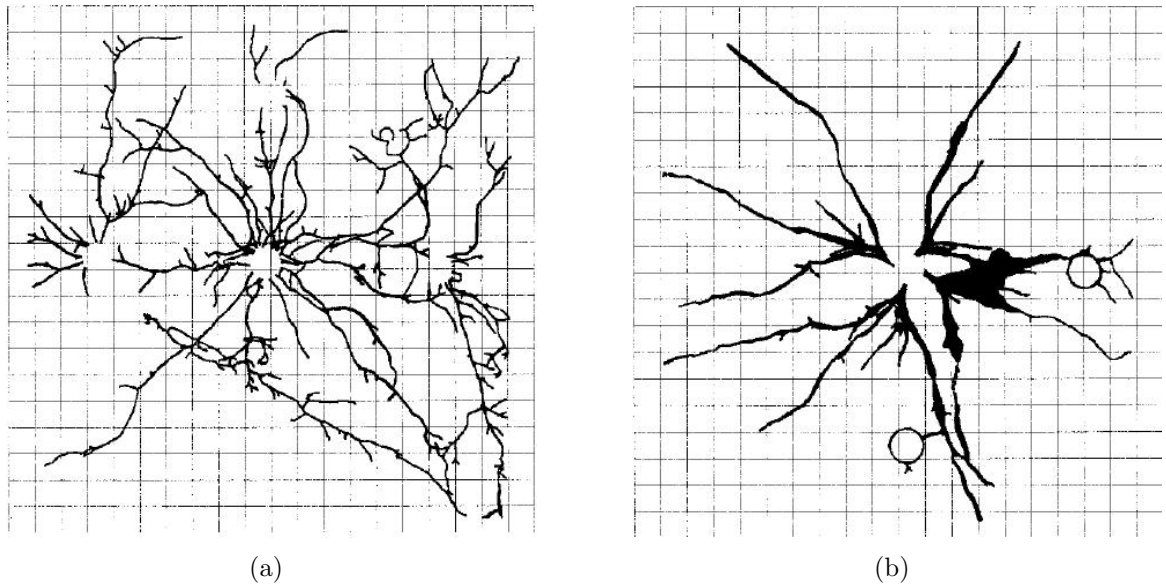


Figura 2.5: Galeria de tuneis construída pelas espécies *R. flavipes* (a) e *C. formosanus* (b) [9].

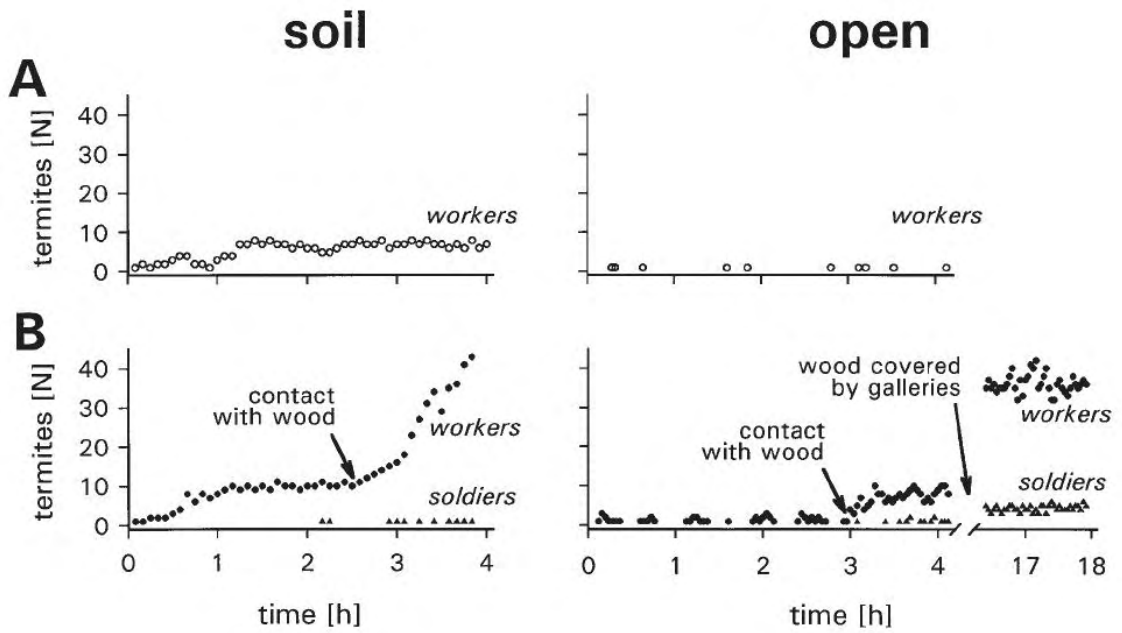


Figura 2.6: Exemplo do número de indivíduos de *Reticulitermes santonensis* durante o forrageamento de um novo território versus o tempo de forrageamento [10].

construção dos mesmos pode variar entre  $67.4 \pm 63.7$  e  $130.5 \pm 129.8$  *cm/dia*. Outras medidas, tais como a área construída, o comprimento de túneis secundários e primários

construídos, entre outros parâmetros, podem ser encontradas nas referências [5, 6, 10]. O número de bifurcações a cada 10 *cm* também pode variar entre  $1.2 \pm 0.4$  e  $3.3 \pm 0.3$  [10]. Observações como estas, indicam que os comportamentos de diferentes espécies podem não ser facilmente generalizados.

## 2.2 Facilitação social

Interações entre indivíduos que compõem grupos sociais geram uma gama de comportamentos não apresentados em uma escala individual [22, 34]. Uma das manifestações mais básicas desse fenômeno é a facilitação social, definida como padrões usuais de comportamento que são iniciados ou aumentados no espaço ou amplificados pela presença ou ação de outros animais. Sendo assim, a facilitação social pode ser considerada a capacidade dos animais em sentir, excitar e se comunicar com outros animais e estaria fortemente relacionada com o número de indivíduos envolvidos. O processo de facilitação social pode ser encontrado em humanos, caranguejos, abelhas, escorpiões, formigas e cupins entre outros [22].

A investigação da sobrevivência de *Nasutitermes nigriceps* em ambientes de diferentes tamanhos e abundantes em comida mostrou que a sobrevivência e o consumo de comida diminuem com o tamanho do ambiente [21]. Esse fato é uma forte evidência de que a interação social é importante para a sobrevivência do grupo, uma vez que aumentado o tamanho do ambiente, a densidade de cupins diminui, fazendo com que a taxa de contato e de interações entre os indivíduos também diminua. A figura 2.7 mostra resultados de um experimento onde grupos (de diferentes tamanhos) de cupins

foram mantidos em tubos transparentes de vidro ( $9.5\text{cm} \times 1.4\text{cm}$ ) hermeticamente fechados. Os grupos ficaram condicionados a uma temperatura de  $25^\circ\text{C} \pm 0.5$  sem comida ou água [22].

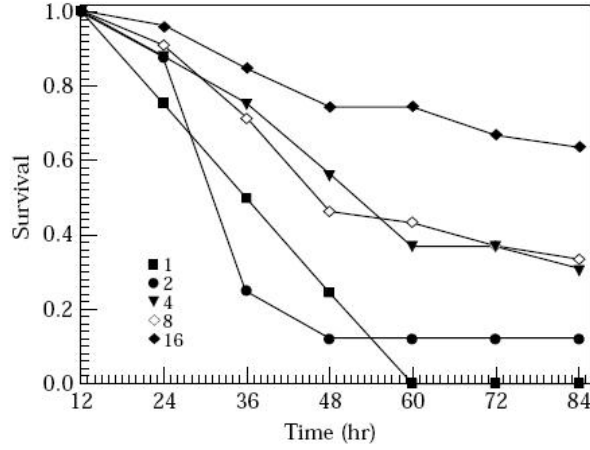


Figura 2.7: Dados do experimento de sobrevivência de *Nasutitermes cf. aquilinus* na ausência de comida. Cada ponto representa a proporção total de sobreviventes para um dado tamanho de grupo [22].

Por sua vez, o processo de facilitação social deverá ser modelado por meio de uma função limitada, refletindo o fato de que os cupins não podem ser excitados infinitamente através de repetidas interações. É também desejado que a atividade de um indivíduo aumente ou diminua de acordo com um único parâmetro, representando seu grau de excitabilidade [22]. Essas duas exigências levam à escolha de uma função tangente hiperbólica, como se segue:

$$A_k(t+1) = \tanh \left[ g_k \left( \lambda \sum_{i=1}^n A_i(t) + A_k(t) \right) \right] \quad (2.1)$$

onde  $A_i(t)$  é a atividade do  $i$ -ésimo cupim (primeiro vizinho do cupim  $k$ ) no tempo  $t$ ,  $g_k$  é o fator de excitabilidade do indivíduo  $k$  e  $\lambda$  é um parâmetro que determina a habilidade do grupo em se comunicar. Um cupim estará ativo caso  $A_k > 0$  e inativo

se  $A_k = 0$  [22].

A aplicação dessa função atividade (eq. 2.1) em um modelo de autômatos celulares (fig 2.8) permitiu uma comparação qualitativa com resultados experimentais (fig. 2.7 e 2.9 b), mostrando de fato que a interação social é um mecanismo importante no tempo de vida dos cupins.

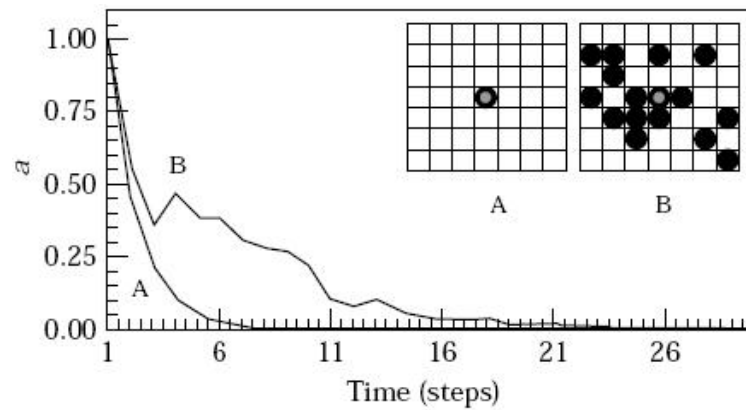
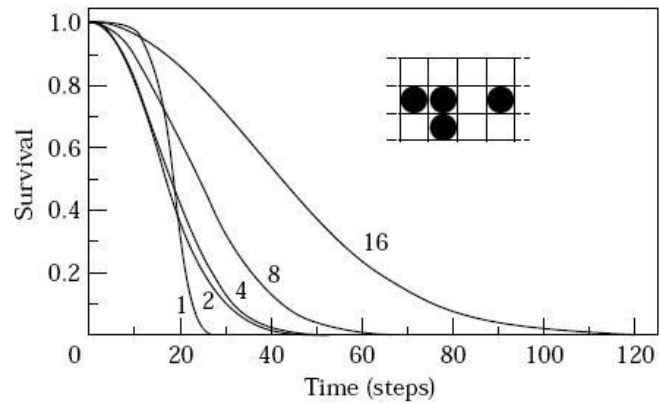
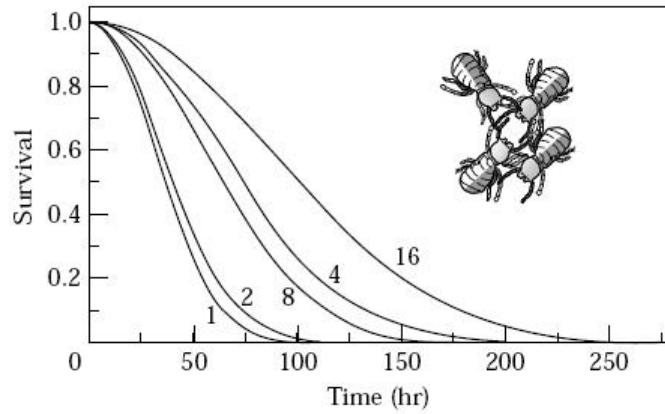


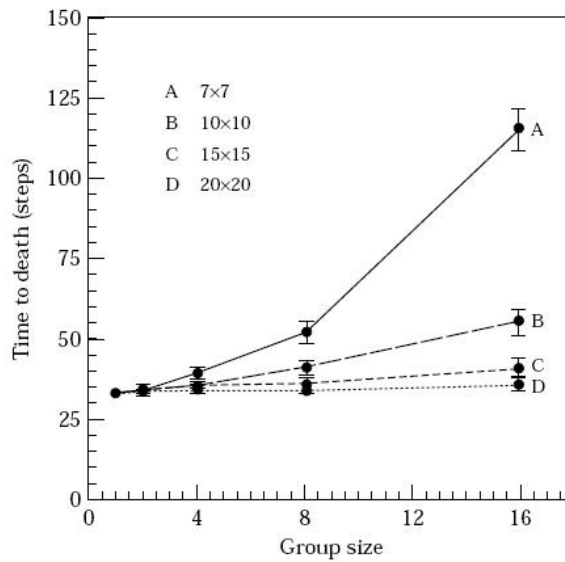
Figura 2.8: Evolução temporal da função atividade (eq. 2.1) para um indivíduo isolado (curva A) e em um grupo com 16 indivíduos (curva B) [22].



(a)



(b)



(c)

Figura 2.9: Comparação qualitativa entre o tempo de vida de cupins a partir de (a) simulações e do (b) experimento, sugerindo que a interação social é um mecanismo importante no tempo de vida de cupins em grupos. Em (c) é mostrado o efeito do tamanho da rede no tempo de vida dos cupins [22].

## Capítulo 3

# Processo de contato, gás de rede conservativo e transições de fases

Transições de fases para estados absorventes são bem conhecidas em Física da Matéria Condensada bem como em modelos de populações e de epidemias [30]. Nesta seção serão abordados alguns aspectos de transições de fases em sistemas sem termodinâmica (aos quais os conceitos de trabalho e energia não se aplicam). Especificamente, discutiremos dois modelos: processo de contato (CP - Contact Process) e gás de rede conservativo. Particular destaque será conferido à análise denominada quase estacionária como método de investigação dos sistemas em questão.

