



CRISTIAN TIAGO ERAZO MENDES

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE DISPERSÃO SOBRE A
DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO PULGÃO
APHIS GOSSYPHII GLOVER:
UMA ABORDAGEM COMPUTACIONAL**

LAVRAS – MG

2017

CRISTIAN TIAGO ERAZO MENDES

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE DISPERSÃO SOBRE A DINÂMICA
ESPAÇO-TEMPORAL DO PULGÃO *APHIS GOSSYPHII* GLOVER:
UMA ABORDAGEM COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária, área de concentração em Estatística e Experimentação Agropecuária, para a obtenção do título de Mestre.

Dra. Solange Gomes Faria Martins

Orientador

LAVRAS – MG

2017

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Mendes, Cristian Tiago Erazo

Efeito dos parâmetros de dispersão sobre a dinâmica espaço-temporal do pulgão *Aphis gossypii* Glover : Uma Abordagem Computacional / Cristian Tiago Erazo Mendes. – Lavras : UFLA, 2017.

57 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)–Universidade Federal de Lavras, 2017.

Orientador: Dra. Solange Gomes Faria Martins.

Bibliografia.

1. Pulgão. 2. Modelo Penna. 3. Dinâmica Populacional. 4. Distribuição Espacial. I. Martins, /Solange Gomes. II. Título.

CRISTIAN TIAGO ERAZO MENDES

**EFEITO DOS PARÂMETROS DE DISPERSÃO SOBRE A DINÂMICA
ESPAÇO-TEMPORAL DO PULGÃO *APHIS GOSSYPHII* GLOVER: UMA
ABORDAGEM COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária, área de concentração em Estatística e Experimentação Agropecuária, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 27 de Março de 2017.

Dra. Solange Gomes Faria Martins UFLA
Dra. Thelma Safadi UFLA
Dr. Maurício Sérgio Zacarias EMPRAPA

Dra. Solange Gomes Faria Martins
Orientador

**LAVRAS – MG
2017**

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Estatística juntamente aos professores e funcionários, pela oportunidade de estudo e aprendizado.

À CAPES pelo apoio financeiro que foi de grande importância para concretização deste trabalho.

À professora Dra. Solange Gomes Faria Martins, pela atenção, ensinamentos, orientação e paciência durante os últimos dois anos.

À minha avó Maria Terezinha Soares e à minha mãe Fátima Áltair Mendes que sempre estiveram ao meu lado me incentivando, acreditando e me apoiando em todo momento.

Aos meus tios Rosele Mares Mendes e Antônio Joubert Mendes, que sempre me ajudaram.

À Érica, ao Ricardo e à Tamara pela convivência diária, por terem me acolhido durante esses dois últimos anos, e que se tornaram grandes amigos que levo para a vida toda.

Aos colegas da turma Érica Pereira, Andrezza, Ernandes, Eleanderson, Rogério, Sérgio, André, Rodrigo, Rafael Agostinho, Hércilio pela amizade ao longo do curso.

Aos amigos do departamento, em especial, Henrique, Rafael Lemos, Fernando, Michele e Carol pelo companheirismo, amizade e apoio nos momentos difíceis.

RESUMO

O pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1876 destaca-se dentre as pragas do algodoeiro pelos prejuízos econômicos e pelos danos causados à planta. Com o propósito de conseguir um controle maior dessa praga, estudos são realizados para melhor compreender as características da dinâmica populacional deste inseto. Um modelo computacional bastante utilizado em dinâmica populacional com estrutura etária é o modelo Penna. Algumas adaptações deste modelo para estudo da dinâmica populacional de diferentes espécies são encontradas na literatura. Este trabalho teve como objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal do pulgão *A. gossypii* em cultura de algodoeiro, utilizando as adaptações do modelo Penna propostas por (AMARAL, 2014). Mais especificamente, o comportamento da dinâmica populacional mediante alterações em parâmetros relativos à dispersão de ápteros e alados. Nos resultados obtidos observou-se pequenas alterações na média populacional e na taxa de crescimento intrínseco devido a alterações nos parâmetros relativos à dispersão. Por outro lado, observou-se a influência da migração de ápteros sobre o tempo de infestação das plantas na rede. Da análise espacial, observou-se um padrão de distribuição agregada, um comportamento anisotrópico da distribuição espacial, assim como a formação de cluster percolante em momentos próximos aos de ocorrência de máxima variância e do ponto de inflexão da média populacional em função do tempo, para todos os conjuntos de parâmetros relativos à dispersão.

Palavras-chave: Pulgão. Modelo Penna. Dinâmica Populacional. Distribuição Espacial.

ABSTRACT

With the purpose of getting a larger control of that plague, studies are accomplished for best to understand the characteristics of the population dynamics of this insect. A model computational quite used in population dynamics with age structure is the model Penna. Some adaptations of this model for study of the population dynamics of different species are found in the literature. The objective of this work was to analyze the dynamics space-storm of the aphid *A. gossypii* in cotton plant culture, using the adaptations of the model Penna proposed by (AMARAL, 2014). More specifically, the behavior of the population dynamics by alterations in relative parameters to the dispersion of apterous and winged. In the obtained results it was observed small alterations in the population average and intrinsic growth rate due to alterations in the relative parameters to the dispersion. On the other hand, it was observed the influence of the migration of apterous on the time of infestation of the plants in the net. For all the dispersion parameter sets an aggregate distribution pattern, an anisotropic behavior of the spatial distribution, as well as the formation of a clustered percolation were observed in moments close to the occurrence of maximum variance and the inflection point of the population mean.

Keywords: aphid. model Penna. population dynamics. spatial distribution

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – População de pulgões com cerca de 1,3 mm de comprimento com sifúnculos escuros na extremidade do abdômen. Fonte:(SARAN; SANTOS, 2007)	11
Figura 2.2 – Formação de colônia do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover. Fonte:(SARAN; SANTOS, 2007)	12
Figura 2.3 – Ciclo de vida holocíclico (completo) e anolocíclico (incompleto) de pulgões.	12
Figura 2.4 – Área de produção do algodão em território nacional. Fonte:(CONAB, 2016a)	14
Figura 2.5 – Séries históricas das produtividades do algodão em caroço, da pluma e da área total de algodão plantado. Fonte:(CONAB, 2016b)	15
Figura 2.6 – Regras de vizinhança bidimensional de Von Neuman e Moore	16
Figura 2.7 – Exemplo de evolução de um autômato celular aplicando as regras do "Jogo da Vida" (<i>Game of Life</i>).	16
Figura 2.8 – Palavra computacional representando o genótipo do indivíduo, cada bit setado em '1' corresponde uma mutação deletéria.	18
Figura 2.9 – Genótipo do filho idêntico ao da mãe, exceto pelos M bits sorteados os quais sofreram mutações deletérias.	18
Figura 2.10 – Exemplo de formação de clusters e percolação.	19
Figura 3.1 – Representação das regras de migração para pulgão na forma áptera situado nos extremos da rede.	26
Figura 3.2 – Representação das regras de migração para pulgão na forma áptera situado nas bordas da rede.	26
Figura 3.3 – Representação das regras de migração para pulgão na forma áptera situado no interior da rede.	26
Figura 4.1 – Taxa intrínseca de crescimento do pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover, para diferentes valores de α_1 e α_2 .	29
Figura 4.2 – Taxa de plantas infestadas na rede ao longo do tempo (dias).	31
Figura 4.3 – Taxa de plantas infestadas na rede ao longo do tempo (dias), com alta probabilidade de migração do alado.	32
Figura 4.4 – Distribuição de frequência dos sítios em intervalos de classes para X_j , em diferentes etapas temporais do cenário correspondente a $\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 0,6$.	33
Figura 4.5 – Evolução temporal da média populacional $\mu(t)$ e variância $\sigma^2(t)$ no cenário correspondente a $\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 0,6$.	34

Figura 4.6 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0,1$ e $\alpha_2=0,6$	39
Figura 4.7 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0,1$ e $\alpha_2=0,6$	39
Figura 4.8 – Correlograma de Bearing utilizando o coeficiente de autocorrelação de Geary com $\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 0,6$, para análise espacial direcional.	40
Figura 4.9 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0,3$ e $\alpha_2=0,7$	41
Figura 4.10 – Correlograma de Bearing utilizando o coeficiente de autocorrelação de Geary com $\alpha_1 = 0,3$ e $\alpha_2 = 0,7$, para análise espacial direcional.	42
Figura 4.11 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0,4$ e $\alpha_2=0,8$	43
Figura 4.12 – Correlograma de Bearing utilizando o coeficiente de autocorrelação de Geary com $\alpha_1 = 0,4$ e $\alpha_2 = 0,8$, para análise espacial direcional.	44
Figura 4.13 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0,5$ e $\alpha_2=0,7$	45
Figura 4.14 – Correlograma de Bearing utilizando o coeficiente de autocorrelação de Geary com $\alpha_1 = 0,5$ e $\alpha_2 = 0,7$, para análise espacial direcional.	46
Figura 4.15 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0,6$ e $\alpha_2=0,4$	47
Figura 4.16 – Correlograma de Bearing utilizando o coeficiente de autocorrelação de Geary com $\alpha_1 = 0,6$ e $\alpha_2 = 0,4$, para análise espacial direcional.	48
Figura 4.17 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0,8$ e $\alpha_2=0,6$	49
Figura 4.18 – Correlograma de Bearing utilizando o coeficiente de autocorrelação de Geary com $\alpha_1 = 0,8$ e $\alpha_2 = 0,6$, para análise espacial direcional.	50
Figura 4.19 – Formação de cluster na configuração correspondente aos parâmetros $\alpha_1=0,1$ e $\alpha_2=0,1$	52
Figura 4.20 – Formação de cluster na configuração correspondente aos parâmetros $\alpha_1=0,1$ e $\alpha_2=0,2$	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Duração do estágio ninfal (α), período pré-reprodutivo (β), longevidade (L), em dias, fecundidade total por fêmea (B) e fecundidade diária por fêmea (b) do <i>A. gossypii</i> Glover no algodoeiro em diferentes temperaturas (médias \pm o intervalo de confiança 95 %). Fonte:(XIA et al., 1999) . . .	13
Tabela 2.2 – Taxa intrínseca de crescimento (r_m) e duração em dias de uma geração (τ) de <i>A. gossypii</i> Glover no algodoeiro em diferentes temperaturas. Fonte:(XIA et al., 1999)	13
Tabela 4.1 – Valores médios $\bar{\mu}$ em diferentes configurações.	28
Tabela 4.2 – Análise de diferentes cenários na dinâmica populacional do pulgão, nas etapas temporais que ocorrem a percolação, máxima variância e ponto de inflexão.	34
Tabela 4.3 – Análise de diferentes índices de dispersão, calculados para diferentes cenários, em etapas temporais no período transiente e estacionário	36
Tabela 4.4 – Ajuste e seleção de modelo para população de pulgões na rede 20x20, em diferentes cenários e etapas temporais, utilizando AIC	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Pulgão <i>Aphis gossypii</i> Glover	11
2.2	Importância Econômica do Algodão	13
2.3	Autômato Celular	15
2.4	Modelo Penna	17
2.5	Teoria da Percolação	18
2.6	Métodos de análise espacial	19
2.6.1	Razão Variância/Média	20
2.6.2	Índice de Morisita	20
2.6.3	Seleção de modelos	21
2.6.3.1	Distribuição de Poisson	21
2.6.3.2	Distribuição Binomial Negativa	21
2.6.3.3	Crítério de informação de Akaike (AIC)	22
2.6.4	Coeficiente de Geary	22
2.6.5	Correlograma de Bearing	24
3	METODOLOGIA	25
3.1	Dados utilizados nas simulações	26
4	RESULTADO E DISCUSSÃO	28
4.1	Média Populacional no Regime Estacionário:	28
4.2	Taxa Intrínseca de Crescimento	29
4.3	Infestação de plantas na rede	30
4.4	Distribuição de frequência dos sítios em intervalos de classes para a variável X_j	31
4.5	Evolução Temporal da Média Populacional e da Variância	33
4.6	Índices de Dispersão	35
4.7	Ajuste e seleção de modelo utilizando critério de Akaike	37
4.8	Correlograma de Geary e Formação de Cluster	38
5	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS	55

INTRODUÇÃO

Os afídeos, popularmente conhecidos como pulgões, são pragas que atacam diversas culturas em cultivos protegidos e culturas no campo. Estes insetos apresentam alta capacidade de reprodução, o que lhes permitem atingir níveis populacionais altamente prejudiciais à cultura em que se encontram. Somado ao potencial reprodutivo, possuem alta capacidade de dispersão e colonização das culturas que atacam. Enquanto os pulgões ápteros apresentam uma mobilidade mais restrita à região local, os pulgões alados podem voar e alcançar longas distâncias, desempenhando assim importante papel na dispersão da espécie.

Dentre as diversas culturas que atacam, crisântemo, pepino, pimentão, tomate, entre outras, o algodão é uma das culturas anuais de maior importância no Brasil devido ao seu valor econômico e social. O avanço da tecnologia com o aumento da produtividade, permitiu ao Brasil se tornar um grande exportador da matéria-prima. Para se obter um maior valor comercial, algumas características econômicas importantes são levadas em consideração, como produção, peso do capulho e semente, porcentagem de fibra e resistência a pragas e doenças (SEAGRI, 2015; KIMATI et al., 1997).

Dentre as pragas que atacam o algodoeiro, destaca-se o pulgão *Aphis gossypii* Glover, 1877 pelos prejuízos causados às plantas. Ao sugarem a seiva, estas pragas produzem encarquilhamento das folhas e deformação dos brotos, prejudicando o desenvolvimento da planta. Quando não controlado, os pulgões reduzem a produção de algodão em cerca de 44%, sem contar com os danos causados por viroses (GALLO et al., 2002).

Com a finalidade de definir medidas de controle das populações de pulgões em culturas de interesse, se faz necessário o estudo da dinâmica populacional desta espécie com ênfase na análise temporal e espacial. Modelos matemáticos, estatísticos e computacionais são instrumentos utilizados para simular e compreender diferentes comportamentos biológicos observados em populações de pragas. Um modelo computacional amplamente utilizado em dinâmica populacional com estrutura etária é o Modelo Penna (PENNA, 1995). Este modelo permite adaptações para estudo da dinâmica populacional de diferentes espécies (SANTOS et al., 2012; GIAROLA et al., 2006; SOUZA, 2007, 2007).

Este trabalho teve como objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal da população de *A. gossypii* em cultura de algodoeiro, utilizando as adaptações ao modelo Penna propostas por Amaral (2014), mediante variações em parâmetros relativos à capacidade de migração de formas ápteras e aladas. Para estudo da dinâmica considerou-se os dados biológicos do pulgão a 25 °C, por tratar-se da temperatura mais propícia para o desenvolvimento desta espécie. Neste estudo procurou-se verificar a existência de relações entre variáveis dependentes do tempo e o padrão de distribuição espacial do pulgão.

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pulgão *Aphis gossypii* Glover

O pulgão *Aphis gossypii* Glover é uma das principais pragas que atacam o algodoeiro, podendo ocorrer já no início de sua formação, quando começa a germinação dos brotos. O desenvolvimento do pulgão na planta hospedeira depende principalmente das características da planta e das condições climáticas. São insetos de tamanho pequeno, com aproximadamente 0,15 a 1,5 mm de espessura (figura 2.1), corpo mole, encontrados na forma áptera e alada (com asas). Na reprodução, os alados são gerados em ambientes com grande densidade populacional, resultado da restrição de espaço e alimento dos indivíduos. A sua coloração varia de amarelo claro ao verde escuro (FERNANDES et al., 2001; SARAN; SANTOS, 2007; GALLO et al., 2002).

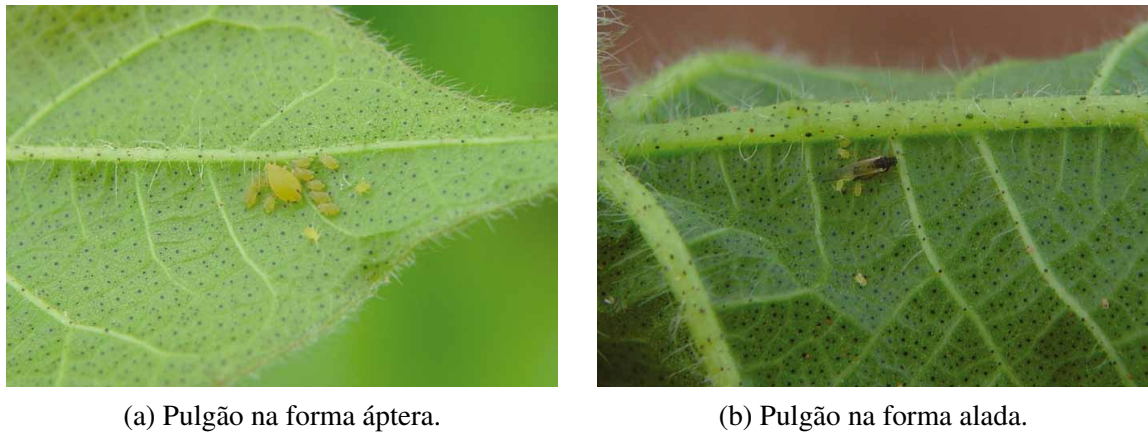
Figura 2.1 – População de pulgões com cerca de 1,3 mm de comprimento com sífúnculos escuros na extremidade do abdômen. Fonte:(SARAN; SANTOS, 2007)



Os danos provocados pelos pulgões podem diminuir a produtividade afetando algumas características da planta e assim a sua comercialização. Eles agem diretamente nas plantas, provocando definhamento das mesmas. Também podem ser vetores de viroses, como o vermelhão de algodoeiro e o mosaico-das-nervuras (CIA; FREIRE; SANTOS, 1999; DEGRANDE, 1998).

