Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Gradiente de dispersão do HLB dos citros e consequências para o seu manejo

Rafaela Zázera Toledo

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Fitopatologia

Piracicaba
2019

Rafaela Zázera Toledo
Bacharela em Engenharia Agrônômica

Gradiente de dispersão do HLB dos citros e consequências para o seu manejo

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ BELASQUE JÚNIOR**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Fitopatologia

Piracicaba
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Toledo, Rafaela Zázera

Gradiente de dispersão do HLB dos citros e consequências para o seu manejo / Rafaela Zázera Toledo. - - Piracicaba, 2019.

52 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Controle 2. '*Candidatus Liberibacter*' 3. *Diaphorina citri* 4. Potência inversa I. Título

À minha irmã Fernanda, por quem eu tenho plena admiração
e à minha mãe Maria Rita, por me fazer sentir especial a cada novo dia.

Dedico com amor

AGRADECIMENTOS

À Deus por me abençoar nessa caminhada.

À minha família, em especial minha mãe, irmã, tias e madrinha pelo amor, apoio, carinho e proteção. Amo vocês.

Ao meu orientador professor Dr. José Belasque pelo conhecimento e paciência.

Ao professor Dr. Armando Bergamin Filho por compartilhar sua sabedoria.

Aos funcionários do Departamento de Fitopatologia e Nematologia da ESALQ/USP, em especial Maria Heloisa e Fabiana.

Á Dr. Vivian Beatriz Orlandin Coelho e á Faride Simão pelo apoio psicológico.

Ás minhas *roomates* Letícia, Marina e Bianca, obrigada pelo companheirismo.

Á Poliana Frigo, que em tão pouco tempo me mostrou uma amizade sincera e uma parceria incrível.

Á Alice, Gressa, Isabela, Kelly e Renata, vocês foram essenciais! Obrigada pelo apoio nos momentos difíceis, momentos de alegria compartilhando risadas e boas conversas. Obrigada pela amizade que construímos.

Aos colegas de pós-graduação do programa de Fitopatologia.

Á Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

EPÍGRAFE

As 4 irmãs Zázera

*Quando elas foram nascendo
Num lar sacrossanto e abençoado,
Seus pais já antecedendo
As batizaram com um nome tão sagrado...
A santíssima Mãe de Jesus,
Maria, já pelo anjo predestinada,
Geraria num esplendor de muita luz
Quem redimiria a humanidade condenada...
Aquela que as nascer foi Maria Carolina,
A primogênita. Maria Ângela nasceu em seguida,
Pela terceira vez, Maria Heloisa, outra menina
E por último Maria Rita, mui querida...
Para seus pais foram bênçãos de Deus,
As quatro filhas, encanto de lar.
Foi como um presente a todos os seus
Que jamais deixaram de sempre se amar...
As quatro são um encanto de criaturas,
Educadas com esmero dentro do lar.
Como dona Geny se desdobrava em canduras
E o papai Wanderley sempre a compartilhar...
Elas não só receberam a mais fina educação,
Como também disciplinadas aulas escolares.
Tiveram os melhores estudos e a conclusão
De elevar seus graus em altos patamares...
Por onde passam, irradiam amor, carinho e alegria,
Não se objetivando em cumprimentar suas amizades,
Um aceno, um abraço, dispensados com harmonia
Entre quem as tem com expressão de felicidade...
Que estes oitos versos sejam para homenagear
As quatro Marias (Piva e Zázera) com sincero respeito,
Pois elas são descendentes de um casal que sabia amar
E afirmavam: neste mundo, o que é bom já 'nasce feito'...*

Arlindo Bellini

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. A citricultura paulista.....	11
2.2. As bactérias associadas ao HLB	12
2.3. O inseto vetor <i>Diaphorina citri</i>	13
2.4. Sintomas e epidemiologia do HLB	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1. Áreas de estudo	19
3.2. Ajuste de modelos de gradiente	20
4. RESULTADOS.....	25
5. DISCUSSÃO	43
6. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS.....	49

RESUMO

Gradiente de dispersão do HLB dos citros e consequências para o seu manejo

Huanglongbing (HLB) é considerada a doença mais devastadora dos citros. O HLB é causado pela bactéria '*Candidatus Liberibacter spp.*' e transmitido pelo inseto vetor, o psílideo *Diaphorina citri*. Não existem ainda métodos curativos para essa doença, ou variedades resistentes, e seu manejo é baseado na aquisição de mudas sadias, monitoramento e controle químico frequente do vetor e inspeção e erradicação de plantas sintomáticas. Devido à dificuldade de manejo da doença, muitos produtores acabam por abandonar a atividade citrícola. O objetivo desse trabalho foi determinar o modelo de gradiente de dispersão da doença que melhor se ajusta aos dados de proporção de plantas sintomáticas erradicadas, a fim de propor medidas mais eficientes de manejo. Para isso, foram ajustados os modelos potência inversa e exponencial negativo à dados de proporção de plantas sintomáticas erradicadas em relação a borda dos lotes, para 21 lotes retangulares de pomares comerciais de laranja doce. Foram utilizadas duas abordagens para a análise dos gradientes, denominadas de "concêntrica" e "direcional". Para ambas utilizou-se a proporção de plantas erradicadas para faixas de 20 em 20 metros de distância em relação a todas as bordas do pomar para a primeira (concêntrica), e em relação a cada borda dos lotes (direcional). Em ambas as abordagens analisadas, houve melhor ajuste do modelo potência inversa. No entanto, a abordagem concêntrica obteve 15 ajustes de um total de 21 lotes, enquanto que para a abordagem direcional, houve ajuste do modelo para apenas seis lotes. Esses resultados demonstram que há um gradiente de doença da borda para o interior dos lotes, e que ocorre um influxo de insetos vetores de todas as direções. Além disso, o ajuste do modelo da potência inversa sugere que os lotes sofreram influência de fontes de inóculo externas, ou seja, psílideos bacterilíferos pousam preferencialmente na borda dos pomares e uma pequena parte adentra o interior do lote levando a doença. O gradiente de dispersão em relação da borda dos lotes é consequência da disseminação primária, a qual só poderá ser evitada com o manejo regional, sendo indispensável para um manejo eficiente do HLB a curto e médio prazo.