Modelos como os citados acima são importantes na área de física estatística, na qual procura-se entender os fenômenos relacionados com sistemas de muitas entidades interagentes [34]. Teorias gerais de transições de fases e de fenômenos críticos foram desenvolvidas, unificando assim a compreensão de transições gás-líquido, transições magnéticas, cristais líquidos e outros sistemas [29]. Nesse contexto uma transição de

fase é definida como uma mudança abrupta, singular, das propriedades macroscópicas de um sistema de muitas unidades, como função dos parâmetros de controle [29].

Por meio de análises de grupo de renormalização, simulações, teoria de campos ou de soluções exatas, é possível determinar a criticalidade (expoentes, funções de escala, etc.) de modelos específicos, determinando ou agrupando-os dentro de uma classe de universalidade [30, 32]. É esperado, que uma transição de fase contínua de um estado ativo para um estado absorvente pertença à classe de universalidade de percolação direcionada (DP) desde que o modelo tenha interações de curto alcance e que não esteja sujeito a simetrias especiais, de acordo com a conjectura de Jensen e Grassberger [30].

### 3.1 Processo de Contato e gás de rede conservativo

Considerado como um modelo elementar de espalhamento de doenças, o processo de contato é um modelo que apresenta a interação entre indivíduos saudáveis e doentes. O modelo é definido em uma rede hipercúbica onde cada sítio da rede representa um indivíduo que pode estar infectado ou saudável [29, 33]. A doença se espalha através do contato entre os indivíduos e depende de um parâmetro de infecção  $\lambda$ . Sítios infectados se recuperam a uma taxa unitária enquanto a doença se espalha para os sítios saudáveis a uma taxa  $\frac{\lambda}{q}$ , em que  $q$  é o número de coordenação da rede. A figura 3.1 mostra as possíveis transições no modelo em uma rede unidimensional com suas respectivas taxas de infecção para as quatro configurações possíveis entre sítios saudáveis (círculos vazios) e sítios infectados (círculos preenchidos).

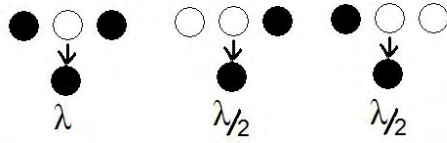


Figura 3.1: Taxas de infecção para o processo de contato em uma dimensão.

Intuitivamente, podemos afirmar que se a taxa de infecção  $\lambda$  é muito baixa, a extinção da doença para tempos longos é certa. Por outro lado, se  $\lambda$  tiver um valor alto a doença deve se espalhar indefinidamente. A fronteira entre a persistência e a extinção da doença é marcada por um ponto crítico, denotado por  $\lambda_c$ . Então, esse ponto separa os dois estados estacionários que o sistema pode atingir em tempos longos: um estado livre da doença (absorvente) e um estado “ativo” onde a epidemia sobrevive. Sendo assim,  $\lambda_c$  marca uma transição de fase, contínua, entre um estado absorvente e um estado ativo [29, 33], como mostrado na figura 3.2. Essas considerações são válidas tomando o limite de tamanho infinito <sup>1</sup> e  $d \geq 1$ .

O modelo de gás de rede conservativo (CLG - Conserved Lattice Gas) por sua vez, é também um modelo de interações de curto alcance e que leva a uma transição de fase como no caso do CP [35]. Porém, o modelo possui uma quantidade conservada que é o número de partículas, fazendo com que este modelo não pertença à classe de universalidade DP.

O modelo CLG é definido em uma rede hipercúbica na qual cada sítio da rede pode estar vazio ou ocupado por uma única partícula. Partículas vizinhas repelem-se através de interações repulsivas de curto alcance. Como produto dessa interação,

<sup>1</sup>Para qualquer sistema de tamanho finito, o estado absorvente é a única configuração estacionária possível.

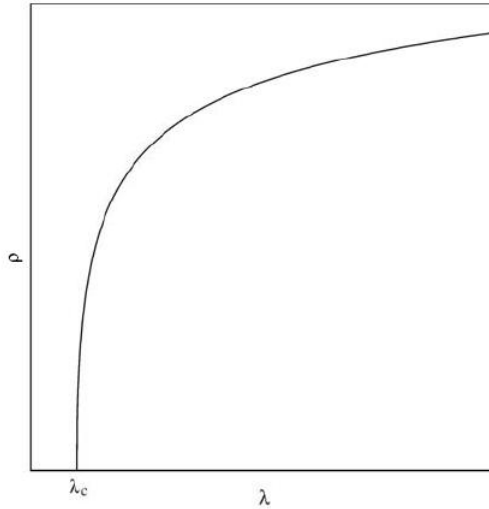


Figura 3.2: Comportamento do parâmetro de ordem  $\rho$  (densidade de sítios infectados) para o processo de contato em função de  $\lambda$ .  $\lambda_c$  é o valor crítico do parâmetro de controle, que separa as duas fases [29].

em cada passo de tempo as partículas ativas (aquelas que possuem vizinhos) migram aleatoriamente para um dos seu primeiros vizinhos, desde que este esteja vazio. Nesse modelo a densidade constante de partículas  $\zeta = N/L^d$  é o parâmetro de controle do modelo [35].

De fato, modelos que possuem o parâmetro de controle como sendo uma quantidade conservada e possuindo infinitos estados absorventes exibem expoentes críticos compatíveis com uma única classe de universalidade [35], diferentes da DP.

## 3.2 Teoria de escala e análise de tamanho finito

A teoria de escala visa fornecer uma descrição do sistema na vizinhança do ponto crítico [33]. Para analisar o comportamento de estados ativos nesse trabalho, vamos estudar (por meio de simulações de sistemas de tamanho finito) o comporta-

mento quasi-estacionário do sistema <sup>2</sup>. Depois de um transiente inicial, que depende do tamanho do sistema  $L$  e da distância ao ponto crítico  $\Delta$  ( $\Delta \equiv \rho - \rho_c$ ), as médias sobre as amostras sobreviventes (que não atingem o estado absorvente) tendem a valores estacionários  $\bar{\rho}$ . Para  $L$  grande e  $\Delta$  pequeno, a densidade quasi-estacionária pode ser escrita como:

$$\bar{\rho}(\Delta, L) \propto L^{-\beta/\nu_\perp} f(\Delta L^{1/\nu_\perp}) \quad (3.1)$$

A função de escala  $f(x) \propto x^\beta$  é válida para  $L \gg \xi$ , em que  $\xi$  é o comprimento de correlação e diverge quando aproxima-se do ponto crítico de acordo com uma lei de potência:

$$\xi \propto |\Delta|^{-\nu_\perp} \quad (3.2)$$

Já para o caso onde  $\Delta < 0$ , a função de escala é da forma  $f(x) \propto |x|^{-\nu_\perp + \beta}$  para valores grandes e negativos de  $x$ . Dessa forma podemos concluir que para  $\Delta = 0$  a eq. (3.1) leva a:

$$\bar{\rho}(0, L) \propto L^{-\beta/\nu_\perp} \quad (3.3)$$

Portanto, graficando  $\bar{\rho}$  em função de  $L$ , podemos localizar  $\rho_c$ , uma vez que no ponto crítico temos uma lei de potência dada pela eq. (3.3), e nas proximidades do ponto

---

<sup>2</sup>É necessária uma análise quasi-estacionária porque qualquer sistema de tamanho finito leva a uma configuração absorvente para tempo infinito (desde que exista ao menos uma configuração absorvente possível) e uma vez alcançado o estado absorvente, o sistema permanecerá para sempre neste estado.

crítico observaremos desvios dessa lei que se expressará em uma curvatura não nula nos gráfico em escala logarítmica.

Fazendo uso da variância de  $\rho$  definido por  $\chi = L^d(\langle \rho^2 \rangle - \langle \rho \rangle^2)$ , a análise de tamanho finito fornece:

$$\chi(\Delta, L) \propto L^{\gamma/\nu_{\perp}} g(\Delta L^{1/\nu_{\perp}}) \quad (3.4)$$

em que, agora, a função de escala é  $g(x) \propto x^{-\gamma}$ . Sendo assim, no ponto crítico e para  $x$  suficientemente grande temos  $\chi(0, L) \propto L^{\gamma/\nu_{\perp}}$ . Através da variância podemos deduzir a relação de hiperescala <sup>3</sup>:

$$\gamma = d\nu_{\perp} - 2\beta,$$

em que  $d$  é a dimensão do sistema.

Outra aplicação desse método consiste em analisar o tempo médio de vida  $\tau_H$  de um sistema dada uma densidade inicial. Incorporando a dependência com  $L$  temos:

$$\tau_H(\Delta, L) \propto L^{\nu_{\parallel}/\nu_{\perp}} G(\Delta L^{1/\nu_{\perp}}) \quad (3.5)$$

A função de escala é  $G(x) \propto x^{-\nu_{\parallel}}$ , para  $x < 0$  e  $|x| \gg 1$ . No ponto crítico temos então que  $\tau_H(0, L) \propto L^{\nu_{\parallel}/\nu_{\perp}}$ . Note que se  $\lambda < \lambda_c$  o tempo de vida assume um valor finito quando  $L \rightarrow \infty$ , enquanto que para  $\Delta > 0$  o tempo de vida cresce exponencialmente com o tamanho do sistema.

---

<sup>3</sup>Outras relações de hiperescala e relações de escala são encontradas na ref. [31]

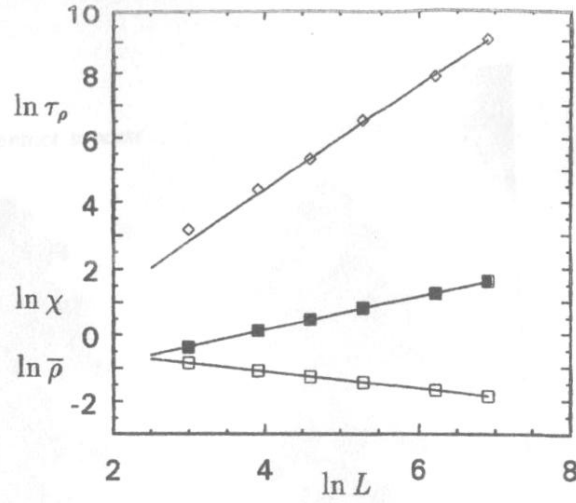


Figura 3.3: Dependência com o tamanho  $L$  dos parâmetros  $\tau_\rho$ ,  $\chi$  e  $\bar{\rho}$  para o processo de contato unidimensional [33].

Outra característica é o tempo de relaxação  $\tau_\rho$ , que governa a aproximação de  $\rho(t)$  ao seu valor estacionário:

$$\rho(t) - \bar{\rho}(\Delta, L) \simeq C \exp(-t/\tau_\rho) \quad (3.6)$$

No ponto crítico,  $\tau_\rho$  tem a mesma dependência que  $\tau_H$ , logo,  $\tau_\rho(0, L) \propto L^{\nu_\parallel/\nu_\perp}$ . Na tabela 3.1 são apresentados os expoentes críticos para a percolação direcionada, processo de contato e gás de rede conservativo. Com os expoentes de  $\bar{\rho}$ ,  $\chi$  e  $\tau_\rho$  determina-se a classe de universalidade do modelo.

	$\beta/\nu_\perp$	$\gamma/\nu_\perp$	$\nu_\parallel/\nu_\perp$
DP	0.2521 [32]	0.495(1) [32]	1.580(1) [32]
CP	0.2528(3) [36]	0.497 [33]	1.5815(10) [36]
CLG	0.223(5) [38]	0.553(3) [38]	1.715(7) [38]

Tabela 3.1: Valores dos expoentes críticos para os modelos DP, CP e CLG em uma dimensão.

### 3.3 Método para simular o estado quasi-estacionário

Proposto por Oliveira e Dickman [36], esse método tem como vantagem o ganho de pelo menos uma ordem de grandeza no tempo computacional das simulações na criticalidade. Os resultados obtidos por tal método estão em plena concordância com resultados de simulações usuais. Na figura 3.4 são mostrados resultados de ambos os métodos para o processo de contato unidimensional.

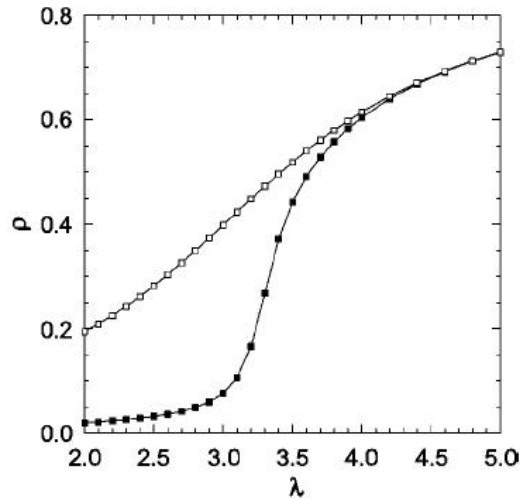


Figura 3.4: Densidade quasi-estacionária  $\rho$  no processo de contato unidimensional. Os símbolos representam resultados para o método proposto por Dickman, enquanto as linhas sólidas são resultados convencionais [36].

#### 3.3.1 Descrição do método

Seja  $X_t$  a evolução do sistema no tempo  $t$  através de uma simulação convencional que possua um estado absorvente e  $X_t^*$  um processo idêntico a  $X_t$  porém sem possuir o estado absorvente. Quando  $X_t$  for entrar num estado absorvente, trocamos  $X_t$  por uma configuração  $X_s^*$  ( $0 < s \leq t$ ) e então continuamos a evolução de  $X_t$  da maneira usual. As configurações  $X_s^*$  são as configurações da evolução de  $X_t$  que não

vão para o estado absorvente e são atualizadas com uma probabilidade  $p_{rep}$ .