Em regiões de clima temperado a reprodução predominante dos afídeos é sexuada. Em regiões tropicais, como o Brasil e em casas de vegetação, a reprodução processa-se exclusivamente por partenogênese telítoca (assexuada), sendo tanto as formas áptera quanto alada, constituídas de fêmeas que dão origem a ninfas. Os alados, pelo fato de possuírem asas, apresentam uma capacidade maior de migração e dispersão. Por outro lado, os ápteros são aqueles

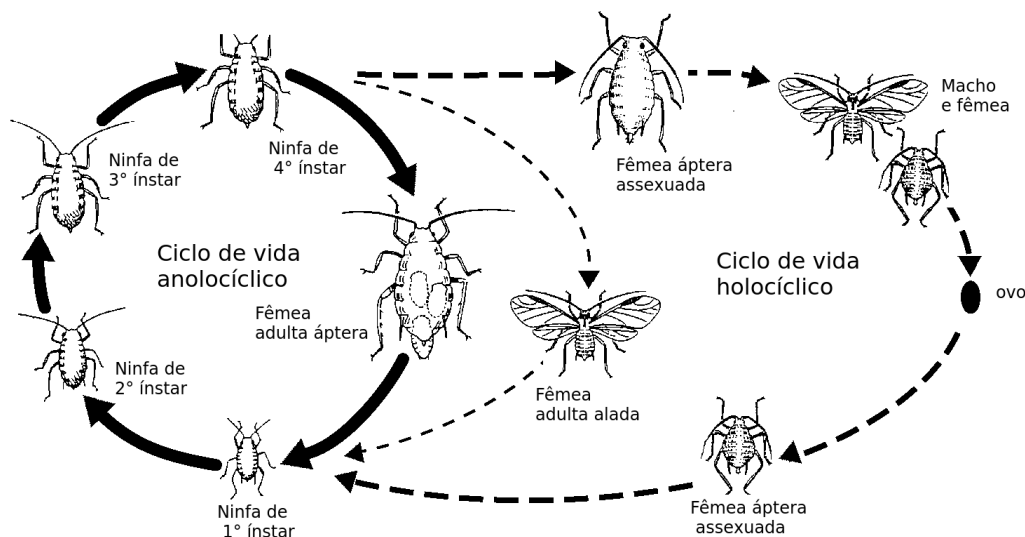
Figura 2.2 – Formação de colônia do pulgão *Aphis gossypii* Glover. Fonte:(SARAN; SANTOS, 2007)



que possuem uma maior capacidade reprodutiva na colônia (GALLO et al., 2002; SARAN; SANTOS, 2007; ILHARCO, 1992).

Na reprodução sexuada as fêmeas são fecundadas antes de se reproduzirem, originando descendentes com ciclo de vida holocíclico (completo). Na reprodução assexuada as fêmeas procriam sem terem sido fecundadas, dando origem apenas a descendentes fêmeas geneticamente iguais às suas mães, conhecidas como clones e com ciclo de vida anolocíclico (incompleto). Estes ciclos são apresentados na figura 2.3 (ILHARCO, 1992).

Figura 2.3 – Ciclo de vida holocíclico (completo) e anolocíclico (incompleto) de pulgões.



O algodoeiro é conhecido como uma das plantas mais sujeitas ao ataque de pragas (CIA; FREIRE; SANTOS, 1999), dentre elas está o pulgão *A. gossypii* que, em uma infestação nas fases iniciais do algodoeiro, compreende a maior causa de danos (NEVES et al., 1965). A temperatura é um fator importante que influencia o desenvolvimento e a reprodução dos pulgões

(BUENO, 2005). Segundo Dixon et al. (1977) uma mudança na temperatura resulta em uma alteração na taxa reprodutiva, assim como na longevidade dos afídeos. Nas tabelas 2.1 e 2.2 estão alguns resultados de experimentos conduzidos em laboratório com o pulgão *A. gossypii* sobre o algodoeiro em diferentes temperaturas (XIA et al., 1999).

Tabela 2.1 – Duração do estágio ninfal (α), período pré-reprodutivo (β), longevidade (L), em dias, fecundidade total por fêmea (B) e fecundidade diária por fêmea (b) do *A. gossypii* Glover no algodoeiro em diferentes temperaturas (médias \pm o intervalo de confiança 95 %). Fonte:(XIA et al., 1999)

$\theta(^{\circ}\text{C})$	α	β	L	B	b
10	23.0 \pm 1.76	3.2 \pm 0.55	53.4 \pm 7.06	6.1 \pm 1.69	0.4 \pm 0.27
15	13.0 \pm 1.0	2.4 \pm 0.47	38.4 \pm 4.9	21.4 \pm 2.5	1.2 \pm 0.2
20	8.5 \pm 0.39	1.0 \pm 0.2	24.2 \pm 2.94	24.6 \pm 2.0	2.2 \pm 0.24
25	5.0 \pm 0.2	0.6 \pm 0.08	15.8 \pm 1.96	28.3 \pm 2.5	3.1 \pm 0.25
30	4.6 \pm 0.18	0.6 \pm 0.12	12.0 \pm 1.37	14.6 \pm 1.4	2.7 \pm 0.39
35	5.4 \pm 0.39	0.9 \pm 0.2	10.2 \pm 0.78	4.0 \pm 0.35	1.7 \pm 0.41

Tabela 2.2 – Taxa intrínseca de crescimento (r_m) e duração em dias de uma geração (τ) de *A. gossypii* Glover no algodoeiro em diferentes temperaturas. Fonte:(XIA et al., 1999)

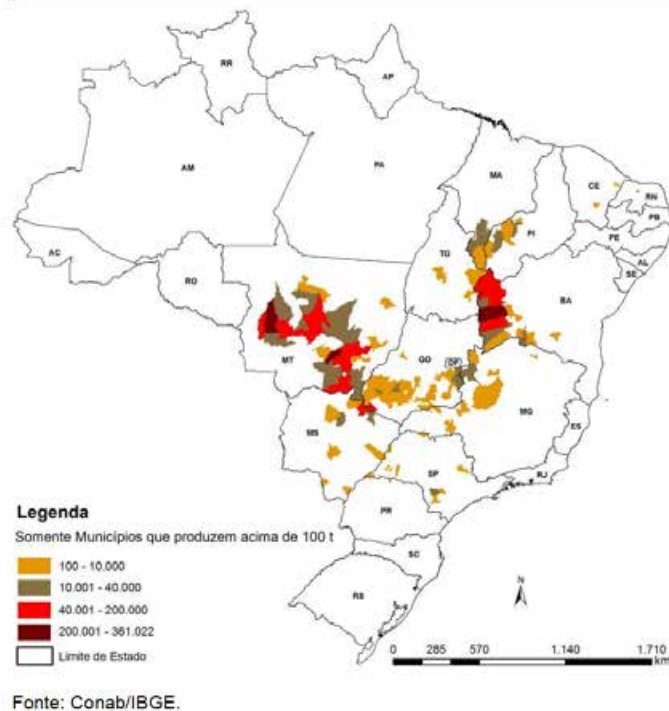
$\theta(^{\circ}\text{C})$	r_m	τ
10	0.03	28.9
15	0.14	18.5
20	0.25	11.4
25	0.39	8.3
30	0.36	6.4
35	0.09	7.6

2.2 Importância Econômica do Algodão

O avanço da tecnologia e o aumento da produtividade permitiram ao Brasil passar de maior importador mundial de algodão para o terceiro maior exportador do produto em 12 anos (SEAGRI, 2015). Atualmente os estados que possuem maior produção de algodão são Mato Grosso e Bahia, tendo o primeiro uma extensão de 597,6 mil hectares de área cultivada, e o segundo uma área de 242 mil hectares (figura 2.4). No Brasil a área total de produção é 976,2 mil hectares (CONAB, 2016a).

O aumento na produtividade de grãos se deve ao avanço na área da pesquisa, ao aumento das exportações e à valorização do produto com preço interno aumentando, aliado a vários

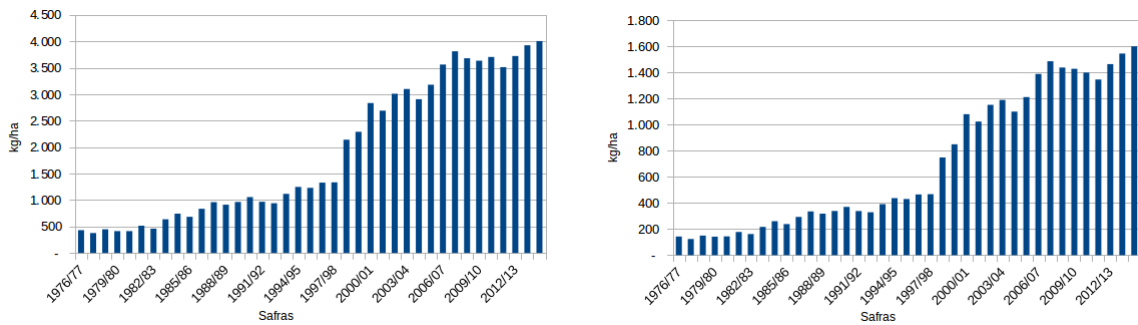
Figura 2.4 – Área de produção do algodão em território nacional. Fonte:(CONAB, 2016a)



outros fatores (MAPA, 2012). A figura 2.5 mostra o aumento da produtividade do algodão ao longo dos últimos anos, tendo a área plantada apresentado pouca variação.

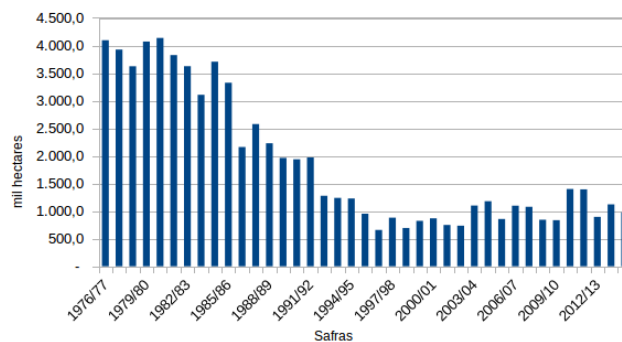
Na figura 2.5 observa-se nos gráficos um salto na produtividade do algodão em caroço e da pluma na safra 1997/98 para 1998/99. Essa análise pode ser explicada a partir de medidas adotadas em anos anteriores na cotonicultura mato-grossense. Na safra de 1994/95 os agricultores tinham expectativa de ter uma colheita com boa produtividade devido aos resultados satisfatórios das safras anteriores, porém foram surpreendidos com alguns imprevistos, como excesso de chuvas, descontrole de pragas e doença azul atingindo as plantações de algodão. Nesse período os produtores passaram por grandes dificuldades tendo uma baixa produtividade e assim gerando vários prejuízos. A partir desse acontecimento, alguns incentivos foram dados para alavancar a cotonicultura no estado, como por exemplo a iniciativa em pesquisa, criação do Programa de Apoio ao Algodão de Mato Grosso (Proalmat) e do Fundo de Apoio à Cultura do Algodão (Facual). Também foram criadas algumas associações, como a Mato-grossense dos Produtores de Algodão (Ampa). Com os resultados satisfatórios, o modelo de agricultura empresarial empregado pelos produtores nos últimos anos vem contribuindo para que o Brasil apareça no cenário mundial como um dos principais exportadores do produto (AMPA, 2016).

Figura 2.5 – Séries históricas das produtividades do algodão em caroço, da pluma e da área total de algodão plantado. Fonte:(CONAB, 2016b)



(a) Produtividade do algodão em caroço (kg/ha).

(b) Produtividade da pluma (kg/ha).



(c) Área total de algodão plantado no Brasil (mil hectares).

2.3 Autômato Celular

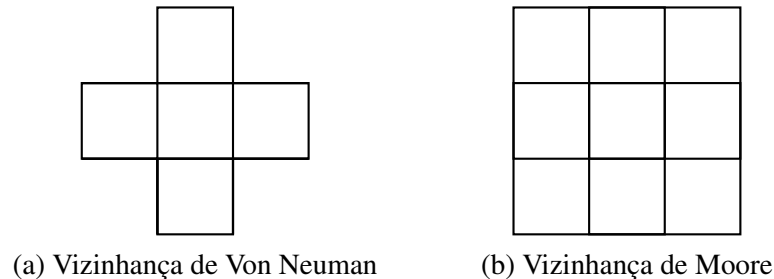
Autômatos Celulares são sistemas onde o espaço, o tempo e as variáveis dinâmicas são discretas (VICHNIAC, 1984). Os primeiros estudos realizados sobre autômatos celulares foram feitos por John Von Neuman na década de 40. O objetivo era, a partir de uma organização lógica, tentar modelar auto-reprodução natural. No início da década de 50, com base em uma sugestão de Ulam, Von Neuman propôs uma arquitetura adequada para esta simulação (KARI, 2005; LANGTON, 1986).

A arquitetura proposta é bidimensional, dividida em uma matriz de máquinas de estados finitos, chamados de células, interligados localmente uns com os outros. Cada célula muda de estado em função do seu próprio estado e dos estados de células na sua vizinhança. O tempo avança na matriz em passos discretos com todas as células mudando de estado simultaneamente. Como sistema homogêneo, o autômato utilizado por cada célula é definido por uma função de transição, θ , que é a mesma para todas as células.

As vizinhanças mais comuns em uma rede bidimensional são a vizinhança de Von Neuman, apresentada na figura 2.6a e a vizinhança de Moore, apresentada na figura 2.6b. Na vizi-

nhança de Neuman temos um conjunto de 5 células, uma central e seus 4 vizinhos; na vizinhança de Moore, temos um conjunto de 9 células, uma central e seus 8 vizinhos.

Figura 2.6 – Regras de vizinhança bidimensional de Von Neuman e Moore

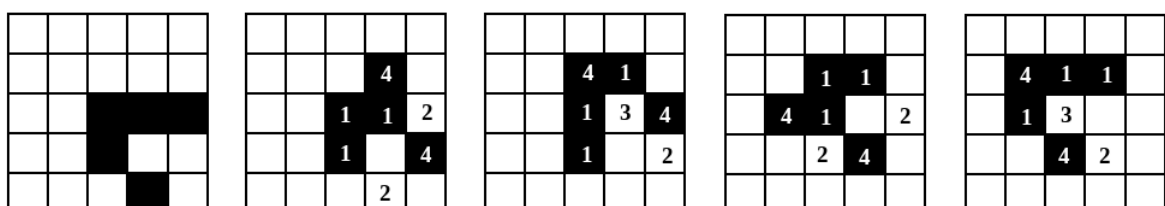


Um autômato celular bastante conhecido é o "Jogo da Vida" (*Game of Life*), o qual foi desenvolvido por Conway nos finais dos anos 60, e que faz analogia aos organismos vivos, com nascimento, morte e sobrevivência. Nesse autômato a vizinhança considerada é a de Moore. O estado de uma célula é representado pelos valores binários 0 se a célula estiver morta ou 1 se ela estiver viva. Todos os nascimentos e mortes ocorrem de forma simultânea, em que cada interação do jogo constitui uma única geração (CASTRO et al., 2015; GARDNER, 1970). As regras do jogo são:

1. Uma célula viva com 2 ou 3 vizinhos vivos permanece viva;
2. Uma célula viva com apenas 1 ou 0 vizinhos vivos, morre;
3. Uma célula viva com 4 ou mais vizinhos, morre;
4. Uma célula morta com exatamente 3 vizinhos vivos, renasce.

A figura 2.7 é um exemplo de evolução de um autômato celular no tempo aplicando as regras do "Jogo da Vida" (*Game of Life*). Os quadrados em branco representam células vivas, e os quadrados em preto, representam células mortas. Os números nas matrizes indicam qual regra foi utilizada.

Figura 2.7 – Exemplo de evolução de um autômato celular aplicando as regras do "Jogo da Vida" (*Game of Life*).



2.4 Modelo Penna

O modelo Penna, conhecido também como modelo “Bit-String” (PENNA, 1995), é um modelo simples para estudo da dinâmica populacional com estrutura etária. Este modelo foi proposto inicialmente para populações assexuadas, embora a adição do sexo possa ser considerado (BERNARDES, 1996). O modelo Penna, o qual baseia-se na teoria de acúmulo de mutações deletérias, pode ser implementado computacionalmente através de variáveis booleanas e técnicas de manipulação de bits.

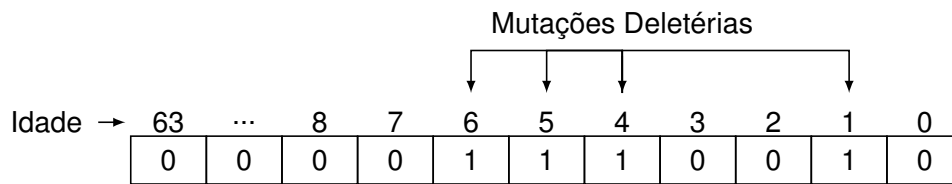
O modelo Penna vem sendo utilizado para vários estudos relativos a fenômenos evolutivos observados na natureza, tais como a senescência catastrófica do salmão do pacífico (PENNA et al., 1995), o efeito da pesca seletiva sobre as características de crescimento do surubim (SANTOS et al., 2012), simulação computacional para populações de macaco-prego-de-crista em ambientes fragmentados (KEESEN et al., 2017), simulação computacional da dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii* (GIAROLA et al., 2006), dentre outros.

Neste modelo, cada indivíduo de uma população é caracterizado por um "genótipo" representado por palavras computacionais ou tiras de bits. As diferentes posições ou bits numa palavra computacional são preenchidas por variáveis binárias com valores 0 ou 1. Cada bit representa um intervalo de tempo na vida do indivíduo, que pode ser medido em dias, meses, anos ou qualquer outra unidade de tempo. O valor “1” do bit representa a ocorrência de uma mutação deletéria cujos efeitos têm início naquela idade, diminuindo assim a probabilidade de sobrevivência, e o valor "0" representa a ausência.

A figura 2.8 representa o genótipo do indivíduo. Nesta figura as mutações deletérias ocorrem nas idades 1, 4, 5 e 6. Como o modelo baseia-se na teoria de acúmulo de mutações deletérias, define-se um parâmetro T , denominado limiar de mutações deletérias. Se o indivíduo na idade atual acumular T mutações deletérias, ele certamente não sobreviverá à etapa temporal seguinte. Considerando o genótipo representado na figura 2.8 e assumindo $T = 1$, o indivíduo certamente morrerá quando atingir a idade 1. No caso de $T = 2$, ele certamente morrerá na idade 4.

