



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Câmpus de Rio Claro

Departamento de Física

Análise estatística da dinâmica de roubos e furtos residenciais

Aluno: Murilo Ferriolli Marques

Orientador: Prof. Dr. Edson Denis Leonel

Rio Claro–SP 2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

Murilo Ferriolli Marques

Análise estatística da dinâmica de roubos e furtos residenciais

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas do
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Filho, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Física,
área de Física.

Edson Denis Leonel

Rio Claro - SP
2019

M357a Marques, Murilo Ferriolli
 Análise Estatística da Dinâmica de Roubos e Furtos
 Residenciais / Murilo Ferriolli Marques. -- Rio Claro, 2019
 52 p. : il.

 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual
 Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências
 Exatas, Rio Claro
 Orientador: Edson Denis Leonel

 1. Autômato celular. 2. Criminalidade. 3. Transição de
 fase. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Câmpus de Rio Claro

Departamento de Física

Murilo Ferriolli Marques

Análise Estatística da Dinâmica de Roubos e Furtos Residenciais

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas do
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Filho, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Física,
área de Física.

Comissão Examinadora

Prof Dr Edson Denis Leonel

Prof Dr Makoto Yoshida

Tenete-Coronel Dr Rodrigo Eval Arena

Conceito: Aprovado

Rio Claro/SP, 25 de Junho de 2019

Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar as meus pais Luiz Antônio Marques e Valeria Cristina Ferriolli Marques por todo o carinho, amor e ajuda durante essa jornada para realizar meus sonhos. Eles são o principal motivo por ter chegado aonde cheguei.

Também quero agradecer ao Prof. Dr Edson Denis Leonel por abrir as portas para meu futuro e acreditar em mim, por toda sua ajuda e paciência nesses últimos anos. Uma das pessoas mais competentes e gentis que tive o enorme prazer de conhecer.

Professor, MUITO OBRIGADO!

Gostaria também de mencionar meu enorme agradecimento ao Tenente-Coronel Rodrigo Eval Arena, pelas valorosas contribuições referentes aos estudos realizados nesse trabalho.

Aos meus amigos que entraram no ano de 2012 junto a mim, e ao demais que conheci ao longo dos anos. Em especial meu grande amigo Henrique Reatto Porcel pelas varias noites de estudo e aos colegas do Laboratório de Dinâmica não linear.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Nesse trabalho, utilizaremos um autômato celular para investigar o problema de roubos e furtos residenciais. A partir de regras e critérios pré-estabelecidos, definimos o comportamento da difusão da criminalidade em uma cidade como função do tempo e dos seus parâmetros de controle. Utilizando um tratamento estatístico da criminalidade, nossos resultados indicam uma possível transição entre fase endêmica, onde o crime existe porém em baixa ocorrência, e uma fase epidêmica, onde o crime é desenfreado.

Palavras chaves: Autômato celular. Criminalidade, Transição de fase

Abstract

In this work, we will use a cellular automata to investigate the problem of residential robberies. Starting from a set of rules and criteria, the diffusion of the crime is investigated either as a function of time as well function of the control parameters. Using a statistical treatment our results indicate a possible phase transition between endemic, where crime exists but in low occurrence, and epidemic where crime is rampant.

Key words: Cellular automaton. Crime, Phase Transition

Sumário

Capítulo 1: Introdução	8
1.1 A Criminologia associada à tecnologia.....	8
1.2 Uma abordagem do problema.....	9
Capítulo 2: O Modelo	12
2.1 Modelando o problema	12
2.2 Aprimorando o Modelo.....	16
2.2.1 A dependência do tempo	17
2.2.2 Atração Intrínseca e Atração dinâmica	20
2.2.3 A influência da região	22
Capítulo 3: Resultados Numéricos	24
3.1 A Difusão da criminalidade	24
3.1.1 A Influência do Parâmetro de controle ω	24
3.1.2 A Influência do Parâmetro de Controle As_0	35
Capítulo 4: Uma Possível Transição de fase	38
4.1 A Influência dos Parâmetros As_0 , e ω para a Transição de Fase	38
4.2 Caracterizando a Transição de Fase utilizando As_0 e ω	41
4.3 Caracterizando a Transição de Fase utilizando ω	42
Capítulo 5: A Influência do Tamanho do Retículo	45
Capítulo 6: Conclusões e Perspectivas.....	48
Referências Bibliográficas	50

Capítulo 1: Introdução

1.1 A Criminologia associada à tecnologia

A criminalidade, infelizmente, é algo presente em qualquer região, sendo tal fenômeno pouco ou muito evidente. Estudos relacionados à criminalidade afirmam que não é algo trivial apontar a causa que leva uma pessoa a praticar crimes [1].

Alguns acadêmicos apontam que a criminalidade está vinculada a um efeito de desordem urbana [2-4]. Entretanto, as consequências desses atos praticados por criminosos geram diversos prejuízos materiais e morais, tanto para a sociedade quanto para o Estado.

Diversos são os meios que a polícia utiliza para combater o crime, de forma ostensiva, inibindo que um crime ocorra (atos praticados pela Polícia Militar, Polícia Rodoviária Federal e Polícia Ferroviária Federal), ou mesmo agindo quando o crime já foi executado, incluindo o procedimento jurídico (atos praticados pela Polícia Civil e Polícia Federal), segundo o artigo 144 da Constituição Federal.

Entretanto, mesmo com todo esforço da polícia em preservar a ordem pública, o crime ainda persiste. Por esse motivo, meios de estudos de comportamentos dos criminosos aliados a vários ramos do conhecimento científico (criminologia), além de investigações primárias que antecedem um crime, são de extrema importância para garantir melhor segurança dos locais afetados.

A criminologia trata-se de uma ciência empírica, baseando-se na observação, nos fatores e na prática de atos delituosos, sendo essencialmente qualitativa. Composto um conjunto de diversos ramos da ciência, a criminologia junta forças com a Psicologia, Direito, Biologia, Filosofia, entre outras áreas do conhecimento, a fim de estudar o comportamento dos criminosos, o crime, a vítima e o controle social de atos criminosos [5-7].

A criminologia, juntamente com a metodologia investigativa policial, vem ganhando força nos últimos anos com a aplicação de métodos matemáticos. Isso é possível graças a grandes quantidades de dados e a rapidez da informação.

Tomando como base um conjunto de dados adquiridos, podemos realizar um tratamento empírico, determinando padrões de comportamento delitivo, permitindo a possibilidade de criar vínculos delitivos com o auxílio de técnicas computacionais específicas [8].

Em outras palavras, podemos através da observação do comportamento de criminosos, juntamente com uma base de dados, transformar padrões em equações matemáticas, assim como fazemos com as observações de fenômenos naturais, obtendo assim as leis da física.

1.2 Uma abordagem do problema

No ano de 2001, foi realizado um levantamento pela polícia de Long Beach, no estado da Califórnia (CA) nos Estados Unidos da América (EUA), de regiões onde ocorreram roubos e furtos residenciais durante um período de três meses. Após esse procedimento, foi realizado um novo levantamento durante um novo período de três meses [9]. A Figura 1 compara as regiões visitadas pelos criminosos durante esses dois períodos de três meses.

Pode-se observar que algumas regiões que foram visitadas pelos criminosos se mantêm as mesmas nos dois períodos. Entretanto, também é possível observar uma migração do foco dos criminosos em relação aos roubos e furtos (regiões mais avermelhadas).

Analisando a imagem, questiona-se sobre a possibilidade de elaborar um método que possa prever regiões com maiores probabilidades de roubos e furtos a residências, além de tentar prever a migração das regiões mais visadas pelos criminosos, algo semelhante a uma previsão do tempo. Ressaltando que o objetivo do trabalho não será desenvolver um método para prever quando uma casa, em específica, será invadida pelos criminosos, mas sim elaborar uma ferramenta que possa auxiliar a polícia a prever áreas ou bairros onde possuam maior probabilidade de serem vítimas das ações de criminosos, podendo assim, tomar a melhor providência possível.

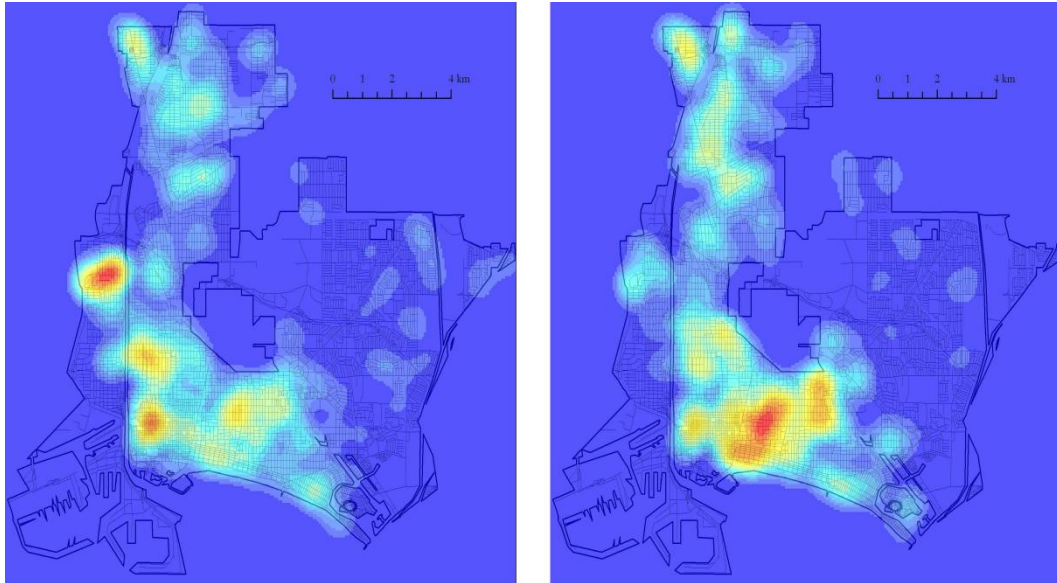


Figura 1. Dinâmica dos roubos e furtos residências em dois períodos seguidos de três meses em Long Beach, CA, EUA. Extraído da referência [9].

Além disso, estudaremos o comportamento da difusão do crime em áreas com maiores probabilidades de roubos e furtos ao alterar alguns parâmetros específicos que controlam a dinâmica, fazendo assim uma análise estatística do número de roubos e furtos ao longo do tempo. Antes de prosseguirmos com a construção de um modelo, é importante esclarecer a diferenças de um roubo e de um furto.

De acordo com o Código Penal Brasileiro [10], mais especificamente no artigo 155, o furto se caracteriza pela subtração para si ou para outrem coisa alheia móvel, possuindo uma pena de reclusão, de um a quatro anos e multa. A pena ainda pode ser aumentada dependendo das ações do infrator da lei (se houver emprego de explosivos, rompimento de obstáculo (furto qualificado), se o crime é praticado durante o repouso noturno, entre outros fatores) ou diminuída (se o criminoso é primário ou o item subtraído é de pequeno valor).

Já o roubo se encaixa no artigo 157 caracterizado pela subtração de coisa alheia móvel, para si ou para outrem, mediante grave ameaça ou violência à pessoa, ou depois de havê-la, por qualquer meio, reduzido à impossibilidade de resistência, possuindo uma pena de reclusão, de quatro a dez anos e multa, podendo aumentar

a pena dependendo das ações do infrator (utilização de arma de fogo, lesão corporal grave, entre outros atos).

Embora as ações de roubo e furto sejam semelhantes no que diz respeito a subtração de coisa alheia móvel (presentes nos crimes contra o patrimônio), elas se diferem pelo fato da utilização de violência (ou não) pelo criminoso em relação a vítima. Contudo, não serão considerados os meios que os criminosos utilizam para a realização da infração, mas sim o ato da invasão do infrator.

Capítulo 2: O Modelo

2.1 Modelando o problema

Primeiramente, é necessário definir de qual forma o criminoso irá atuar no modelo. Sendo assim, de modo a representar uma cidade hipotética, usaremos um retículo bidimensional de dimensões $L \times L$, onde L será o comprimento do retículo (cidade), de forma que cada residência da cidade seja representada por um sítio $s(x, y)$.

Cada sítio (residência) receberá um valor numérico, que chamaremos de “atração” $A_s(t)$ que, do ponto de vista dos criminosos, mede o quão tendenciosa é uma residência para a ocorrência de um roubo ou de um furto.

Com relação ao comportamento do criminoso, o trataremos como um “caminhante aleatório tendencioso”, que atua sobre o retículo bidimensional, onde o caminhante aleatório se locomove apenas para os primeiros vizinhos da rede (ver Figura 3), porém com a maior probabilidade de se dirigir a casa com o maior valor de atração.

Dessa maneira, podemos definir as equações de probabilidade de ocorrer um roubo ou um furto na residência localizada no sítio $s(x, y)$ com a sua respectiva atração $A_s(t)$ através da equação (1),

$$P_s = 1 - e^{-A_s(t)\delta t}, \quad (1)$$

e a probabilidade de locomoção do criminoso é dado pela equação (2)

$$q_{s \sim s'} = \frac{A_{s'}(t)}{\sum_{s \sim s'} A_{s'}(t)}, \quad (2)$$

onde δt é uma fração de dias que será utilizado como passo de Monte Carlo ($1/24 =$ uma hora).