Computacionalmente, isto é feito guardando-se  $M$  configurações não absorventes (que contenha no mínimo um sítio ativo) da simulação usual em uma lista. Essas configurações são atualizadas com uma probabilidade  $p_{rep}$ . Tal atualização é feita escolhendo-se aleatoriamente uma das  $M$  configurações guardadas e trocando-a pela configuração atual. Quando o sistema alcançar uma configuração absorvente, essa configuração (a que levou ao estado absorvente) é trocada por uma da lista de  $M$  configurações, escolhida aleatoriamente. Dessa forma, a evolução temporal do sistema nunca alcançará o estado absorvente.

Esse método de simulação permite uma análise da densidade de sítios ativos em função do tempo, podendo ser feita uma média temporal do sistema para tempos grandes, determinando assim, a densidade estacionária para um dado parâmetro inicial.

# Capítulo 4

## Modelo para o processo de forrageamento

O processo de forrageamento de cupins será modelado em um espaço contínuo restrito a duas dimensões com coordenadas reais. Um túnel criado por cupins irá evoluir no tempo se houver no mínimo um cupim em seu interior. A direção tomada pela evolução do túnel no tempo  $t$  é dada por um ângulo  $(\theta_t)$ . Cada túnel possuirá uma quantidade global de feromônio em seu interior. Essa quantidade será de extrema importância na evolução dos túneis como veremos na seção 4.2.

O espaço onde serão colocadas as iscas será definido num espaço com coordenadas inteiras, ou seja, uma rede. Escolhida a distribuição espacial das iscas, esta configuração será mantida a fim de estudar a eficiência de busca para diferentes trajetórias de caminhada.

## 4.1 O ambiente das iscas

É razoável admitir que em um ambiente rico em comida, a forma da trajetória descrita pelos cupins não seja importante. Dessa forma, as iscas serão distribuídas dentro de clusters (agregados) e não homogeneamente no espaço.

Dada uma rede espacial quadrada  $L \times L$ , o número total de clusters possíveis é dado por:

$$N_{tc} = (L/T_c)^2 \quad (4.1)$$

onde  $T_c$  é o tamanho linear do cluster. Todos os clusters tem o mesmo tamanho e suas posições (centros  $c_j$ ) são sorteadas aleatoriamente. Três condições restringem a posição de um cluster:

1. Toda a região pertencente ao cluster deverá estar contida dentro da rede  $L \times L$ .
2. A região coberta pelo cluster  $j$  não poderá sobrepor a região de qualquer outro cluster.
3. O centro de cada cluster deverá estar a uma distância mínima  $D_{min}$  do centro da rede, onde está localizado o ninho. Esta distância simula a escassez de comida próximo ao ninho, forçando os cupins a procurar recursos em outras regiões.

O número de clusters  $N_c$  a ser sorteado dependerá da densidade de clusters, definida como:

$$\rho_c \equiv N_c/N_{tc} \quad (4.2)$$

Finalmente, o número de iscas  $N_{is}$  sorteadas dentro de cada cluster dependerá

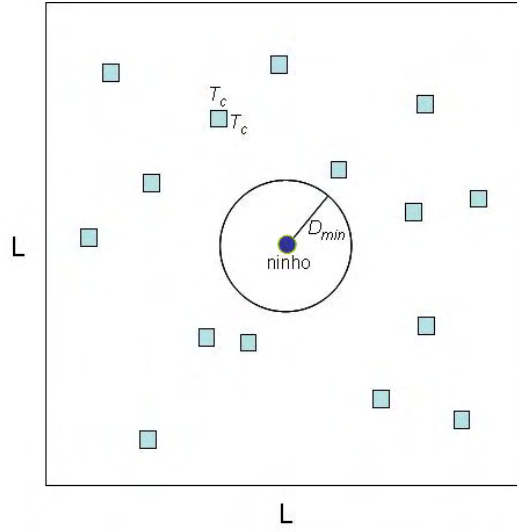


Figura 4.1: Esquema do ambiente onde será feita a análise de eficiência para diversas trajetórias.

da densidade de iscas por cluster:

$$\rho_{is} \equiv N_{is}/N_{tis} \quad (4.3)$$

onde  $N_{tis}$  é o número possível de iscas dentro de um cluster ( $N_{tis} = (T_c)^2$ ). A figura 4.1 ilustra o ambiente das iscas.

## 4.2 A formação dos túneis

No ninho são colocados  $N$  cupins. Cada cupim é caracterizado por um fator de excitabilidade  $g_k$  escolhido com igual chance no intervalo

$$g_k \in [g_m - \delta, g_m + \delta] \quad (4.4)$$

A aleatoriedade em  $g_k$  reflete o fato de que em uma colônia de cupins existem indivíduos fracos, fortes, jovens, velhos, saudáveis ou não. O fator  $g_k$  determinará quantas vezes o cupim  $k$  poderá avançar escavando dentro de um túnel.

Como na equação 2.1, a atividade do cupim  $k$  será dada por:

$$A_k(t+1) = \tanh [g_k A_k(t)], \quad A(t=0) = 1.0 \quad (4.5)$$

Um passo de tempo no modelo equivale a analisar todos os túneis existentes, ou seja, todos os túneis são evoluídos simultaneamente.

Quando a atividade do cupim alcançar um valor mínimo ( $A_{min}$ ), este retornará ao ninho, fazendo com que sua atividade seja restaurada ao máximo ( $A_k = 1.0$ ).

Inicialmente  $N_0$  túneis (cada um com um cupim) são criados na borda do ninho de raio ( $R_{ninho}$ ) com um ângulo mínimo ( $\gamma$ ) entre eles, como mostra a figura 4.2.

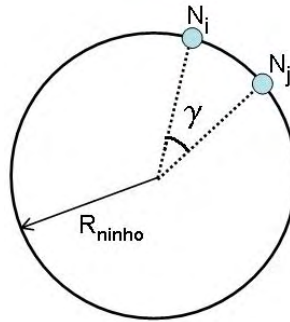


Figura 4.2: Ângulo mínimo entre quaisquer túneis iniciais.

Em intervalos de tempo constante  $t_l$ , uma quantidade  $q_{cl}$  de cupins (ou os que restaram no ninho) deixam o ninho em direção às extremidades dos túneis. No modelo, admite-se que a atividade do cupim não diminui até ele alcançar a extremidade, para onde são enviados diretamente. Um túnel ( $T_i$ ) será escolhido por um cupim que estiver

no ninho com uma probabilidade proporcional à sua quantidade de feromônio  $Q_f^i$ , ou seja, quanto maior for  $Q_f^i$  maior a chance do túnel  $T_i$  ser escolhido por um cupim. A quantidade de feromônio de trilha  $Q_f^i$  evolui no tempo da seguinte forma:

1. Um cupim ao entrar no túnel  $T_i$  depositará uma quantidade de feromônio  $F_0$  no túnel:

$$Q_f^i = Q_f^i + F_0$$

2. Se o túnel  $T_i$  levar à comida,  $Q_f^i$  aumentará de acordo com o número de cupins no seu interior ( $n_c^i$ ) em razão do reforço da trilha feito com feromônio por cada um dos cupins ao retornarem ao ninho com o alimento. Então:

$$Q_f^i = Q_f^i + n_c^i \times F_0$$

3. Se  $T_i$  não obtiver sucesso de busca, ou se não houver cupins em seu interior,  $Q_f^i$  diminuirá a uma taxa  $t_d$  em cada passo de tempo.

$$Q_f^i = (1.0 - t_d) \times Q_f^i$$

Note que  $t_d$  controla a rapidez com que o feromônio diminui dentro do túnel.

Dessa forma nomeamos  $t_d$  como sendo a taxa de degradação do feromônio.

Um túnel avançará no tempo por segmentos unitários desde que haja no mínimo um cupim em seu interior. A direção  $\theta_i(t + 1)$  desse avanço dependerá da direção avançada pelo túnel no instante anterior. Dessa forma temos:

$$\theta_i(t + 1) = \theta_i(t) + \phi(t) \quad (4.6)$$

onde  $\phi$  é um ângulo aleatório escolhido com uma distribuição uniforme limitada ao intervalo  $[-\alpha, \alpha]$ . Note que  $\theta_i(0)$  é o ângulo escolhido para o túnel primário que deixa o ninho. Portanto  $\alpha$  determina o ângulo máximo que um túnel poderá desviar-se de sua direção anterior, podendo levar desde uma caminhada absolutamente correlacionada ( $\alpha = 0$ ) até um passeio aleatório sem tendências ( $\alpha = \pi$ ).

Dois aspectos restringem o crescimento de um túnel:

1. Um túnel poderá alcançar uma distância máxima ( $D_{max} = \sqrt{x^2 + y^2}$ ) do ninho.

Um cupim ao ultrapassar essa distância não voltará mais para o ninho, reduzindo o número total de cupins. O tamanho do túnel não aumentará mais, porém sua quantidade de feromônio continuará decaindo no tempo tornando possível que este túnel seja escolhido futuramente por outros cupins. Se esse for o caso, os cupins que entrarem neste túnel também irão desaparecer. Esta estratégia é baseada no fato de que o retorno para o ninho depende da distância em que o cupim está dele, seja por falta de energia para retornar ou pelo aumento do risco associado à presença de predadores.

2. Um túnel não poderá se cruzar com outro túnel. A ponta que encontrar um segmento qualquer, seja do seu próprio ou de outro túnel, irá parar de evoluir e perderá todo o seu feromônio. Caso não existam mais extremidades com feromônio, serão sorteadas  $N_0$  posições em túneis já escavados. Cada segmento sorteado dará origem a um novo túnel e receberá um cupim.

A estratégia para simular o crescimento dos túneis e proibir sua intersecção é considerar que cada segmento construído ocupe uma área circular de raio  $1/2$ . A figura 4.3 mostra um túnel primário com quatro segmentos construídos e a área ocupada por eles. Cada posição ocupada é guardada dentro de uma lista, permitindo que seja analisado a distância entre a posição criada e as já existentes. Essa estratégia é bem similar a usada na simulação do DLA fora de rede.

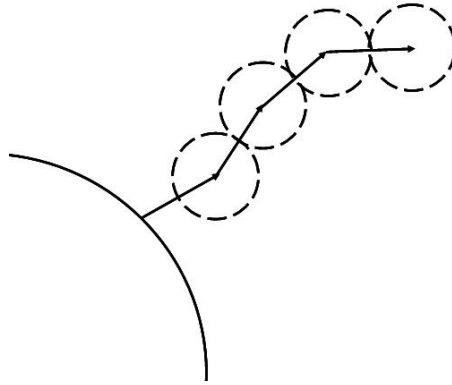


Figura 4.3: Construção de quatro segmentos a partir do ninho. A circunferência mostra a área ocupada por um segmento. As setas que ligam uma circunferência a outra mostram a direção de evolução do túnel.

Um túnel ( $T_i$ ) irá bifurcar, dando origem a um novo túnel, de acordo com uma probabilidade  $P_b$  que dependerá do número de cupins no seu interior  $N_c^i$ , de um parâmetro  $N_{ot}$  que seria o número ótimo de cupins em um túnel para que ocorra a bifurcação e de um expoente  $\eta$  que determina a forma da curva de probabilidade. Assim, a probabilidade de bifurcação de um túnel é dada por

$$P_b = \frac{(N_c^i/N_{ot})^\eta}{1.0 + (N_c^i/N_{ot})^\eta} \quad (4.7)$$

O ângulo  $\pm\varphi$  do novo túnel, originado por uma bifurcação, é sorteado aleato-

riamente no intervalo  $(\pi/3, \pi/2]$ <sup>1</sup>. Metade dos cupins do túnel original vão para o novo túnel que recebe a mesma quantidade de feromônio do túnel original.

Finalmente, o processo de evolução dos túneis irá terminar quando forem criados  $N_{seg}$  segmentos ou quando o número total de cupins restantes for zero.

## 4.3 Resultados

### 4.3.1 O ambiente das iscas

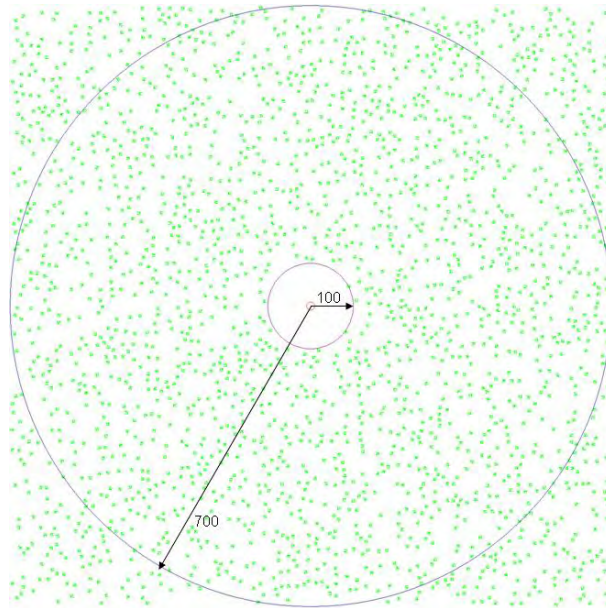


Figura 4.4: Ambiente de iscas onde as caminhadas são analisadas. Os parâmetros usados são:  $L = 1400$ ,  $T_c = 8$ ,  $\rho_c = 0.1$  e  $\rho_{is} = 0.5$ .

Uma vez que a largura de um túnel construído por cupim pode variar entre aproximadamente 0.4 e 1.7 *cm* levando, portanto, a uma largura média de aproxi-

---

<sup>1</sup>Note que o ângulo mínimo de uma bifurcação no nosso modelo foi determinado geometricamente, usando as condições de que um segmento não pode ocupar a mesma área de outro segmento.

madamente 1 *cm*, consideraremos no modelo proposto que cada sítio da rede tenha dimensões de 1*cm* × 1*cm*.