Palavras-chave: Controle; '*Candidatus Liberibacter*'; *Diaphorina citri*; Potência inversa

ABSTRACT

Citrus HLB dispersion gradient and consequences for its management

Huanglongbing (HLB) is considered the most devastating disease of citrus. HLB is caused by the bacterium '*Candidatus Liberibacter* spp.' and transmitted by the insect vector, the psyllid *Diaphorina citri*. There are no curative methods for this disease, or resistant varieties, and its management is based on the acquisition of healthy seedlings, monitoring and frequent chemical control of the vector and inspection and eradication of symptomatic plants. Due to the difficulty of managing the disease, many producers end up abandoning citrus activity. The objective of this work was to determine the disease dispersion gradient model that best fits the proportion of symptomatic eradicated plants, in order to propose more efficient management measures. For this, inverse power and negative exponential models were adjusted to the proportion of symptomatic plants eradicated in relation to batch border for 21 rectangular plots of commercial sweet orange orchards. Two approaches were used for the analysis of gradients, of "concentric" and "directional". For both, the proportion of eradicated plants for strips 20-by-20-m apart from all orchard edges was used for the first (concentric), and for each lot border (directional). In both approaches analyzed, there was better fit of the inverse power model. However, the concentric approach obtained 15 adjustments of a total of 21 batches, whereas for the directional approach, there was adjustment of the model to only six batches. These results demonstrate that there is a disease gradient from the edge to the interior of the batches, and that an influx of vector insects from all directions occurs. In addition, the adjustment of the inverse potency model suggests that the lots were influenced by external inoculum sources, that is, bacterial insects preferentially land on the edge of the orchards and a small part enters the interior of the lot leading to illness. The dispersion gradient in relation to the edge of the lots is a consequence of the primary dissemination, which can only be avoided with the regional management, being indispensable for an efficient management of the HLB in the short and medium term.

Keywords: Control; '*Candidatus Liberibacter*'; *Diaphorina citri*; Inverse power

1. INTRODUÇÃO

A citricultura tem grande expressão na cadeia do agronegócio brasileiro. O Brasil é o maior produtor mundial de laranja, seguido dos Estados Unidos, Índia e México. No ano de 2017 o país teve uma produção de mais de 18 milhões de toneladas de suco, sendo a maior parte voltada pra exportação (FAOSTAT, 2017).

O *Huanglongbing* (HLB) é a principal doença enfrentada pelo setor citrícola. Seu primeiro relato ocorreu no sul da China em 1919 e agora a doença já está presente em mais de 40 países. Em março de 2004 e agosto de 2005, ocorreram as primeiras detecções da doença nos estados de São Paulo, Brasil, e na Flórida, Estados Unidos, respectivamente (Bové, 2006). Essas regiões são as maiores produtoras mundiais de laranja doce e suco de laranja.

O HLB é uma doença associada as bactérias denominadas '*Candidatus Liberibacter* spp.', pertencentes à classe α Proteobacteria (Teixeira *et al.*, 2010) e disseminadas por dois insetos vetores: *Diaphorina citri* e *Trioza erytreae*. No Brasil duas espécies do patógeno estão presentes, '*Ca. L. asiaticus*' e '*Ca. L. americanus*', ambas transmitidas pelo psílideo *D. citri* (Bové, 2014). O psílideo *Trioza erytreae*, originário da África, não é relatado no Brasil, assim como a bactéria '*Ca. L. africanus*'.

Sintomas característicos do HLB correspondem a folhas que apresentam amarelecimento e evoluem para um intenso mosqueado, queda de frutos, desfolha e morte dos ponteiros. Os frutos de ramos infectados são pequenos, assimétricos e apresentam sementes abortadas (Bové, 2006).

O manejo da doença é baseado na utilização de mudas sadias para implementação de novos pomares, erradicação de plantas sintomáticas e controle do inseto vetor. Entretanto, devido à influência de áreas vizinhas com fontes de inóculo do patógeno, o manejo regional é a melhor forma para o controle do HLB (Bassanezi *et al.*, 2010).

Grande parte dos citricultores paulistas são de pequeno a médio porte (FUNDECITRUS, 2017), e não realizam a erradicação de plantas sintomáticas (Maschio, 2011). Para um efetivo controle da doença devem-se adotar inspeções frequentes, de todas as plantas cítricas da propriedade, seguida da remoção das mesmas quando detectadas com sintomas (Belasque Jr. *et al.*, 2010). Pode-se afirmar que os produtores agem muito mais fortemente para o controle do vetor do que para a remoção de plantas sintomáticas. De

acordo com Bassanezi *et al.* (2013a), há uma perda direta e imediata quando uma planta sintomática e ainda produtiva é eliminada, especialmente plantas adultas com sintomas iniciais. Além disso, a inspeção e a erradicação de plantas são atividades de custo relativamente alto, quando comparado com a pulverização de inseticidas para o controle do vetor (Belasque Jr *et al.*, 2010).

Estudos epidemiológicos podem oferecer informações úteis na comparação, melhoria ou no estabelecimento de medidas efetivas para o manejo do HLB, um patossistema relativamente complexo. Segundo Gottwald, (2010), o padrão espacial de plantas doentes é útil para o entendimento das relações patógeno-vetor, da forma de propagação da doença e para proposição de um manejo mais eficaz. Entretanto, poucos estudos foram realizados sobre a epidemiologia da doença, especialmente aqueles relacionados à sua distribuição espacial e o gradiente de plantas sintomáticas (Gottwald *et al.*, 2010).

O pronunciado “efeito de borda”, no qual há mais plantas doentes adjacentes à estradas, corpos d’água, casas, matas e outros pontos geográficos, é bastante citado no caso do HLB (Gottwald *et al.*, 2009a). A quantificação desse efeito pode auxiliar no manejo da doença, como por exemplo no estabelecimento de plantios com interfaces marginais mínimas para evitar ou reduzir novas infecções (Gottwald *et al.*, 2009a). Em propriedades pequenas a relação entre a área total do pomar e a área da borda é grande, o que torna essas áreas mais expostas à influência de áreas vizinhas (Asato, 2018). No caso de propriedades maiores, essa relação é menor, resultando em proporcionalmente menos infecções (Bassanezi *et al.*, 2013b,a).

Nesse sentido, no presente trabalho os objetivos foram determinar o gradiente de dispersão da doença em pomares comerciais de laranja doce. Para isso foram ajustados os modelos potência inversa e exponencial negativo aos dados de proporção de plantas com HLB a diferentes distâncias da borda desses pomares. Por último, com os resultados dos ajustes desses modelos, discutiu-se como o manejo do HLB poderia ser mais efetivo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A citricultura paulista

O Brasil é referência mundial na produção de citros (Neves *et al.*, 2010). Atualmente, o país é o maior produtor e exportador mundial de suco de laranja, com 54% e 77%, respectivamente, desses mercados (FNP, 2016). No cultivo da laranja, o continente americano representa 54%, seguido do continente asiático com 26%, continente africano com 10% e europeu com 9% (FAOSTAT, 2017).