Para a evolução da dinâmica, foi utilizado o Método de Monte Carlo (MMC), uma ferramenta utilizada na área estatística [11]. Descrito como um método de simulação que se baseia em uma grande quantidade de amostras, utilizando uma sequência de números aleatórios para obter resultados numéricos. Esse método é amplamente utilizado em várias áreas do conhecimento, desde complexos sistemas biológicos, econômicos, físicos, entre outros, onde seria muito difícil, se não até mesmo impossível obter uma solução analítica de um determinado problema [11,12].

A equação (1), que corresponde à probabilidade de ocorrer um roubo ou furto em uma residência, pode ser interpretada da seguinte maneira. Quanto menor o valor da atração $A_s(t)$ atribuído à residência (aproximando-se de zero), mais o valor da exponencial se aproxima de 1, fazendo com que a probabilidade de ocorrer um delito se aproxime de zero.

Podemos analisar também a equação (1) com o limite oposto: Quanto maior o valor atribuído a $A_s(t)$, maior a probabilidade de ocorrer um roubo ou furto na residência $s(x, y)$, como demonstrado abaixo,

$$\lim_{A_s(t) \rightarrow \infty} P_s = \lim_{A_s(t) \rightarrow \infty} 1 - e^{-A_s(t)\delta t} = 1 - e^{-\infty} = 1 - 0 = 1 = 100\%.$$

Embora algebricamente fosse necessário um valor de atração infinito para ter 100% de probabilidade de o criminoso agir em uma residência, graficamente vemos que não é necessário um valor tão elevado. Ao gerar o gráfico da equação (1) em função da atração $A_s(t)$, ilustrada pela Figura 2, vemos uma convergência para a probabilidade máxima considerável sem valores muito elevados de atração. Em $A_s(t) = 200$ unidades, temos uma probabilidade $P_s = 99,97\%$ de o criminoso agir na respectiva residência.

A equação (2), por outro lado, nos fornece a probabilidade de deslocamento do criminoso, em que o termo no numerador representa a atração de um de seus primeiros vizinhos, e o termo no denominador $\sum_{s \sim s'} A_{s'}(t)$ é uma normalização [13,14], a soma de todos os estados acessíveis (soma de todas as atrações dos vizinhos). O que podemos interpretar dessa equação é que, quanto maior o valor da atração em um de seus vizinhos, maiores as chances do criminoso se locomover para ele. Caso os primeiros vizinhos possuam a mesma atração, o criminoso terá igual probabilidade de se mover para ambos os lados.

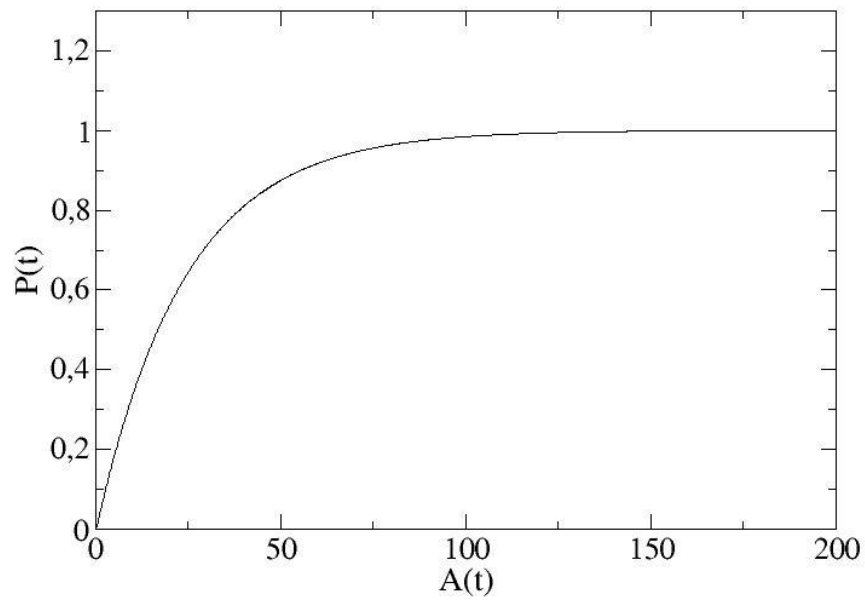


Figura 2. Probabilidade de ocorrer um roubo ou furto em função da atração $A_s(t)$ com $\delta t = 1/24$.

A seguir, as Figuras 3 (a-d) ilustram a representação matricial da cidade além da movimentação do criminoso no retículo.



Figura 3a. Ilustração de uma cidade de dimensões $L=5$.

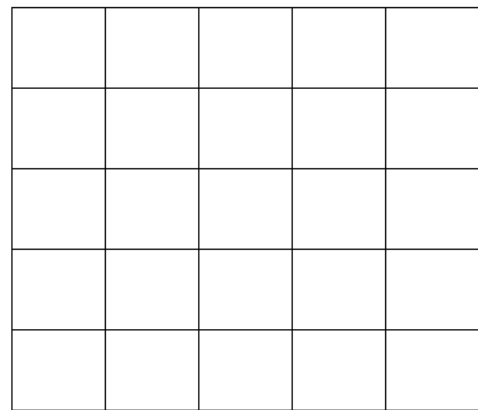


Figura 3b. Representação matricial da cidade.

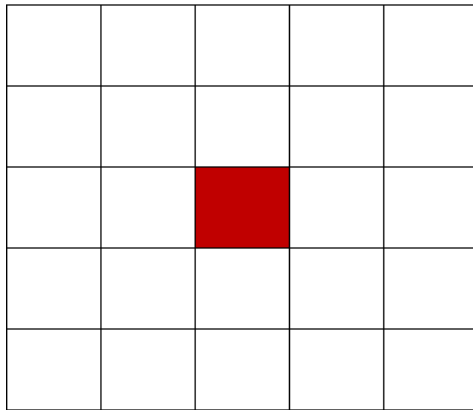


Figura 3c. Criminoso (quadrado em Vermelho) situado em um sítio $s(x, y)$.

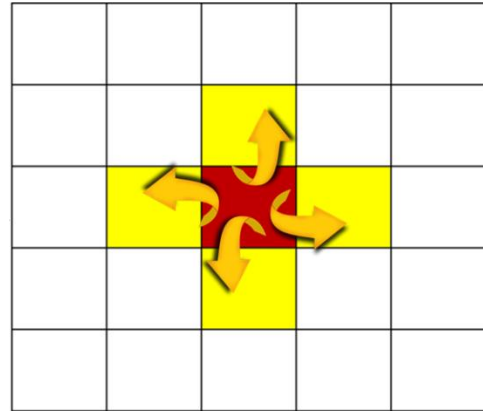


Figura 3d. Caminhada do Criminoso para os primeiros vizinhos do retículo.

Do ponto de vista matemático, uma cidade será representada por uma matriz quadrada, conseqüentemente as residências serão representadas por elementos de matriz. Cada um desses elementos matriciais terá um valor numérico atribuído $A_s(t)$, que pode aumentar ou diminuir conforme a dinâmica acontece. O criminoso, representado por um caminhante aleatório que, desse modo, tende a se locomover para as regiões com o maior valor de atração, caminhará pelos elementos de matriz.

Quando o caminhante aleatório estiver em um determinado elemento $s(x, y)$, será feita a seguinte pergunta: “Essa residência deve ser invadida?”. Assim, de acordo com a atração daquela casa, será calculada a probabilidade de ocorrer o roubo ou furto pela equação (1). Digamos, hipoteticamente, que o valor da probabilidade de ocorrer um roubo ou furto nessa residência seja de $P_s = 0,3 = 30\%$. Sendo assim, será escolhido através de uma sub-rotina¹ um número aleatório x no intervalo $[0,1]$, caso $0 < x \leq 0,3$, ocorrerá um delito na respectiva residência.

Após essa etapa, a residência passará a receber um valor de atração maior, deixando-a mais chamativa para a ocorrência de novos roubos e furtos, enquanto o caminhante aleatório será removido do retículo. Um novo caminhante será gerado no mapa, porém em um local diferente, proporcional a atração da nova região, dando início novamente a dinâmica (quanto mais atrativo for o sítio, maior a probabilidade de um caminhante aleatório dar início a sua caminhada). Também é

¹ Utilizaremos uma sub-rotina de gerador de números aleatórios (Random Number Generatos (RNG)) para Fortran 77 denominada RAN 2.

importante mencionar que quanto maior a atração de um sítio, maior a probabilidade de x estar dentro do intervalo que permite ocorrer um roubo ou furto. Por exemplo, se a probabilidade de ocorrer o roubo ou furto em um sítio for de $P_s = 0,85 = 85\%$, então, para ocorrer o crime será necessário que $0 < x \leq 0,85$, sendo x um número aleatório entre 0 e 1 a probabilidade do criminoso voltar a atenção para essa residência é muito maior do que a anterior, onde $0 < x \leq 0,3$.

Entretanto, também existe a possibilidade de não ocorrer um roubo ou furto. Por exemplo, no primeiro caso onde $P_s = 0,3 = 30\%$, digamos que o número aleatório $x > 0,3$. Nesse caso, como o número aleatório não se encaixa no intervalo que permite a ocorrência do delito, o criminoso (caminhante aleatório) decidirá não invadir aquela residência, e se deslocará para um de seus vizinhos. A lei matemática que rege para qual vizinho o criminoso se dirigirá será a equação (2), lembrando que, quanto maior a atração da residência vizinha, maior a probabilidade do criminoso de se dirigir a ela. Em seguida, será feita novamente a pergunta: “Essa residência deve ser invadida?” Novamente, será calculada a probabilidade de ocorrer um roubo ou um furto, porém com a atração dessa nova residência. Se, ao sortear o número aleatório x , este estiver no intervalo $0 < x \leq P_s$, então ocorrerá o roubo ou furto. A residência passará a receber um acréscimo de atração, será removido o criminoso do retículo e um novo será colocado, dando início novamente a dinâmica. Caso não ocorra o delito, novamente será calculado, através da equação (2), para qual residência o criminoso se encaminhará, calculando novamente P_s e assim fechando a dinâmica.

2.2 Aprimorando o Modelo

Após a apresentação inicial do modelo, apontaremos alguns fenômenos que devem ser levados em consideração para maior aproximação da realidade.

2.2.1 A dependência do tempo

Nesse trabalho, consideraremos que os criminosos possuem uma preferência em relação ao horário em que vão realizar os roubos ou furtos residenciais. Considere que a grande maioria dos criminosos escolha efetuar seus roubos e furtos no período noturno, devido a maior furtividade. Isso significa que a probabilidade P_s passa a ser dependente não só da atração do sítio, mas também do horário em que o criminoso deseja invadir a residência. À medida que a noite cai, a probabilidade de ocorrer os roubos e furtos aumenta, e à medida que se aproxima do meio dia, por exemplo, menor a probabilidade de ocorrerem delitos. Sendo assim, precisamos modificar a equação (1) para melhor se adruar a esse tipo de comportamento.

Uma boa função que nos fornece essa periodicidade de máximos e mínimos em um intervalo de tempo definido (no caso de um dia) é a função cosseno [15]. Então podemos definir uma função $f(t)$ dada por,

$$f(t) = 1 + \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \theta\right), \quad (3)$$

onde t é definido como o tempo, ou seja a hora do dia, T é o período de um dia (24h) e θ é uma fase inicial.

De posse da equação (3), podemos redefinir a equação (1) levando em consideração a dependência temporal, obtendo a equação (4),

$$P_s(t) = 1 - e^{-A_s(t)f(t)\delta t}. \quad (4)$$

Uma análise rápida da equação (4) nos mostra que a probabilidade atinge um valor máximo (para $\theta = 0$) no horário $t = 0$ h (meia noite). Conforme o tempo passa, esse valor cai até atingir um valor mínimo em $t = 12$ h (meio dia). Em seguida, a probabilidade de ocorrerem roubos e furtos cresce até atingir um máximo novamente em $t = 24$ h (meia noite). Tal comportamento pode ser visto na Figura 4, onde o mínimo se localiza entre os horários de 8 horas às 16 horas.

Entretanto, podem haver casos em que a probabilidade mínima ou máxima não esteja centrada aos horários anteriores. Para essas situações, atribuímos um valor diferente para a fase θ , responsável por deslocar os máximos e mínimos dos valores de probabilidade fornecidas pela equação (4), como ilustra as Figura 5 e 6.

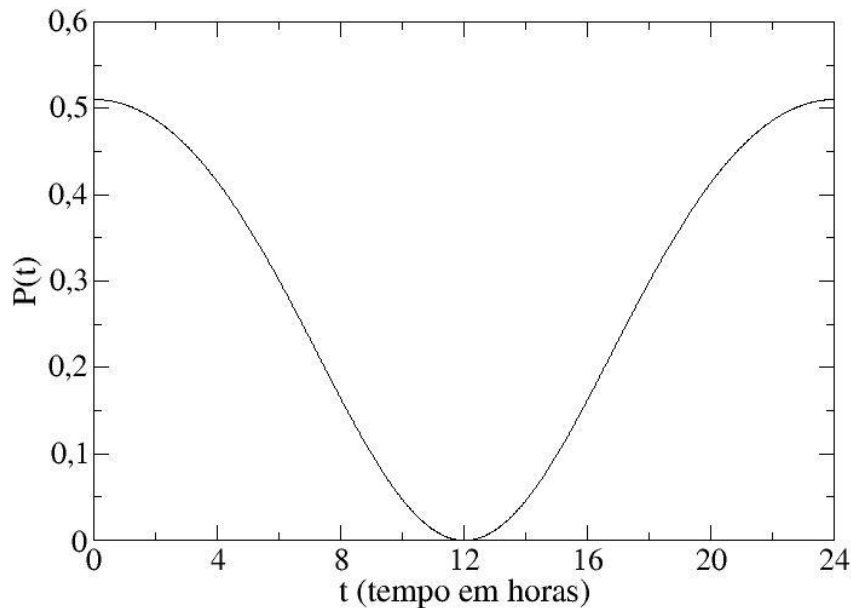


Figura 4. Probabilidade de ocorrer um roubo ou furto em uma residência em função das horas do dia. Os parâmetros utilizados foram $A_s = 8,56$ unidades, $\delta t = 1/24$ e $\theta = 0 \pi$.