Todas as simulações foram feitas em uma rede de tamanho  $L = 1400$  com clusters de tamanho  $T_c = 8$ . A densidade de clusters e de iscas foram  $\rho_c = 0.1$  e  $\rho_{is} = 0.5$  respectivamente. A distância mínima do ninho para colocar os clusters foi  $D_{min} = 100$ ; já a distância máxima que o cupim poderá alcançar sem morrer é  $D_{max} = 700$ . A configuração dos clusters na rede quadrada foi feita escolhendo-se aleatoriamente uma posição  $c_j$  para cada um dos  $N_c$  clusters. Ao redor da posição  $c_j$  foram colocadas também aleatoriamente  $N_{is}$  iscas de tamanho unitário. Tal ambiente foi mantido para todas as amostras e para todos os parâmetros que controlam a forma da caminhada. Dessa forma, nesta dissertação, não nos preocupamos em fazer uma estatística sobre as diversas distribuições de iscas no ambiente e sim uma estatística sobre caminhadas, dada uma única configuração de fonte de comida (fig. 4.4).

As simulações foram realizadas em computadores Pentium 4 de 3.0 GHz e 2.0 Gb de memória ram. O programa foi escrito em linguagem Fortran 90 e executado em plataforma Linux. Foram realizadas 5000 amostras para cada parâmetro. Da mesma forma, médias com mais amostras ( $2 \times 10^4$ ) foram testadas, onde foi verificado que o valor médio e o desvio da média obtidos não mudaram significativamente.

Para gerar os padrões de iscas e de forrageamento, comandos de tela gráfica foram acrescentados ao programa original e executados em plataforma Windows. Nesta etapa usamos um processador Sempron 3300+ com 1.0 Gb de memória ram.

### 4.3.2 A formação dos túneis

Para a formação dos túneis fixamos os seguintes parâmetros, que podem ser comparados com dados experimentais citados no capítulo 2:

- a) Número de cupins no ninho:  $N = 50$ . Este número representa de fato somente os cupins trabalhadores que saem para procurar alimentos, não estando relacionado com a população total da colônia.
- b) Parâmetros do fator de excitabilidade  $g_k$ :  $g_m = 0.6$  e  $\delta = 0.3$ . Dessa forma temos  $g_k \in [0.3, 0.9]$  para  $k = 1, N$ . O valor de  $g_k$  é mantido fixo até o fim de cada amostra.
- c) Número inicial de túneis:  $N_0 = 5$ .
- d) Raio do ninho:  $R_{ninho} = 10$ .
- e) Ângulo mínimo entre túneis iniciais:  $\gamma = 10^\circ$ .
- f) Intervalo de tempo e quantidade de cupins que deixam o ninho:  $t_l = 5$  e  $q_{cl} = 5$ .
- g) Expoente que caracteriza a probabilidade de bifurcação de um túnel:  $\eta = 20$ . Na figura 4.5 é mostrado o comportamento da função probabilidade de bifurcação para diferentes valores do expoente  $\eta$  em função do número de cupins dentro de um túnel.
- h) Atividade mínima:  $A_{min} = 10^{-3}$ .
- i) Número de segmentos à construir:  $N_{seg} = 12000$ . Considerando que a área média construída por cupins é de aproximadamente  $86cm^2/dia$  [5], estima-se que o

tempo gasto para a construção dos 12000 segmentos seja de 140 dias.

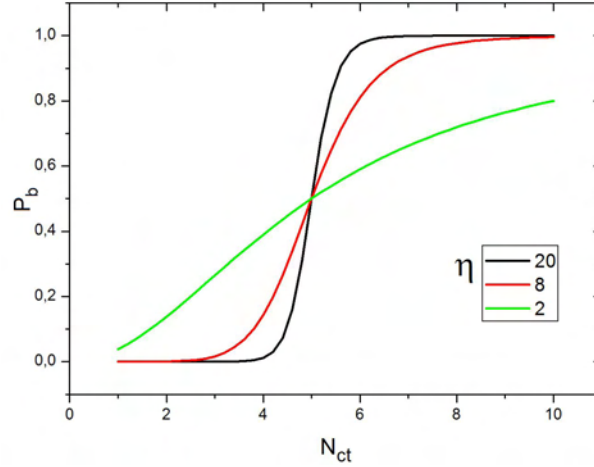


Figura 4.5: Probabilidade de bifurcação para diferentes valores do expoente  $\eta$  em função do número de cupins  $N_{ct}$  dentro de um túnel. O número ótimo de cupins para ocorrer a bifurcação é  $N_{ot} = 5$ .

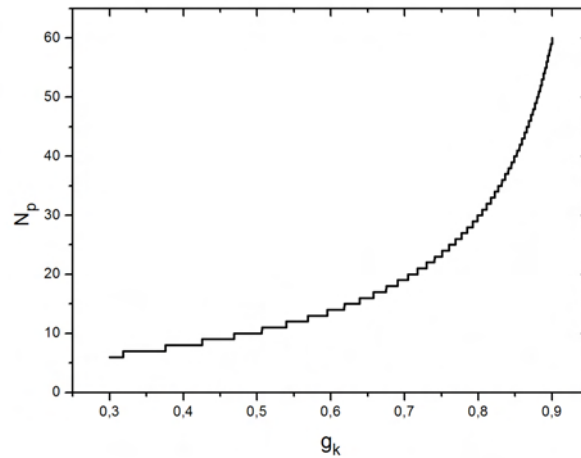


Figura 4.6: Número de passos  $N_p$  que um cupim poderá dar antes da sua atividade atingir um mínimo ( $A_{min} = 10^{-3}$ ), em função do seu fator de excitabilidade  $g_k$ .

O número de passos  $N_p$  que um cupim poderá dar antes da sua atividade atingir  $A_{min} = 10^{-3}$  é mostrado na figura 4.6. Uma vez que um cupim se diferencia do outro por seu valor  $g_k$ , conseqüentemente eles são diferenciados pelo número de passos que conseguem dar escavando antes de retornarem ao ninho para restaurar seus níveis

de atividade. No intervalo de  $g_k$  que estamos considerando, podem existir apenas cinquenta e quatro tipos de cupins, sendo que o mais fraco deles poderá dar apenas seis passos antes de retornar ao ninho enquanto o mais forte poderá dar sessenta passos. Na figura 4.7 é apresentado o comportamento da função atividade (eq. 4.5) para três valores de  $g_k$ .

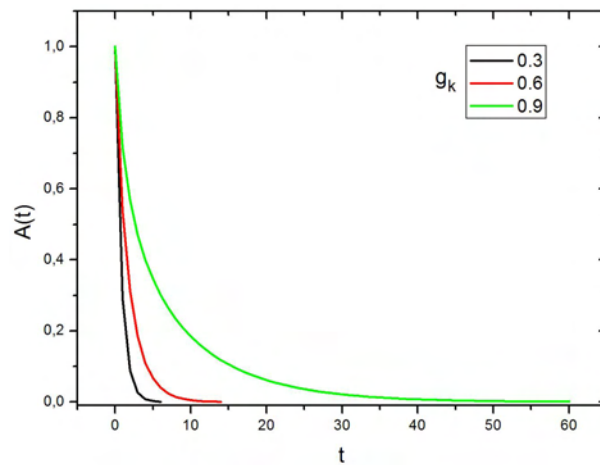


Figura 4.7: Comportamento temporal da função atividade para três valores de  $g_k$ .

Para se fazer uma análise relativa a eficiência dos túneis no forrageamento, definimos as seguintes quantidades:

1. Eficiência em encontrar clusters diferentes:

$$\xi_c = N_{ce}/N_c \quad (4.8)$$

onde  $N_{ce}$  é o número total de clusters diferentes encontrados e  $N_c$  é o número total de clusters na rede.

## 2. Eficiência em encontrar iscas:

$$\xi_i = N_{ie}/N_{is} \quad (4.9)$$

onde  $N_{ie}$  é o número de iscas encontradas e  $N_{is}$  é o número total de iscas na rede. É importante salientar que o método de se proibir que dois túneis se cruzem elimina a hipótese de que uma isca possa ser encontrada mais de uma vez. Isso porque haverá um segmento nessa região devido ao túnel que a encontrou; como o modelo analisa se um segmento está se superpondo a outro antes de analisar se existe uma isca no sítio em questão, esta, por sua vez, ficará “invisível” para os outros túneis.

Na figura 4.8 são mostrados os padrões de túneis gerados para diferentes taxas de degradação do feromônio e para ângulos de desvio iguais a cinco, trinta e sessenta graus. Para ângulos grandes os padrões são muito semelhantes aqueles para  $\alpha = 60^\circ$ .

Para valores de  $t_d = 0.01$  a quantidade de feromônio cai lentamente fazendo com que os túneis criados permaneçam evoluindo por tempos longos, mesmo que nenhuma isca seja encontrada 4.9(b). Tal comportamento não é visto quando  $t_d = 0.05$ . Isto se deve ao fato dos cupins escolherem os túneis em que vão entrar levando em conta a quantidade de feromônio existente nestes. Dessa forma túneis que não levarem rapidamente à comida perdem todo seu feromônio fazendo com que sejam abandonados. Na figura 4.9(d) estão circulados túneis que pararam de evoluir devido à perda total do feromônio.

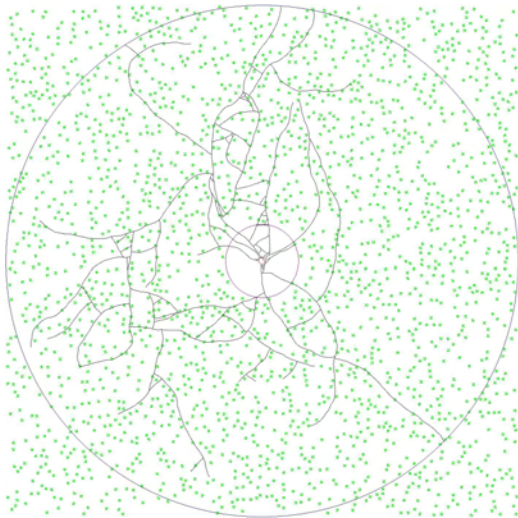
A figura 4.12 mostra que o comportamento das grandezas  $\xi_i$ ,  $\xi_c$ ,  $D_{mc}$  e  $N_{sc}$  não são fortemente influenciadas pela taxa de degradação de feromônio. Já a fração de túneis  $f_T$  com tamanho  $l$  segue uma distribuição exponencial e, portanto, apresenta comprimentos característicos dependentes de  $t_d$ .

Com relação ao ângulo de desvio  $\alpha$ , máximos nas eficiências são encontrados em torno de quarenta graus para  $\xi_i$  e em torno de vinte graus para a  $\xi_c$ . A queda das eficiências para ângulos grandes se deve ao fato da maioria dos segmentos serem construídos na região onde não há comida (ver figuras 4.8(e) e 4.8(f)) fazendo com que o processo de forrageamento fique inócuo.

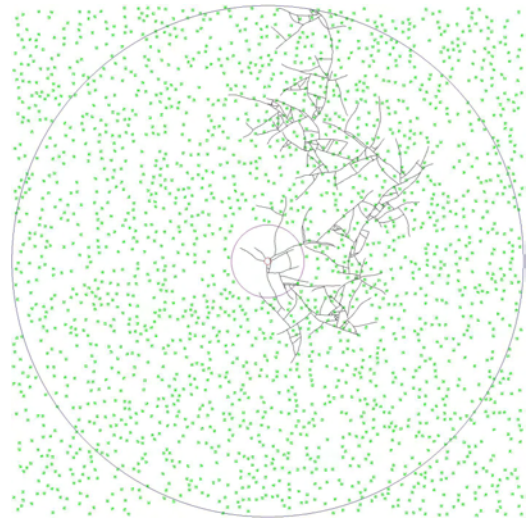
O número ótimo  $N_{ot}$  que caracteriza a probabilidade de bifurcação também muda a forma dos padrões como é visto na figura 4.11. Uma análise geral das figuras 4.12 e 4.13 mostra que os máximos para as eficiência ficam mais evidentes à medida que  $N_{ot}$  aumenta. Destas figuras podemos notar que o número de bifurcações (determinada por  $N_{ot}$ ) controla o número de segmentos construídos dentro da região determinada por  $D_{max}$  fazendo com que as quantidades  $N_{sc}$  e  $D_{max}$  estejam intimamente relacionadas. Isto mostra que se houvesse um ambiente abundante em comida, teríamos que as eficiências seriam determinadas pela distância do ninho que um cupim pode alcançar.

Uma vez que é encontrado um decaimento exponencial para a fração de túneis com comprimento  $l$ , podemos medir o comprimento característico  $\lambda$  através da equação 4.10. Eles são mostrados nas figuras 4.12(f) e 4.13(f) para diferentes taxas de decaimento de feromônio.