A reprodução no modelo Penna ocorre a partir do momento em que o indivíduo alcança uma certa idade mínima de reprodução R_M , ou seja, atinge a maturidade sexual. A partir dessa idade o indivíduo poderá gerar b descendentes em cada etapa temporal até chegar a idade máxima de reprodução R_X .

Figura 2.8 – Palavra computacional representando o genótipo do indivíduo, cada bit setado em '1' corresponde uma mutação deletéria.



Na figura 2.9 é representado o genótipo do filho que é idêntico ao da mãe, exceto pelos M bits escolhidos aleatoriamente, os quais sofreram mutações deletérias no momento da reprodução. Considerando $M = 2$, observa-se que o valor do bit na posição 2 do genótipo foi alterado de $0 \rightarrow 1$ e, na posição 5, o valor continua sendo 1 tal como no genótipo da mãe (ausência de mutações benéficas).

Figura 2.9 – Genótipo do filho idêntico ao da mãe, exceto pelos M bits sorteados os quais sofreram mutações deletérias.



Para evitar a explosão populacional, os indivíduos morrem com uma probabilidade dada pelo fator de Verhulst, o qual aumenta com a densidade populacional. O indivíduo morrerá com uma probabilidade dada por $\frac{N_t}{N_{max}}$, sendo N_t o tamanho da população no tempo t e N_{max} o número máximo de indivíduos que o ambiente suporta, denominado capacidade de carga do ambiente. Em cada etapa temporal todos os indivíduos, seja qual for a idade, são testados para morte por este fator. Se o indivíduo não morrer pelo fator de Verhulst ou pelo acúmulo de mutações deletérias, ele sobreviverá à etapa temporal seguinte e a sua idade será implementada de uma unidade.

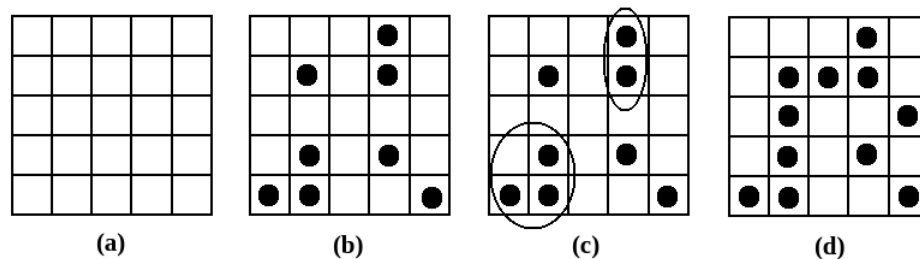
2.5 Teoria da Percolação

A teoria da percolação pode ser entendida como um processo de preenchimento de uma malha quadrada composta de vários sítios, ou seja lugares, em que o sorteio da ocupação de um

sítio é feita de forma aleatória e independente da ocupação dos demais sítios vizinhos (STAUFFER, 1994; SALÚSTIO; COSTA, 2003).

Um exemplo de formação de cluster pode ser vista na figura 2.10. A figura 2.10a representa uma rede dividida em pequenos quadrados em branco indicando que os sítios estão vazios. Na figura subsequente 2.10b os sítios foram preenchidos de maneira sucessiva e aleatória, com um ponto preto no centro de cada quadrado indicando que o sítio foi ocupado. Na figura 2.10c são definidos agrupamentos com pontos em preto circundados, indicando que os sítios estão conectados, ou seja que possui um lado em comum, seja pela esquerda ou direita, em cima ou embaixo. Os grupos formados por sítios escolhidos de forma aleatória e conectados pelos vizinhos mais próximos, são denominados de clusters, podendo ter tamanhos e formatos variados (STAUFFER, 1994).

Figura 2.10 – Exemplo de formação de clusters e percolação.



Para entender a formação do cluster percolante, considere por exemplo a figura 2.10a, em que N representa o número total de sítios vazios e p a probabilidade de ocupação da rede. Após o preenchimento da rede ser feita de forma contínua e aleatória, a rede terá Nxp sítios preenchidos e $Nx(1 - p)$ sítios vazios. Quando a rede atinge a ocupação Nxp em que se observa a formação de um cluster que conecta as duas extremidades da rede por um caminho, seja norte-sul ou leste-oeste, considera-se que houve a formação de cluster percolante (figura 2.10d) (STAUFFER, 1994).

2.6 Métodos de análise espacial

Processos em sistemas naturais e os padrões que resultam deles são de fundamental importância em diversos estudos na área de ecologia. O conhecimento do padrão de distribuição espacial pode fornecer informações relevantes sobre uma espécie/população. Nesta seção serão apresentados alguns métodos para caracterizar estes padrões espaciais de distribuição.

2.6.1 Razão Variância/Média

A dispersão de uma população pode ser classificada a partir do cálculo da razão da variância/média (MATHUR, 2014):

$$I_D = s^2 / \bar{x} \quad (2.1)$$

sendo s^2 a variância amostral e \bar{x} a média amostral. Valores de I_D iguais a um, indicam um arranjo espacial ao acaso; valores menores que um indicam um padrão espacial regular ou uniforme e valores significativamente maiores que um, indicam um padrão espacial agregado.

Pode-se analisar o afastamento da aleatoriedade de I_D pelo teste de qui-quadrado (χ^2), com $n-1$ graus de liberdade. A estatística do teste é dado por (FARIAS; BARBOSA; BUSOLI, 2001):

$$\chi_c^2 = I_D(n-1) \quad (2.2)$$

em que rejeita-se a aleatoriedade se $\chi_c^2 > \chi_{(\alpha, n-1gl)}^2$.

2.6.2 Índice de Morisita

O índice de Morisita (MORISITA, 1962) mede a agregação espacial, e é dado pela expressão:

$$I_\delta = n \frac{\sum_{i=1}^n N_i^2 - \sum_{i=1}^n N_i}{(\sum_{i=1}^n N_i)^2 - \sum_{i=1}^n N_i} \quad (2.3)$$

em que n é o tamanho da amostra e N_i é o número de indivíduos em cada unidade amostral i . Valores de I_δ iguais a um, indicam um padrão espacial aleatório; valores menores que um indicam um padrão espacial regular ou uniforme e valores significativamente maiores que um, indicam um padrão espacial agregado.

Pode-se analisar a significância da aleatoriedade de I_δ pelo teste de qui-quadrado (χ^2), com $n-1$ graus de liberdade. A estatística do teste é dada por (FARIAS; BARBOSA; BUSOLI, 2001):

$$\chi_c^2 = I_\delta \left(\sum_{i=1}^n N_i - 1 \right) + n - \sum_{i=1}^n N_i \quad (2.4)$$

em que rejeita-se a aleatoriedade se $\chi_c^2 > \chi_{(\alpha, n-1gl)}^2$.

2.6.3 Seleção de modelos

2.6.3.1 Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson pertence à família exponencial de distribuições e possui apenas um parâmetro, λ . Ela caracteriza-se por sua variância ser igual à média ($\sigma^2 = \mu$) (NORMAN et al., 2005).

A probabilidade $P(Y = y)$ em que a variável aleatória Y assume o valor observado y , é representada pela distribuição de Poisson como (EVANS; ROSENTHAL, 2009):

$$P(Y = y) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^y}{y!} \quad (2.5)$$

com as seguintes relações de recorrências:

$$P(0) = e^{-\lambda} \quad (2.6)$$

$$P(y) = \frac{\lambda}{y} P(y-1), \quad y = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (2.7)$$

2.6.3.2 Distribuição Binomial Negativa

Nas literaturas biológicas a distribuição Binomial Negativa é muito utilizada para dados de contagem. Esta distribuição possui dois parâmetros (μ, k) e a característica de sua variância ser maior que a média ($\sigma^2 > \mu$). A função que representa esta distribuição é dada por (YOUNG, 1998):

$$P(X = x) = \binom{k+x-1}{k-1} \left(\frac{k}{\mu+k} \right)^k \left(\frac{\mu}{\mu+k} \right)^x, \quad x = 0, 1, 2, 3, 4, \dots \quad (2.8)$$

sendo:

\bar{x} = média amostral

k = parâmetro de agregação

$P(X = x)$ = probabilidade de encontrar x indivíduos em uma unidade amostral;

As relações de recorrência são:

$$P(0) = \left(\frac{k}{\mu+k} \right)^k, \quad (2.9)$$

$$e \quad P(X = x) = \binom{k+x-1}{x} \left(\frac{\mu}{\mu+k} \right) P(x-1), \quad x = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (2.10)$$

2.6.3.3 Critério de informação de Akaike (AIC)

O modelo AIC proposto por Akaike (1973) é utilizado para seleção de modelos e faz uso da informação ou distância de Kullback-Leiber (K-L) como base fundamental para o teste. K-L é definido como a diferença direcional de dois modelos, do modelo ajustado para o real. Como nem sempre o modelo real é conhecido, a maneira encontrada para estimar a informação é a utilização da função log-verossimilhança empírica em seu ponto de máximo (AKAIKE, 1998; BURNHAM, 2002).

Na aplicação do teste, calcula-se AIC para todos os modelos candidatos e seleciona o de menor valor do AIC como o modelo que mais se aproxima do modelo real (desconhecido) que gerou os dados. AIC é definido como:

$$AIC = -2\log(\hat{\theta}|y) + 2k \quad (2.11)$$

em que $\log(\hat{\theta}|y)$ é o valor máximo da log-verossimilhança e k o número de parâmetros do modelo.

2.6.4 Coeficiente de Geary

A autocorrelação espacial ocorre quando valores das variáveis amostradas em locais próximos não são independentes entre si. As causas da autocorrelação espacial são várias. Em processos biológicos, possíveis causas são interação, extinção e especiação das espécies. Assim a autocorrelação espacial pode ser definida de acordo com a maneira como os valores das variáveis aleatórias se apresentam em pares de locais a uma certa distância, sendo mais semelhantes quando há autocorrelação espacial positiva, menos semelhantes quando há autocorrelação espacial negativa, ou sem a presença de semelhança, quando ocorre a ausência da autocorrelação espacial (DORMANN et al., 2007; LEGENDRE, 1993).

Uma métrica utilizada para medir a autocorrelação espacial é o coeficiente de diferença generalizada proposta por Geary (1954) e que utiliza a seguinte estatística como medida de agregação:

$$C = (n - 1) \frac{\sum_{i,j} w_{i,j} (y_i - y_j)^2}{2S \sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{para } i \neq j \quad (2.12)$$

em que y_i e y_j são os números de indivíduos na i -ésima e j -ésima unidade amostral respectivamente, \bar{y} é a média de todas as unidades amostrais, n o número total de unidades amostrais e $S = \sum_{i,j} w_{i,j}$ é a soma dos valores da matriz de vizinhança W (ROSENBERG, 2000).

Para calcular o coeficiente de autocorrelação, deve-se criar a matriz W de conectividade (ou vizinhança) e escolher um método de atribuição de peso $w_{i,j}$ para conectar as unidades. Normalmente utiliza-se a matriz de pesos binária, de maneira que $w_{i,j}$ é igual a 1 se houver conexão entre as unidades i e j , e zero caso contrário. No entanto pode-se utilizar outras maneiras de ponderação como, por exemplo, o inverso da distância ou o inverso da distância ao quadrado (MARIE-JOSEEFORTIN, 2005).

A mesma análise pode ser feita em classes de distância, observando diferentes ordens para a matriz de vizinhança $W(d)$, criada a partir de diferentes distâncias d entre as unidades amostrais. Para cada par de sítios i, j , $w_{i,j}=1$ se a distância entre os sítios cair dentro da classe de distância e zero se cair fora desse intervalo. O número de classes na análise da autocorrelação espacial nem sempre é claro. A definição deste número pode ser feita de forma arbitrária, considerando diferentes possibilidades com o mesmo conjunto de dados, combinando os intervalos de classe com a quantidade de pares de distância em cada classe (LEGENDRE; LEGENDRE, 1998).

De acordo com Legendre e Legendre (1998) uma maneira de definir o número de classes de distância é aquela que depende do tamanho da amostra. Utilizando a regra de Sturge, o número de classes de distância (D) é dado por:

$$D = 1 + 3.3 \log_{10} \frac{n(n-1)}{2} \quad (2.13)$$

sendo n o número de amostras.

O valor do coeficiente de Geary varia de zero a infinito, com valores de zero a 1 se houver autocorrelação positiva, valores iguais a 1 se não houver autocorrelação e valores acima de 1 se houver autocorrelação espacial negativa (ROSENBERG, 2000). Este tipo de correlograma é denominado não direcional.

2.6.5 Correlograma de Bearing

Em busca de maior informação espacial e análise de tendências geográficas, alguns métodos destacam-se pela busca de medidas de associação espacial que também levam em conta a direção. Em espaços geográficos ambientais, por exemplo a difusão de infestação de pragas em plantações, a direcionalidade é um fator crucial na antecipação de desenvolvimentos futuros e na geração de estratégias para amenizar as tendências próximas (O'LOUGHLIN, 2002). Uma maneira de analisar essas tendências é utilizando o correlograma de Bearing, que mede a autocorrelação espacial considerando a distância e direção entre sítios.

O correlograma de Bearing proposto por Rosenberg (2000) é um dos métodos de análise de correlação espacial mais comuns. O cálculo é semelhante ao correlograma não-direcional e consiste na análise de uma mesma variável em diferentes classes de distância e direção.

No correlograma de Bearing a matriz de vizinhança não fornece informações apenas da classe de distância envolvida, mas também a informação direcional entre duas unidades amostrais. Assim, os elementos da nova matriz de vizinhança ($W'(d)$) são dados por:

$$w'_{i,j} = w_{i,j} \cos^2(\alpha_{i,j} - \theta) \quad (2.14)$$

sendo $w_{i,j}$ o elemento da matriz de vizinhança original, $\alpha_{i,j}$ o ângulo entre as unidades amostrais e θ o ângulo direcional fixado. Portanto, no correlograma direcional a matriz $W(d)$ é transformada em nova matriz $W'(d)$, podendo ser utilizada para construção do correlograma de Geary direcional.

METODOLOGIA

Com o objetivo de verificar os efeitos da migração de formas ápteras e aladas sobre a dinâmica populacional do pulgão *Aphis gossypii* em algodoeiro, foi utilizado o Modelo Penna com as adaptações propostas por Amaral (2014). O modelo com suas adaptações será descrito a seguir.

A população é constituída de fêmeas nas formas áptera e alada, distribuídas em sítios sobre uma rede 20×20 . Cada sítio da rede representa um algodoeiro cuja capacidade de carga N_{max} se mantém constante no tempo (não estamos considerando o ciclo fenológico do algodão). Além disto, a rede é homogênea, ou seja, todos os sítios possuem a mesma capacidade de carga. O genótipo de cada fêmea é representado por uma tira constituída de duas palavras computacionais de 64 bits cada.

Ao se tornar adulta, ou seja, a partir do momento em que a fêmea atinge a idade mínima de reprodução (RM), ela irá gerar em cada etapa temporal b descendentes, todas fêmeas, até atingir a idade máxima de reprodução (RX). Os genótipos das filhas serão definidos de acordo com as regras do modelo Penna. No momento da reprodução fêmeas ápteras poderão gerar descendentes ápteros ou alados, e fêmeas aladas, apenas descendentes ápteros. A probabilidade de uma fêmea áptera gerar um descendente alado é dada pela densidade populacional do sítio na etapa temporal anterior, ou seja, $\frac{N_j(t-1)}{N_{max}}$, sendo $N_j(t-1)$ o tamanho populacional do sítio j na etapa temporal $t-1$. Os descendentes de fêmeas ápteras e aladas serão posicionados no mesmo sítio j da mãe.

Os deslocamentos dos pulgões ápteros e alados na rede seguem regras que levam em conta as diferenças morfológicas entre eles. Os pulgões ápteros são capazes de migrar, com probabilidade α_1 , somente para sítios que constituem seus primeiros vizinhos, de acordo com as regras de Von Neumann, sem condições periódicas de contorno. As figuras 3.1, 3.2 e 3.3 são representações dos deslocamentos de pulgões ápteros posicionados em diferentes regiões da rede. No caso de pulgões na forma alada, estes migrarão com probabilidade α_2 para qualquer sítio na rede escolhido aleatoriamente. Em cada etapa temporal, tanto ápteros quanto alados, irão migrar apenas uma vez.

Figura 3.1 – Representação das regras de migração para pulgão na forma áptera situado nos extremos da rede.

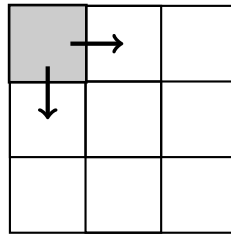


Figura 3.2 – Representação das regras de migração para pulgão na forma áptero situado nas bordas da rede.

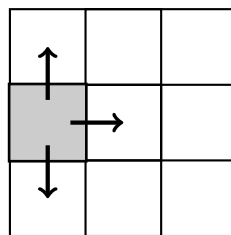
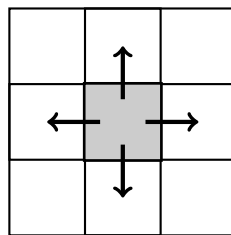


Figura 3.3 – Representação das regras de migração para pulgão na forma áptero situado no interior da rede.



Após todas as fêmeas terem sido testadas para reprodução, envelhecimento, morte (por acúmulo de mutações deletérias e fator de Verhulst) e migração, uma etapa temporal, correspondente a um dia, é concluída.

Neste momento é importante esclarecer a composição da população em $t = 0$. A população inicial foi constituída de N_0 fêmeas ápteras com a característica de apresentar uma estrutura etária estável.

3.1 Dados utilizados nas simulações

- Cada simulação foi constituída de 20000 etapas temporais. As primeiras 19800 etapas temporais foram necessárias para se obter uma população com estrutura etária estável. Durante este período não ocorre migração dos pulgões.