Se na prática a função temporal não estiver de acordo com o comportamento da dinâmica da criminalidade da cidade, a mesma pode ser trocada ou adaptada se necessário. Se por algum motivo a probabilidade de ocorrer um roubo ou furto residencial não depender do tempo, ou seja, a probabilidade de ocorrer um delito seja constante a medida que o tempo avança, basta substituir a função temporal por uma função constante $f(t) = \text{constante}$. Em especial, se $f(t) = 1$, recupera-se a equação (1) novamente. Caso o número de roubos e furtos caia linearmente até o meio dia e aumente linearmente até a meia noite, basta atribuir uma função modular $f(t) = \alpha|t - 12|$, onde α é uma constante de proporcionalidade. Vale ressaltar que para essa expressão é necessário modular o intervalo de tempo t para mod (24). Ou seja, o tempo pertencerá ao intervalo de $[0,24]$.

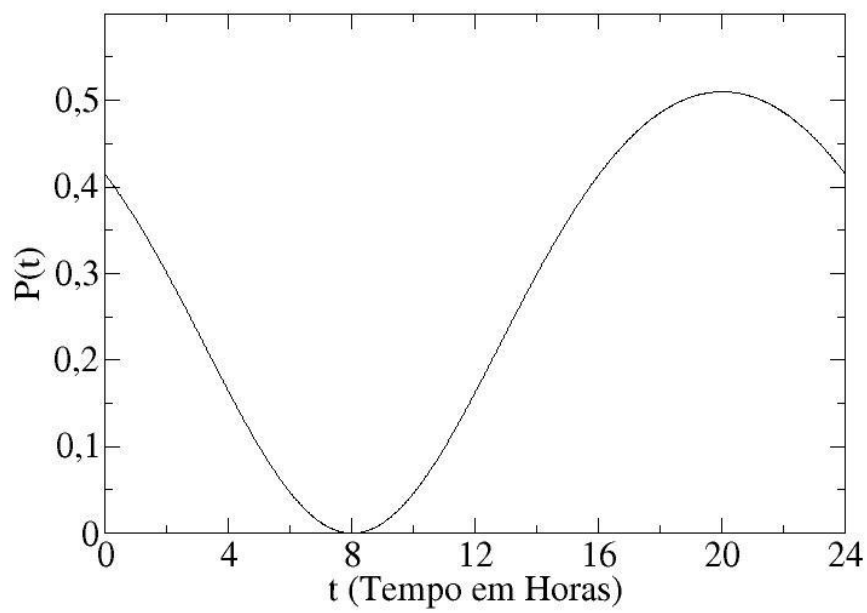


Figura 5. Probabilidade de ocorrer um roubo ou furto em uma residência em função das horas do dia. Os parâmetros utilizados foram $A_s = 8,56$ unidades, $\delta t = 1/24$ e $\theta = 2/3 \pi$.

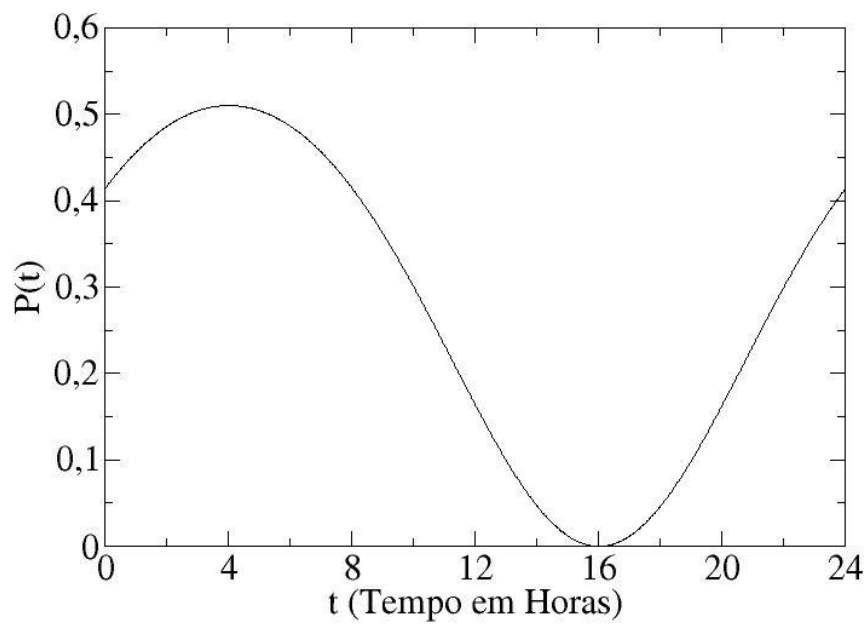


Figura 6. Probabilidade de ocorrer um roubo ou furto em uma residência em função das horas do dia. Os parâmetros utilizados foram $A_s = 8,56$ unidades, $\delta t = 1/24$ e $\theta = -1/3 \pi$.

O fato é que para regular a curva de probabilidade de roubos e furtos de uma cidade, basta fazer um levantamento estatístico dos horários de ação dos criminosos e definir uma função que melhor se adapte a situação.

2.2.2 Atração Intrínseca e Atração dinâmica

A atração responsável pela probabilidade de ocorrer um roubo ou furto residencial não deve ser encarada como um valor constante no tempo nem no espaço. No mundo real, a criminalidade não depende apenas do tempo, mas também da região onde a residência se localiza [2-4]. Por isso, é necessário definirmos, de uma forma mais apropriada, a atração associada a cada residência do retículo, de forma que,

$$A_s(t) = A_{s0} + B_s(t), \quad (5)$$

onde A_{s0} é definido como uma atração intrínseca da residência do sítio $s(x, y)$, que pode ser interpretada em quão atrativa a residência por si só é vista pelos criminosos (muros baixos, rua mal iluminada, ausência de cercas elétricas, localização da residência em um bairro violento, entre outros fatores que intrinsecamente aumentam a vantagem de uma ação bem sucedida dos criminosos). A priori, a atração intrínseca no modelo não evolui no tempo, mantendo-se constante durante toda a dinâmica.

No modelo, a atração intrínseca A_{s0} está fortemente relacionada com o desempenho da função preventiva do crime feita pelo Estado, que basicamente atua sob três formas distintas, sendo elas a prevenção primária, prevenção secundária e prevenção terciária.

A prevenção primária caracteriza-se pela implementação de medidas indiretas de prevenção, consistentes em evitar que fatores sirvam como estímulo à prática delituosa. Trata-se normalmente de medidas sociais por meio das quais o Estado garante acesso ao emprego e a direitos sociais como segurança, lazer, moradia e outros, buscando sempre atuar nas raízes sócias. Entretanto, tais medidas são consideradas a médio ou até mesmo em longo prazo.

A prevenção secundária atua sobre uma área específica (setores da sociedade) que indicam um potencial de criminalidade elevado. Geralmente, a prevenção secundária está fortemente ligada com a ação policial e com a política legislativa penal.

Por se tratar de um modo de prevenção mais ostensivo, sua forma de operação é a curto e médio prazo. Contudo, esse modo de prevenção é considerado tardio, pois sempre atua após a ocorrência do crime [5-6].

A prevenção terciária está relacionada com o processo de punição e ressocialização do processo de execução penal.

Como o parâmetro de controle A_{s0} é um parâmetro relacionado à residência em si ou até mesmo a uma região em específico da cidade, podemos dizer que a atração intrínseca de uma região é inversamente proporcional a forma de prevenção primária, ou seja, quanto maior a atração intrínseca, menores as medidas tomadas pelo Estado (ou até mesmo pelos próprios moradores) [2-4]. Lembrando que, na evolução da dinâmica A_{s0} permanecerá constante.

Por outro lado, o termo $B_s(t)$ chamado de atração dinâmica, é o argumento que evolui a medida que a dinâmica acontece, possuindo não só uma dependência temporal mas também uma dependência espacial. Essa atração, de uma forma simplificada, pode ser descrita como,

$$B_s(t + \delta t) = B_s(t)(1 - \omega \delta t) + \theta E_s(t), \quad (6)$$

onde ω é a taxa de decaimento da atração dinâmica, ou então, a taxa de perda de interesse em uma residência do sítio $s(x, y)$ a medida que o tempo passa (também relacionada com as medidas de prevenção mencionadas anteriormente), $E_s(t)$ é o número de vezes em que a residência do sítio $s(x, y)$ foi visitado pelos criminosos e θ é um acréscimo a atração dinâmica [16,17].

É importante comentar que, caso a residência não seja assaltada, ou, $E_s = 0$, o sítio $s(x, y)$ não receberá nenhum acréscimo a atração $A_s(t)$. Também é importante mencionar que o valor θ que será acrescido apenas às residências visitadas pelos criminosos não será permanente [13,14]. Digamos que o tempo de acréscimo θ para o sítio seja de 2 meses (60 dias) e que um sítio tenha sofrido dois

delitos nesse período de tempo, a sua atração dinâmica receberá um acréscimo de 2θ . Após 60 dias, se a residência não for visitada novamente pelos criminosos, o acréscimo cairá para 1θ , e após mais 60 dias cairá para zero, deixando assim de receber a atração extra. Esse tempo em que o sítio receberá esse acréscimo de atração será denominado de tempo de infecção T_{inf} .

Fazendo uma análise dos parâmetros apresentados na equação (6) com as formas de prevenção abordadas anteriormente, ω está fortemente relacionado com os métodos de prevenção primário e secundário. Isso porque ω , a cada passo de Monte Carlo irá reduzir uma quantidade de atração (do ponto de vista dos criminosos) para a ocorrência de um roubo ou furto na residência (efeito das janelas quebradas [2-4]). Entretanto, como muitas vezes ω atua sobre uma casa em que o crime já aconteceu, ele também possui uma influência do método de prevenção secundária.

Embora ω seja responsável pela redução do interesse dos criminosos por uma residência, também possuímos o parâmetro θ , responsável pelo aumento da atração dinâmica da residência, funcionando com um antagonista de ω , podendo ser compreendido como a ausência das formas de prevenção [2-4] e outros fatores que aumentam o potencial de ocorrência de crimes na região.

2.2.3 A influência da região

Outro fenômeno que é necessário levarmos em consideração é a influência da vizinhança. Consideraremos que uma residência ao ser invadida, o sítio $s(x, y)$ começará a receber um acréscimo de atração θ durante um determinado período de tempo, porém, o fato de uma casa sofrer uma invasão pode ter influência em deixar todo um quarteirão mais visado para novos ataques. Pensando nisso, a equação (6) será reescrita da seguinte forma,

$$B_s(t + \delta t) = \left((1 - \eta)B_s(t) + \frac{\eta}{z_s} \sum_{s'} B_{s'}(t) \right) (1 - \omega \delta t) + \theta E_s(t), \quad (7)$$

onde η é a influência dos vizinhos, z_s é o número de estados acessíveis (ou simplesmente o número de vizinhos) que o sítio possui, logo residências na borda do retículo possuem menos vizinhos do que aqueles que se localizam no seu interior. Temos também o termo no somatório da equação, que corresponde ao somatório da atração dinâmica de todos os vizinhos acessíveis ao sítio $s(x, y)$. O objetivo dessa equação é remover uma taxa η da atração dinâmica e acrescentar uma taxa η da média da atração dinâmica da sua vizinhança, dando assim a influência dos vizinhos que desejamos. Temos também que, caso $\eta = 0$, recuperamos a equação (6) onde não havia tal influência.

Agora, com as devidas equações e formas com que a dinâmica evolui, discutiremos no próximo capítulo os resultados numéricos para o modelo.

Capítulo 3: Resultados Numéricos

3.1 A Difusão da criminalidade

Nesse Capítulo, serão abordados e discutidos os primeiros resultados numéricos, que têm como objetivo visualizar a evolução da dinâmica e as influências dos parâmetros de controle apresentados no capítulo anterior, podendo assim relacioná-los com o número de roubos e furtos praticados pelos criminosos.

3.1.1 A Influência do Parâmetro de controle ω

Inicialmente, faremos algumas simulações computacionais para observar o comportamento da difusão das regiões mais propícias à ocorrência de roubos ou furtos residenciais no retículo.

Para obter as Figuras 7(a-h), usaremos uma rede bidimensional quadrada, de dimensões 300×300 , (um total de 90 mil residências). A influência dos vizinhos $\eta = 0,15 = 15\%$, o acréscimo de atração a cada passo de Monte Carlo para as residências visitadas pelos criminosos $\theta = 0,06$, o tempo de infecção da residência $T_{inf} = 30$ dias, a atração intrínseca e dinâmica para todos os sítios de $A_{s0} = 1/30$, e $B_s(0) = 14$ respectivamente, $\omega = 0,005$, por fim $\delta t = 1/24$.