A citricultura brasileira está concentrada no cinturão citrícola. Essa região abrange mais de nove mil propriedades do estado de São Paulo e Sul/Sudoeste de Minas Gerais com uma área de aproximadamente 465.635 ha. Para a safra 2018/19 estima-se uma produção de 284,9 milhões de caixas de laranja de 40,8Kg (FUNDECITRUS, 2019). O parque citrícola é composto pela sua maioria em variedades tardias, como Valência, Valência Folha Murcha; seguida por variedades de meia estação, como Pêra Rio e por último de variedades precoces, Hamlin, Westin, Rubi, entre outras (FUNDECITRUS, 2017).

Muitas pragas e doenças são um risco para a sanidade de pomares, algumas delas podendo levar a perdas significativas na produção, na qualidade dos frutos ou aumento dos custos de produção. Dentre elas, destacam-se as causadas por fungos, como a pinta preta dos citros (*Phyllosticta citricarpa*) e a podridão floral dos citros (*Colletotrichum* spp.), as doenças causadas por bactérias, como o cancro cítrico (*Xanthomonas citri* subsp. *citri*), a clorose variegada dos citros (*Xylella fastidiosa*) e o HLB ('*Ca. Liberibacter asiaticus*' e '*Ca. Liberibacter americanus*').

No entanto, o principal desafio fitossanitário no setor citrícola em todo continente americano é o HLB, uma doença que vem desestimulando parte dos produtores devido as dificuldades para seu manejo. Presente há várias décadas nos continentes asiático e africano (Bové, 2006), o HLB teve seu primeiro relato no Brasil em 2004, na cidade de Araraquara, São Paulo (Coletta-Filho *et al.*, 2004; Teixeira *et al.*, 2005). Desde então a doença se disseminou por áreas produtoras de citros em São Paulo e no Paraná, com impactos na manutenção de pomares e nos custos de produção da cultura. Segundo a Coordenadoria de Defesa Agropecuária do Estado de São Paulo (CDA), no período de 2005 a 2016,

aproximadamente 48 milhões de plantas foram erradicadas em São Paulo (Coordenadoria de Defesa Agropecuária do Estado de São Paulo, 2017).

No cinturão citrícola a incidência de laranjeiras com sintomas de HLB, em 2018, foi de 18,1%, aproximadamente 35,3 milhões de plantas. Nesse levantamento identificou-se que 30% das plantas apresentavam mais da metade da copa com sintomas de HLB (FUNDECITRUS, 2018a). Dentre as regiões que formam o cinturão, as que apresentam as maiores incidências são Centro e Sul, com 31,6% e 30,7% de plantas sintomáticas, respectivamente. Também foram estimadas as incidências de plantas considerando o tamanho das propriedades e observou-se que em propriedades pequenas a incidência de plantas sintomáticas é maior. As incidências de plantas sintomáticas foram de 33,7%, 29,1%, 17,4% e 7,0% para propriedades com até 10 mil plantas, >10 mil até 100 mil, >100 mil até 500 mil, e com mais de 500 mil plantas, respectivamente. Devido ao impacto da doença, que eleva os custos de produção e reduz à qualidade e quantidade de frutos, muitos são os produtores que abandonaram a atividade citrícola. No cinturão citrícola, de 2015 a 2018, houve uma queda de 22,5% no número de propriedades com laranja doce (FUNDECITRUS, 2018b). Do total de propriedades que deixaram de se dedicar a produção de laranja (1.706), 95,3% delas tinham menos que 20 mil plantas, ou seja, eram de pequenos produtores.

2.2. As bactérias associadas ao HLB

O HLB foi relatado pela primeira vez como uma deficiência nutricional (Gottwald *et al.*, 2007b). Na década de 1950 achava-se que o HLB era provocado por um vírus, os únicos agentes infecciosos transmissíveis por enxertia conhecidos pela ciência na época (Bové, 2014). Em 1970, na França, com uso da microscopia eletrônica, detectou-se uma bactéria restrita ao floema e associada ao HLB (Bové, 2006). A caracterização da bactéria foi realizada na década de 1990, quando técnicas moleculares se tornaram disponíveis. Dessa forma, o patógeno foi confirmado como um organismo Gram-negativo e pertencente ao gênero provisório '*Candidatus*' na subdivisão α das Proteobacterias (Bové, 2014). Atualmente o HLB está associado a três espécies de bactérias fastidiosas Gram-negativas: '*Candidatus* Liberibacter asiaticus', '*Candidatus* Liberibacter americanus' e '*Candidatus* Liberibacter africanus'. O termo '*Candidatus*' é atribuído a bactérias não cultiváveis em meio de cultura em laboratório (Gottwald, 2010).

No Brasil, duas espécies desse patógeno foram descritas: '*Ca. Liberibacter asiaticus*' e '*Ca. Liberibacter americanus*', além de um fitoplasma do grupo IX associado também aos sintomas de HLB nos citros (Teixeira *et al.*, 2008). O fitoplasma foi relatado nos estados de São Paulo e Bahia, em 2008 e 2012, respectivamente (Bové, 2014). A espécie '*Ca. Liberibacter africanus*' não foi relatada nas Américas e '*Ca. Liberibacter americanus*' foi detectada apenas no Brasil (Bové *et al.*, 2008). Nos países das América do sul, Central e Norte, a espécie '*Ca. Liberibacter asiaticus*' é a mais disseminada (Bassanezi *et al.*, 2010). Embora os tipos asiático e americano ocorram em São Paulo, o primeiro é bem mais frequente, provavelmente por atingir maiores concentrações dentro das plantas infectadas e ser menos sensível ao calor que '*Ca. Liberibacter americanus*' (Lopes *et al.*, 2009). Tanto a sensibilidade ao calor quanto a menor concentração bacteriana, combinados com a remoção de plantas doentes, podem ter sido as principais causas do declínio de '*Ca. Liberibacter americanus*' no Estado (Lopes *et al.*, 2017). Segundo Lopes *et al.* (2009), a incidência de '*Ca. Liberibacter americanus*' foi reduzida de 98 a 20% nos primeiros anos após a detecção do HLB em São Paulo. Assim, nas Américas as epidemias de HLB são, portanto, associadas à espécie '*Ca. Liberibacter asiaticus*'.

2.3. O inseto vetor *Diaphorina citri*

A disseminação do HLB no Brasil se dá predominantemente pelo inseto vetor *Diaphorina citri*. Esse psílídeo foi relatado no Brasil ainda na década de 40, muito antes do aparecimento da doença, e sua importância na cultura ocorreu somente após o surgimento do HLB (Costa Lima, 1942).