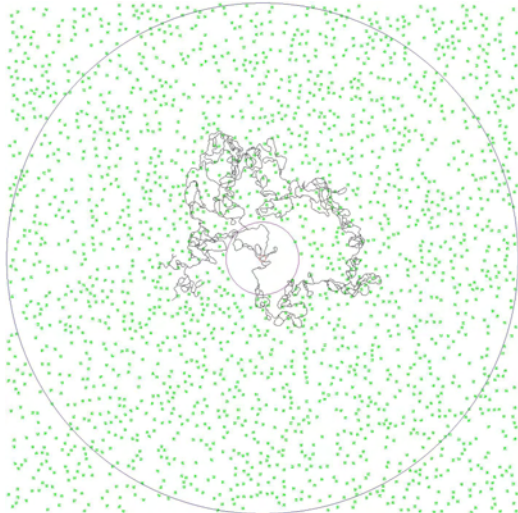
$$f_T(l) \propto \exp(-l/\lambda) \quad (4.10)$$



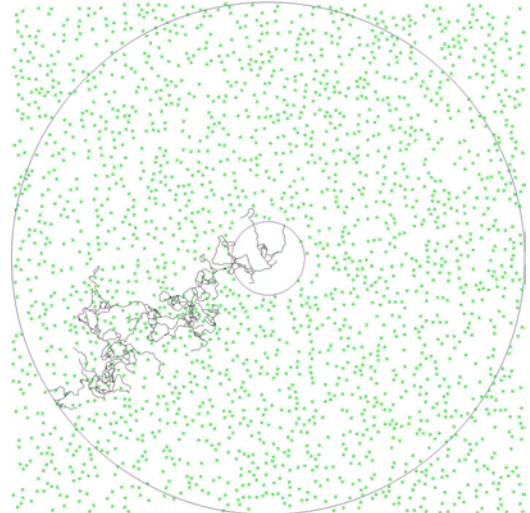
(a)  $t_d = 0.01, \alpha = 5$



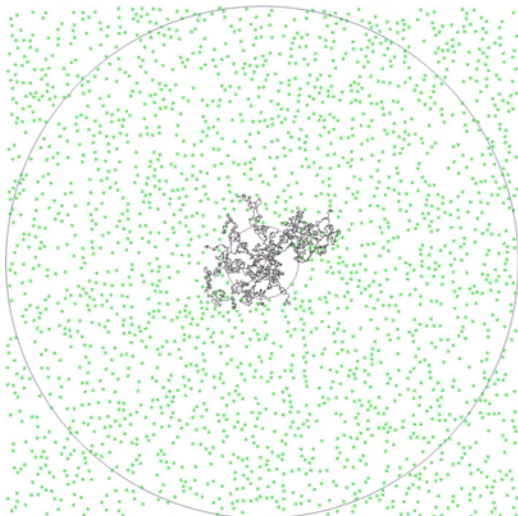
(b)  $t_d = 0.05, \alpha = 5$



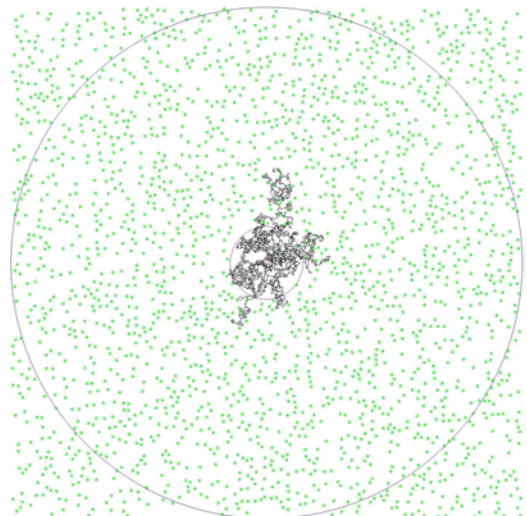
(c)  $t_d = 0.01, \alpha = 30$



(d)  $t_d = 0.05, \alpha = 30$



(e)  $t_d = 0.01, \alpha = 60$



(f)  $t_d = 0.05, \alpha = 60$

Figura 4.8: Padrões típicos de forrageamento gerados com  $N_{ot} = 5$ .

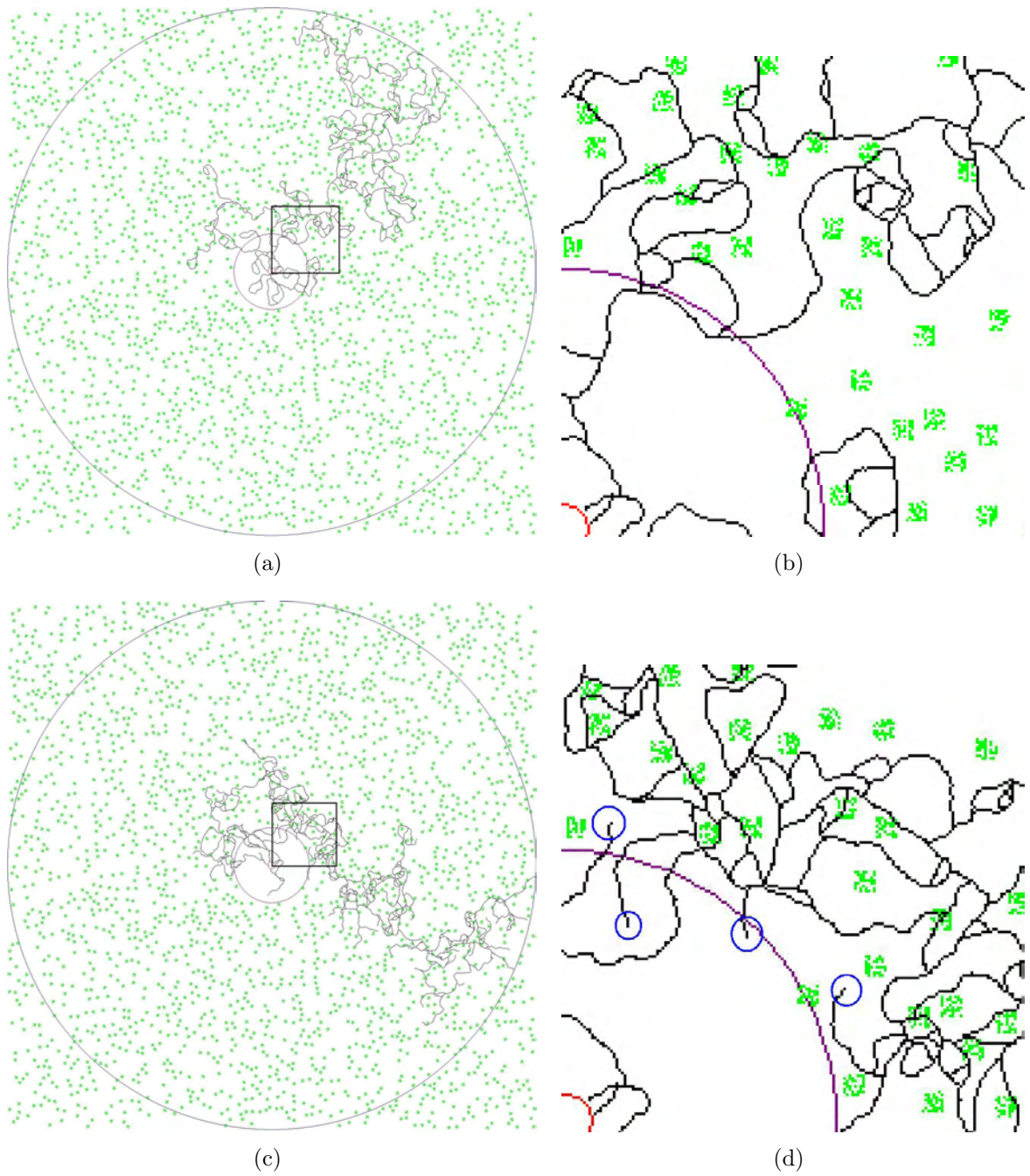
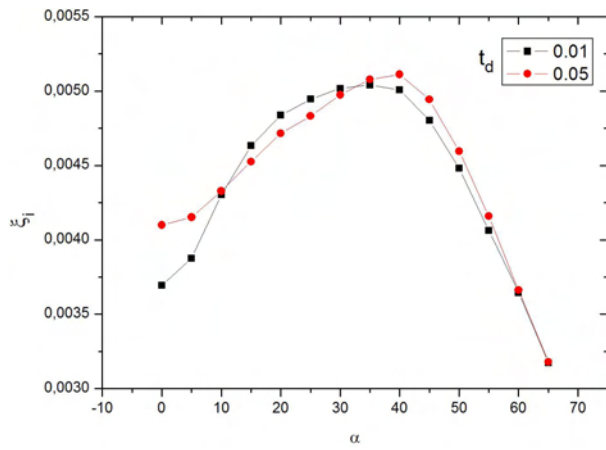
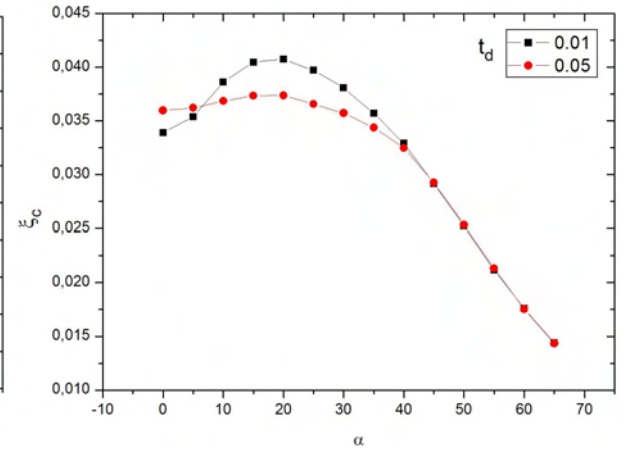


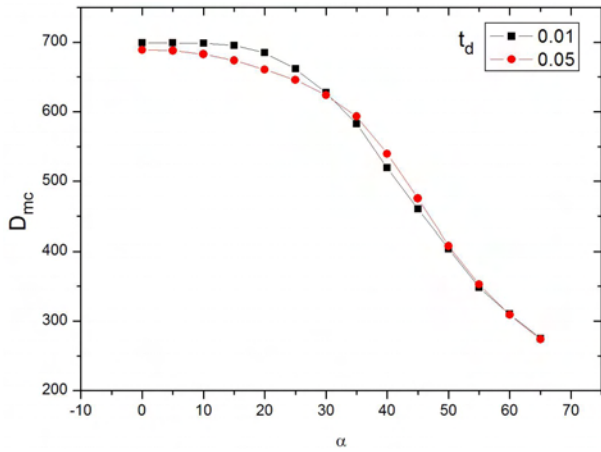
Figura 4.9: Padrões de túneis gerados com  $N_{ot} = 5$ ,  $\alpha = 25^\circ$  e (a)  $t_d = 0.01$  e (c)  $t_d = 0.05$ . As figuras (b) e (d) são um zoom da parte quadriculada nas figuras (a) e (c) respectivamente. Túneis que pararam de avançar em razão da ausência de feromônio de trilha têm suas extremidades circuladas.



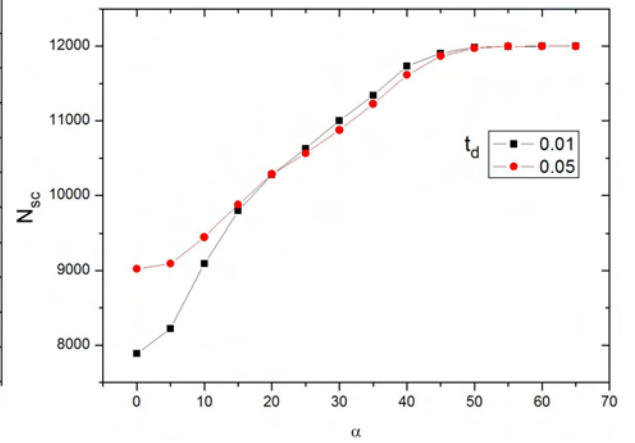
(a)



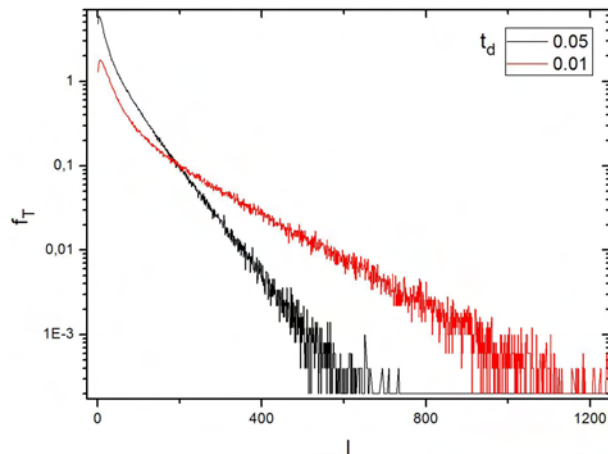
(b)



(c)

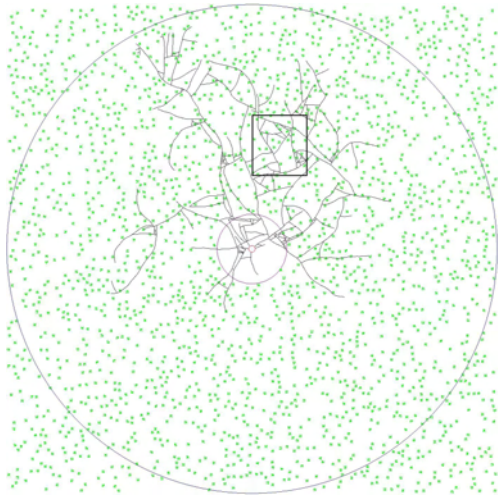


(d)

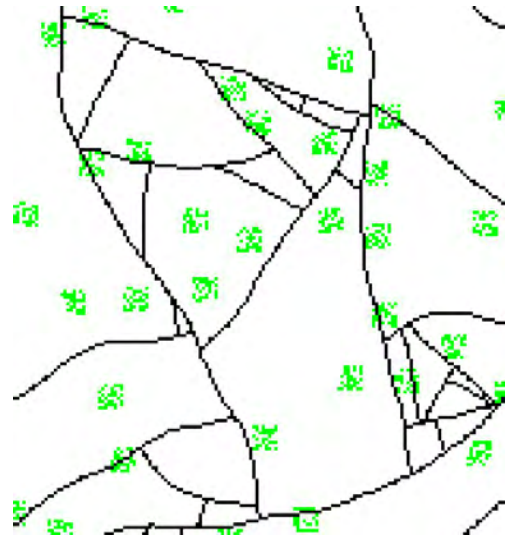


(e)

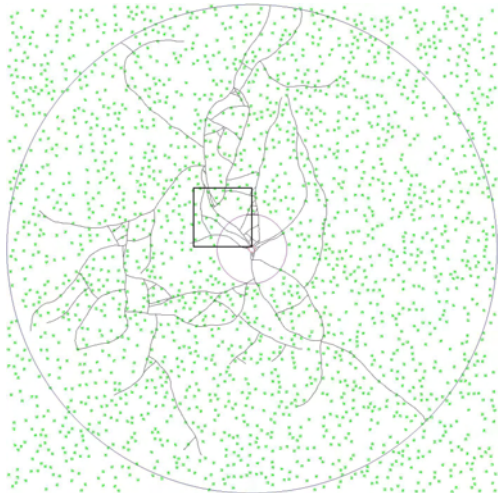
Figura 4.10: Comportamento de (a)  $\xi_i$ , (b)  $\xi_c$ , (c)  $D_{mc}$  e (d)  $N_{sc}$  para  $N_{ot} = 5$  em função do ângulo de desvio  $\alpha$ . Em (e) temos a fração de túneis  $f_T$  em função do comprimento  $l$  do túnel para  $\alpha = 20^\circ$ .