Para essa situação, a interpretação da simulação será que a cada passo de Monte Carlo a dinâmica avançará $\delta t = 1/24$ dia ou 1 hora no tempo. Serão resolvidas as equações de probabilidade apresentadas anteriormente, tanto para a invasão do criminoso em uma residência (4), quanto para a probabilidade de locomoção (2), além da atualização da atração dinâmica de todos os sítios (residências) do retículo, repetindo o processo no próximo passo de Monte Carlo (próxima “hora” passada de simulação).

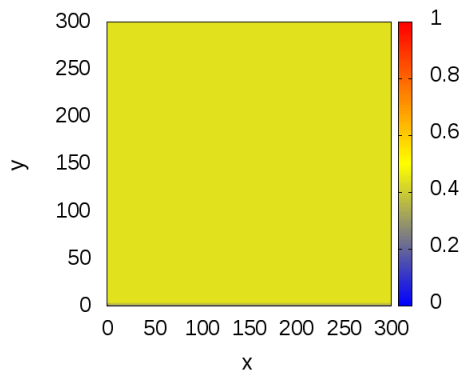


Figura 7a. Comportamento da criminalidade após 1 dia de simulação

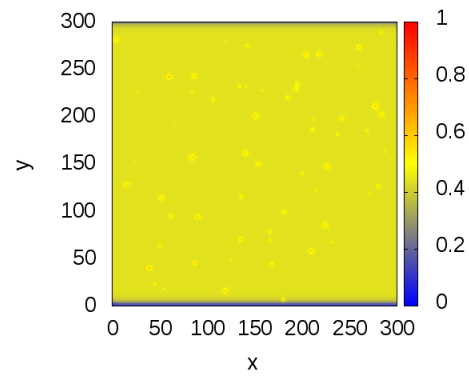


Figura 7b. Comportamento da criminalidade após 10 dias de simulação

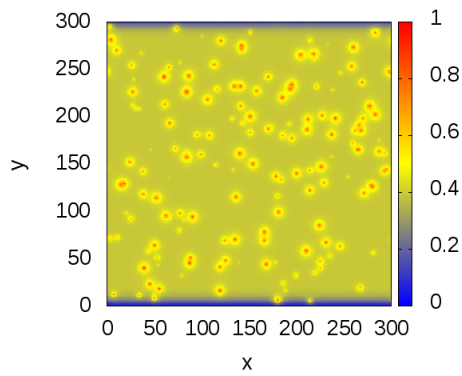


Figura 7c. Comportamento da criminalidade após 30 dias de simulação

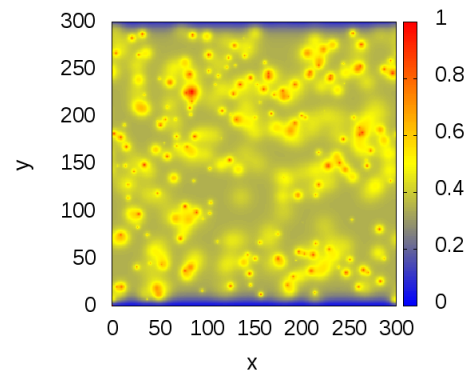


Figura 7d. Comportamento da criminalidade após 60 dias de simulação

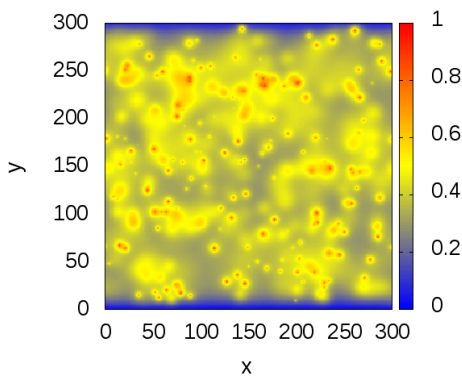


Figura 7e. Comportamento da criminalidade após 90 dias de simulação

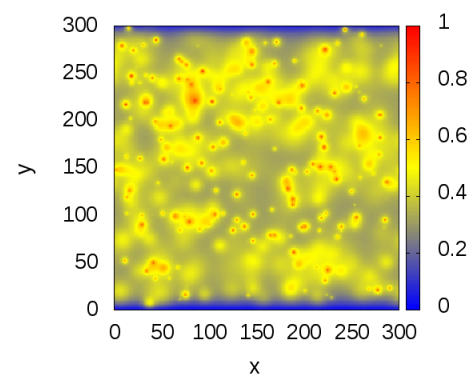


Figura 7f. Comportamento da criminalidade após 120 dias de simulação

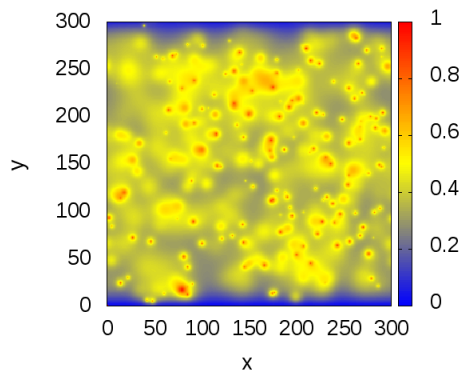


Figura 7g. Comportamento da criminalidade após 150 dias de simulação

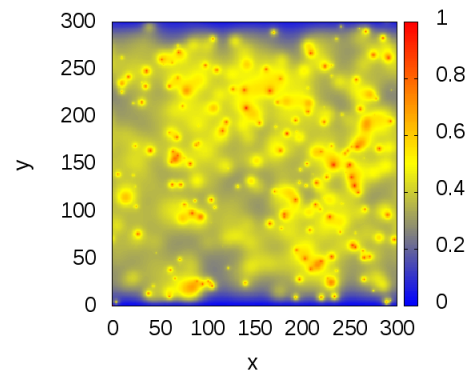


Figura 7h. Comportamento da criminalidade após 180 dias de simulação

Podemos perceber nas figuras que existem regiões (denotaremos de ilhas de atração) espalhadas pelo retículo. Algumas dessas ilhas se mantêm relativamente constantes, enquanto outras surgem e desaparecem com o decorrer do tempo, reproduzindo a dinâmica apresentada na Figura 1.

O que nos chama a atenção nessas imagens é que, embora o crime ainda esteja acontecendo, não há uma redução ou crescimento aparente da criminalidade. Sendo assim, investigaremos os números de roubos e furtos ocorridos em um intervalo de 15 anos, conforme ilustrado pela Figura 8. Além disso, a Figura 9 ilustra a simulação da difusão da criminalidade após os mesmos 15 anos.

Na Figura 8 podemos observar que o número de roubos e furtos (Número de R e F) quase se sobrepõe ao ajuste linear (linha vermelha), cujo coeficiente angular 4,932 roubos e furtos por dia. Isso significa que há um número constante de aproximadamente 5 roubos ou furtos diários, confirmando a hipótese de que para esse conjunto de parâmetros o crime se mantém constante, caracterizando uma fase, possivelmente epidêmica.

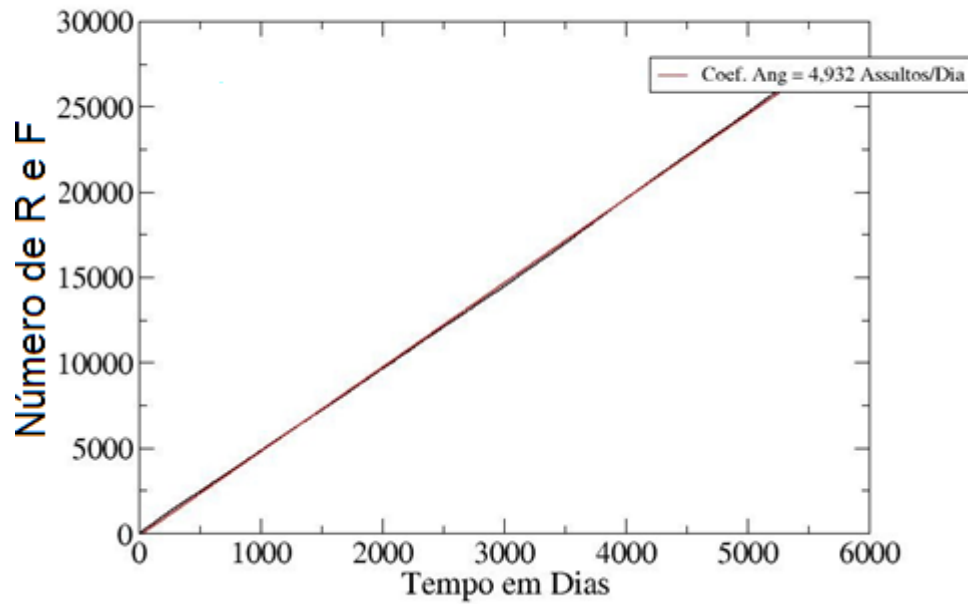


Figura 8. Gráfico do número de roubos e furtos por 15 anos de simulação.

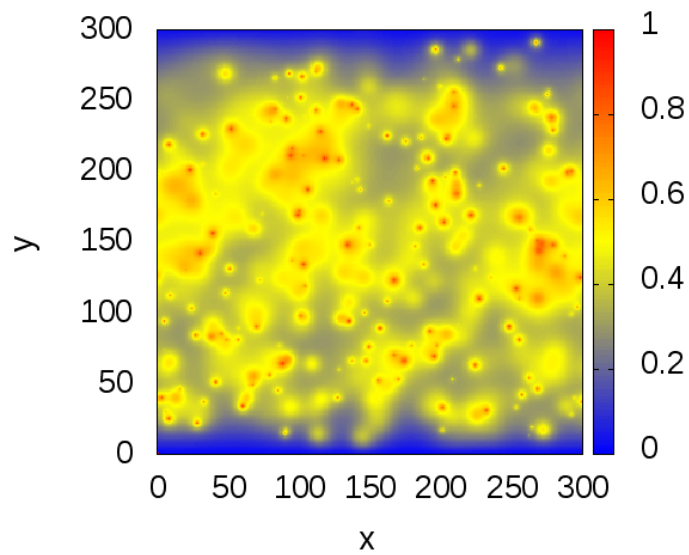


Figura 9. Comportamento da criminalidade após 15 anos de simulação.

Agora, faremos uma mudança nos parâmetros de controle. Continuamos a utilizar um retículo quadrado de dimensões 300×300 , $\eta = 0,15$, $\theta = 0,06$, $T_{inf} = 30$ dias, $A_{s0} = 1/30$, $B_s(0) = 14$, $\delta t = 1/24$. Entretanto, aumentaremos a taxa de

decaimento para $\omega = 0,01$. Assim, dando início as novas simulações, obtemos as Figuras 10(a-h).