- A migração dos pulgões ocorre a partir das 200 últimas etapas temporais, ou seja, em $t' = 19801$. A evolução temporal da população foi observada a partir deste instante, o qual corresponde a $t = 0$ para cada um dos cenários tratados. Todos os cenários partiram, portanto, da mesma população inicial, inclusive, com a mesma distribuição espacial nos sítios da rede. Cada cenário será identificado pelos valores de α_1 e α_2 .
- A capacidade de carga (N_{max}) de cada sítio foi fixada em 1500 pulgões;
- A ocupação inicial da rede foi de 2%;
- Os parâmetros biológicos do pulgão assumiram os valores correspondentes à temperatura de 25°C, por tratar-se de temperatura mais favorável ao desenvolvimento da espécie: $R = 6$ (idade mínima de reprodução), $RX = 14$ (idade máxima de reprodução) e $b = 3$ (fecundidade), conforme a tabela 2.1 ;
- Os demais parâmetros do modelo assumiram os seguintes valores: $M = 1$ (número de mutações deletérias) e $T = 1$ (limite de mutações deletérias).
- Para realizar as simulações computacionais foi desenvolvido um programa em linguagem de programação C. Alguns softwares foram utilizados para análise dos resultados. Por exemplo podemos citar as taxas intrínsecas de crescimento que foram obtidas através do ajuste da função logística, na relação do tamanho da população em função do tempo, com a utilização do software Geogebra (GEOGEBRA, 2017), versão 4.0.34. As correlações de Bearing foram obtidas utilizando o software PASSaGE (ROSENBERG; ANDERSON, 2011), versão 2.0. O cálculo dos índices para identificação de padrões espaciais e ajuste para distribuição de probabilidade dos dados populacionais foram realizados no software R (R-PROJECT, 2017), versão 3.2.3. Alguns gráficos foram gerados com o grace e gnu-plot (versão 5.0).

RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Média Populacional no Regime Estacionário:

Neste momento vamos definir a média populacional ($\mu(t)$) calculada em cada etapa temporal sobre os sítios da rede como:

$$\mu(t) = \frac{\sum_{j=1}^{400} N_j(t)}{400}, \quad (4.1)$$

sendo $N_j(t)$ a população do sítio j no instante t .

Na tabela 4.1 são apresentados os valores médios ($\bar{\mu}$) calculados sobre os valores médios populacionais ($\mu(t)$), considerando as últimas 100 etapas temporais do regime estacionário em alguns cenários. Observa-se que os valores médios ($\bar{\mu}$) apresentam pequenas variações quando comparados os diferentes cenários.

Tabela 4.1 – Valores médios $\bar{\mu}$ em diferentes configurações.

Probabilidade de migração		
Áptero (α_1)	Alado (α_2)	$\bar{\mu}$
0,1	0,1	519,30
0,1	0,2	519,20
0,1	0,3	519,19
0,1	0,4	518,92
0,1	0,5	518,78
0,1	0,6	519,17
0,1	0,7	518,69
0,1	0,8	518,71
0,1	0,9	518,55
0,1	1,0	518,23
0,3	0,7	518,96
0,4	0,8	518,48
0,5	0,7	518,23
0,6	0,4	518,89
0,8	0,6	518,01

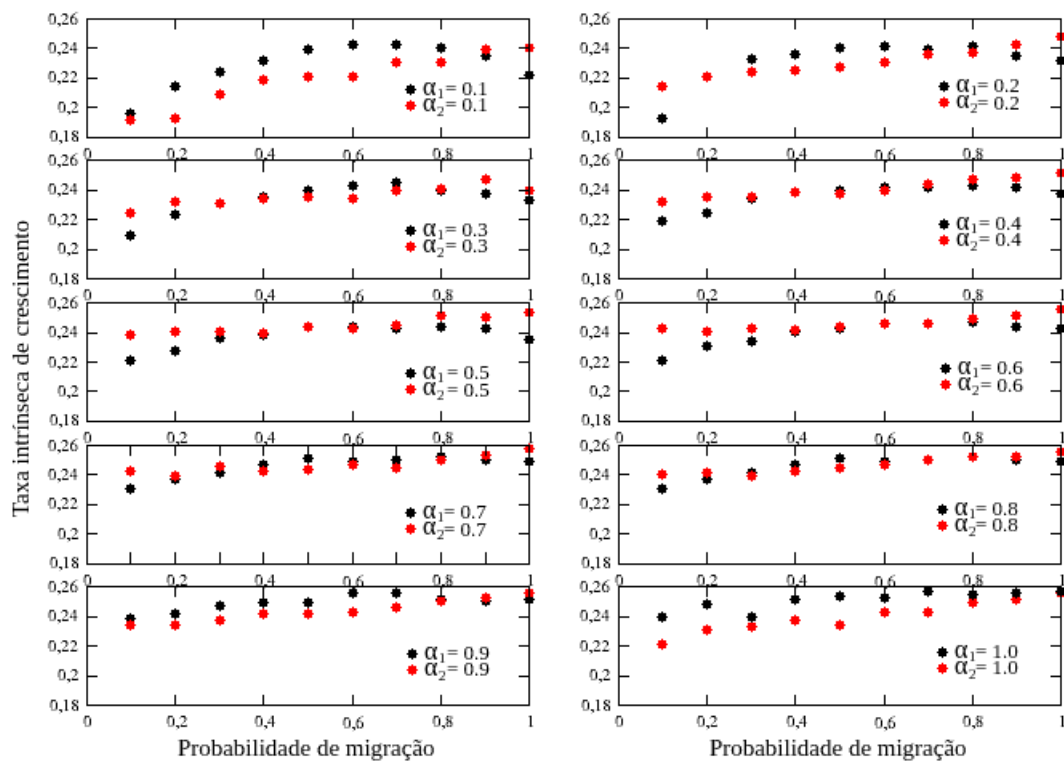
4.2 Taxa Intrínseca de Crescimento

Na figura 4.1 são apresentados os gráficos das taxas intrínsecas de crescimento em função das probabilidades de migração, quando se mantém constante α_1 ou α_2 . As taxas intrínsecas de crescimento nos diferentes cenários foram obtidas através do ajuste da função logística $N(t)$ com a utilização do software Geogebra, versão 4.0.34.

É possível observar na figura 4.1 que as maiores variações na taxa intrínseca de crescimento ocorrem quando α_1 e α_2 assumem os menores valores 0,1 e maiores valores 1,0. Com α_1 mantido constante em 0,1, a taxa intrínseca de crescimento assume o valor máximo com α_2 entre 0,6 e 0,7. Para valores maiores de α_2 , observa-se uma redução na taxa intrínseca de crescimento. Por outro lado, mantido α_2 constante em 0,1 observa-se um aumento da taxa intrínseca com o aumento de α_1 no intervalo de 0,2 a 1,0.

Considerando todos os cenários, observamos que a taxa intrínseca de crescimento assumiu valores entre 0,19 e 0,26. Em todos os cenários a taxa intrínseca de crescimento apresentou valor inferior ao encontrado experimentalmente por Xia et al. (1999), ou seja, $r_m = 0,39$.

Figura 4.1 – Taxa intrínseca de crescimento do pulgão *Aphis gossypii* Glover, para diferentes valores de α_1 e α_2 .



4.3 Infestação de plantas na rede

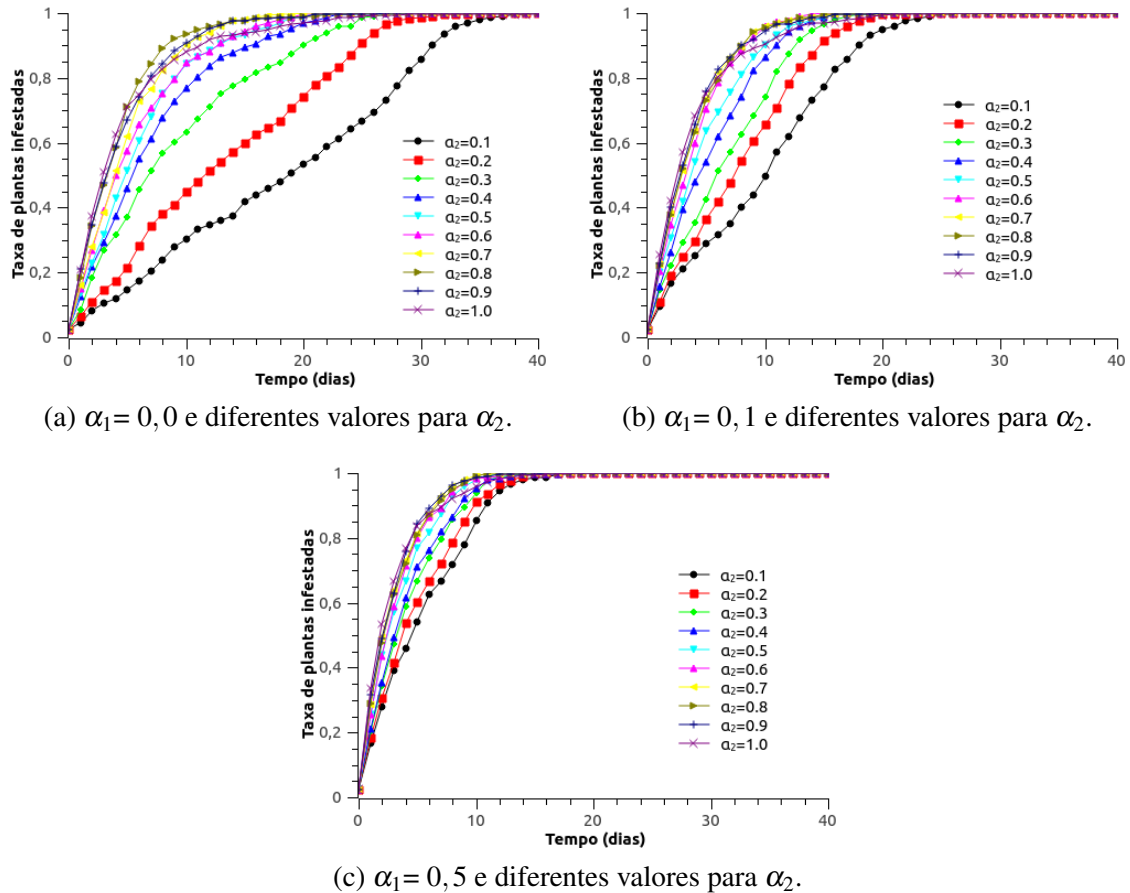
Observa-se nas figuras 4.2(a),(b) e (c) que o maior tempo para infestação de 100% das plantas diminui à medida que o valor do α_1 aumenta (aproximadamente 38 dias para $\alpha_1 = 0,0$; 25 dias para $\alpha_1 = 0,1$ e 18 dias para $\alpha_1 = 0,5$).

Observa-se também que à medida que α_1 aumenta, menor é a diferença entre os tempos necessários para 100% de infestação quando comparados cenários caracterizados por diferentes valores de α_2 e mesmo valor de α_1 . Ou seja, quanto maior α_1 , menor a distinção entre as curvas com diferentes valores de α_2 .

Podemos observar uma relação entre a taxa intrínseca de crescimento (figura 4.1) dos pulgões e o tempo de infestação das plantas (figuras 4.2). Por exemplo, com $\alpha_1 = 0,1$ as taxas intrínsecas de crescimento crescem até um certo valor e depois diminuem, a medida que varia o α_2 . Da análise do tempo de infestação, com mesmo valor de $\alpha_1 = 0,1$, verificamos que a medida que α_2 aumenta, o tempo de infestação de 100% das plantas diminui, ou seja, a medida que a taxa de crescimento aumenta, o tempo de infestação para 100% das plantas diminui. Pode-se observar também a relação com outro valor de $\alpha_1 = 0,5$, em que os valores das taxas de crescimento possuem menores variações para diferentes valores de α_2 , assim como tempos para 100% de infestação da rede mais próximos.

Nas figuras 4.3(a),(b) e (c) são destacadas as curvas correspondentes a $\alpha_2 = 0,7; 0,8; 0,9$ e $1,0$. Verifica-se que altas probabilidades de migração dos alados podem gerar um aumento no tempo necessário para 100% de infestação. Isto é notável para os cenários em que $\alpha_2 = 1,0$.

Figura 4.2 – Taxa de plantas infestadas na rede ao longo do tempo (dias).

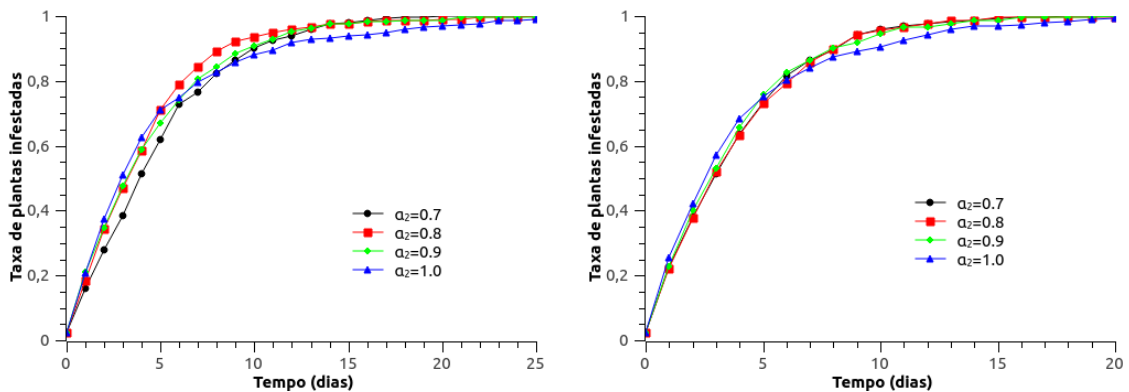


4.4 Distribuição de frequência dos sítios em intervalos de classes para a variável X_j

Vamos agora definir a variável X_j pela razão $\frac{N_j(t)}{\mu(t)}$, sendo $N_j(t)$ a população no sítio j e $\mu(t)$ a média populacional da rede no instante t , sendo a dimensão da rede de 20×20 . Na figura 4.4 são apresentados os histogramas de frequência dos sítios por intervalos de classe para X_j (foi escolhido o cenário correspondente a $\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 0,6$, já que em populações biológicas a capacidade de dispersão do alado é maior do que a do áptero). As análises foram feitas em diferentes etapas temporais, considerando tanto o período transiente quanto o período estacionário. A capacidade de carga do ambiente foi fixada em 1500 pulgões por sítio e a ocupação inicial na rede igual a 2%.

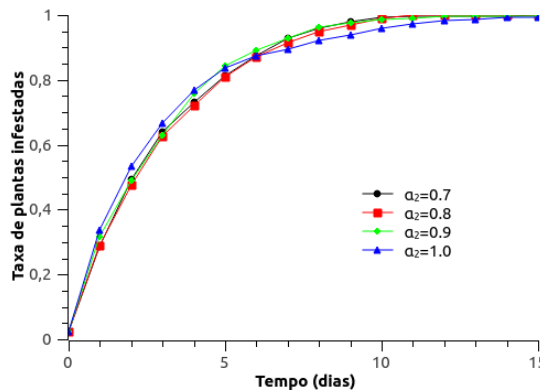
Observa-se que em $t = 0$, momento em que os pulgões começam a migrar, 80% dos sítios na rede possuem uma população cujo valor é menor que 0,1 da média populacional da rede ($\mu(0) = 8,81$). Observa-se também que 100% dos sítios possuem uma população menor que 0,5 de $\mu(0)$. Em $t = 5$ observa-se a presença de sítios com tamanho populacional maior ou igual à média populacional da rede ($\mu(5) = 16,89$), embora a maioria dos sítios apresente

Figura 4.3 – Taxa de plantas infestadas na rede ao longo do tempo (dias), com alta probabilidade de migração do alado.



(a) $\alpha_1 = 0,0$ e valores para α_2 igual a 0,7; 0,8; 0,9 e 1,0.

(b) $\alpha_1 = 0,1$ e valores para α_2 igual a 0,7; 0,8; 0,9 e 1,0.

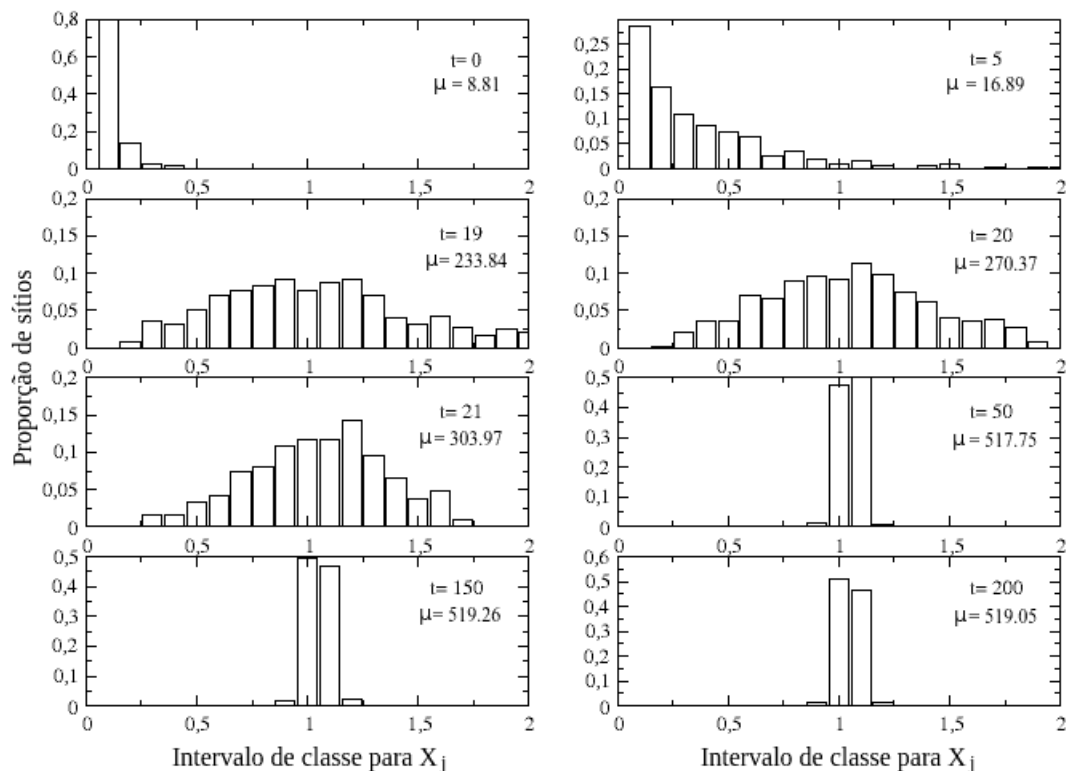


(c) $\alpha_1 = 0,5$ e valores para α_2 igual a 0,7; 0,8; 0,9 e 1,0.

tamanho populacional menor. Já em $t = 19$, $t = 20$ e $t = 21$ percebe-se a presença de sítios com tamanhos populacionais maiores e menores que a média populacional $\mu(t)$. Observa-se também nesse intervalo de tempo, uma grande variação nos valores de $\mu(t)$, com $\mu(19) = 233,84$, $\mu(20) = 270,37$ e $\mu(21) = 303,97$. Isso se deve ao fato das observações ocorrerem dentro do período transiente, em instantes em que a taxa de variação do tamanho populacional com o tempo é elevada.