A principal característica de *D. citri* é a inclinação do corpo num ângulo de 45° com a superfície da planta (Bonani, 2009; Hall *et al.*, 2012). Os adultos medem de 2,7 mm a 3,3 mm de comprimento e o ciclo de vida varia de 15 a 47 dias, dependendo da temperatura (Liu & Tsai, 2000; Hall *et al.*, 2012). Os ovos são de cor clara e podem apresentar uma coloração amarelo escura quando do surgimento do primeiro estágio ninfal. A eclosão ocorre em média três dias após a postura do ovo (Liu & Tsai, 2000). Existem cinco estágios ninfais que duram de 10 a 40 dias (Grafton-Cardwell *et al.*, 2013). O inseto adulto alimenta-se preferencialmente em folhas mais novas, na parte abaxial, provavelmente por ser uma região de mais fácil acesso aos vasos do floema (George *et al.*, 2017). As fêmeas ovipositam

até 800 ovos, apenas em tecidos jovens (brotações), nos quais as ninfas se alimentam (Grafton-Cardwell *et al.*, 2013). O intervalo de temperatura mais adequado para o crescimento da população do inseto é de 25-28°C (Liu & Tsai, 2000). O acasalamento e a oviposição estão restritas ao período diurno (Wenninger & Hall, 2007).

O psílideo pode se dispersar a longa distância, superior a dois quilômetros, sem auxílio do vento, o que facilita a introdução do patógeno em novas áreas (Martini *et al.*, 2014; Lewis-Rosenblum *et al.*, 2015). A transmissão pelo inseto vetor é composta por: a) um período de aquisição, no qual as ninfas ou adultos adquirem a bactéria quando se alimentam em plantas infectadas; b) um período de latência, necessário para que o patógeno se instale na glândula salivar e possa reproduzir; e c) um período de acesso à inoculação, durante o qual o inseto introduz a bactéria em outras plantas (Inoue *et al.*, 2009; Grafton-Cardwell *et al.*, 2013).

A aquisição do patógeno pelo vetor ocorre tanto por ninfas quanto por adultos, mas as ninfas são mais eficazes na aquisição e transmissão da bactéria. Nas ninfas a concentração do patógeno é maior (Inoue *et al.*, 2009; Pelz-Stelinski *et al.*, 2010). O inseto vetor pode adquirir o patógeno a partir do seu segundo instar, mas somente no quarto e quinto instares são capazes de transmitir a bactéria (Inoue *et al.*, 2009; Pelz-Stelinski *et al.*, 2010). Os tempos de alimentação para que *D. citri* adquira o patógeno e o período de latência são bastante variáveis, de acordo com a literatura. Capoor *et al.* (1974) observaram aquisições a partir de 15 minutos de alimentação, mas a porcentagem de transmissão foi baixa nesse período. Taxas de aquisição de 100% foram observadas após uma hora de alimentação. Já Xu *et al.* (1988) afirmam que o tempo mínimo para infecção é de 5 horas. Em relação ao período latente, Xu *et al.* (1988) afirmam ser variável de 1 a 25 dias. Após a aquisição, a capacidade de transmissão do patógeno pelos adultos pode ocorrer por toda vida do inseto, que dura de 2 a 3 meses. Desse modo, a relação patógeno-vetor é do tipo persistente (Hung *et al.*, 2004; Parra *et al.*, 2010). Segundo Hung *et al.* (2004), não há relatos de transmissão transovariana. No entanto, Pelz-Stelinski *et al.* (2010) detectaram essa transmissão numa proporção de 6%. A transmissão da bactéria para a semente foi investigada por diferentes grupos de pesquisa e é considerado um evento raro ou impossível (Albrecht & Bowman, 2009).

Diaphorina citri pode ser encontrado no pomar ao longo de todo o ano, ocorrendo maiores populações, normalmente, ao final da primavera e início do verão, devido ao maior

fluxo vegetativo e altas temperaturas (Yamamoto *et al.*, 2001; Hall *et al.*, 2007). Durante a primavera ocorre maior expressão dos sintomas da doença e maior concentração das bactérias nas plantas doentes, portanto esse é um período do ano com mais adultos bacterilíferos.

2.4. Sintomas e epidemiologia do HLB

Epidemias de HLB são poliéticas, isto é, necessitam de anos para mostrar um significativo aumento na intensidade da doença. Por isso, estudos sobre a epidemiologia da doença, como ela progride no tempo e no espaço, são difíceis de serem realizados (Gottwald *et al.*, 2007b). Somado a isso, a doença possui um longo período de incubação, e o aparecimento dos sintomas após a infecção pode variar de 6 a 12 meses, considerando as condições climáticas, variedade ou espécie da planta e concentração do patógeno (Bové, 2006). Diferentemente do período de incubação, o período de latência da doença é relativamente curto e a planta já pode se tornar fonte de inóculo 15 dias após a infecção por '*Ca. Liberibacter*' (Lee *et al.*, 2015). Portanto, os produtores podem adotar a erradicação de plantas sintomáticas, mas isso não resultará por completo na eliminação de plantas infectadas na área sob controle.

A dinâmica da doença pode resultar de múltiplos processos, e uma vez estabelecida é bastante rápida, sugerindo que o movimento do vetor seja contínuo (Gottwald, 2010). A doença é propagada pelo vetor por dois processos espaciais que ocorrem simultaneamente: i) a disseminação primária, que ocorre por adultos infectivos que imigram de fontes de inóculo localizadas externamente ao pomar; e ii) a disseminação secundária, que ocorre a curtas distâncias e é resultante da movimentação de psíldeos infectivos dentro do próprio talhão, mas não necessariamente entre plantas vizinhas ou mais próximas (Gottwald *et al.*, 2009a, 2010; Bassanezi *et al.*, 2010).

Estudos feitos por Bassanezi *et al.* (2013b) confirmaram que a disseminação primária é a forma mais danosa de propagação da doença em áreas mantidas com erradicação de plantas sintomáticas e controle do vetor. Essas medidas de controle não impedem a entrada de psíldeos infectivos na área, a qual permanece sempre sujeita a novas infecções primárias. O patossistema HLB-citros-*D. citri* foi classificado por Bergamin Filho *et al.* (2016) como uma nova categoria epidemiológica de doenças de plantas, caracterizada

por doenças policíclicas com disseminação primária contínua. Essa disseminação primária do patógeno, que tem origem a partir de fontes de inóculo produzidos fora do pomar, é um importante processo responsável pelo padrão espacial da doença (Gottwald *et al.*, 2009b; Gottwald, 2010).