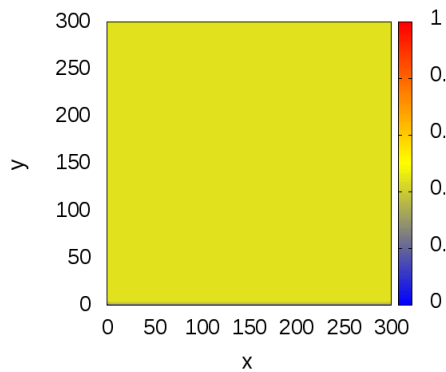


Figura 10a. Comportamento da criminalidade após 1 dia de simulação

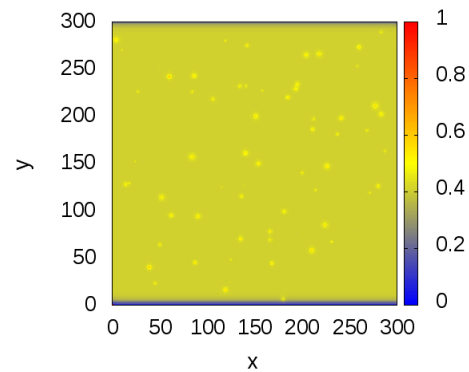


Figura 10b. Comportamento da criminalidade após 10 dias de simulação

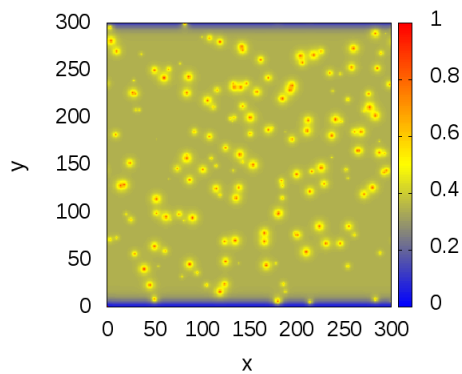


Figura 10c. Comportamento da criminalidade após 30 dias de simulação

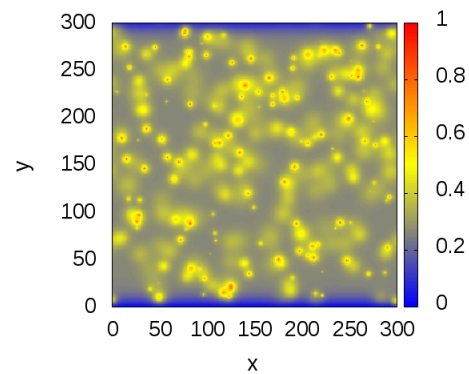


Figura 10d. Comportamento da criminalidade após 60 dias de simulação

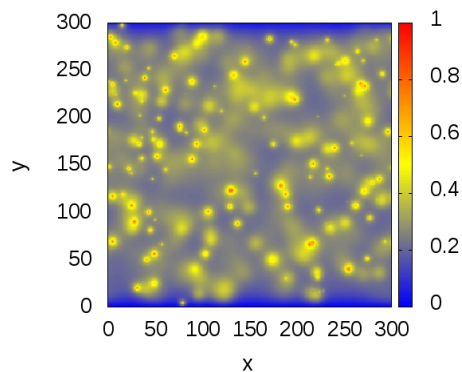


Figura 10e. Comportamento da criminalidade após 90 dias de simulação

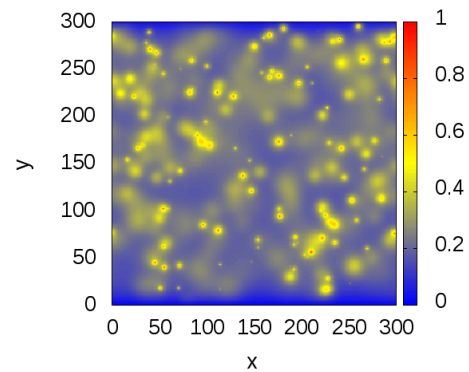


Figura 10f. Comportamento da criminalidade após 120 dias de simulação

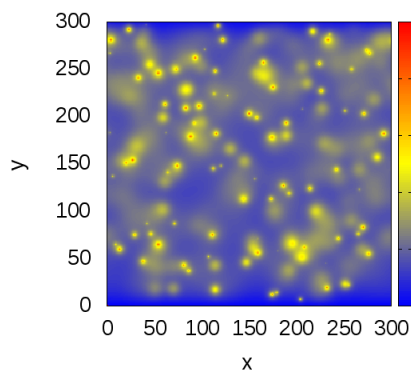


Figura 10g. Comportamento da criminalidade após 150 dias de simulação

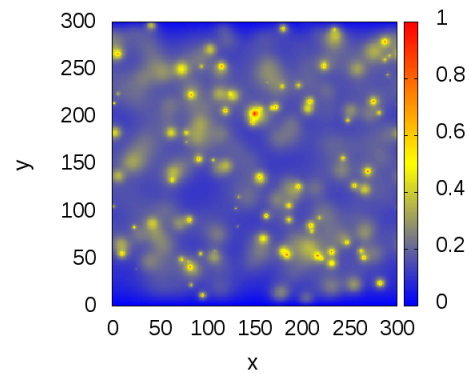


Figura 10h. Comportamento da criminalidade após 180 dias de simulação

Com esse novo conjunto de parâmetros, podemos observar ilhas de atração surgindo e desaparecendo à medida que a dinâmica avança. Porém, claramente vemos que há um decréscimo na criminalidade no retículo.

Novamente, faremos a análise de números de roubos e furtos como função do tempo, dessa vez em um intervalo de tempo de 10 anos, ilustrado na Figura 11.

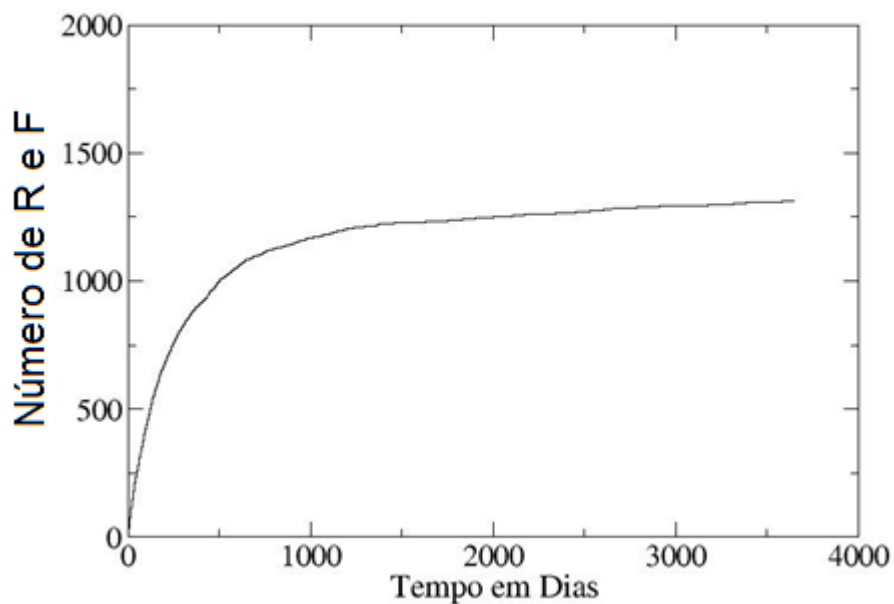


Figura 11. Gráfico do número de roubos e furtos por 10 anos de simulação.

O que chama a atenção nesse gráfico é que ao dobrar o parâmetro ω responsável pelo decréscimo da atração dinâmica, observamos um decréscimo no número de roubos e furtos ao longo do tempo, o que nos leva a acreditar que exista um conjunto de parâmetros que, com o decorrer do tempo, os roubos e furtos residenciais se tornam esporádicos. Ou seja, existe um conjunto de parâmetros que convergem o sistema para um estado estacionário onde o número de crimes cometidos é muito pequeno, podendo supor uma existência de uma fase endêmica.

Realizamos agora uma nova simulação computacional em um período de 10 anos. Utilizamos os mesmos parâmetros anteriores, variando apenas ω em sete valores diferentes.

A Figura 12 ilustra que, à medida que tornamos a taxa de decaimento da atração dinâmica maior, mais rapidamente o número de roubos e furtos residenciais decresce, tornando-os esporádicos. Também podemos observar um comportamento similar ilustrado pela Figura 1. Contudo, observamos na Figura 13 que à medida que o tempo avança, independente do parâmetro ω , todas as curvas se sobrepõem para tempos curtos, com exceção de uma divergência no final do gráfico. Tal comportamento nos aponta para uma possível invariância de escala [11].

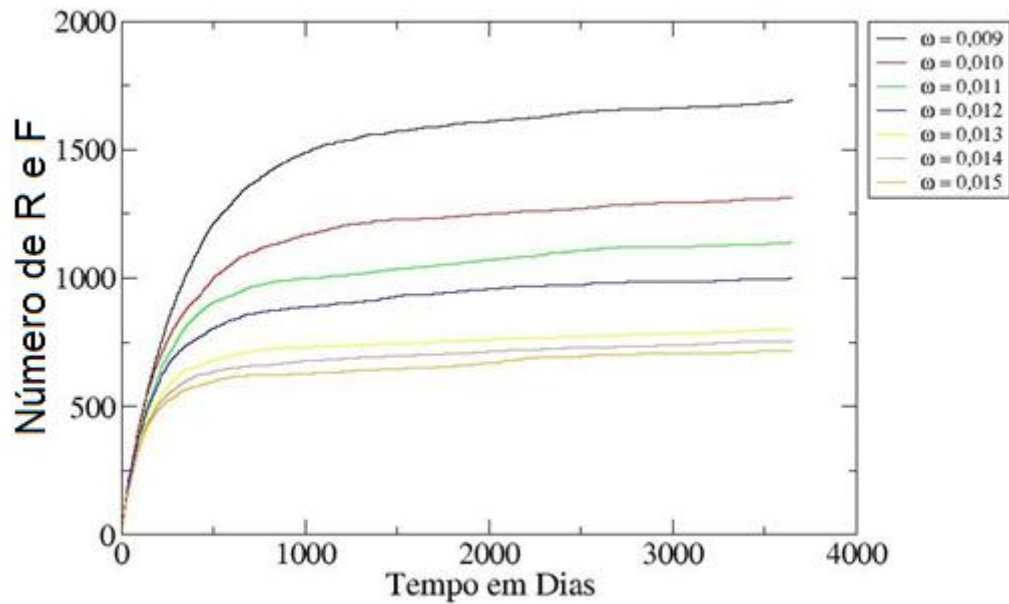


Figura 12. Comparação do número de roubos e furtos em um período de 10 anos utilizando sete parâmetros ω diferentes, conforme mostrado na Figura.

Comparando as Figuras 8 e 11 notamos que não são todos os valores de ω que possuem a propriedade de redução do número de roubos e furtos. Possivelmente, exista um intervalo (com valores relativamente altos de ω) em que, à medida que o tempo avança, o número de roubos e furtos residenciais decresce, até que as ocorrências se tornem eventos esporádicos, como ilustrado pela Figura 12. Também existe um outro intervalo (com valores intermediários de ω) onde o número de roubos e furtos se mantém constante, como ilustrado na Figura 8. Por outro lado, existe um intervalo de ω (valores relativamente baixos), onde entramos em um estado de calamidade pública, ilustrado pelas Figuras 14(a-h), caracterizando uma possível fase epidêmica.

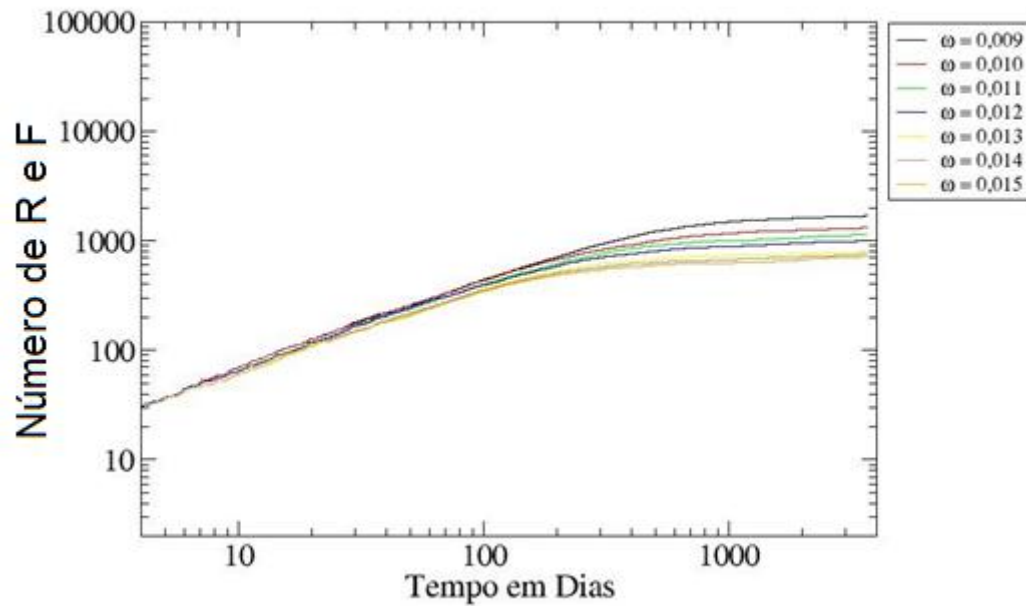


Figura 13. Comparação do número de roubos e furtos em um período de 10 anos utilizando sete parâmetros ω diferentes em escala logarítmica.

Para essas simulações, utilizamos os mesmos parâmetros de controle anteriores, porém com $\omega = 8 \cdot 10^{-4}$. As simulações nos mostram claramente que quanto menor for o valor de ω , mais atrativas para os criminosos serão as residências do ponto de vista dos criminosos. Além disso, a Figura 15 nos mostra o número de roubos e furtos em função do tempo, utilizando os novos parâmetros de controle por um período de 3 anos, onde podemos perceber um crescimento contínuo.