À medida que o tempo evolui, observa-se que as populações dos sítios se distribuem em torno da média populacional ($\mu(50) = 517,75$, $\mu(150) = 519,26$ e $\mu(200) = 519,05$). Além disto, observa-se que em $t = 150$ e $t = 200$, $\mu(t)$ apresenta pequenas flutuações em relação à $\bar{\mu} = 519,17$ (média das últimas 100 médias populacionais $\mu(t)$, tabela 4.1) uma vez que nestes instantes a população na rede já atingiu o estado estacionário.

Figura 4.4 – Distribuição de frequência dos sítios em intervalos de classes para X_j , em diferentes etapas temporais do cenário correspondente a $\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 0,6$.



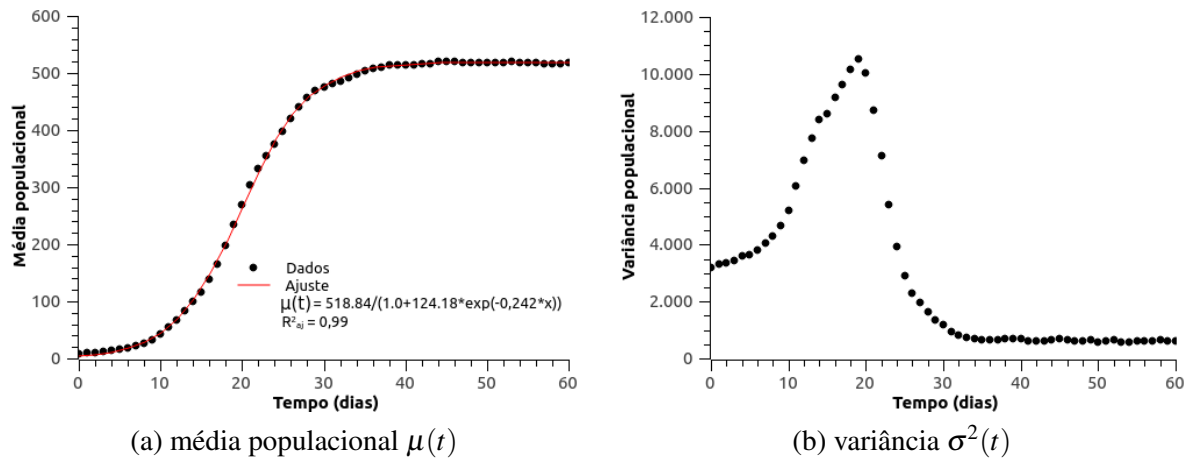
Com estes resultados, observa-se uma redução na variabilidade da distribuição à medida que o tempo evolui. No regime estacionário a população em cada sítio varia no intervalo de 0,8 a 1,2 da média populacional, com uma concentração maior no intervalo de classe $0,9 < X_j < 1,0$. Comportamento semelhante foi observado para os demais cenários.

4.5 Evolução Temporal da Média Populacional e da Variância

Na figura 4.5a apresenta-se a evolução temporal da média populacional $\mu(t)$ e na figura 4.5b a variância populacional $\sigma^2(t)$, sendo $\sigma^2(t) = \frac{\sum_{i=1}^{400} (N_j(t) - \mu(t))^2}{n}$, no cenário correspondente a $\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 0,6$. Observa-se que a média populacional aumenta com t no período transitente, enquanto $\sigma^2(t)$ aumenta até um determinado valor e, a seguir, diminui com o tempo. Este comportamento para média populacional e para a variância está de acordo com o observado na análise da distribuição de frequência dos sítios por intervalo de classe, ou seja, um aumento na variabilidade seguida de uma redução na variabilidade da distribuição.

Na tabela 4.2 são apresentados diferentes cenários (diferentes valores para α_1 e α_2), considerou os instantes em que a variância é máxima e momentos de ocorrência dos pontos de inflexão da curva $\mu(t)$ e o tempo que ocorre a primeira percolação na rede. Os pontos de

Figura 4.5 – Evolução temporal da média populacional $\mu(t)$ e variância $\sigma^2(t)$ no cenário correspondente a $\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 0,6$.



inflexão foram obtidos a partir do ajuste de função logística para $\mu(t)$. Verifica-se na tabela que os instantes de ocorrência de máxima variância e do ponto de inflexão estão muito próximos para a maioria dos cenários (com uma diferença de no máximo 2 dias), o que nos leva a hipótese de que existe uma relação entre eles. Além da relação com formação de clusters percolantes que se formam próximos a estas etapas temporais.

Tabela 4.2 – Análise de diferentes cenários na dinâmica populacional do pulgão, nas etapas temporais que ocorrem a percolação, máxima variância e ponto de inflexão.

Probabilidade de migração				
Áptero (α_1)	Alado (α_2)	Cluster Percolante	Máxima variância	Ponto de inflexão
0,1	0,1	22	23	24,4
0,1	0,2	21	21	23,39
0,1	0,3	22	20	21,92
0,1	0,4	19	20	21,19
0,1	0,5	20	19	20,35
0,1	0,6	22	19	19,92
0,1	0,7	20	19	19,98
0,1	0,8	17	20	19,66
0,1	0,9	16	19	19,93
0,1	1,0	14	20	19,97
0,3	0,7	23	19	18,63
0,4	0,8	16	18	17,87
0,5	0,7	14	18	17,52
0,6	0,4	16	18	17,42
0,8	0,6	20	16	16,19

4.6 Índices de Dispersão

Os índices de dispersão variância/média e de Morisita em diferentes cenários são apresentados na tabela 4.3. Para análise foram consideradas etapas temporais do regime transiente (etapa temporal no início da migração, na formação do cluster percolante, máxima variância e ponto de inflexão) e etapas temporais do regime estacionário sendo $t = 150$ e $t = 200$ para todos os cenários.

Observa-se que os valores da razão variância/média e do índice de Morisita foram significativamente maiores que 1 em praticamente todas as situações, indicando que a população do pulgão apresenta um padrão espacial agregado na maioria dos cenários e das etapas temporais analisadas. Exceto quando $\alpha_1=0,1$ e $\alpha_2=0,6$ em $t = 200$, os valores não diferem significativamente de 1, indicando uma distribuição espacial aleatória.

Tabela 4.3 – Análise de diferentes índices de dispersão, calculados para diferentes cenários, em etapas temporais no período transiente e estacionário

Probabilidade de migração		Tempo (dias)	Variância/Média (I_D)	Índice de Morisita (I_δ)
Áptero (α_1)	Alado (α_2)			
0,1	0,6	05	216,09*	13,71*
		19	45,09*	1,19*
		20	37,22*	1,13*
		21	28,77*	1,09*
		150	1,14*	1,0002*
		200	1,09 ^{NS}	1,0002 ^{NS}
0,3	0,7	05	129,06*	7,08*
		18	35,39*	1,14*
		19	28,56*	1,09*
		23	6,99*	1,02*
		150	1,29*	1,0005*
		200	1,27*	1,0005*
0,4	0,8	05	106,59*	5,61*
		16	48,19*	1,23*
		18	34,22*	1,12*
		150	1,68*	1,001*
		200	1,91*	1,002*
0,5	0,7	05	87,34*	4,63*
		13	65,57*	1,46*
		17	39,56*	1,16*
		18	32,47*	1,11*
		200	1,49*	1,0009*
0,6	0,4	05	87,12*	4,64*
		16	50,43*	1,23*
		17	44,15*	1,18*
		18	37,75*	1,13*
		200	1,55*	1,001*
0,8	0,6	05	60,74*	3,23*
		16	34,77*	1,14*
		20	13,21*	1,03*
		200	2,22*	1,002*
		200	2,18*	1,002*

4.7 Ajuste e seleção de modelo utilizando critério de Akaike

Na tabela 4.4 são apresentados os valores da média, da variância e do AIC em diferentes cenários e etapas temporais. Utilizando o critério Akaike foi escolhido o modelo que melhor se ajusta e melhor explica o comportamento da população de pulgão, no que se refere ao padrão de distribuição espacial. Os modelos utilizados para comparação foram os modelos de Poisson e o da Binomial Negativa.

Observa-se na tabela 4.4, que em todas as etapas temporais analisadas, o modelo que melhor se ajusta ao conjunto de dados pelo teste do critério de Akaike, foi o da Binomial Negativa, por apresentar o menor AIC. Os resultados encontrados estão em concordância com os obtidos a partir dos outros índices de dispersão, assim como com o padrão de distribuição espacial agregada de pulgões já relatado na literatura (PILSON et al., 1995).

Tabela 4.4 – Ajuste e seleção de modelo para população de pulgões na rede 20x20, em diferentes cenários e etapas temporais, utilizando AIC

Probabilidade de migração		Tempo (dias)	média	variância	AIC	
Áptero (α_1)	Alado (α_2)				Binomial Negativa	Poisson
0,1	0,6	05	16,89	3649,85	2756,1	24738,3
		19	233,84	10545,27	4825	21229,2
		20	270,37	10064,19	4840,2	18533,7
		21	303,97	8746,03	4811,1	15316,6
0,3	0,7	05	21,05	2710,98	3056,7	22411,8
		18	251,22	8889,82	4756,7	17177,2
		19	289,42	8266,41	4748,8	14689,6
		23	395,87	2768,42	4324,2	5986,4
0,4	0,8	05	22,84	2434,47	3168,2	21527,8
		16	200,63	9669,72	4784,3	22529,7
		18	270,27	9248,65	4818,6	17461,8
0,5	0,7	05	23,69	2069,65	3219,7	20076,9
		13	138,89	9107,21	4660,9	27849,6
		17	245,95	9729,32	4823,6	19541,7
		18	282,13	9161,79	4819,3	16811
0,6	0,4	05	23,6	2056,03	3165,5	20552,7
		16	211,23	10652,36	4830	23907,6
		17	242,29	10696,26	4855,5	21570,2
		18	277,62	10481,3	4862,7	19019,3
0,8	0,6	05	26,68	1620,77	3382,6	17711,7
		16	246,52	8572,76	4790,8	17844,6
		20	380,08	5022,21	4618,3	8882

4.8 Correlograma de Geary e Formação de Cluster

As figuras 4.7, 4.9, 4.11, 4.13, 4.15 e 4.17 representam a distribuição espacial do pulgão na rede 20x20, em diferentes cenários e etapas temporais, dentre elas, os instantes de ocorrência de máxima variância e do ponto de inflexão. Cada posição representa um sítio e a correspondente quantidade de pulgões presentes. À medida que o tempo evolui, observamos a formação de *clusters* (aglomerados de sítios) cada vez maiores, assim como o aumento da média populacional $\mu(t)$.

Uma análise interessante é verificar a autocorrelação espacial entre os sítios e identificar se o padrão é isotrópico ou anisotrópico. Em busca de determinar tendências e padrões isotrópicos/anisotrópicos foram obtidos os correlogramas de Geary. Na definição do número de classes de distância foi utilizada a regra de Sturge que sugere utilizar 17 intervalos de classes para uma rede 20x20.

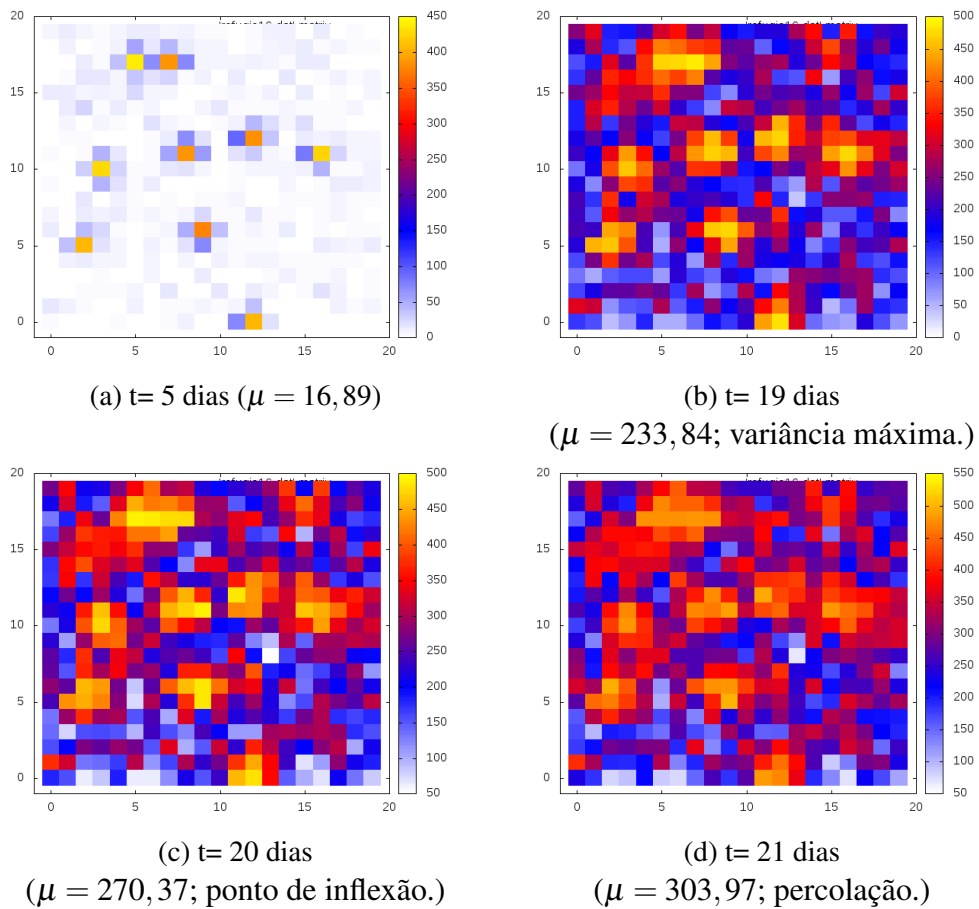
A seguir serão apresentados os correlogramas dos 6 cenários mostrados na tabela 4.3. Para cada cenário, 4 correlogramas em diferentes etapas temporais. Em cada um dos diagramas circulares, o coeficiente é plotado a cada 10° em linhas que indicam classes de intervalos de distância.

Na figura 4.8a ($\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 0,6$) não observa-se autocorrelação. Nas figuras 4.10a ($\alpha_1 = 0,3$ e $\alpha_2 = 0,7$), 4.12a ($\alpha_1 = 0,4$ e $\alpha_2 = 0,8$), 4.14a ($\alpha_1 = 0,5$ e $\alpha_2 = 0,7$) e 4.16a ($\alpha_1 = 0,6$ e $\alpha_2 = 0,4$) observa-se autocorrelação positiva no primeiro anel, e autocorrelação negativa em anéis mais distantes na direção noroeste, além de autocorrelação positiva nas últimas classes de distância. Já na figura 4.18 ($\alpha_1 = 0,8$ e $\alpha_2 = 0,6$) observa-se grande quantidade de autocorrelação negativa no sétimo, oitavo e nono anel na direção noroeste.

Na figura 4.8b e 4.8d observa-se coeficientes significativos no quarto anel e em todas as direções nos 2 primeiros anéis. Além de aparecer uma tendência na direção leste-oeste, verifica-se também valores de coeficientes negativos em distâncias maiores concentrados na direção nordeste-noroeste. Já na figura 4.8d observa-se tanto autocorrelação negativa quanto positiva nas pequenas distâncias, mas grande quantidade de autocorrelação negativa nas distâncias maiores.

Observou-se nas figuras 4.10b, 4.10c, 4.10d, autocorrelação positiva em todas as direções até o terceiro arco. Na figura 4.10b nas classes de distância maiores, observou-se autocorrelação negativa em todas as direções. Já nas figuras 4.10c, 4.10d, observou-se nas distâncias

Figura 4.7 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0,1$ e $\alpha_2=0,6$.

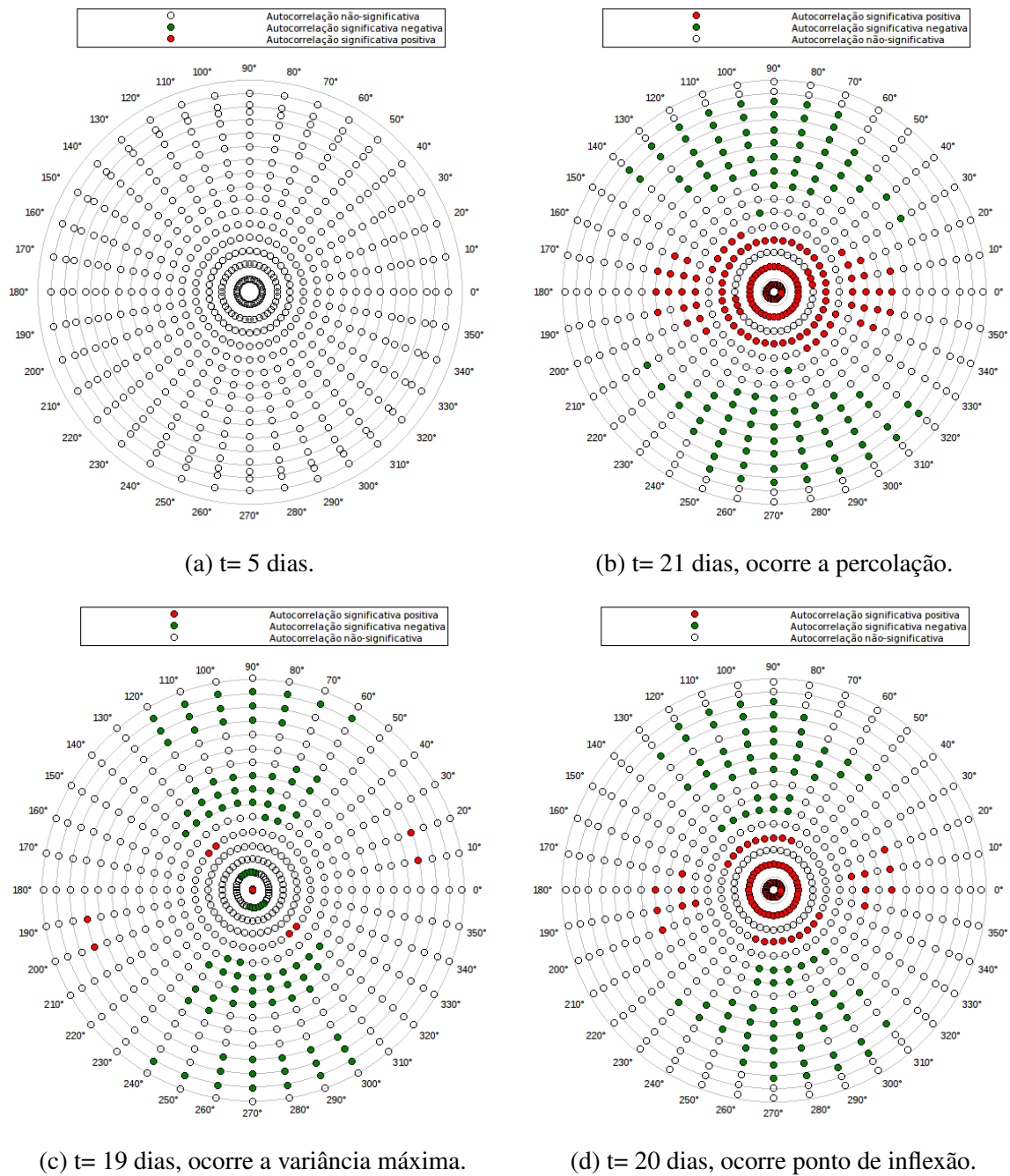


maiores, autocorrelação negativa na direção noroeste e autocorrelação positiva na direção nordeste, apresentando assim uma tendência direcional dos dados na rede.