(a)



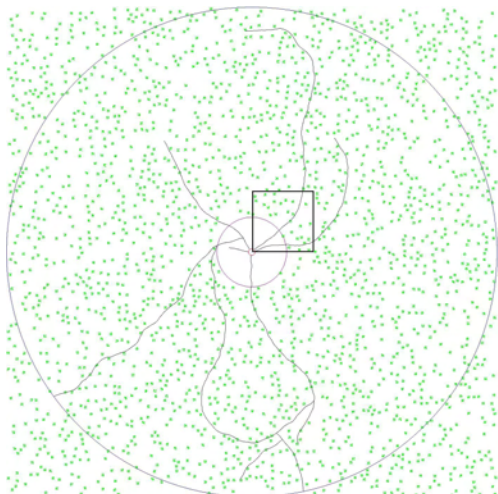
(b)



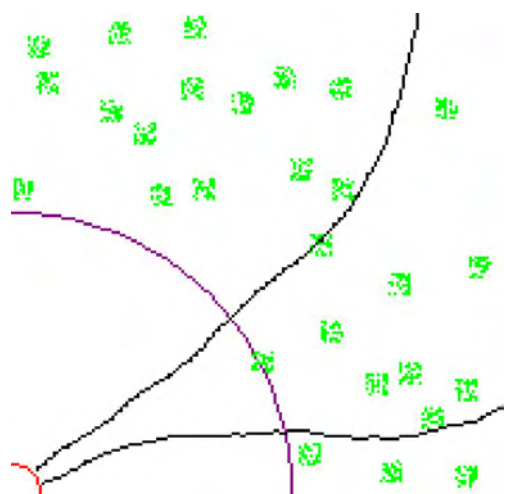
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.11: Padrões de túneis gerados com  $\alpha = 5^\circ$ ,  $t_d = 0.01$  e  $N_{ot}$  igual (a) três, (c) cinco e (e) dez. As demais figuras mostram zooms das regiões quadriculadas correspondentes.

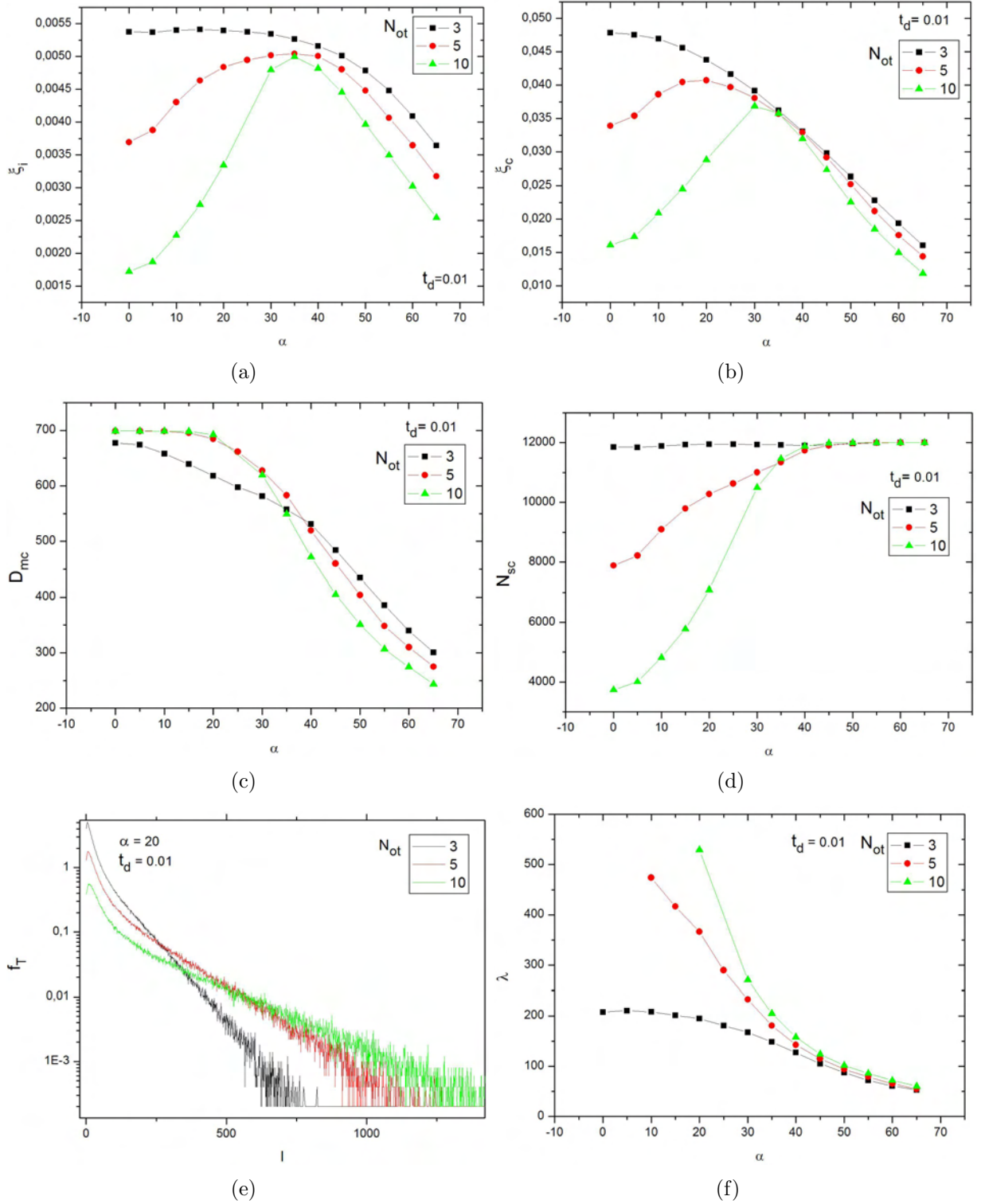


Figura 4.12: Comportamento de (a)  $\xi_i$ , (b)  $\xi_c$ , (c)  $D_{mc}$  e (d)  $N_{sc}$  para valores de  $N_{ot} = 3, 5$  e  $10$  e  $t_d = 0.01$  em função do ângulo de desvio  $\alpha$ . Em (e) temos a fração de túneis  $f_T$  em função do comprimento  $l$  do túnel para os mesmos valores de  $N_{ot}$  e para  $\alpha = 20^\circ$ . Em (f) está mostrado o comportamento do tamanho característico  $\lambda$  dos túneis em função do ângulo de desvio  $\alpha$ .

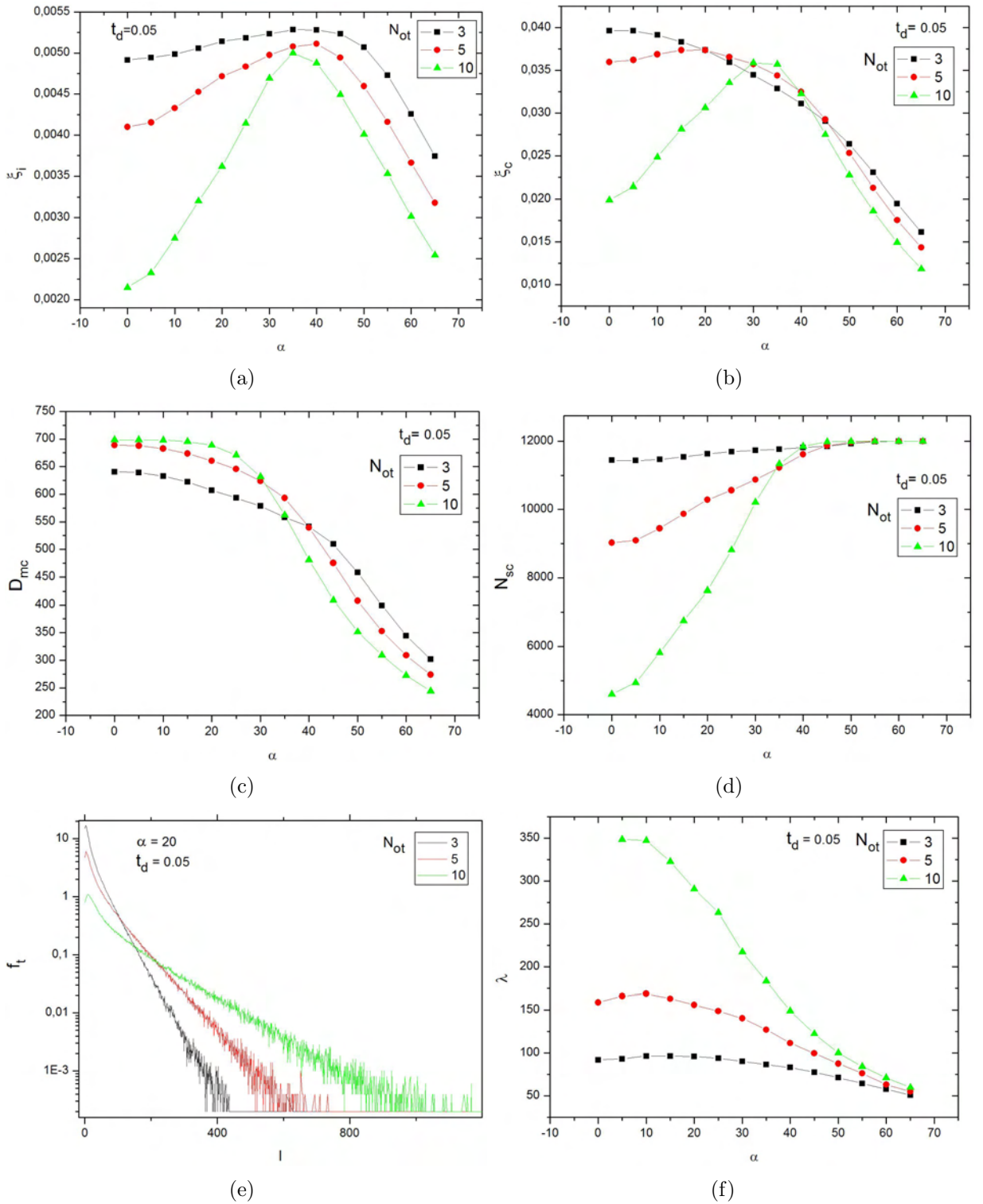


Figura 4.13: Comportamento de (a)  $\xi_i$ , (b)  $\xi_c$ , (c)  $D_{mc}$  e (d)  $N_{sc}$  para valores de  $N_{ot} = 3, 5$  e  $10$  e  $t_d = 0.05$  em função do ângulo de desvio  $\alpha$ . Em (e) temos a fração de túneis  $f_T$  em função do comprimento  $l$  do túnel para os mesmos valores de  $N_{ot}$  e para  $\alpha = 20^\circ$ . Em (f) está mostrado como o tamanho característico  $\lambda$  dos túneis depende do ângulo de desvio  $\alpha$ .

## 4.4 Conclusão

O processo de forrageamento dos cupins foi modelado usando-se essencialmente fatores biológicos como a taxa de decaimento de feromônio e o número ótimo de cupins dentro de um túnel para que ocorra uma bifurcação, processo que dá origem a um novo túnel. Então a questão passa a ser qual o maior ângulo que um cupim poderá desviar-se de sua direção anterior fazendo com ele obtenha uma eficiência máxima em encontrar comida.

Em um ambiente fragmentado, simulamos os vários tipos de caminhadas e observamos que a eficiência em encontrar iscas apresenta um máximo característico em  $\alpha$  aproximadamente igual a quarenta graus, enquanto a eficiência em encontrar clusters diferentes exibe um máximo em torno de vinte graus quando  $N_{ot} = 5$  (fig. 4.10(a) e 4.10(b)). Dessa forma, os cupins teriam dois comportamentos distintos que lhes permitiriam obter uma eficiência máxima: desviar-se por ângulos menores até encontrar comida e então mudar sua caminhada para ângulos maiores.

A taxa de degradação de feromônio  $t_d$  influencia no comprimento característico  $\lambda$  dos túneis criados, mas não influencia de forma expressiva no comportamento das eficiências. Já o número necessário de cupins em um túnel para que possa ocorrer bifurcação  $N_{ot}$  muda de forma clara o comportamento das eficiências e do número de segmentos construídos  $N_{sc}$ , deixando os picos de eficiência mais nítidos e mudando o pico de eficiência de clusters de  $\alpha \approx 20^\circ$  para  $\alpha \approx 30^\circ$ .

O modelo inclui duas características intrínsecas e fundamentais que são limitar a distância do ninho  $D_{max}$  que um cupim poderá ir sem morrer e fazer com que

em torno do ninho, determinado por  $D_{min}$ , não haja alimentos. Se não houvessem esses parâmetros não teríamos picos de eficiência para um ambiente abundante em comida e a eficiência seria constante para qualquer ângulo. Para baixas densidades de comida, a eficiência passa a depender da distância entre as iscas, fazendo com que os cupins tenham que desviar-se por ângulos pequenos, evitando construir segmentos em uma região deserta. Portanto, teríamos baixas eficiências para ângulos grandes e eficiências constantes para ângulos de desvio pequenos. Dessa forma,  $D_{max}$  e  $D_{min}$  são de extrema importância para a análise de  $\xi_i$  e  $\xi_c$ . Não menos importantes, o número de segmentos a serem construídos  $N_{seg}$  e o ângulo de desvio  $\alpha$  determinam a máxima distância do ninho  $D_{mc}$  alcançada por um segmento. Assim  $D_{min}$  é o outro fator independente que controla as curvas de eficiência.