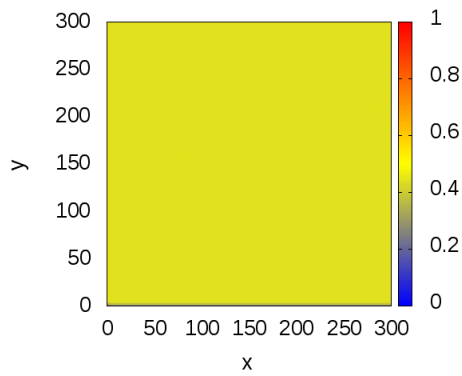


Figura 14a. Comportamento da criminalidade após 1 dia de simulação

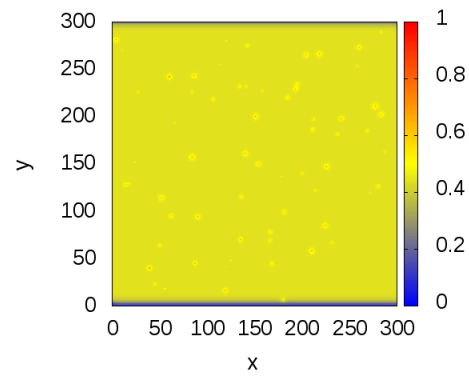


Figura 14b. Comportamento da criminalidade após 10 dias de simulação

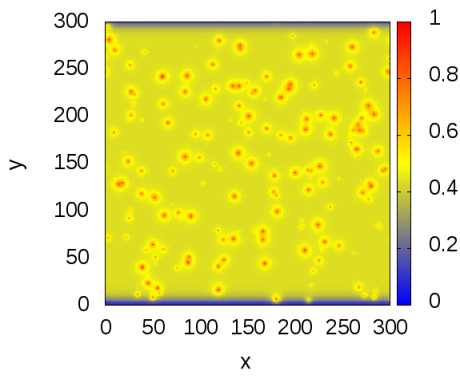


Figura 14c. Comportamento da criminalidade após 30 dias de simulação

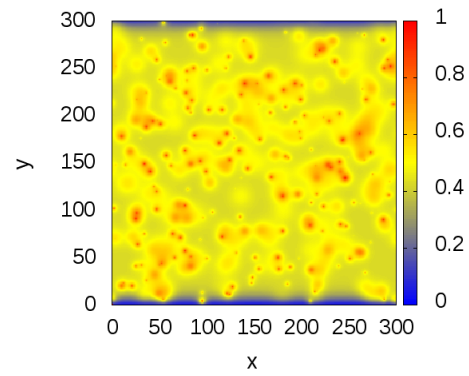


Figura 14d. Comportamento da criminalidade após 60 dias de simulação

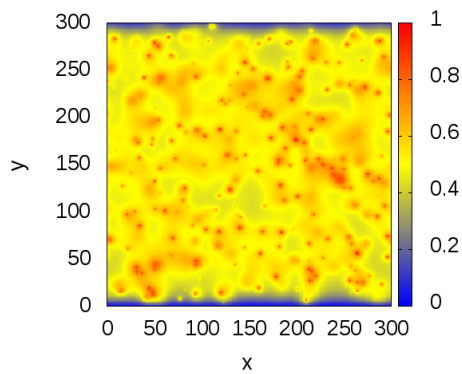


Figura 14e. Comportamento da criminalidade após 90 dias de simulação

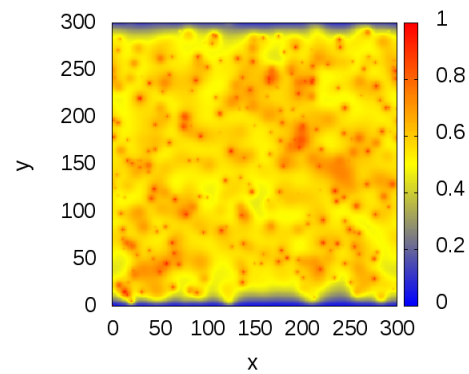


Figura 14f. Comportamento da criminalidade após 120 dias de simulação

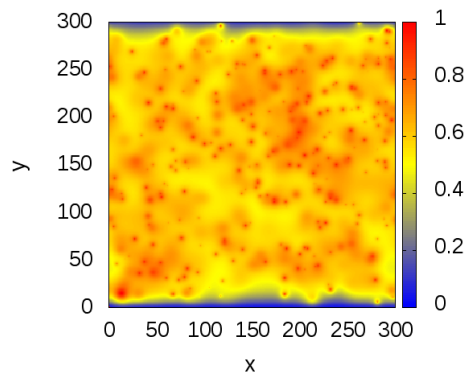


Figura 14g. Comportamento da criminalidade após 150 dias de simulação

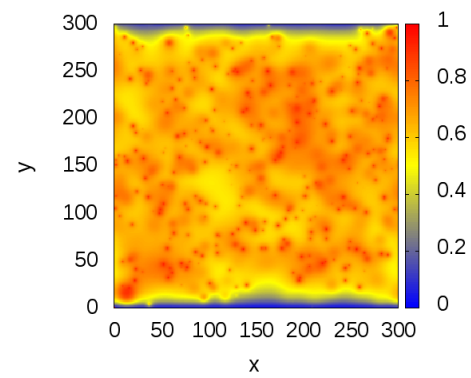


Figura 14h. Comportamento da criminalidade após 180 dias de simulação

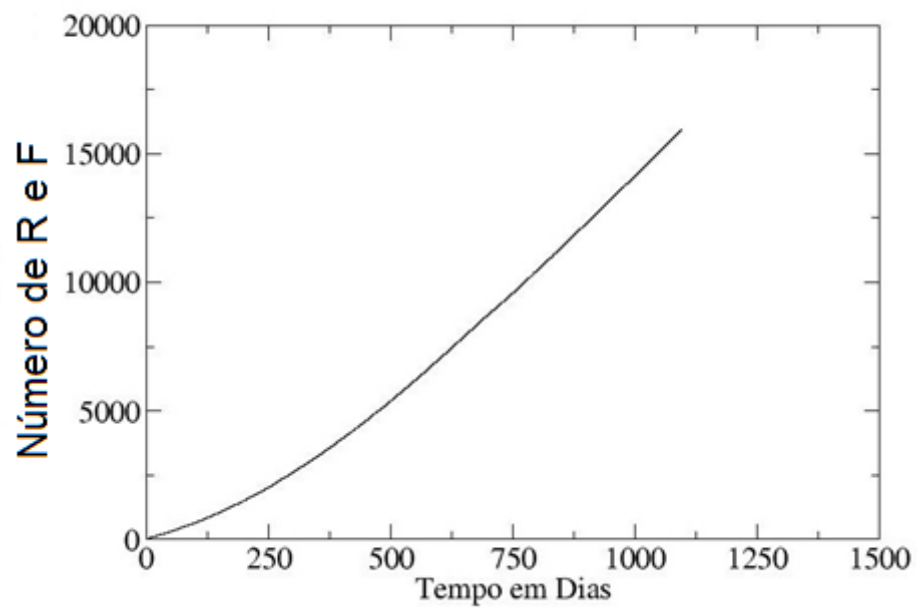


Figura 15. Gráfico do número de roubos e furtos por 3 anos de simulação.

3.1.2 A Influência do Parâmetro de Controle A_{s0}

Na Seção anterior, podemos observar as consequências da variação do parâmetro de controle ω responsável pela redução da atração dinâmica do sistema. Entretanto, ω talvez não seja o único parâmetro de controle influente no modelo. O parâmetro A_{s0} , vinculado à prevenção primária de segurança apresentado anteriormente influencia no número de roubos e furtos e será, portanto, variado.

Diferente de ω que é um parâmetro de rede (considerado o mesmo para todo o retículo), A_{s0} é um parâmetro vinculado a uma região em específico, podendo ser um bairro, um quarteirão, ou até mesmo vinculado a uma residência. Vale ressaltar também que quanto mais elevado o valor de A_{s0} (maior a atração intrínseca do local), maiores as chances de ocorrer um roubo ou um furto na residência. Ou seja, quanto maior a atração intrínseca de uma região, menores as formas de prevenção primárias no local.

Para observarmos os efeitos da variação da atração intrínseca, faremos algumas simulações computacionais, ilustradas pelas figuras 16a e 16b. Iniciaremos a simulação com todas as residências com os mesmos parâmetros de controle. Entretanto, separando a cidade em dois bairros distintos, cuja diferença entre eles será o valor da atração intrínseca. Feito isso, deixamos a dinâmica evoluir no tempo, observando suas consequências.

Os parâmetros utilizados na simulação foram um retículo de dimensões 300×300 , resultando em um total de 90 mil residências. A influência dos vizinhos $\eta = 0,15 = 15\%$, o acréscimo de atração a cada passo de Monte Carlo para as residências visitadas pelos criminosos $\theta = 0,06$, o tempo de “infecção” da residência $T_{inf} = 30$ dias, a atração intrínseca do bairro à esquerda $A_{s0} = 10/30$ e a atração intrínseca do bairro à direita $A_{s0} = 1/30$, a atração dinâmica para todas os sítios de $B_s(0) = 14$, $\omega = 0,005$, por fim $\delta t = 1/24$.

Podemos observar nas Figuras 16a e 16b que bairros que possuem uma atração intrínseca maior do que outros são mais tendenciosos à ocorrência de roubos e furtos, além de indicar também que, quanto menor a atração intrínseca de um determinado bairro, menor o número de ocorrências de ação dos criminosos.

Com isso, é possível representar de forma matemática e computacional a influência da ausência (para valores elevados de A_{s0}) ou a presença (para valores baixos de A_{s0}) das formas de prevenção primária.

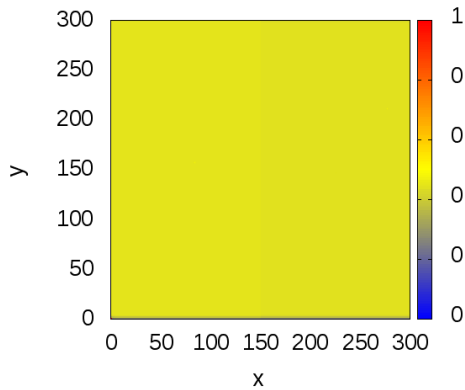


Figura 16a. Comportamento de criminalidade após 1 dia de simulação

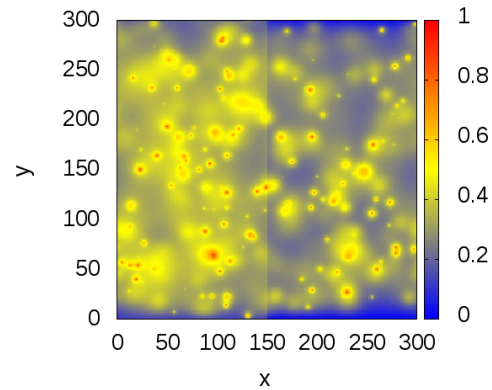


Figura 16b. Comportamento da criminalidade após 180 dias de simulação

Por fim, faremos outra simulação computacional considerando quatro bairros distintos, onde ambos terão os mesmos valores de parâmetros de controle exceto o valor de suas respectivas atrações intrínsecas, ilustrado pelas figuras 17a e 17b.

Os parâmetros utilizados na simulação foram um retículo de dimensões 300×300 , resultando em um total de 90 mil residências. A influência dos vizinhos $\eta = 0,15 = 15\%$, o acréscimo de atração a cada passo de Monte Carlo para as residências visitadas pelos criminosos $\theta = 0,06$, o tempo de “infecção” da residência $T_{inf} = 30$ dias, a atração intrínseca do bairro inferior esquerdo será $A_{s0} = 100/30$, a atração intrínseca do bairro superior esquerdo será $A_{s0} = 50/30$, a atração intrínseca do bairro inferior direito será $A_{s0} = 1/30$, a atração intrínseca do bairro superior direito será $A_{s0} = 1/150$ a atração dinâmica para todos os sítios de $B_s(0) = 14$, $\omega = 0,005$, por fim $\delta t = 1/24$.

Novamente, podemos observar a influência da atração intrínseca A_{s0} sobre o número de roubos e furtos residenciais.

No próximo capítulo, discutiremos a influência da variação dos parâmetros de controle A_{s0} e ω , além de observarmos como a escolha deles pode influenciar na dinâmica do sistema.

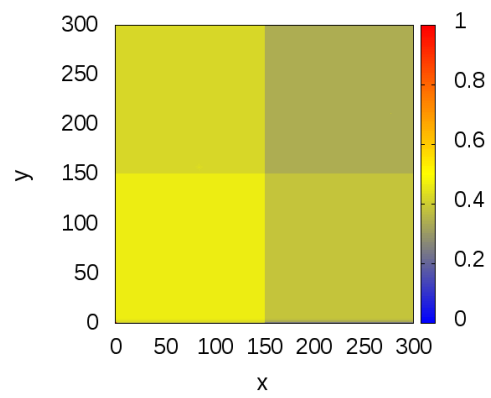


Figura 17a. Comportamento de criminalidade após 1 dia de simulação

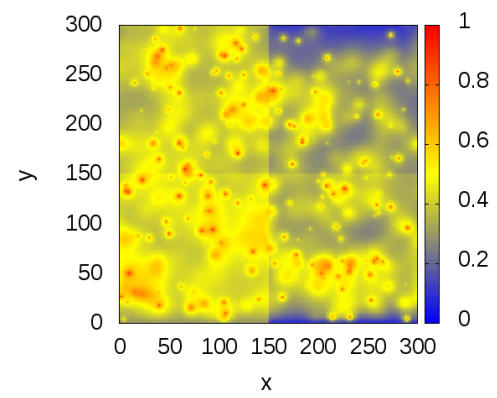


Figura 17b. Comportamento da criminalidade após 180 dias de simulação

Capítulo 4: Uma Possível Transição de fase

4.1 A Influência dos Parâmetros A_{s0} , e ω para a Transição de Fase

Nessa etapa do trabalho, serão feitas algumas simulações computacionais variando os parâmetros de controle para a evolução do sistema, podendo assim observar suas consequências e caracterizar uma possível Transição de Fase.

Uma transição de fase é uma mudança nas características macroscópicas resultante da mudança de um parâmetro de controle pertinente de um sistema. Um exemplo bem comum em nosso cotidiano é a transição de fase da água, que ao alterar um parâmetro de controle (temperatura) podemos alterar as características macroscópicas do sistema, transformando a matéria de sólido para líquido, de líquido para gás ou vice versa. Como a água mudou sua característica ao alterar a temperatura, dizemos que ela sofreu uma transição de fase.

Mas a água não é a única a sofrer mudanças ao alterar um parâmetro de controle relevante ao sistema. Existem vários outros sistemas físicos, biológicos, sociais e até mesmo financeiros [18-23] que possuem a dependência de um parâmetro de controle, e ao alterar seu valor mudamos as características desses sistemas.

No modelo apresentado nesse trabalho, podemos visualizar a presença de alguns parâmetros de controle com um forte potencial de alterar drasticamente o comportamento do sistema dependendo do valor atribuído a eles. São eles a atração intrínseca A_{s0} e a taxa de decaimento da atração dinâmica ω .