Nos diagramas 4.12b e 4.12c, observa-se nos 3 primeiros anéis, autocorrelação positiva em praticamente todas as direções. Na figura 4.12b observa-se autocorrelações positivas nos últimos anéis na direção nordeste e valores negativos a partir do sexto anel na direção noroeste. Já na figura 4.12c observa-se autocorrelação positiva até o nono anel e autocorrelações negativas em todas as direções no décimo primeiro anel e também na direção noroeste a partir do sexto anel.

Nas figura 4.14a,b e c, observa-se que as autocorrelações direcionais seguem um certo padrão, sendo que nas menores classes de distância as autocorrelações são positivas, aparecendo também na direção noroeste nas maiores distâncias. Já as autocorrelações negativas aparecem nos anéis intermediários até as distâncias maiores com direção noroeste-leste. Observa-se também na figura 4.14b autocorrelação positiva em quase todas as direções nas distâncias mais

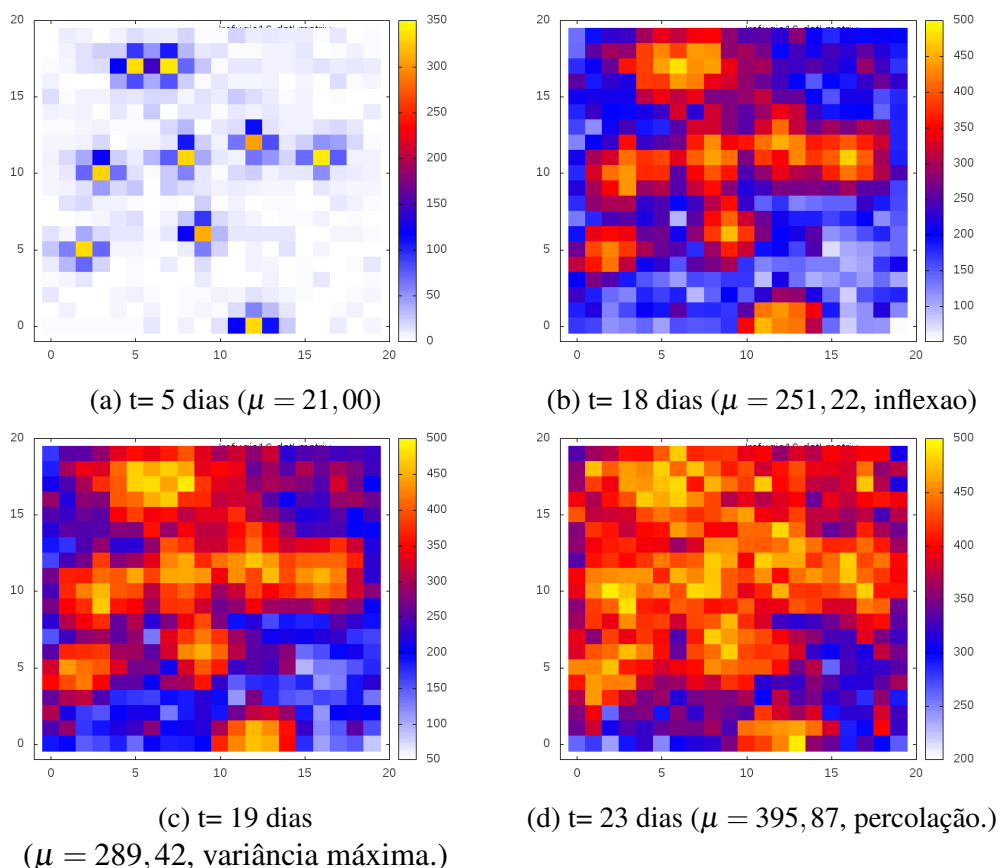
Figura 4.8 – Correlograma de Bearing utilizando o coeficiente de autocorrelação de Geary com $\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 0,6$, para análise espacial direcional.



longas. Nas figuras 4.14c e 4.14d observa-se coeficientes com valores negativos a partir do sexto anel até as últimas classes de distância, mostrando uma tendência direcional.

Observou-se nas figura 4.16b, 4.16c, 4.16d, autocorrelação positiva nos 3 primeiros anéis, mostrando que os dados em pequenas distâncias estão bastante correlacionados. Observou-se também autocorrelação positiva em praticamente todas as direções considerando a distância mais longa, e por fim observou-se nesses 3 diagramas autocorrelação negativa na

Figura 4.9 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0,3$ e $\alpha_2=0,7$

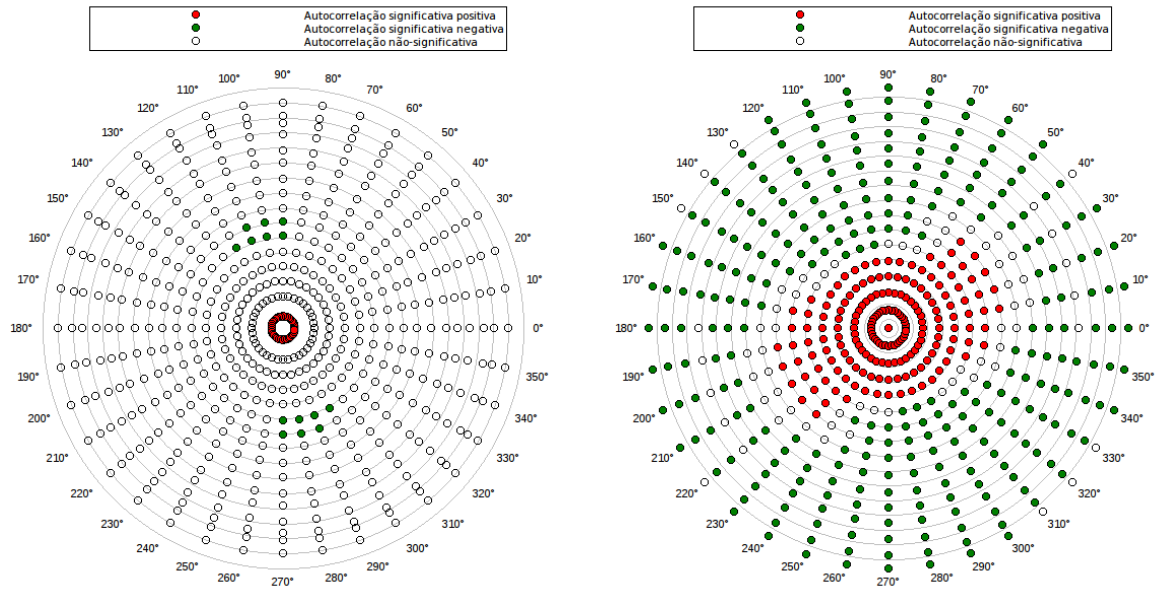


direção noroeste, do sexto anel até o décimo segundo, mostrando uma tendência direcional dos dados.

Observou-se na figura 4.16b, autocorrelação positiva em todas as direções até o sétimo anel, e também autocorrelação positiva até o décimo anel na direção nordeste, mostrando uma tendência direcional, e autocorrelação negativa em todas as direções a partir do décimo terceiro anel. Observou-se na figura 4.16c autocorrelação positiva apenas nas distâncias menores, até o sexto anel. Observou-se autocorrelação negativa do sexto anel até o nono e também do décimo terceiro em diante em todas as direções.

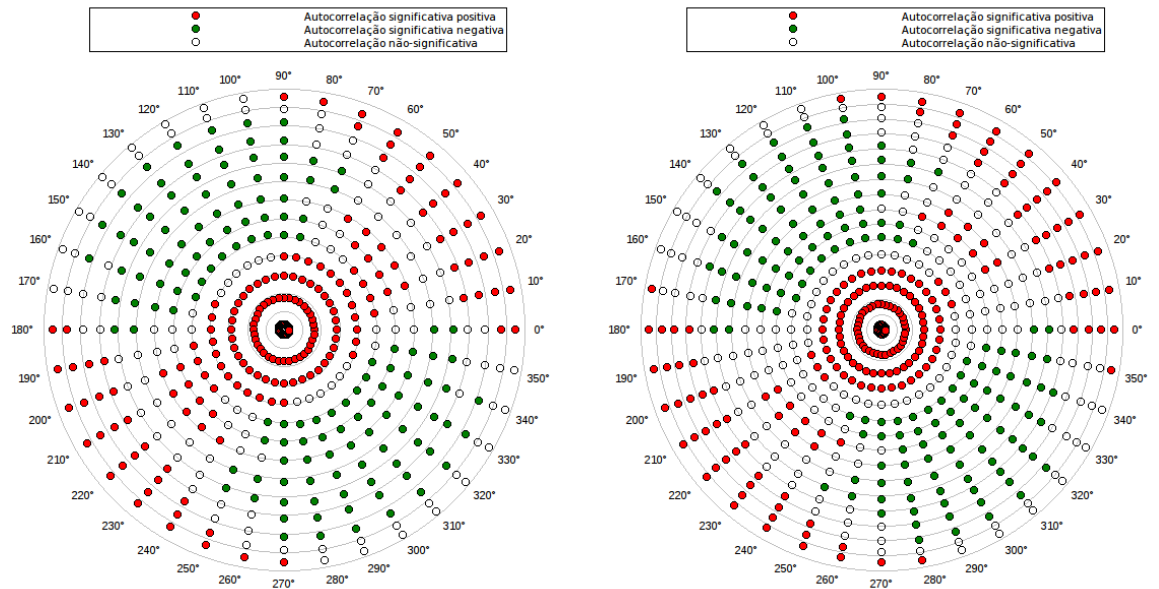
Verificou-se nos diagramas de todos os cenários apresentados, um comportamento anisotrópico das populações dos pulgões, em que na mesma classe de distância observou-se diferentes significâncias do índice de Geary em diferentes direções. Assim percebe-se que as variações nas probabilidades de migração de alados e ápteros não influencia o comportamento anisotrópico da população de pulgões.

Figura 4.10 – Correlograma de Bearing utilizando o coeficiente de autocorrelação de Geary com $\alpha_1 = 0,3$ e $\alpha_2 = 0,7$, para análise espacial direcional.



(a) $t = 5$ dias após início da migração.

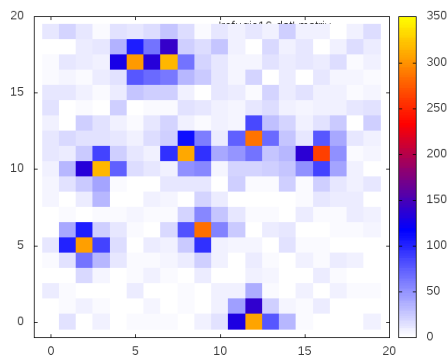
(b) $t = 23$ dias, ocorre a percolação.



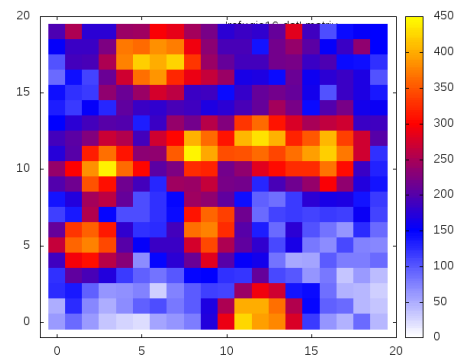
(c) $t = 19$ dias, ocorre a variância máxima.

(d) $t = 18$ dias, ocorre ponto de inflexão.

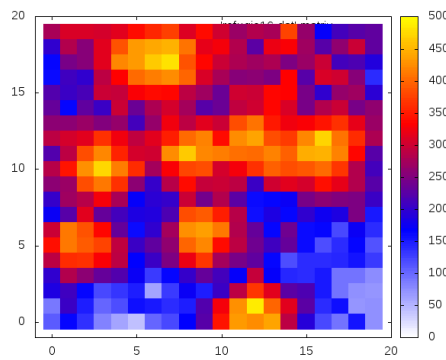
Figura 4.11 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0,4$ e $\alpha_2=0,8$



(a) $t= 5$ dias ($\mu = 22,84$)



(b) $t= 16$ dias ($\mu = 200,63$, percolação.)



(c) $t= 18$ dias ($\mu = 270,28$, variância máxima e ponto de inflexão.)

Figura 4.12 – Correlograma de Bearing utilizando o coeficiente de autocorrelação de Geary com $\alpha_1 = 0,4$ e $\alpha_2 = 0,8$, para análise espacial direcional.

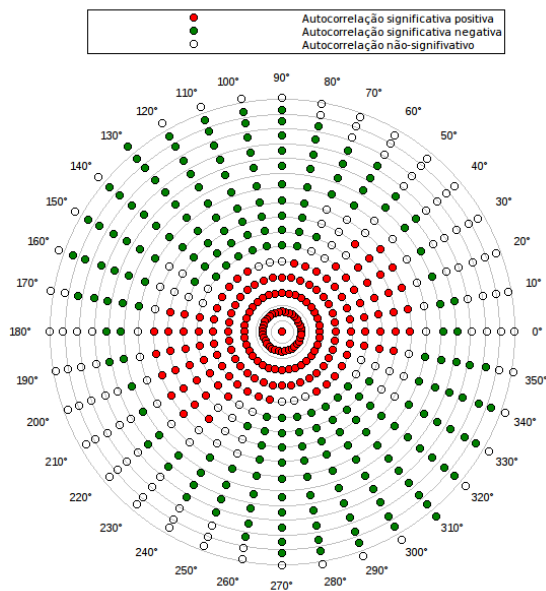
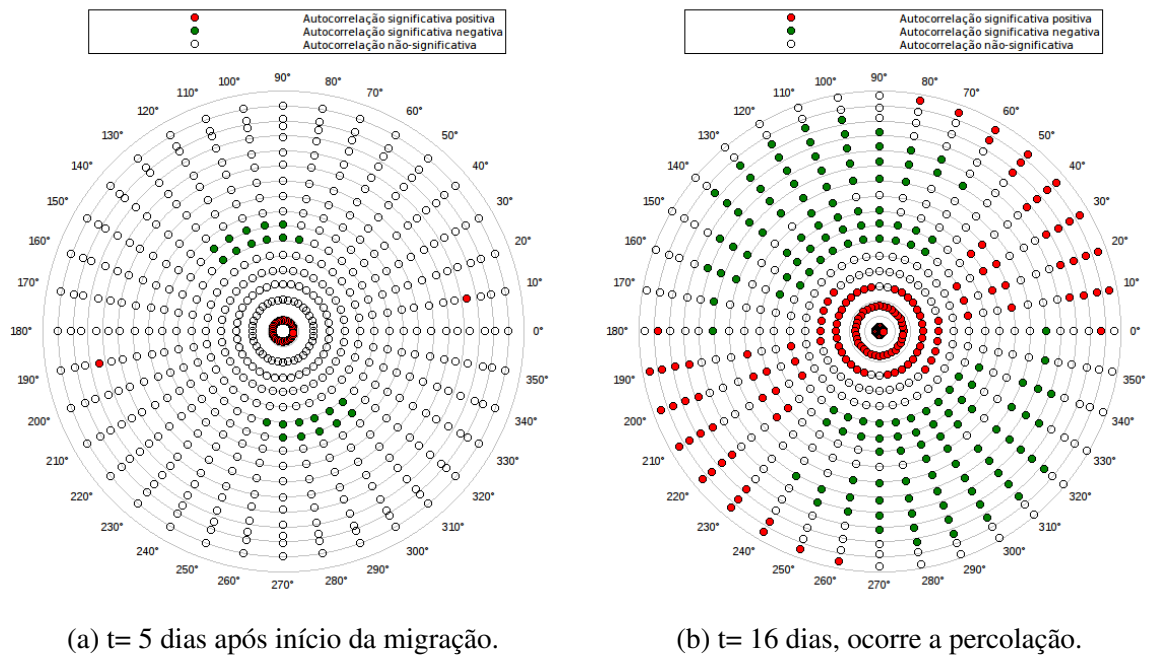
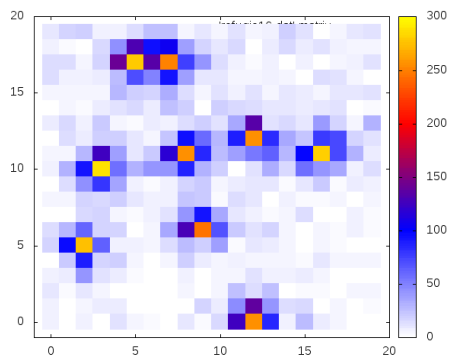
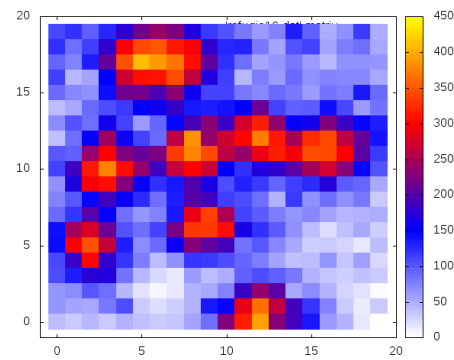


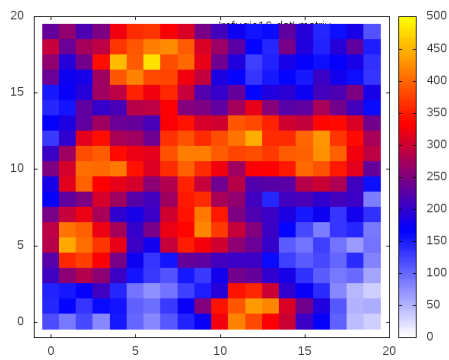
Figura 4.13 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0,5$ e $\alpha_2=0,7$



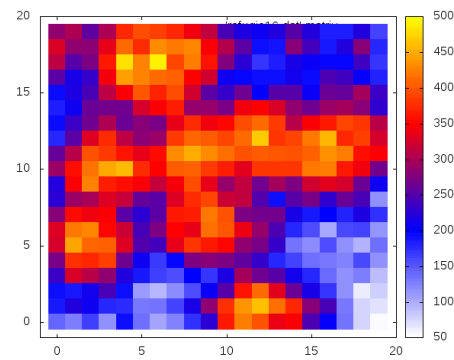
(a) $t= 5$ dias ($\mu = 23,70$)



(b) $t= 13$ dias
($\mu = 138,89$, percolação.)