O ajuste de modelos de gradiente de doença são uma das formas de se estudar o crescimento espacial de uma epidemia. O emprego de modelos matemáticos para esse fim permite a identificação de características biológicas do patossistema e, como consequência, em propor táticas de manejo para a doença ou vetor (Bergamin Filho *et al.*, 2002; Van Maanen & Xu, 2003). Gradientes de doença são úteis, por exemplo, para se determinar a capacidade de dispersão do patógeno a diferentes distâncias.

Uma frequente disseminação primária ocasiona o denominado “efeito de borda”, característica essa observada em muitas áreas cítricas afetadas pelo HLB em toda América. O efeito de borda é resultado da maior incidência de plantas sintomáticas nas periferias dos pomares, decorrente da dispersão de adultos infectivos de fora dos pomares. Essa preferência de *D. citri* por plantas de borda é uma característica de insetos que se movem com frequência e a presença em plantas e pomares vizinhos favorece tal comportamento. Maiores populações do vetor em plantas nas bordas dos pomares podem ocorrer também pela influência de fatores bióticos e abióticos. Variáveis meteorológicas como velocidade do vento, intensidade luminosa, temperatura, podem alterar o microclima e afetar diretamente a fenologia das plantas de citros (Sétamou & Bartels, 2015). Segundo Sétamou *et al.* (2012), *D. citri* é um inseto diurno, o qual utiliza a luz para a seleção da planta hospedeira, o que explica assim a preferência em colonizar plantas nas bordas de pomares. Dada essa característica de colonização de *D. citri*, Gasparoto *et al.* (2018) citam que altas concentrações de plantas doentes nas bordas de propriedades indicam a necessidade de um controle mais intenso da doença, tanto interna quanto externamente à propriedade.

Não há métodos de controle curativos para o HLB e ainda não são conhecidas fontes de resistência genética ao patógeno. Todas as espécies cítricas plantadas comercialmente são suscetíveis ao patógeno e seu inseto vetor (Albrecht & Bowman, 2011). Por isso, medidas que reduzem o número de novas infecções é fundamental no processo de produção de cítricos. O manejo do HLB é baseado em três princípios básicos: i) utilização de mudas sadias para implementação de novos pomares ou replantio; ii) inspeção e erradicação de plantas sintomáticas e; iii) controle do inseto vetor (Bové, 2006). Medidas quarentenárias

também são de extrema importância para evitar a entrada do patógeno em uma dada região em que o patógeno ou vetor ainda estejam ausentes.

De acordo com Bassanezi *et al.* (2013b), o manejo regional é a melhor estratégia para o manejo do HLB, visto que pomares vizinhos não manejados são fontes de inóculo primário do patógeno. No entanto, produtores também devem se atentar para o quanto são efetivos em suas ações internas, ou seja, na remoção de plantas sintomáticas, na redução das populações do inseto vetor, e no emprego de mudas saudáveis. Para o controle do vetor muitos produtores do cinturão citrícola pulverizam seus pomares com inseticidas seguindo calendários fixos. A detecção de adultos de *D. citri* pode ser feita com o emprego de armadilhas adesivas amarelas. Adicionalmente, alguns produtores empregam o controle biológico do vetor, com a liberação do parasitóide *Tamarixia radiata* ou do fungo entomopatogênico *Isaria fumorosea*.

Muitos produtores resistem à prática de erradicação de plantas sintomáticas. Essa medida de controle tem alto custo e resulta em um impacto imediato na produção de frutos. Além disso, uma planta sintomática pode ainda ser produtiva por alguns anos. Por isso, muitos citricultores empregam mais esforços no controle químico do vetor, em detrimento da eliminação de plantas sintomáticas (Bassanezi *et al.*, 2013a). Maschio (2011) relatou que 44% dos produtores de citros não realizavam, naquela época, a erradicação de plantas sintomáticas como medida de manejo do HLB.

A eliminação de árvores sintomáticas é uma prática regulamentada, determinada pela Instrução Normativa N°53 de 16/10/2008 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Segundo essa portaria os produtores devem inspecionar seus pomares pelo menos quatro vezes ao ano e eliminar as plantas sintomáticas. Portanto, a não erradicação de plantas está em desacordo com a lei. No entanto, devido aos seus impactos financeiros negativos e considerando que a maioria dos produtores do estado de São Paulo são de pequeno e médio porte (FUNDECITRUS, 2017), a realização dessa prática se torna, muitas vezes, inviável.

Plantas com sintomas apresentam, inicialmente, poucos ramos com folhas amareladas, as quais evoluem para um intenso mosqueado, sem delimitação entre as áreas verdes e amarelas, e uma assimetria marcada pela nervura central. Folhas sintomáticas podem ser curvadas, com nervuras grossas e escurecidas. Com o avanço da doença pode ocorrer desfolha e morte dos ponteiros. Os frutos apresentam um tamanho reduzido, são

incompletamente maduros e apresentam a região estiolar verde (Bové, 2006). Por meio de cortes perpendiculares nos frutos, nota-se assimetria e sementes abortadas (Belasque Jr *et al.*, 2009). De acordo com Bassanezi *et al.* (2009), a redução na proporção de frutos pode chegar a 100% dependendo de quanto a copa é afetada pela doença. Esses autores ainda observaram que frutos sintomáticos ficam mais ácidos e com menor Brix, perdendo qualidade para produção de suco.

A doença torna a planta improdutiva e debilitada, mas raramente provoca sua morte. Pomares inteiros podem vir a ser inviáveis entre sete e dez anos depois do aparecimento da doença, caso medidas de controle não sejam tomadas (Gottwald *et al.*, 2007b). O aumento da incidência do HLB é mais rápido nos pomares jovens que nos pomares adultos, portanto, a evolução dos sintomas pode ser rápida dependendo da idade ou porte da planta no momento da infecção e também do número de infecções numa mesma planta (Bassanezi & Bassanezi, 2008; Bassanezi *et al.*, 2010).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Áreas de estudo

O estudo foi realizado a partir de dados coletados de 21 lotes de três propriedades comerciais citrícolas presentes no estado de São Paulo, denominadas de 1, 2 e 3. As propriedades 1 e 3 são localizadas na região centro do parque citrícola e a propriedade 2 na região sudoeste. Todos os lotes são da variedade Pera Rio e foram plantados de 2009 a 2013. O número total de plantas em cada lote variou de 8 a 19 mil (Tabela 1).