Podemos ver claramente que para valores elevados de A_{s0} há um grande número de roubos e furtos residenciais no retículo, e ao reduzir esse valor, reduzimos também o número de casas visitadas pelos criminosos. Por outro lado, ω se comporta de maneira contrária a A_{s0} . Ao aumentar o valor de ω diminuimos o

número de roubos e furtos no retículo, e claro, diminuindo o valor de ω é visualizado o efeito contrário.

Entretanto, independente dos parâmetros se comportarem de maneiras diferentes para contribuir com a mudança da dinâmica do sistema, ambos são relevantes para uma transição de fase.

Como visto anteriormente no Capítulo 3, dependendo do valor dos parâmetros de controle que escolhemos, podemos convergir o sistema para um estado onde o número de roubos e furtos no retículo se torna esporádico. Todavia, também temos um intervalo de parâmetros que faz o sistema convergir para um estado de roubos e furtos acima do desejado.

Dependendo do conjunto de parâmetros de controle que atribuímos, o sistema pode convergir para duas fases distintas. A primeira, para o caso de roubos e furtos esporádicos, que chamaremos de fase endêmica. A segunda, para casos de roubos e furtos acima do desejado, que chamaremos de fase epidêmica [24]. Ao variar um parâmetro de controle que altere as características do sistema (alterando de fase epidêmica para endêmica, ou vice-versa), estamos caracterizando uma transição de fase.

Faremos então uma simulação inicial para verificar a influência dos dois parâmetros de controle A_{s0} e ω , responsáveis pela evolução da dinâmica no sistema.

Os parâmetros utilizados na simulação foram: Um retículo de dimensões 100×100 , resultando em um total de 10 mil residências. A influência dos vizinhos $\eta = 0,15 = 15\%$, o acréscimo de atração a cada passo de Monte Carlo para as residências visitadas pelos criminosos $\theta = 0,06$, o tempo de “infecção” da residência $T_{inf} = 30$ dias, a atração dinâmica para todos os sítios de $B_s(0) = 14$, por fim $\delta t = 1/24$.

Para realizar a simulação, atribuímos um valor inicial para A_{s0} e ω . Em seguida, deixamos o tempo evoluir por quinze anos, até o sistema convergir para a fase vinculada a esses dois parâmetros. Feito isso, nos últimos seis meses de simulação (após o sistema convergir para o estado estacionário) começamos a

registrar o número de roubos e furtos. Por fim, tiramos uma média do número de roubos e furtos por dia nesses últimos seis meses.

Logo após essa etapa, registramos o par (A_{s0}, ω) associado ao valor de delitos diários, obtendo assim um ponto. Em seguida, alteramos levemente o valor de A_{s0} e ω e repetimos o processo, obtendo assim mais um ponto, até que todo o intervalo dos parâmetros A_{s0} e de ω tenham sido utilizados.

O resultado está ilustrado pela Figura 18, onde quanto mais avermelhado o ponto, maior o número de roubos e furtos diários médios no período dos seis últimos meses de simulação.

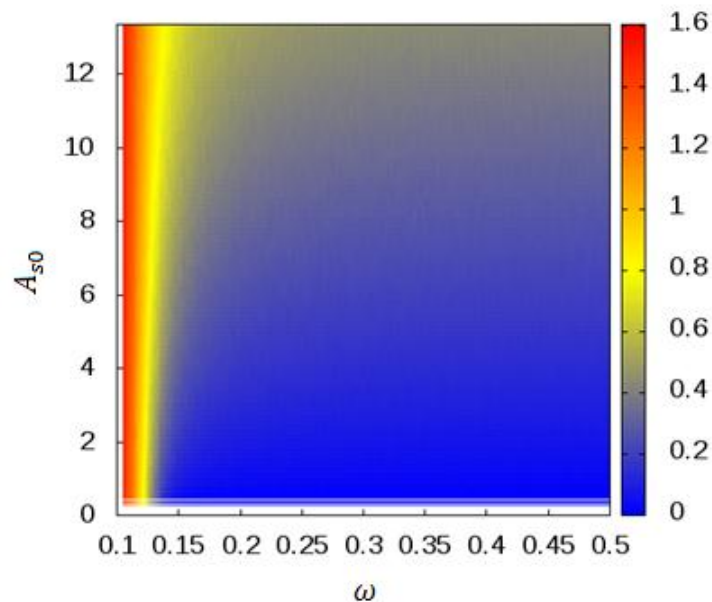


Figura 18. Simulação da influência dos parâmetros de controle A_{s0} e ω em uma cidade de dimensões $L = 100$.

Podemos observar na Figura 18 que ao elevar o parâmetro A_{s0} também elevamos a região onde o sistema se encontra em uma fase epidêmica (grande número de roubos e furtos). Entretanto, ao elevar o valor do parâmetro de controle ω , rapidamente convergimos o sistema para uma fase endêmica (baixo número de roubos e furtos).

A Figura 18 além de nos mostrar as influências de cada parâmetro de controle A_{s0} e ω , também nos permite visualizar uma transição de fase, onde ao se combinar

determinados valores de A_{s0} e ω conseguimos convergir o sistema para uma fase endêmica ou epidêmica.

4.2 Caracterizando a Transição de Fase utilizando A_{s0} e ω

Para caracterizar a Transição da Fase Epidêmica para a Fase Endêmica do modelo é efetuada a seguinte estratégia. Primeiramente, para a cidade possuir uma Fase Endêmica de roubos e furtos, é necessário que haja um número muito baixo de delitos em comparação ao tamanho do retículo. Consideraremos esse número de roubos e furtos esporádicos aceitável sendo menor ou igual a 0,1% do total de residências do retículo em um período de seis meses. Isso quer dizer que, para uma cidade de tamanho $L = 100$ (dez mil residências), o número de delitos considerados esporádicos será menor ou igual a dez ocorrências a cada seis meses (uma residência invadida pelos criminosos a cada seis meses, de um total de dez mil re).

A Figura 19 mostra as combinações de pares de parâmetros A_{s0} e ω que converge o sistema para uma fase epidêmica, representada pela área avermelhada, ou para uma fase endêmica representada pela área azulada, caracterizando assim a Transição de Fase do sistema.

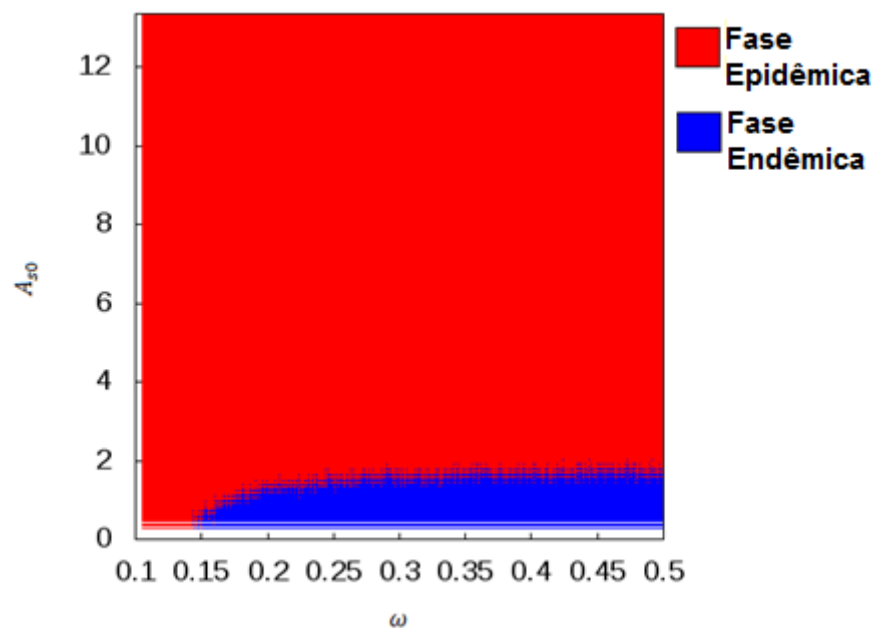


Figura 19. Caracterização da Transição de Fase Epidêmica para a Fase Endêmica variando os parâmetros de controle A_{s0} e ω .

4.3 Caracterizando a Transição de Fase utilizando ω

Nessa etapa, realizaremos uma nova simulação com o objetivo de analisar a influência da variação do parâmetro ω em retículos (cidades) de tamanho $L \times L = 100 \times 100$.

Iniciamos a análise fixando todos os parâmetros de controle com exceção de ω . Em seguida, evoluímos a dinâmica por um período de tempo de quinze anos, atingindo assim o estado estacionário. Nos últimos seis meses, iniciamos uma contagem do número de roubos e furtos realizados nesse período, obtendo assim uma média de delitos diários associados ao valor ω . Repetimos o processo alterando as condições iniciais (onde o criminoso começará sua caminhada) com o objetivo de produzir um ensemble de amostras (número médio de delitos por dia associado ao valor de ω).

O objetivo de se gerar um grande número de amostras é obter um valor médio para diferentes condições iniciais, diminuindo assim as flutuações que possam vir a aparecer.

Obtendo esse valor médio do número de roubos e furtos diários em um período de seis meses, temos um valor médio de roubos e furtos associados a um valor de ω , gerando assim o primeiro ponto do gráfico da Figura 20. Após esse processo, alteramos levemente ω para um valor maior, repetindo o procedimento gerando os demais pontos no gráfico.

Os parâmetros utilizados na simulação foram: Um retículo de dimensões 100×100 , resultando em um total de 10 mil residências. A influência dos vizinhos $\eta = 0,15 = 15\%$, o acréscimo de atração a cada passo de Monte Carlo para as residências visitadas pelos criminosos $\theta = 0,06$, o tempo de “infecção” da residência $T_{inf} = 30$ dias, a atração intrínseca $A_{s0} = 1/30$, a atração dinâmica para todos os sítios de $B_s(0) = 14$, por fim $\delta t = 1/24$.

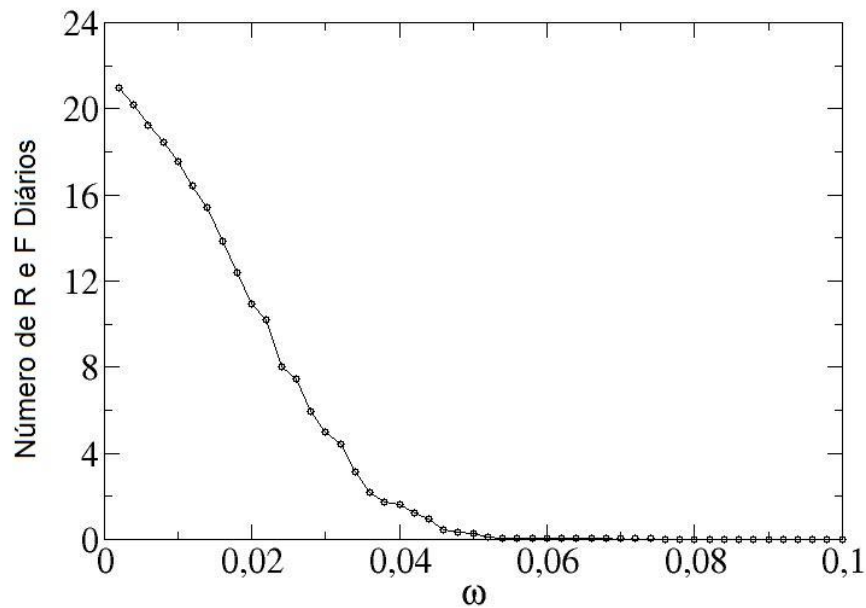


Figura 20. Comportamento do Número de Roubos e Furtos associados a diferentes valores de ω .

Podemos notar que, mesmo apenas variando ω conseguimos visualizar a transição de uma fase epidêmica para uma endêmica ocorrendo aproximadamente em $\omega = 0,048$, onde a curva deixa de ter um comportamento decrescente linear (ilustrado pela Figura 21) e passa a ter um comportamento constante próximo à zero. Lembrando que, os crimes ainda existem nessa região (para $\omega > 0,048$), entretanto acontecem de forma esporádica.

Os critérios para a definição de ω para ocorrer uma Transição de Fase mantêm-se os mesmos discutidos no Capítulo 4. Para ocorrer uma Transição da Fase Epidêmica para uma Fase Endêmica, é necessário que o número de delitos ocorridos em um período de tempo de seis meses seja menor ou igual a 0,1% do número total de residências do retículo, nos fornecendo um parâmetro crítico $\omega_c = 0,048$, caracterizando assim a Transição de Fase utilizando apenas o parâmetro ω .

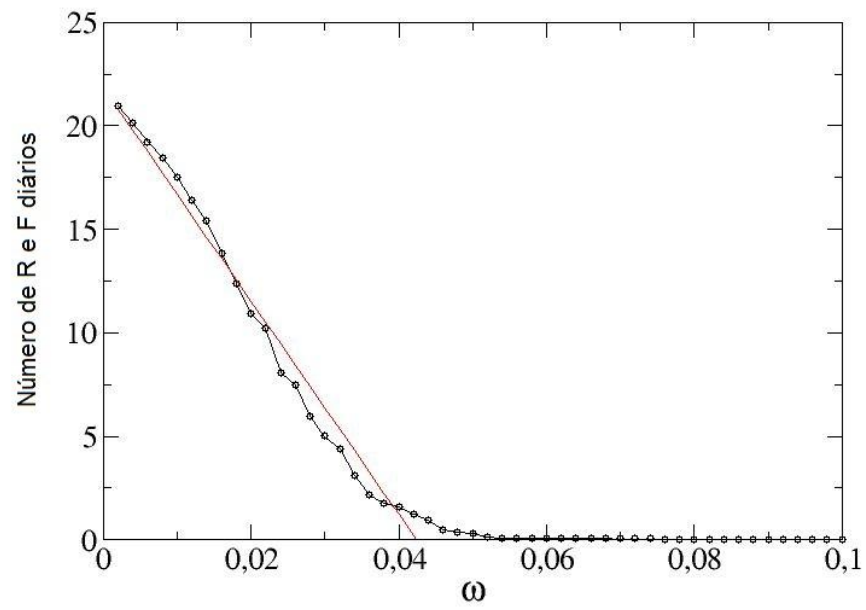


Figura 21 Comportamento Linear Decrescente durante a Fase Epidêmica.