# Capítulo 5

## Modelo para a Facilitação social

Motivados por resultados experimentais, descritos na seção 2.2, que mostram que o tempo de vida dos cupins é influenciado pela quantidade de indivíduos que o grupo contém, vamos simular o movimento e a interação de  $N$  cupins em um túnel unidimensional de tamanho  $L$ . Para o modelo proposto analisaremos a existência de uma transição de fase do estado ativo para o estado absorvente e determinaremos qual classe de universalidade o modelo pertence. A densidade de cupins  $\zeta = N/L$  ( $N \leq L$ ) é uma quantidade conservada e é o parâmetro de controle do nosso modelo.

### 5.1 Modelo

Vamos considerar uma rede unidimensional contendo  $L$  sítios e com condições de contorno periódicas. Cada sítio da rede poderá estar ocupado por um único cupim. Cada cupim terá uma atividade dada pela eq. (4.5) que lhe permitirá mover-se aleatoriamente pela rede. Por outro lado, ele ficará inativo (impossibilitado de se mover)

se sua atividade atingir um valor mínimo  $A_{min}$ . Por sua vez, quando dois cupins se encontrarem, suas atividades são restauradas aos seus valores máximos. Este processo é o que chamamos de facilitação social e está ilustrado na figura 5.1.

As regras de evolução são descritas a seguir:

1. A cada passo de tempo, incrementado por  $\Delta t = 1/N_c$  onde  $N_c$  é o número de cupins ativos, um cupim ativo é escolhido ao acaso, podendo se mover, com igual chance para um dos seus primeiros vizinhos.
2. Caso o sítio vizinho esteja vazio, o cupim se move e sua atividade evolui de acordo com a eq. (4.5).
3. Se o vizinho escolhido estiver ocupado, seja por um cupim ativo ou não, a atividade dos dois cupins é elevada ao máximo  $A = 1$ . Nesse caso a posição dos cupins no instante  $t$  é preservada.

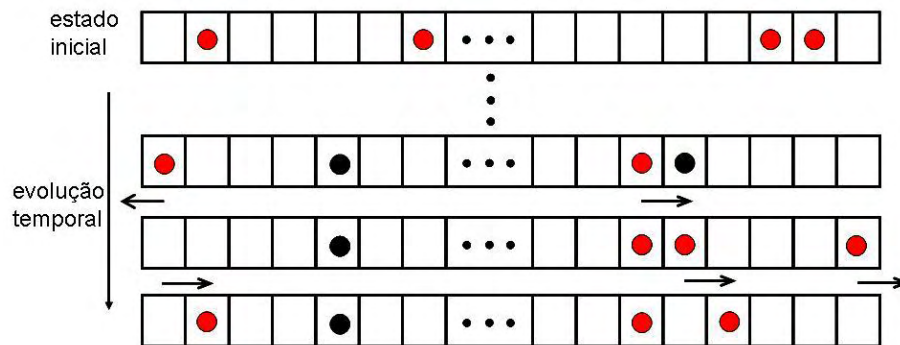


Figura 5.1: Evolução temporal do modelo de facilitação social. Os discos vermelhos e pretos indicam cupins ativos e inativos, respectivamente.

## 5.2 Resultados

O processo de facilitação social foi simulado usando-se  $g_m = 0.3$  e  $A_{min} = 10^{-3}$ . Como o fator de excitabilidade individual de cada cupim  $g_k$  é escolhido aleatoriamente no intervalo entre  $g_m - \delta$  e  $g_m + \delta$ , apresentamos resultados para o caso onde todos os cupins tem o mesmo valor de  $g_k$  fazendo  $\delta = 0$  e para o caso onde temos quatro tipos de cupins fazendo  $\delta = 0.1$ , sendo que a diferença entre eles é mostrada na figura 5.2

Note que o fator de excitabilidade é um parâmetro importante, uma vez que este permite que os cupins tenham condições de se movimentar por tempos longos, aumentando conseqüentemente a chance que a atividade dentro do túnel não alcance o estado absorvente. Na figura 5.3 podemos ver que, mesmo para densidades baixas, é possível manter uma densidade não nula de cupins ativos aumentando o valor de  $g_m$ .

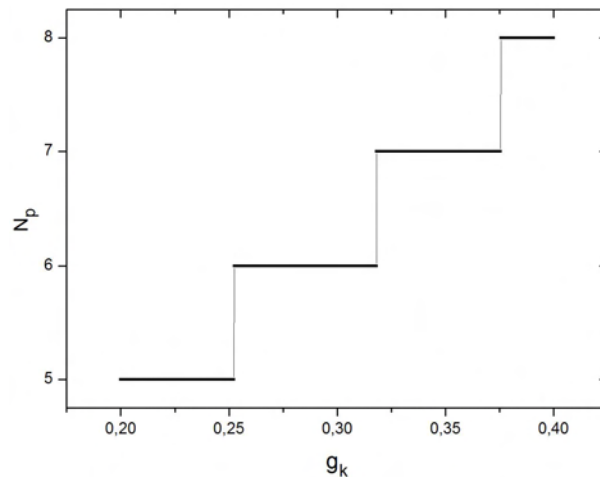


Figura 5.2: Número de passos antes da atividade do cupim cair até  $A_{min} = 10^{-3}$  para  $g_m = 0.3$  e  $\delta = 0.1$ .

Para a análise de tamanho finito, simulamos o modelo em redes de tamanho  $L = 100, 200, 500, 10^3, 2 \times 10^3, 5 \times 10^3, 10^4$  e  $2 \times 10^4$  usando o método de simulação descrito na seção 3.3 para valores de  $M = 2 \times 10^3$  e  $p_{rep} = 0.01$ . A média temporal

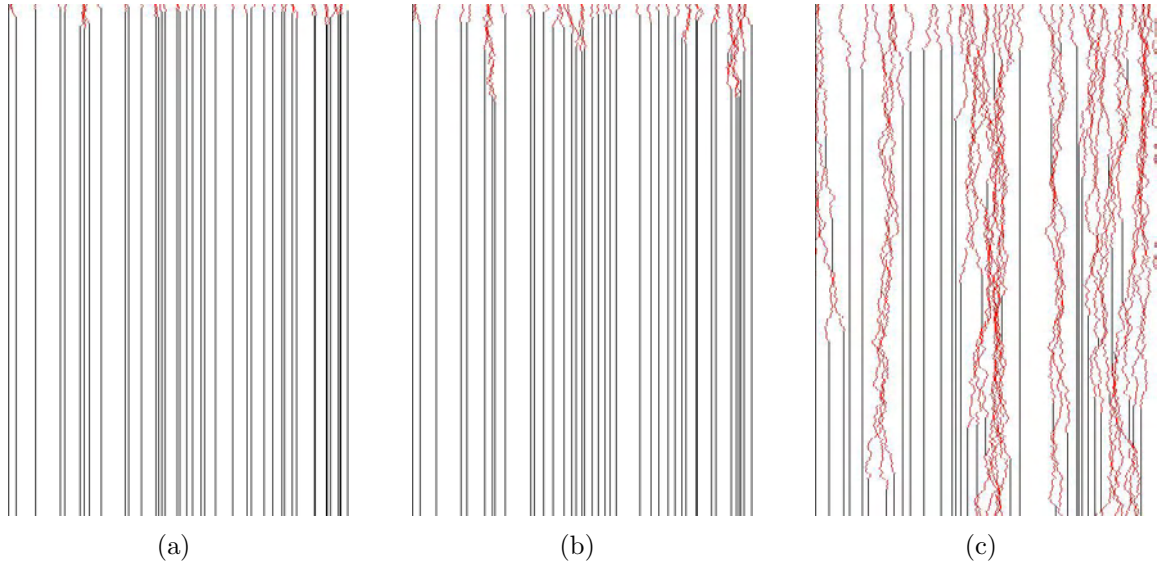


Figura 5.3: Padrões espaço temporais com  $\zeta = 0.1$ ,  $L = 400$  e  $t = 600$  para valores de  $\delta = 0$  e  $g_m = 0.3, 0.6$  e  $0.9$ , respectivamente, para (a), (b) e (c). As cores vermelhas e pretas indicam sítios que possuem cupins ativos e inativos, respectivamente. Os sítios estão dispostos horizontalmente e o tempo evolui verticalmente para baixo.

das grandezas analisadas foi feita para tempos de simulação entre  $t_{si} = 3 \times 10^7$  e  $t_{sf} = 5 \times 10^7$ . Para as redes da ordem de  $10^4$  fizemos  $t_{sf} = 4 \times 10^7$ . Uma análise visual do comportamento de  $\rho$  (fig. 5.4) permitiu a determinação de  $t_{si}$  para as redes de todos os tamanhos. Além dessa média, foram feitas médias sobre configurações iniciais (de seis a dez amostras).

Para valores de  $g_m = 0.3$  e  $\delta = 0$  padrões de evolução espaço-temporal são mostrados na figura 5.5 para diferentes densidades iniciais de sítios ativos  $\zeta$ . Como pode-se observar na figura 5.5(b), os padrões próximos da criticalidade possuem uma estrutura complexa que se propaga no espaço tempo. Contudo, esse padrões diferem muito dos observados em percolação direcionada [33].

A densidade estacionária  $\zeta_s$  em função de  $L$  é mostrada na figura 5.6. Para a densidade inicial de sítios ativos  $\zeta_i = 0.4298$  encontramos uma lei de potência,

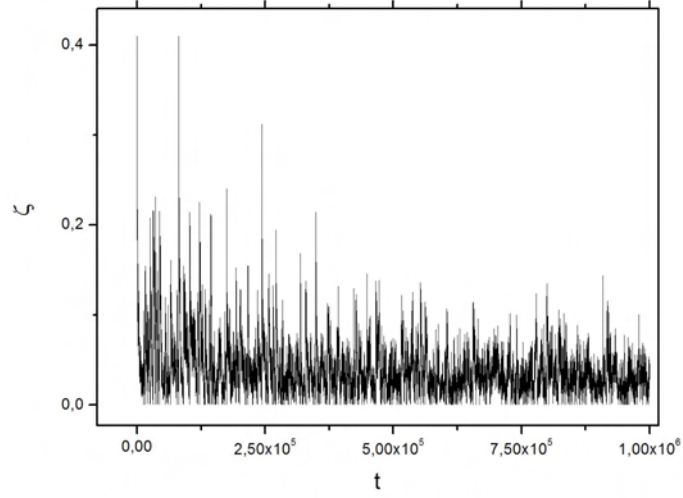


Figura 5.4: Comportamento temporal da densidade de cupins ativos para uma densidade inicial  $\zeta^i = 0.41$  em uma rede de tamanho  $L = 10^3$ .

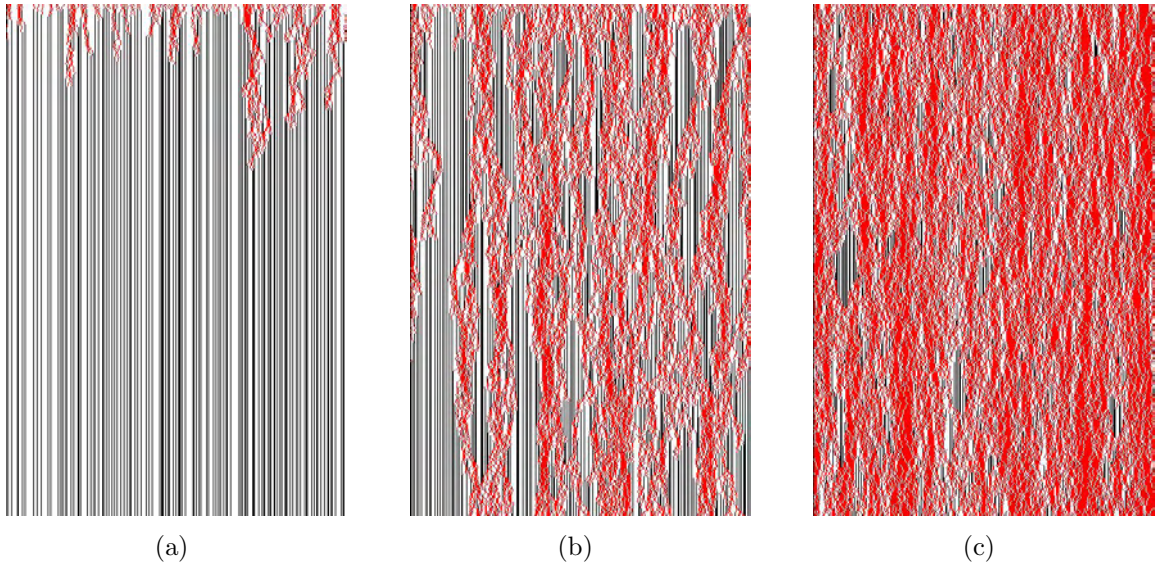


Figura 5.5: Padrões espaço-temporais para  $g_m = 0.3$  e  $\delta = 0$  com  $L = 400$  e  $t = 600$  para valores de  $\zeta_i = 0.3, 0.43$  e  $0.6$  respectivamente para (a), (b) e (c). Cores como na fig.5.3

portanto, considerando a lei de escala  $\zeta_s \propto L^{\frac{\beta}{\nu_{\perp}}}$  encontramos  $\frac{\beta}{\nu_{\perp}} = 0.219(8)$ . Da lei de escala

$$\chi \propto L^{\frac{\gamma}{\nu_{\perp}}}$$

encontramos  $\frac{\gamma}{\nu_{\perp}} = 0.435(6)$ . Os valores da densidade estacionária para tamanhos de rede menores foram omitidos das figuras 5.6 e 5.7 pelo fato do número de cupins ser

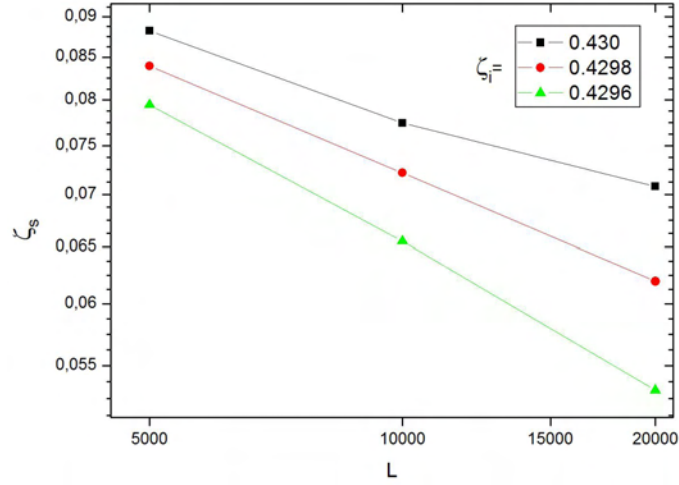


Figura 5.6: Densidade quase-estacionária  $\zeta_s$  em função do tamanho  $L$  da rede. As três curvas diferem na densidade inicial de cupins  $\zeta_i$ . Em todas as curvas  $\delta = 0$

discreto, tornando impossível um ajuste fino no parâmetro  $\zeta_i$ .