(d) $t= 17$ dias
($\mu = 245,95$, ponto de inflexão.)



(c) $t= 18$ dias
($\mu = 282,13$, variância máxima.)

Figura 4.14 – Correlograma de Bearing utilizando o coeficiente de autocorrelação de Geary com $\alpha_1 = 0,5$ e $\alpha_2 = 0,7$, para análise espacial direcional.

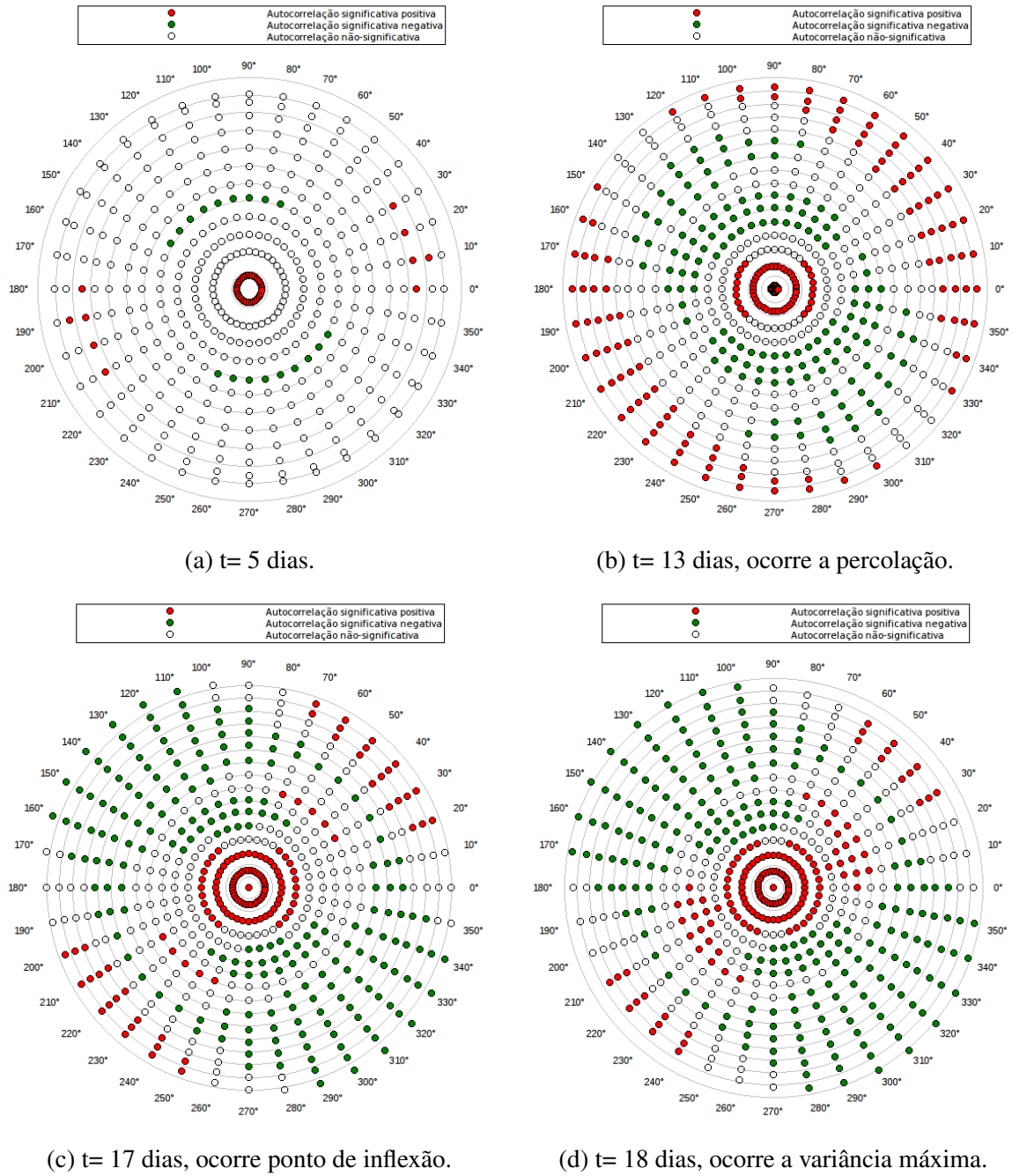


Figura 4.15 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0,6$ e $\alpha_2=0,4$

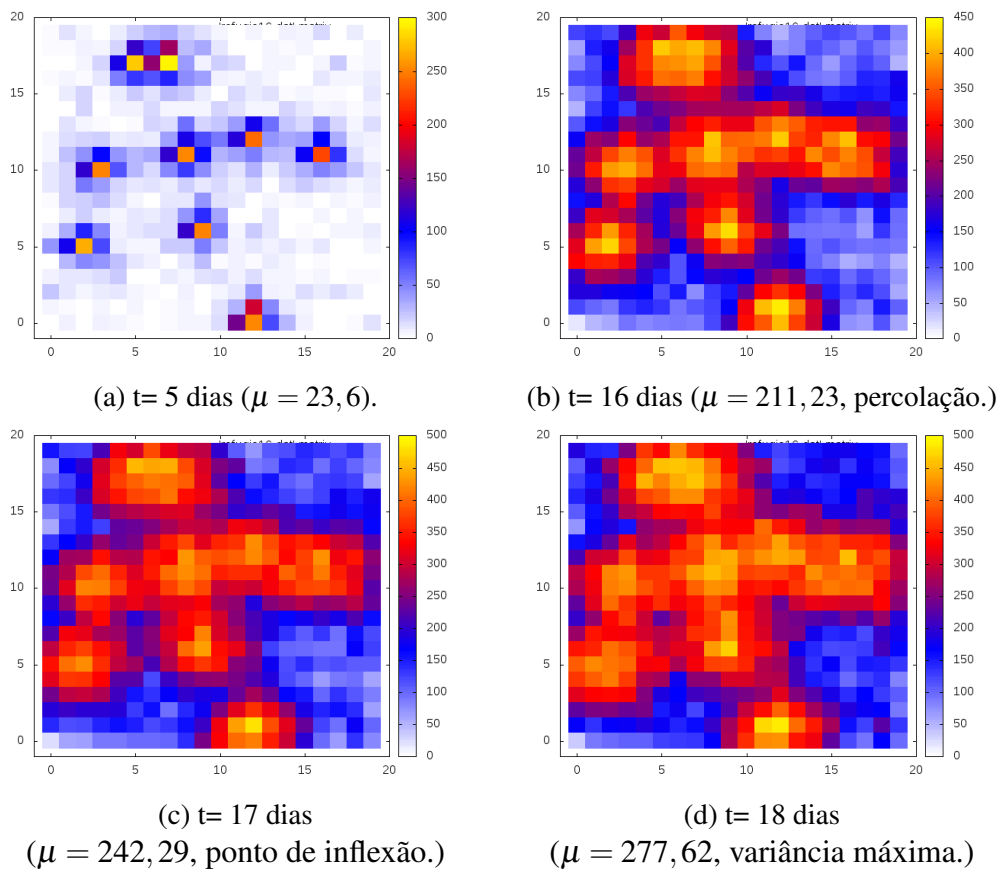


Figura 4.16 – Correlograma de Bearing utilizando o coeficiente de autocorrelação de Geary com $\alpha_1 = 0,6$ e $\alpha_2 = 0,4$, para análise espacial direcional.

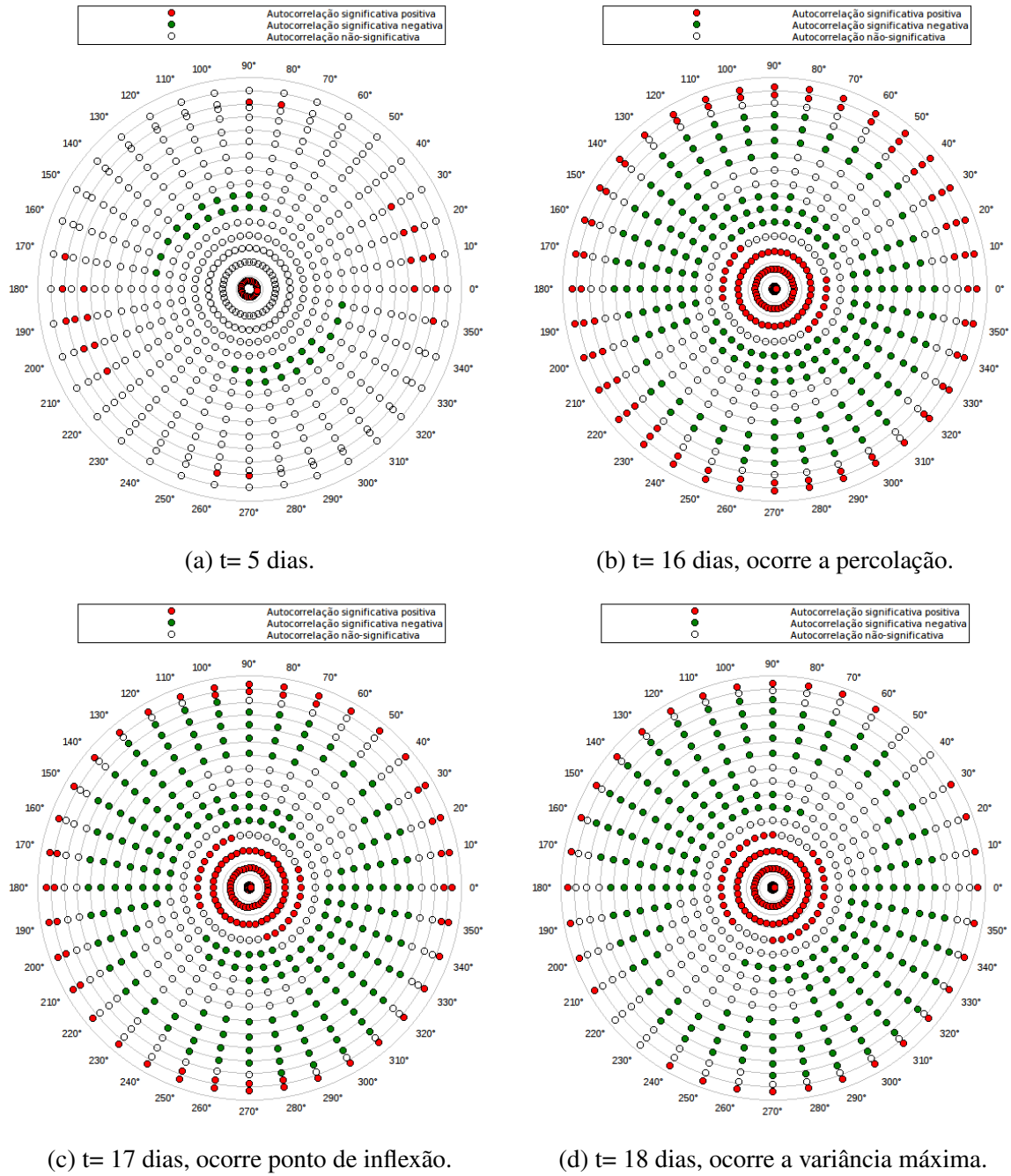
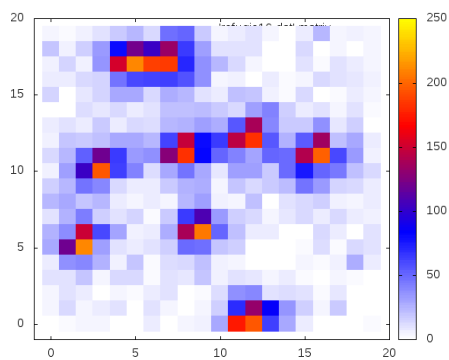
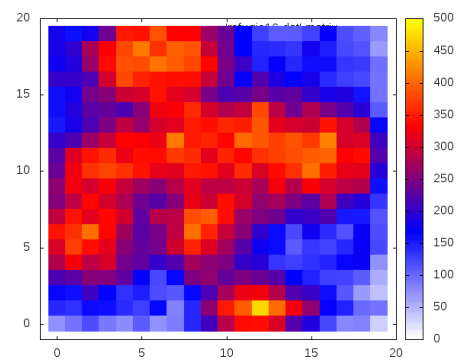


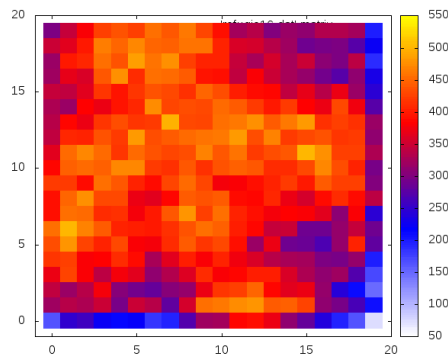
Figura 4.17 – Distribuição espacial dos pulgões na rede com probabilidade de migração igual a $\alpha_1=0.8$ e $\alpha_2=0.6$



(a) $t=5$ dias ($\mu = 26,68$)

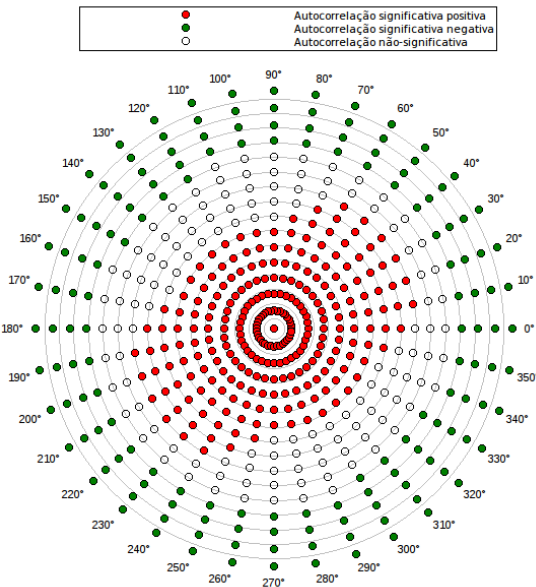
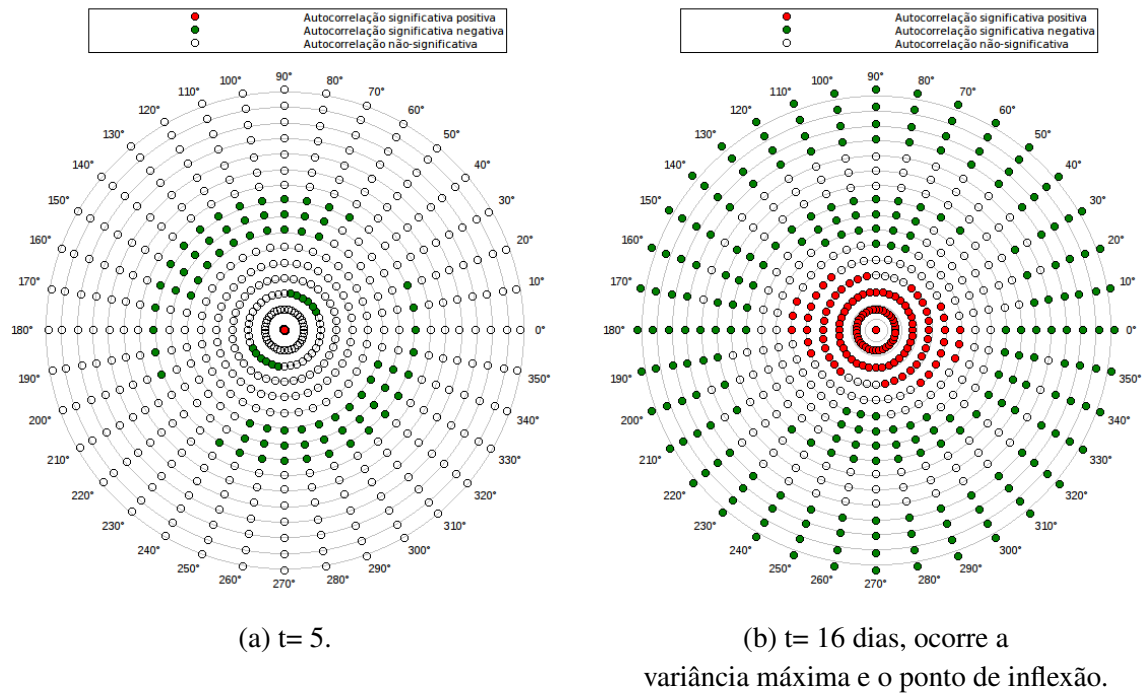


(b) $t=16$ dias
($\mu = 246,52$, variância máxima e ponto de inflexão.)