Capítulo 5: A Influência do Tamanho do Retículo

Estudando a influência da variação do parâmetro ω em um retículo, tomaremos como objetivo o estudo das consequências da variação de ω em retículos de tamanhos diferentes.

A estratégia consiste em escolher valores fixos para os parâmetros de controle com exceção de ω e L . Feito isso, evoluímos a dinâmica por um período de quinze anos, até alcançar o estado estacionário. Nos últimos seis meses de simulação, inicia-se uma contagem do número de roubos e furtos realizados nesse período, obtendo assim um número de delitos médios por dia associados ao par (ω, L) . O processo se repete para a mesma combinação de parâmetros de controle, alterando apenas as condições iniciais.

O objetivo é obter um ensemble de pares (ω, L) associados ao número de delitos médios nesses últimos seis meses. Assim, tiramos a média desse valor de delitos associados ao par (ω, L) obtendo o primeiro ponto no gráfico. Em seguida, o processo se repete para diferentes valores de ω , e quando estiver finalizado a análise para diferentes valores de ω , alteramos o tamanho do retículo (L) e repetimos o procedimento.

Os parâmetros utilizados na simulação foram: A influência dos vizinhos $\eta = 0,15 = 15\%$, o acréscimo de atração a cada passo de Monte Carlo para as residências visitadas pelos criminosos $\theta = 0,06$, o tempo de “infecção” da residência $T_{inf} = 30$ dias, a atração intrínseca $A_{s0} = 1/30$, a atração dinâmica para todos os sítios de $B_s(0) = 14$, por fim $\delta t = 1/24$.

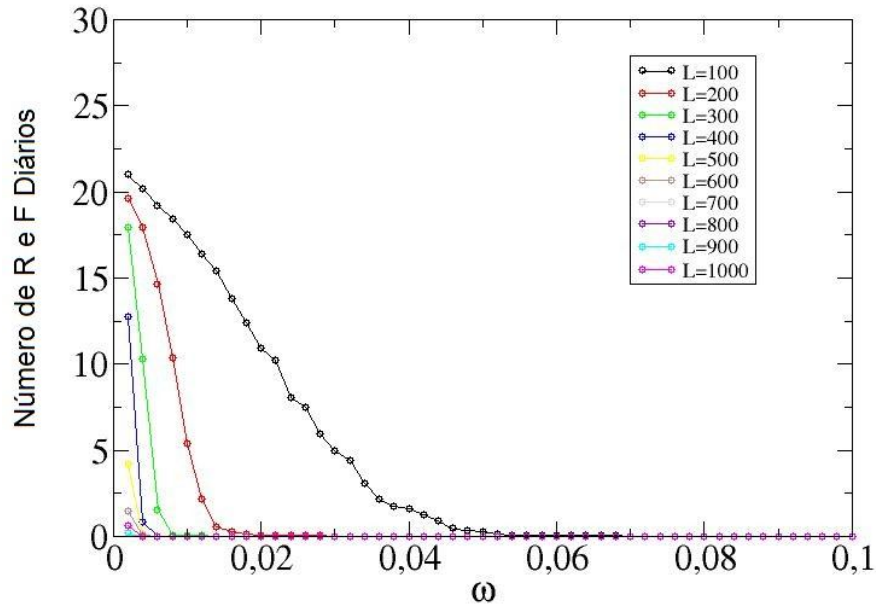


Figura 22. Comportamento do Número de Roubos e Furtos associados a diferentes valores de ω e L .

Na figura 22, notamos algo curioso na construção do gráfico ao se alterar o tamanho do retículo. De acordo com a imagem, ao aumentar o tamanho L do retículo, vemos que para ocorrer uma transição de fase é necessário um valor de ω_c cada vez menor para valores de L cada vez maiores. Em outras palavras, quanto maior o tamanho da cidade, menor o valor de ω_c para caracterizar a transição de fase. O que talvez não reflita com o problema real referente a roubos e furtos. Em uma cidade, em teoria, quanto maior sua população maior o número de criminosos para efetuar seus delitos, consequentemente, mais difícil de convergir o sistema para uma fase endêmica.

Uma possível explicação referente aos resultados mostrados na figura 22 é que, ao longo da evolução da dinâmica de roubos e furtos residenciais, não atribuímos um parâmetro relacionado com a geração de criminosos no retículo. Ou seja, não haveria um controle direto da taxa de criminosos gerados no retículo. Entretanto, ao escolher valores de parâmetros que contribuam para um número cada vez maior de criminosos. Por exemplo, escolhendo elevados valores de θ e de A_0 ou até mesmo baixos valores de ω , estaríamos contribuindo para um número

cada vez mais elevado de criminosos agindo no retículo, como mostra a Figura 15. Por outro lado, ao escolhermos valores baixos dos parâmetros θ e de A_0 ou até mesmo elevados valores de ω , estaríamos conduzindo o sistema para um número cada vez menor de criminosos agindo no retículo como ilustra a Figura 11. Isso significa que, mesmo não possuindo o controle direto da taxa de geração de criminosos, possuímos o controle indireto da mesma, apenas precisamos escolher os parâmetros adequados que convergem o sistema para o número desejado.

Entretanto, como a Figura 22 ilustra, mesmo escolhendo os valores de parâmetros de controle adequados para uma determinada cidade, os mesmos passam a não ser mais adequados à cidades com um tamanho diferente, o que indica uma dependência do tamanho L do retículo na influência dos parâmetros de controle.

Outra forma de contornar esse problema é alterar a estratégia de obter uma taxa indireta do número de criminosos agindo na cidade para uma taxa direta, criando assim ou um número médio de assaltos predeterminados, ou até mesmo uma taxa de geração de criminosos por sítio.

O problema de se utilizar tal estratégia é que, ao se tentar medir uma transição de fase nesse novo modelo, não dependeríamos de um conjunto de parâmetros de controle, apenas do valor médio de roubos e furtos diários em uma cidade. O que reforça a dependência de L aos demais parâmetros de controle. Por exemplo, encontrar uma equação de recorrência onde ω passa a ser uma função que dependa do tamanho da cidade, talvez até da evolução temporal, ou seja $\omega_s(L, t)$,

Capítulo 6: Conclusões e Perspectivas

Ao longo do trabalho, desenvolvemos uma abordagem matemática para representar o problema da difusão referente aos roubos e furtos residenciais em uma cidade hipotética, representada por um retículo bidimensional.

Elaboramos parâmetros de controle referentes às formas de prevenção de segurança, além de atribuída uma equação responsável por ajustar a curva de probabilidade de delitos em função do tempo.

Com o modelo definido, foram realizadas diversas simulações computacionais para analisar a equivalência do modelo com as características apresentadas pelos criminosos, recuperando o comportamento da dinâmica visto na Figura 1, motivadora desse trabalho.

Ao variar o valor numérico de determinados parâmetros de controle, notamos mudanças na dinâmica do sistema. Dependendo dos valores atribuídos, o sistema convergia para um número constante de roubos e furtos. Por outro lado, observamos a existência de um conjunto de valores de parâmetros que fazem com que o sistema venha a convergir para um estado esporádico de crimes, nos levando a crer a existência de duas fases distintas. Uma fase epidêmica, onde os crimes atuam com uma periodicidade acima do desejado. Além de uma fase endêmica, onde os crimes atuam de maneira esporádica.

A partir dessas observações, realizamos novas simulações computacionais, variando a atração intrínseca A_{s0} juntamente com a taxa de decaimento da atração dinâmica ω , nos fornecendo uma transição de uma fase epidêmica de roubos e furtos para uma fase endêmica. Também observamos a ocorrência do mesmo fenômeno de transição de fase ao se variar apenas o parâmetro de controle ω ilustrado pela Figura 20.

Entretanto, ao realizar um novo estudo, dessa vez levando em conta o tamanho do retículo, foi observado um comportamento diferente do esperado para a transição de fase. Levando-nos a crer que, além da influência dos parâmetros atribuídos ao sistema, existe uma suposta influência do tamanho do próprio retículo atrelado aos parâmetros de controle, abrindo uma nova linha de investigação do problema.

Contudo, mesmo o problema referente aos roubos e furtos possuir algumas lacunas a serem investigadas, conseguimos obter progressos significativos para a modelagem da dinâmica dos criminosos, tendo em vista a complexidade e dinamismo do crime.

Referências Bibliográficas

- [1] SANTOS, Márcia Andréia Ferreira. ABORDAGENS CIENTÍFICAS SOBRE AS CAUSAS DA CRIMINALIDADE VIOLENTA: UMA ANÁLISE DA TEORIA DA ECOLOGIA HUMANA. **Revista LEVS**, n. 17, 2016.
- [2] VAN DER WEELE, Joël J.; FLYNN, Mataka P.; VAN DER WOLK, Rogier J. Broken Window Effect. In: **Encyclopedia of Law and Economics**. Springer, New York, NY, 2017. p. 1-4.
- [3] RUBIN, Daniel Sperb. Janelas quebradas, tolerância zero e criminalidade. **Jus Navigandi, Teresina, ano**, v. 8, 2003.
- [4] VOLPE FILHO, Clovis Alberto. Quanto mais comportamentos tipificados penalmente, menor o índice de criminalidade. **Jus Navigandi, Teresina, ano**, v. 9.
- [5] GOMES, Luiz Flávio; MOLINA, Antonio García-Pablos de. Criminologia. **São Paulo: Revista dos Tribunais**, 2000.
- [6] BACILA, Carlos Roberto. Criminologia e estigmas: um estudo sobre os preconceitos. 2015.
- [7] Criminologia, ed. Revista Dos Tribunais. 5ª edição, SP, 2006,p. 120
- [8] JÚNIOR, Celso Moreira Ferro; DE LIMA DANTAS, George Felipe. A descoberta e a análise de vínculos na complexidade da investigação criminal moderna. **Adquirido no site do Ministério da Justiça ([http://www. mj. gov. br](http://www.mj.gov.br))** em 27 outubro de 2018.
- [9] SHORT, Martin B. et al. A statistical model of criminal behavior. **Mathematical Models and Methods in Applied Sciences**, v. 18, n. supp01, p. 1249-1267, 2008.
- [10] Código Penal Brasileiro, Adquirido no site do Planalto http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/Del2848compilado.htm em 27 outubro de 2018
- [11] LEONEL, E. D. Fundamentos da física estatística. **Editores Edgard Blücher LTDA**, 2015.

- [12] ROBERT, Christian; CASELLA, George. **Monte Carlo statistical methods**. Springer Science & Business Media, 2013.
- [13] SALINAS, Sílvia RA. **Introdução a física estatística vol. 09**. Edusp, 1997.
- [14] REIF, Frederick. **Fundamentals of statistical and thermal physics**. Waveland Press, 2009.
- [15] MARTINS, M. L. et al. Cellular automata model for citrus variegated chlorosis. **Physical Review E**, v. 62, n. 5, p. 7024, 2000.
- [16] JOHNSON, Shane D. et al. Space–time patterns of risk: a cross national assessment of residential burglary victimization. **Journal of Quantitative Criminology**, v. 23, n. 3, p. 201-219, 2007.
- [17] JOHNSON, Shane D.; BOWERS, Kate; HIRSCHFIELD, Alex. New insights into the spatial and temporal distribution of repeat victimization. **The British Journal of Criminology**, v. 37, n. 2, p. 224-241, 1997.
- [18] PAPON, Pierre; LEBLOND, Jacques; MEIJER, Paul HE. **Physics of Phase Transitions**. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2002.
- [19] STANLEY, H. Eugene; AHLERS, Guenter. Introduction to phase transitions and critical phenomena. **Physics Today**, v. 26, p. 71, 1973.
- [20] POLLACK, Gerald H. **Phase transitions in cell biology**. Netherlands: Springer, 2008.
- [21] DICKMAN, Adriana G.; DICKMAN, Ronald; BARBOSA, Fabrício Almeida. Transições de fase sem termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 1, p. 23-33, 2006.
- [22] CASTELLANO, Claudio; FORTUNATO, Santo; LORETO, Vittorio. Statistical physics of social dynamics. **Reviews of modern physics**, v. 81, n. 2, p. 591, 2009.
- [23] PLEROU, Vasiliki; GOPIKRISHNAN, Parameswaran; STANLEY, H. Eugene. Econophysics: Two-phase behaviour of financial markets. **Nature**, v. 421, n. 6919, p. 130, 2003.

[24] BOTARI, Tiago; ALVES, S. G.; LEONEL, Edson D. Explaining the high number of infected people by dengue in Rio de Janeiro in 2008 using a susceptible-infective-recovered model. **Physical Review E**, v. 83, n. 3, p. 037101, 2011.