Para o caso onde  $\delta = 0.1$ , os expoentes encontrados foram:  $\frac{\beta}{\nu_{\perp}} = 0.165(7)$ ,  $\frac{\gamma}{\nu_{\perp}} = 0.598(8)$  e considerando  $\tau_s \propto L^{\frac{\nu_{\parallel}}{\nu_{\perp}}}$  encontramos  $\frac{\nu_{\parallel}}{\nu_{\perp}} = 1.57(6)$ . O comportamento de lei de potência para os parâmetros  $\zeta_s$ ,  $\chi_s$  e  $\tau_s$  são mostrados na figura 5.7 e exibem um excelente comportamento em lei de potência.

Na tabela 5.1 são mostrados os expoentes encontrados nos casos onde os indivíduos são idênticos ( $\delta = 0.0$ ) e diferentes ( $\delta = 0.1$ ), em comparação com expoentes encontrados em outros modelos.

	$\beta/\nu_{\perp}$	$\gamma/\nu_{\perp}$	$\nu_{\parallel}/\nu_{\perp}$
DP	0.252 [32]	0.495(1) [32]	1.580(1) [32]
CP	0.2528(3) [36]	0.497 [33]	1.5815(10) [36]
CLG	0.223(5) [38]	0.553(3) [38]	1.715(7) [38]
Modelo prop. $\delta = 0.0$	0.219(8)	0.435(6)	ñ calc.
Modelo prop. $\delta = 0.1$	0.165(7)	0.598(8)	1.57(6)

Tabela 5.1: Valores dos expoentes críticos para os modelos DP, CP e CLG em uma dimensão em comparação com os expoentes encontrados para o caso de indivíduos idênticos e diferentes.

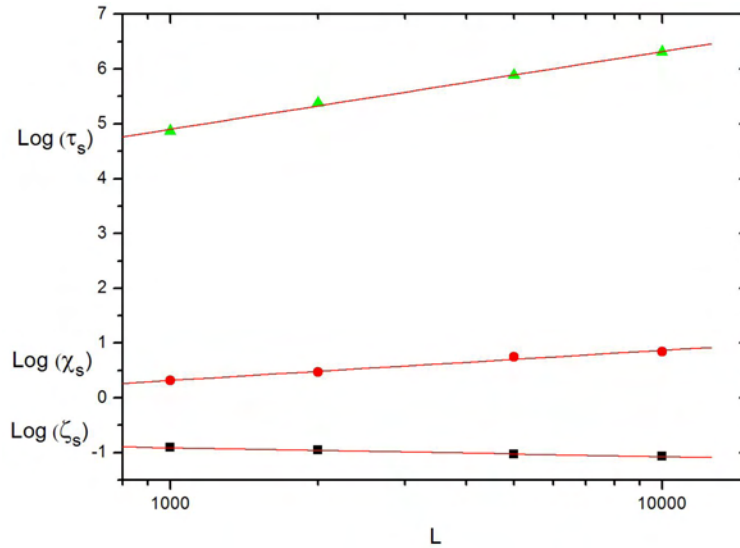


Figura 5.7: Lei de potência que caracteriza a transição de fase do estado ativo para o estado absorvente quando  $\zeta_i = 0.417$  e  $\delta = 0.1$ .

### 5.3 Conclusão

O modelo proposto para a facilitação social exibe uma transição de fase dependente da densidade de cupins  $\zeta$  no interior de um túnel de tamanho  $L$ . Para o caso onde  $\delta = 0$  os expoentes encontrados estão muito próximos dos valores encontrados para o caso do gás de rede conservativo, indicando que eles pertencem à mesma classe de universalidade. Já para o caso onde  $\delta \neq 0$  os expoentes encontrados sugerem uma nova classe de universalidade.

As simulações para tamanhos grandes de rede e para  $\delta \neq 0$ , não nos permitiu conseguir uma boa precisão para o valor crítico do parâmetro de controle  $\zeta_c$ . Ao que tudo indica, existe uma desordem intrínseca dependente da configuração inicial. Isto seria causado pelo fato dos cupins serem diferentes, possibilitando a formação e conseqüentemente a localização de grupos formados por cupins capazes de caminhar por tempos longos e outros grupos por tempos curtos. Portanto, a configuração inicial,

correspondente a posição espacial de cada indivíduo altera o valor da densidade de sítios ativos no estado estacionário. Simulações complementares serão necessárias para uma conclusão definitiva.

# Capítulo 6

## Conclusões gerais

O processo de forrageamento em cupins aqui modelado, apresentou um máximo característico para a eficiência em encontrar iscas e outro para encontrar diferentes clusters. Dessa forma, o modelo mostrou que os cupins teriam que ter dois comportamentos distintos de criação de túneis para obter uma eficiência máxima. Seriam eles: desviar-se de sua trajetória anterior em ângulos de aproximadamente vinte graus até encontrar comida e então mudar seu comportamento para desvios de até quarenta e cinco graus.

A taxa de degradação do feromônio influencia no comprimento característico dos túneis, mas não na eficiência por busca de comida. Por sua vez, o número ótimo de cupins influenciou na eficiência de busca de sítios alvos para desvios pequenos. Para ângulos grandes, os padrões de forrageamento simulados são bem parecidos e o processo de construção de túneis fica restrito à região sem comida; conseqüentemente a eficiência cai rapidamente para ângulos grandes.

Com uma função atividade (eq. 4.5), que descreve a capacidade do cupim se

mover, simulamos o seu tráfego dentro de um túnel. Tais simulações foram feitas considerando-se cupins idênticos e cupins diferentes. Para os dois casos encontramos uma transição de fase contínua do estado absorvente para o estado ativo dependente da densidade de cupins dentro do túnel. Os expoentes característicos encontrados mostram que, para o caso de cupins idênticos, caímos na classe de universalidade do gás de rede conservativo; enquanto para cupins diferentes o modelo apresenta uma nova classe universalidade.

Para o processo de facilitação social ainda são necessárias mais amostras e um estudo mais detalhado sobre a possibilidade de haver uma desordem intrínseca no modelo para o caso onde os cupins são diferentes.

# Referências Bibliográficas

- [1] C. Detrain, J. L. Deneubourg. Self-organized structures in a superorganism: do ants “behave” like molecules? *Physics of Life Reviews*, **3** 162 (2006)
- [2] E. D. Doerr, V. A. J. Doerr. Dispersal range analysis: quantifying variation in dispersal behaviour. *Oecologia* **142** 1 (2005)
- [3] G. Bengtsson, E. Nilsson, T. Rydén, M. Wiktorsson. Irregular walks and loops combines in small-scale movement of a soil insect: implications for dispersal biology. *Journal of Theoretical Biology* **231** 299 (2004).
- [4] A. Arab, Ana M. C.-Leonardo. Effect of biotic and abiotic factors on the tunneling behavior of *Coptotermes gestroi* and *Heterotermes tenuis* (Isoptera: Rhinotermitidae). *Behavioural Process* **70** 32 (2005)
- [5] H. Puche, N.-Y. Su. Tunnel formation by *Reticulitermes flavipes* and *Coptotermes formosanus* (Isoptera: Rhinotermitidae) in response to wood in sand. *Ecology and Behavior* **94** 1398 (2001)

- [6] C. E. Campora, J. K. Grace. Tunnel orientation and serach pattern sequence of the formosan subterranean termite (Isoptera: Rhinotermitidae). *Journal of Economic Entomology* **94** 1193 (2001)
- [7] D. E. Jackson, M. Holcombe, F. L. W. Ratnieks. Trail geometry gives polarity to ant foraging networks. *Letters to Nature* **432** 907 (2004)
- [8] I. Conradt, P. A. Zollner, T. I. Roper, K. Frank and C. D. Thomas. Foray search: an effective systematic dispersal strategy in fragment landscapes. *The American Naturalist* **161** ,no 6 905 (2003)
- [9] H. Puche, N.-Y. Su. Application of fractal analysis for tunnel systems of subterranean termites (Isoptera: Rhinotermitidae) under laboratory conditions. *Population Ecology* **30** 543 (2001)
- [10] J. Reinhard, H. Hertel, M. Kaib. Systematic search for food in the subterranean termite *Reticulitermes santonensis* De Feytaud (Isoptera, Rhinotermitidae). *Insectes Sociaux* **44** , 147 (1997).
- [11] G. Bengtsson, E. Nilsson, T. Rydén, M. Wiktorsson. Modelling the movement of a soil insect. *Journal of Theoretical Biology* **231** 497 (2004).
- [12] P. A. Zollner, S. T. Lima. Search strategies for landscape-level interpatch movements. *Ecology*, **80** 1019 (1999)
- [13] S. -H. Lee, P. Bardunias, N.-Y. Su. Food encounter rates of simulated termite tunnels with variable food size/distribution pattern and tunnel branch length. *Journal of Theoretical Biology* **243** 493 (2006).

- [14] J. W. Haefner, T. O. Crist. Spatial model of movement and foraging in harvester ants (*Pogonomyrmex*) (I): the roles of memory and communication. *Journal of Theoretical Biology* **166** 299 (1994).
- [15] T. O. Crist, J. W. Haefner. Spatial model of movement and foraging in harvester ants (*Pogonomyrmex*) (II): the roles of environment and seed dispersion. *Journal of Theoretical Biology* **166** 315 (1994).
- [16] I. Hanski, O. Ovaskainen. Metapopulation theory for fragmented landscapes. *Theoretical Population Biology* **64** 119 (2003)
- [17] O. Bénichou, M. Coppey, M. Moreau, P-H. suet, R. Voituriez. Optimal search strategies for hidden targets. *Physical Review Letters* **94** 198101 (2005)
- [18] G. M. Viswanathan, S.V. Buldyrev, S. Havlin, M. G. E. da Luz, E. P. Raposo, H. E. Stanley. Optimizing the success of random searches. *Letters to Nature* **401** 911 (1999)
- [19] G. M. Viswanathan, V. Afanasyev, S.V. Buldyrev, S. Havlin, M. G. E. da Luz, E. P. Raposo, H. E. Stanley. Lévy flights in random searches. *Physica A* **282** 1 (2000)
- [20] L. Conradt, E. J. Bodsworth, T. J. Roper, C. D. Thomas. Non-random dispersal in the butterfly *maniola jurtina*: implications for metapopulation models. *Biological Sciences* **267** 1505 (2000)

- [21] M. Lenz, E. R. Williams. Influence of container, matrix volume and group size on survival and feeding activity in species of Coptotermes and Nasutitermes (Isoptera: Rhinotermitidae, Termitidae). *Material und Organismen* **15** 25 (1980)
- [22] O. Miramontes, O. DeSouza. The nonlinear dynamics of survival and social facilitation in termites. *Journal of Theoretical Biology* **181** 373 (1996)
- [23] D. J. T. Sumpter. The principles of collective animal behaviour. *Philosophical Transactions of the Royal Society* **361** 5 (2006)
- [24] K. E. Green. Stop and go foraging signals in eusocial insects. *APS 402 Dissertation*
- [25] R. K. Saran, J. G. Millar, M. K. Rust. Role of (3Z,6Z,8E)-Dodecatrien-1-ol in Trail Following, Feeding, and Mating Behavior of *Reticulitermes hesperus*. *Journal Chemical Ecology* **33** 369 (2007)
- [26] K. Krishna, F. M. Weesner. *Biology of Termites*, New York , London (1970) 2v.
- [27] L. Souto, K. Kitayama. *Constrictotermes cyphergaster* (Isoptera: Termitidae: Nasutitermitinae) Maintain foraging trails for a longer period by means of fecal droplets. *Sociobiology* **35** 367 (2000)
- [28] J. C. Mansur Filho, A.G. Silva, A.T.G. Carvalho, M.L. Martins. Electrocrystallization under magnetic fields: experiment and model. *Physica A* **350** 393 (2005).
- [29] A. G. Dickman, R. Dickman, F. A. Barbosa. Transições de fase sem termodinâmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28** 23 (2006)

- [30] R. Dickman, M. A. Muñoz, A. Vespignani, S. Zapperi. Paths to self-organized criticality. *Brazilian Journal Physics* **30** 27 (2000)
- [31] M. A. Muñoz, R. Dickman, A. Vespignani, S. Zapperi. Avalanche and spreading exponents in systems with absorbing states. *Physical Review E* **59** 6175 (1999)
- [32] G. Ódor. Universality classes in nonequilibrium lattice systems *Reviews of Modern Physics* **76** 663 (2004)
- [33] J. Marro, R. Dickman, *Nonequilibrium phase transitions in lattice models* (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999)
- [34] N. Boccara, *Modeling complex systems* (Springer-Verlag New York, Inc., 2004)
- [35] M. Rossi, R. P.-Satorras, A. Vespignani. Universality class of absorbing phase transitions with a conserved field. *Physical Review Letters* **85** 1803 (2000)
- [36] M. M. de Oliveira, R. Dickman. How to simulate the quasistationary state. *Physical Review E* **71** 016129 (2005)
- [37] R. Dickman, T. Tomé, M. J. de Oliveira. Sandpiles with height restrictions. *Physical Review E* **66** 016111 (2002)
- [38] C. E. Fiore, M. J. de Oliveira. One-dimensional lattice gas models with infinitely many absorbing states. *Brazilian Journal of Physics* **36** 218 (2006)