Tabela 1. Ano de plantio, variedade, porta-enxerto, espaçamento e número total de plantas de cada lote das propriedades citrícolas 1, 2 e 3.

Propriedade	Lote	Plantio	Variedade	Porta enxerto	Espaçamento (m)	Total de plantas
1	37	2009	Pera Rio	Tangerina sunki	7,0 x 3,0	11.787
	38	2009	Pera Rio	Tangerina sunki	7,0 x 3,0	12.323
	39	2009	Pera Rio	Tangerina sunki	7,0 x 3,0	11.700
	40	2009	Pera Rio	Tangerina sunki	7,0 x 3,0	11.356
	197	2012	Pera Rio	Citromelo swingle	6,5 x 2,2	15.582
	198	2012	Pera Rio	Citromelo swingle	6,5 x 2,2	14.128
	199	2012	Pera Rio	Citromelo swingle	6,5 x 2,2	16.008
	200	2012	Pera Rio	Citromelo swingle	6,5 x 2,2	15.966
	204	2012	Pera Rio	Citromelo swingle	6,5 x 2,2	16.844
	205	2012	Pera Rio	Citromelo swingle	6,5 x 2,2	16.199
	206	2012	Pera Rio	Citromelo swingle	6,5 x 2,2	16.188
2	33	2010	Pera rio	Tangerina sunki	6,5 x 2,0	19.204
	34	2010	Pera rio	Tangerina sunki	6,5 x 2,0	16.563
3	403	2011	Pera rio	Cleópatra	6,8 x 2,5	13.850
	502	2012	Pera rio	Tangerina sunki	6,8 x 2,3	16.632
	503	2012	Pera rio	Tangerina sunki	6,8 x 2,3	16.065
	504	2012	Pera rio	Tangerina sunki	6,8 x 2,3	16.380
	505	2012	Pera rio	Tangerina sunki	6,8 x 2,3	15.985
	506	2012	Pera rio	Tangerina sunki	6,8 x 2,3	16.669
	507	2012	Pera rio	Tangerina sunki	6,8 x 2,3	8.460
	508	2013	Pera rio	Tangerina sunki	6,8 x 2,3	10.068

No período em que as epidemias de HLB, analisadas no presente estudo, ocorreram, nas três propriedades eram adotadas a eliminação de plantas sintomáticas e o controle frequente do inseto vetor. Ao menos cinco inspeções anuais foram feitas em todas as plantas e as erradicações ocorreram até 30 dias após inspeção. O número de pulverizações mensais com inseticidas variou de duas a três seguindo calendário pré-estabelecido. Pulverizações adicionais foram realizadas quando da detecção de adultos em armadilhas amarelas ou seguindo a recomendação do “alerta fitossanitário” do Fundecitrus. Inseticidas sistêmicos foram aplicados em plantas com até dois ou três anos de idade, via *drench*, de 0 a 3 vezes por ano no período do verão. Adicionalmente ao controle químico, o controle biológico foi realizado com a soltura do parasitoide *Tamarixia radiata* ao redor das propriedades e em áreas vizinhas aquelas em que se conheciam plantas cítricas ou de *Murraya paniculata*.

3.2. Ajuste de modelos de gradiente

Os dados das avaliações e erradicações de plantas sintomáticas realizadas nas propriedades são referentes ao período de março de 2013 a dezembro de 2017. As inspeções para detecção de plantas com sintomas de HLB foram realizadas pelas equipes das próprias fazendas. Matrizes binárias representando plantas assintomáticas (0, zero) e plantas erradicadas (1, um) foram confeccionadas para todos os 21 lotes. Para a localização das plantas erradicadas foram realizadas inspeções de campo ou obtidas imagens aéreas pelo aplicativo Google Earth ou com veículo aéreo remotamente pilotado (*drone*). O número de matrizes confeccionadas para cada lote variou de três a cinco. O ano e a forma de localização das plantas erradicadas estão apresentados na Tabela 2. Os dados foram acumulados, após a primeira avaliação, para confecção das matrizes e análise dos dados.

As matrizes foram utilizadas de duas formas para a análise dos gradientes, denominadas aqui “concêntrica” e “direcional”. Para ambas as formas foram quantificadas a proporção de plantas erradicadas para faixas de 20 em 20 metros de distância. Para a primeira abordagem as faixas de 20 metros seguiram da periferia para o interior do lote (Figura 1). Para a forma de análise direcional as faixas iniciaram de um lado e iam até o lado oposto, nas direções horizontal e vertical (Figura 2). Nesse caso, para cada direção, foram determinadas as proporções de plantas nos dois sentidos (da esquerda para a direita,

indicado pela letra alfabética A; de baixo para cima, letra B; da direita para esquerda, letra C; e por fim, de cima para baixo, letra D).

Tabela 2. Ano e forma utilizada para localização das plantas erradicadas para cada lote das propriedades 1, 2 e 3.

Propriedade	Lote	Ano	Localização das plantas erradicadas
1	37	2013-2014-2016	Google e drone
	38	2013-2014-2016	Google e drone
	39	2013-2014-2016	Google e drone
	40	2013-2014-2016	Google e drone
	197	2013-2014-2015-2016	Google, vistoria a campo e drone
	198	2013-2014-2015-2016	Google, vistoria a campo e drone
	199	2013-2014-2015-2016	Google, vistoria a campo e drone
	200	2013-2014-2015-2016	Google, vistoria a campo e drone
	204	2013-2014-2015-2016	Google, vistoria a campo e drone
	205	2013-2014-2015-2016	Google, vistoria a campo e drone
2	206	2013-2014-2015-2016	Google, vistoria a campo e drone
	33	2013-2014-2015-2016-2017	Google, vistoria a campo e drone
	34	2013-2014-2015-2016-2017	Google, vistoria a campo e drone
3	403	2013-2014-2016-2017	Google e drone
	502	2014-2016-2017	Google e drone
	503	2014-2016-2017	Google e drone
	504	2014-2016-2017	Google e drone
	505	2014-2015-2016-2017	Google, vistoria a campo e drone
	506	2014-2016-2017	Google e drone
	507	2014-2016-2017	Google e drone
	508	2014-2016-2017	Google e drone

Figura 1. Ilustração das faixas de 20 metros, da periferia para o interior dos lotes, utilizadas para a determinação da proporção de plantas erradicadas e o ajuste de modelos de gradiente de plantas com HLB (matriz concêntrica).

Figura 2. Ilustração das faixas de 20 metros consideradas para cada matriz direcional. A proporção de plantas erradicadas foi determinada para cada faixa nas direções horizontal (sentidos A para C e vice-versa) e vertical (sentidos B para D e vice-versa).