(c) $t=20$ dias
($\mu = 380,08$, percolação.)

Figura 4.18 – Correlograma de Bearing utilizando o coeficiente de autocorrelação de Geary com $\alpha_1 = 0,8$ e $\alpha_2 = 0,6$, para análise espacial direcional.



Na figura 4.4 ($\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 0,6$) verificamos que as populações nos sítios evoluem para uma configuração em que a maioria deles pertencem aos intervalos de classe $X_i = 1,0$ e $X_i = 1,1$. Além disto, como já observado anteriormente, à medida que o sistema evolui, verifica-se a formação de *clusters* cada vez maiores. Assim, com o objetivo de obter maiores informações acerca do padrão de distribuição espacial, observou-se a formação de *clusters* com sítios cuja população seja maior ou igual a média populacional ($\mu(t)$), ou seja, sítios correspondentes a $X_i \geq 1,0$.

Nas figuras 4.19 ($\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 0,1$) e 4.20 ($\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 0,2$) apresenta-se a distribuição de *clusters* para diferentes cenários e etapas temporais. Na figura 4.19 observamos a formação de *clusters* de diferentes tamanhos. Em $t = 21$, $t = 22$ e $t = 23$ observam-se, 15 *clusters*. Em $t = 22$ observa-se percolação pela primeira vez (o *cluster* se estende entre dois lados opostos da rede), etapa temporal próxima da ocorrência de máxima variância ($t = 19$) e do ponto de inflexão ($t \simeq 20$).

Na figura 4.20 observamos a formação de *cluster* em $t = 21$ (24 *clusters*), $t = 22$ (21 *clusters*) e $t = 23$ (21 *clusters*). A percolação ocorre pela primeira vez em $t = 21$, próximo do ponto de inflexão ($t \simeq 23$) e no mesmo momento da máxima variância ($t = 21$).

A presença de percolação em momentos próximos ao da ocorrência de máxima variância e/ou ponto de inflexão, é observada para outros conjuntos de parâmetros α_1 e α_2 . Na tabela 4.2 são apresentados os instantes em que se observa percolação, além dos instantes correspondentes à máxima variância e ao ponto de inflexão. A maior diferença entre os momentos de ocorrência (6 dias, entre o instante da percolação e da máxima variância) aparece na configuração correspondente aos parâmetros $\alpha_1 = 0,1$ e $\alpha_2 = 1,0$. A distribuição espacial nos momentos de percolação para outros cenários podem ser observados nas figuras 5.7 a 5.18.

Na análise da evolução temporal do tamanho populacional, o ponto de inflexão no modelo de Verhulst representa o momento a partir do qual a taxa de crescimento da população passa a diminuir com o tempo. Neste trabalho, observa-se que o ponto de inflexão para a média populacional calculada sobre os sítios ($\mu(t)$) que, da mesma forma, representa o momento a partir do qual a taxa de variação diminui com o tempo, apresenta alguma relação com os momentos de ocorrência da máxima variância e de percolação de sítios que satisfazem a uma condição específica. No contexto de variáveis contínuas, diremos que em torno do ponto em que $\frac{d^2\mu(t)}{dt^2} = 0$ (ponto de inflexão), ocorre um ponto crítico para a função $\sigma^2(t)$. Além disto, em torno desse ponto crítico, observa-se percolação na rede. Até este momento não foi localizado

alguma informação na literatura que faça relação destes pontos com informações relativas à estrutura espacial da população. Dessa forma, entende-se que esta é uma questão que merece atenção em trabalhos futuros.

Figura 4.19 – Formação de cluster na configuração correspondente aos parâmetros $\alpha_1=0,1$ e $\alpha_2=0,1$

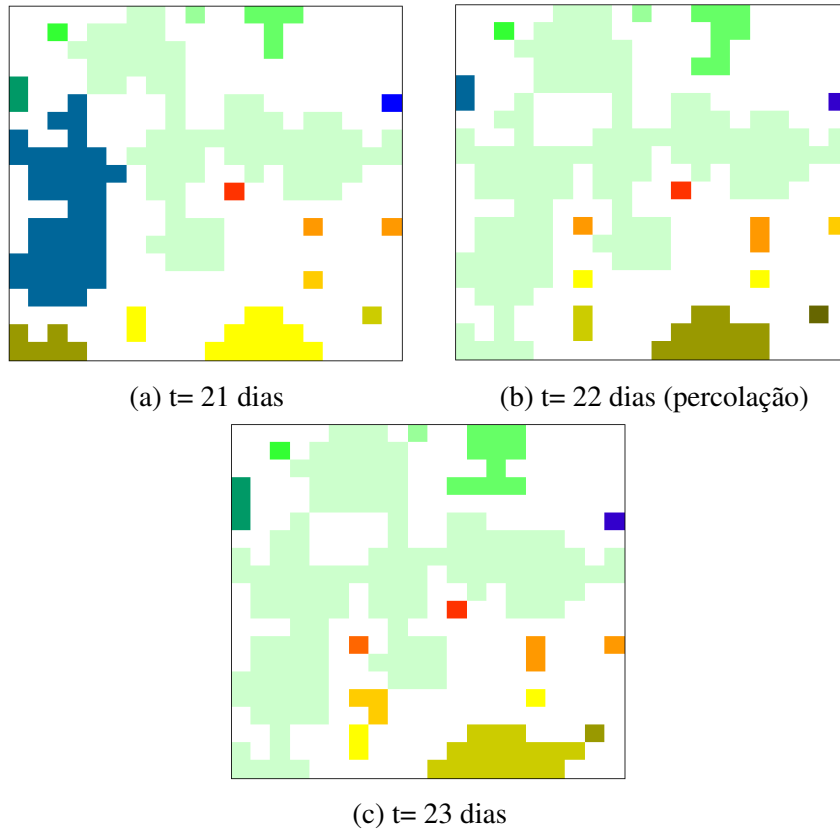
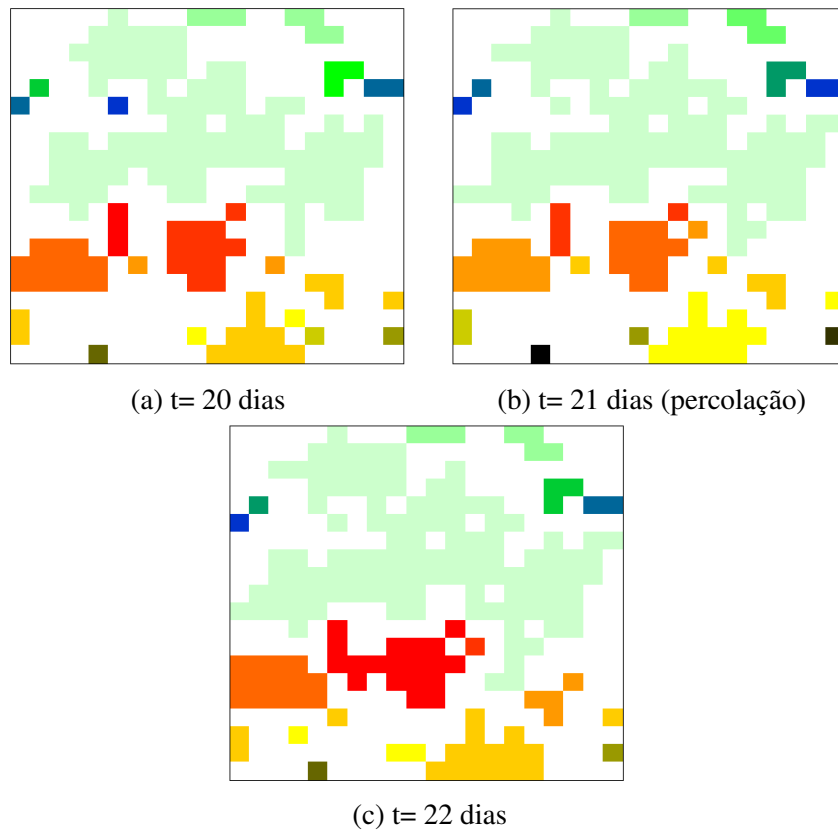


Figura 4.20 – Formação de cluster na configuração correspondente aos parâmetros $\alpha_1=0,1$ e $\alpha_2=0,2$



CONCLUSÕES

- Os resultados em diferentes cenários caracterizado pelos valores de α_1 e α_2 , resultaram em geral, para algumas características populacionais, pequenas diferenças dentre os cenários.
- Os tamanhos populacionais médios ($\bar{\mu}$), obtidos no regime estacionário, apresentaram valores muito próximos (entre 518,01 e 519,30).
- As taxas intrínsecas de crescimento apresentaram, no geral, pouca variação em relação a mudanças em α_1 , quando α_2 constante, e da mesma forma, em relação a α_2 , com α_1 constante. As maiores variações foram observadas com α_1 e α_2 fixados em 0.1.
- Em todos os cenários a taxa intrínseca de crescimento apresentou valor inferior ao obtido por Xia *et al* (1999). O maior valor encontrado para a taxa esteve próximo de 0,26, enquanto que o valor experimental obtido foi 0,39.
- A probabilidade de migração dos ápteros (α_1) interfere no tempo de infestação completa das plantas na rede.
- Analisando a distribuição espacial dos pulgões, observou-se que para os diferentes cenários estudados, tanto no regime transiente quanto no regime estacionário, o padrão apresentou no geral, um padrão agregado, em todos os índices de dispersão utilizados.
- Observou-se na distribuição espacial um comportamento anisotrópico, independente dos valores de α_1 e α_2 .
- Observou-se que as regiões de autocorrelação positiva, negativa ou ausência de correlação, apresentaram posições diferentes nos diferentes cenários. No entanto, não foi identificada uma relação entre estas localizações e os conjuntos de parâmetros α_1 e α_2 .
- Observou-se que os instantes de ocorrência do ponto de inflexão da média populacional ($\mu(t)$), de máxima variância e de cluster percolante, estão muito próximos, na maioria dos cenários. Esta observação indica a existência de uma relação entre estes momentos, que merece ser melhor investigada em trabalhos futuros. É necessário compreender o padrão emergente do comportamento coletivo dos indivíduos que constituem a população.

REFERÊNCIAS

- AKAIKE, H. Information theory as an extension of the maximum likelihood principle. Second International Symposium on Information Theory, p. 267–281, 1973.
- AKAIKE, H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: **Selected Papers of Hirotugu Akaike**. [S.l.]: Springer, 1998. p. 199–213.
- AMARAL, M. L. d. Dinâmica espaço-temporal do pulgão *aphis gossypii* glover, 1877 e sua interação com o parasitoide *lysiphlebus testaceipes* (cresson, 1880) em algodão (*Gossypium hirsutum* L.). UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, 2014.
- AMPA. **História do Algodão**. [S.l.], 2016. Disponível em: <http://www.ampa.com.br/site/qs_historia.php>.
- BERNARDES, A. Strategies for reproduction and ageing. **Annalen der Physik**, Wiley Online Library, v. 508, n. 6, p. 539–549, 1996.
- BUENO, V. Controle biológico de pulgões ou afídeos-praga em cultivos protegidos. **Informe Agropecuário**, EPAMIG, v. 26, 2005.
- BURNHAM, D. A. K. P. **Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-theoretic Approach**. 2nd ed. ed. [S.l.]: Springer, 2002.
- CASTRO et al. Autômatos celulares: implementações de von neumann, conway e wolfram. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 3, n. 3, p. 89–106, 2015.
- CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. d. **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: SP: POTAFOS, 1999. 286 p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. [S.l.], 2016. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_06_09_16_49_15_boletim_graos_junho_2016_-_final.pdf>.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-CONAB. **Séries Históricas de Área Plantada, Produtividade e Produção**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2>>.
- DEGRANDE, P. E. **Guia prático de controle das pragas do algodoeiro**. [S.l.]: UFMS Dourados, MT, 1998.
- DIXON et al. Life cycles, polymorphism, and population regulation. **Ann Rev Ecol Syst**, JSTOR, v. 8, p. 329–353, 1977.
- DORMANN, C. F. et al. Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review. **Ecography**, Wiley Online Library, v. 30, n. 5, p. 609–628, 2007.
- EVANS, M. J.; ROSENTHAL, J. S. **Probability and statistics: The science of uncertainty**. 2. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 2009.
- FARIAS, P. R.; BARBOSA, J. C.; BUSOLI, A. C. Distribuição espacial da lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda* (je smith)(Lepidoptera: Noctuidae), na cultura do milho. **Neotropical Entomology**, SciELO Brasil, v. 30, n. 4, p. 681–689, 2001.

- FERNANDES, A. M. et al. Desenvolvimento do pulgão *aphis gossypii glover* (hemiptera: Aphididae) em três cultivares do algodão herbáceo *Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* Hutch. **Neotropical Entomology**, SciELO Brasil, v. 30, n. 3, p. 467–470, 2001.
- GALLO, D. et al. **Entomologia Agrícola**. Piracicaba: FEALQ, 2002.
- GARDNER, M. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire games "life". **Mathematical Games**, 1970.
- GEARY, R. C. The contiguity ratio and statistical mapping. **The Incorporated Statistician**, JSTOR, v. 5, n. 3, p. 115–146, 1954.
- GEOGEBRA. 2017. <<https://www.geogebra.org/>>. Acessado em 24/04/2017.
- GIAROLA et al. Computer simulation of *aphis gossypii* insects using penna aging model. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 368, n. 1, p. 147–154, 2006.
- ILHARCO, F. A. **Equilíbrio biológico de afídeos**. [S.l.: s.n.], 1992.
- KARI, J. Theory of cellular automata: A survey. **Theoretical Computer Science**, Elsevier, v. 334, n. 1, p. 3–33, 2005.
- KEESEN et al. Simulations of populations of *Sapajus robustus* in a fragmented landscape. **Ecological Modelling**, Elsevier, v. 344, p. 38–47, 2017.
- KIMATI, H. et al. **Manual de fitopatologia: Volume 2: doenças das plantas cultivadas**. [S.l.]: Agronomia Ceres, 1997.
- LANGTON, C. G. Studying artificial life with cellular automata. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, Elsevier, v. 22, n. 1-3, p. 120–149, 1986.
- LEGENDRE, P. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm? **Ecology**, Wiley Online Library, v. 74, n. 6, p. 1659–1673, 1993.
- LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. **Numerical Ecology**. 2nd edition. ed. [S.l.]: Elsevier Science, 1998. (Developments in Environmental Modelling 20).
- MAPA. **Produtividade agrícola do Brasil cresce mais do que a mundial**. [S.l.], 2012. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/noticias/2012/01/produtividade-agricola-do-brasil-cresce-mais-do-que-a-mundial>>.
- MARIE-JOSEEFORTIN, M. **SPATIAL ANALYSIS. A Guide for Ecologists**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.
- MATHUR, M. Spatio-temporal variability in distribution patterns of *Tribulus terrestris*: Linking patterns and processes. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 16, n. 5, p. 1187–1201, 2014.
- MORISITA, M. I σ -index, a measure of dispersion of individuals. **Researches on Population Ecology**, Springer, v. 4, n. 1, p. 1–7, 1962.
- NEVES, O. d. S. et al. **Cultura e adubação do algodoeiro**. [S.l.]: São Paulo: Instituto Brasileiro de Potassa, 1965. 567 p.

NORMAN et al. **Univariate Discrete Distributions, 3rd Edition**. 3. ed. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2005. (Wiley Series in Probability and Statistics).

O'LOUGHLIN, J. The electoral geography of weimar germany: exploratory spatial data analyses (esda) of protestant support for the nazi party. **Political Analysis**, JSTOR, p. 217–243, 2002.

PENNA et al. Mutation accumulation and the catastrophic senescence of the pacific salmon. **Physical Review E**, APS, v. 52, n. 4, p. R3309, 1995.

PENNA, T. J. A bit-string model for biological aging. **Journal of Statistical Physics**, Springer, v. 78, n. 5, p. 1629–1633, 1995.

PILSON et al. Clumped distribution patterns in goldenrod aphids: genetic and ecological mechanisms. **Ecological Entomology**, Wiley Online Library, v. 20, n. 1, p. 75–83, 1995.

R-PROJECT. 2017. <<https://www.r-project.org/>>. Acessado em 24/04/2017.

ROSENBERG, M. S. The bearing correlogram: a new method of analyzing directional spatial autocorrelation. **Geographical Analysis**, Wiley Online Library, v. 32, n. 3, p. 267–278, 2000.

ROSENBERG, M. S.; ANDERSON, C. D. Passage: pattern analysis, spatial statistics and geographic exegesis. version 2. **Methods in Ecology and Evolution**, Wiley Online Library, v. 2, n. 3, p. 229–232, 2011.

SALÚSTIO, P. J. P.; COSTA, P. J. C. da. **Teoria da percolação aplicada à produção de comprimidos**. [S.l.]: Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Tecnologia Farmacêutica, Faculdade de Farmácia, Universidade do Porto, 2003.

SANTOS dos et al. An individual-based model for evolutionary effects of selective fishing applied to pseudoplatystoma corruscans. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 391, n. 21, p. 5112–5120, 2012.

SARAN, P. E.; SANTOS, W. **Manual de pragas do algodoeiro**. [S.l.]: FMC, 2007.

SEAGRI. **Embrapa aposta em produção de algodão**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://www.seagri.ba.gov.br/noticias/2015/06/15/embrapa-aposta-em-producao-de-algodao>>.

SOUZA, A. A. d. Simulação da dinâmica populacional do pulgão aphis gossypii glover e sua interação com o parasitóide lysiphlebus testaceipes. UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, 2007.

STAUFFER, A. A. D. **Introduction to percolation theory**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 1994.

VICHNIAC, G. Y. Simulating physics with cellular automata. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, Elsevier, v. 10, n. 1-2, p. 96–116, 1984.

XIA et al. Influence of temperature on bionomics of cotton aphid, aphis gossypii, on cotton. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, Wiley Online Library, v. 90, n. 1, p. 25–35, 1999.

YOUNG, J. H. Y. a. L. J. **Statistical Ecology**. 1. ed. [S.l.]: Springer US, 1998.