Os modelos utilizados nos ajustes de gradientes foram exponencial negativo e potência inversa. Ambos são os mais usados na caracterização de gradientes de dispersão de doenças em plantas (Esker *et al.*, 2007). Os modelos foram ajustados aos dados de proporção de plantas erradicadas para cada faixa de 20 metros determinados a partir das matrizes concêntricas e direcionais. Apenas os dados acumulados de plantas erradicadas foram utilizados para os ajustes. As matrizes foram confeccionadas com o aplicativo Excel e os ajustes dos modelos testados por regressão não linear com o aplicativo Statistica 12.0 (Stasoft, Tulsa, OK, EUA). Os ajustes foram avaliados quanto à significância da regressão, dos parâmetros “a” e “b” estimados pelos modelos, a distribuição dos resíduos e valor do coeficiente de determinação (R^2) (Campbell & Madden, 1990; Bergamin Filho, 2018). A seguir são apresentados os modelos exponencial negativo e potência inversa.

Exponencial negativo

$$y = a \exp -bx$$

Na qual:

a = proporção de plantas erradicadas na distância 0

b = coeficiente angular (inclinação do gradiente)

x = distância (em metros)

Potência inversa

$$y = ax^{-b}$$

Na qual:

a = proporção de plantas erradicadas na distância 1

b = coeficiente angular (inclinação do gradiente)

x = distância (em metros)

4. RESULTADOS

Todas os lotes apresentaram aumentos na incidência da doença no tempo. As maiores incidências acumuladas de plantas erradicadas ocorreram nos lotes da propriedade 3 (Tabela 3). Nesses lotes foram erradicadas entre 9,9% e 19,5% de plantas em cinco anos, ou menos, após o plantio. Na propriedade 1 os lotes que apresentaram as maiores incidências foram os de número 37, 38, 39 e 40 (entre 3,4% e 5,2%). Os demais lotes avaliados na mesma propriedade, mais novos, apresentaram incidências inferiores a 2% de plantas erradicadas. Na propriedade 2 ocorreram as epidemias de HLB menos severas, comparativamente as propriedades 1 e 3. Nos lotes da propriedade 2 menos de 5% de plantas foram erradicadas com sintomas, apesar dos plantios terem ocorrido em 2010.

Tabela 3. Incidências acumuladas de plantas com HLB erradicadas nos lotes das propriedades 1, 2 e 3 entre os anos 2013 e 2017.

Propriedade	Lote	Plantio	Anos				
			2013	2014	2015	2016	2017
1	37	2009	2,16	3,10	-	4,66	-
	38	2009	1,81	3,56	-	5,22	-
	39	2009	1,44	2,06	-	3,39	-
	40	2009	1,57	2,34	-	3,53	-
	197	2012	0,47	0,67	0,79	1,52	-
	198	2012	0,41	0,58	0,65	1,28	-
	199	2012	0,32	0,54	0,58	1,57	-
	200	2012	0,43	0,59	0,62	1,23	-
	204	2012	0,51	0,74	0,83	1,61	-
	205	2012	0,25	0,43	0,49	0,71	-
	206	2012	0,53	0,70	0,75	1,46	-
2	33	2010	0,50	0,91	2,12	3,59	4,44
	34	2010	0,34	1,71	3,24	3,78	4,65
3	403	2011	1,75	3,08	-	11,78	12,48
	502	2011	-	1,24	-	13,89	14,23
	503	2012	-	3,07	-	11,40	12,04
	504	2012	-	2,81	-	9,33	9,88
	505	2012	-	3,70	3,74	11,57	19,46
	506	2012	-	2,95	-	9,75	17,50
	507	2012	-	4,35	-	13,40	13,77
	508	2013	-	5,35	-	11,03	11,50

Nos ajustes dos modelos potência inversa e exponencial negativo, para as proporções de plantas determinadas na forma concêntrica, as análises de variância das regressões não lineares foram significativas para todos os lotes. No entanto, o ajuste desses modelos não ocorreu em todos os casos (Tabelas 4 a 6). Apenas dois lotes (502 e 507) apresentaram ajustes para ambos os modelos. O modelo potência inversa se ajustou a 15 dos 21 lotes avaliados. Os lotes que não apresentaram ajustes para qualquer modelo foram os de números 200, 204, 205, 206, 506 e 508.

Tabela 4. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 1 (matrizes concêntricas).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
37	16-Nov	0,211	0,375	+	0,89	0,066	0,005	-	0,79
38	16-Nov	1,000	0,840	+	0,96	0,136	0,016	-	0,84
39	16-Nov	0,196	0,423	+	0,81	0,051	0,005	-	0,69
40	16-Nov	0,198	0,406	+	0,93	0,057	0,005	-	0,85
197	16-Nov	0,067	0,349	+	0,80	0,021	0,003 ^{NS}	-	0,60
198	16-Nov	0,090	0,456	+	0,91	0,023	0,006	-	0,88
199	16-Nov	0,165	0,567	+	0,89	0,028	0,007	-	0,78
200	16-Nov	0,322 ^{NS}	0,806	+	0,87	0,029	0,011	-	0,72
204	16-Nov	0,174 ^{NS}	0,568	-	0,80	0,027	0,006	-	0,61
205	16-Nov	0,034 ^{NS}	0,376 ^{NS}	-	0,55	0,011	0,005 ^{NS}	-	0,53
206	16-Nov	0,045 ^{NS}	0,263 ^{NS}	-	0,58	0,019	0,003 ^{NS}	-	0,50

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa para todas as análises (p≤0,05)

Tabela 5. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 2 (matrizes concêntricas).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
33	17-Mar	0,201	0,366	+	0,79	0,06	0,004 ^{NS}	-	0,57
34	17-Mar	0,274	0,436	+	0,90	0,067	0,005	-	0,72

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa para todas as análises (p≤0,05)

Tabela 6. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 3 (matrizes concêntricas).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
403	17-Mar	0,558	0,362	+	0,97	0,184	0,005	-	0,91
502	17-Mar	0,332	0,201	+	0,84	0,178	0,003	+	0,81
503	17-Mar	0,504	0,342	+	0,92	0,166	0,004	-	0,75
504	17-Mar	0,361	0,305	+	0,95	0,139	0,004	-	0,88
505	17-Mar	0,494	0,220	+	0,92	0,240	0,002 ^{NS}	-	0,79
506	17-Mar	0,205	0,039 ^{NS}	-	0,30	0,181	0,000 ^{NS}	-	0,29
507	17-Mar	0,303	0,202	+	0,96	0,170	0,003	+	0,98
508	17-Mar	0,254	0,196	-	0,87	0,141	0,003	-	0,83

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa para todas as análises (p<0,05)

Embora os valores do parâmetro “a” tenham variado de 0,07 (lote 197) a 1,00 (lote 38), a maior parte dos ajustes para o modelo potência inversa resultou em valores desse parâmetro entre 0,2 e 0,5 (Tabelas 4 a 6). Para esse mesmo modelo, os valores do parâmetro “b” variaram de 0,2 a 0,4, exceto para os lotes 38 (0,84) e 199 (0,57). Os ajustes para os lotes da propriedade 3 apresentaram maiores valores para o parâmetro “a” (de 0,3 a 0,6), e menores para o parâmetro “b” (0,2 a 0,3), comparativamente ao observado para os lotes das propriedades 1 e 2 (a≤0,3 e b de 0,4 a 0,5), exceto para o lote 38.

Os lotes da propriedade 3 apresentaram as maiores incidências de plantas com HLB (Tabela 3). O reflexo dessas maiores incidências pode ser observado nos gradientes apresentados nas Figuras 3 a 5. Comparativamente aos lotes das propriedades 1 e 2, com incidências entre 1,3% e 5,2%, os lotes da propriedade 3 apresentaram gradientes menos acentuados, resultantes dos menores valores do parâmetro “b” (Figura 5). As maiores incidências de HLB nos lotes da propriedade 3 também resultaram em maiores valores para o parâmetro “a”, o que indica maiores incidências de plantas doentes nas bordas desses lotes. Nesse sentido, os gradientes de HLB e os ajustes dos modelos potência inversa e exponencial negativo para os lotes da propriedade 3, demonstram as maiores incidências de plantas com HLB tanto nas bordas quanto internamente nesses lotes.

Figura 3. Gradientes de plantas com HLB erradicadas nos lotes da propriedade 1 (matrizes concêntricas). A linha contínua representa o modelo potência inversa e os pontos os dados observados da proporção de plantas a cada 20 metros. O número no canto superior direito refere-se ao número do lote.

Figura 4. Gradientes de plantas com HLB erradicadas nos lotes da propriedade 2 (matrizes concêntricas). A linha contínua representa o modelo potência inversa e os pontos os dados observados da proporção de plantas a cada 20 metros. O número no canto superior direito refere-se ao número do lote.

Figura 5. Gradientes de plantas com HLB erradicadas nos lotes da propriedade 3 (matrizes concêntricas). A linha contínua representa o modelo potência inversa, a linha tracejada o modelo exponencial negativo, e os pontos os dados observados da proporção de plantas a cada 20 metros. O número no canto superior direito refere-se ao número do lote.

Na Figura 6 estão apresentadas as proporções de plantas com HLB do lote 199, nas classes de distâncias estudadas, e os modelos de gradiente potência inversa e exponencial negativo. Os dados desse lote se ajustaram apenas ao modelo potência inversa (Tabela 4). Nessa figura observa-se como a distribuição de plantas doentes ocorre de modo diferente para esses modelos. Uma distribuição de plantas seguindo o modelo potência inversa implica em maiores incidências na borda da área afetada e um acentuado decréscimo das mesmas para o interior da área. Esse modelo também descreve proporcionalmente mais plantas doentes distribuídas no interior do lote, a distâncias maiores a partir da borda, em comparação ao modelo exponencial negativo. Para os casos estudados no presente trabalho,

maiores concentrações de plantas doentes ocorreram até aproximadamente 40 metros a partir da borda e plantas doentes presentes até o centro dos lotes.

Figura 6. Gradientes de plantas com HLB erradicadas no lote 199 (matriz concêntrica). A linha contínua representa o modelo potência inversa, a linha tracejada o modelo exponencial negativo, e os pontos os dados observados da proporção de plantas a cada 20 metros.

Não foram observados ajustes para a grande maioria dos lotes e direções avaliadas quando da análise dos dados da forma direcional. Embora na maior parte dos casos as análises de regressão tenham sido significativas, foram observados baixos coeficientes de determinação, parâmetros “a” e “b” não significativos e distribuições inadequadas dos resíduos (Tabelas 7 a 18). Para apenas cinco lotes (37, 38, 40, 199 e 34) os dados se ajustaram ao modelo potência inversa, isso tendo ocorrido para os sentidos de A para C (lotes 38 e 40), de B para D (lote 34) e de D para B (lotes 37, 38 e 199). Os coeficientes de determinação observados nesses ajustes variaram de 0,86 a 0,92. Os valores observados do parâmetro “a” foram de 2,8; 0,7; 0,4; 0,5; 0,9 e 0,1, para os lotes 38, 40, 34, 37, 38 e 199, respectivamente e do parâmetro “b” de 0,8; 0,6; 0,4; 0,5; 0,6 e 0,5, respectivamente para esses lotes. Não ocorreram ajustes para o modelo exponencial negativo. Os gradientes de plantas com HLB e os dados ajustados ao modelo potência inversa estão apresentados nas Figuras 7 a 9.

Tabela 7. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 1 (direcional, A para C).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
37	16-Nov	ANOVA não significativa							
38	16-Nov	2,848	0,811	+	0,88	0,364	0,021	-	0,66
39	16-Nov	0,148	0,292	-	0,59	0,042	0,001 ^{NS}	-	0,30
40	16-Nov	0,702	0,599	+	0,92	0,088	0,005	-	0,72
197	16-Nov	ANOVA não significativa							
198	16-Nov	0,111	0,461	-	0,75	0,022	0,004	-	0,63
199	16-Nov	0,067	0,306 ^{NS}	-	0,61	0,023	0,002	-	0,59
200	16-Nov	0,085	0,388 ^{NS}	-	0,65	0,017	0,002	-	0,40
204	16-Nov	1,137 ^{NS}	0,912 ^{NS}	+	0,85	0,228 ^{NS}	0,050	-	0,68
205	16-Nov	0,043	0,347	-	0,49	0,016	0,004	-	0,63
206	16-Nov	0,281 ^{NS}	0,621 ^{NS}	+	0,81	0,038	0,006	-	0,73

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa ($p \leq 0,05$) para as análises que apresentam todos os parâmetros

Tabela 8. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 2 (direcional, A para C).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
33	17-Mar	0,541 ^{NS}	0,551	-	0,79	0,086	0,005 ^{NS}	-	0,56
34	17-Mar	0,803	0,606	-	0,84	0,095	0,005	-	0,58

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa para todas as análises ($p \leq 0,05$)

Tabela 9. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 3 (direcional, A para C).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
403	17-Mar	0,537 ^{NS}	0,307	+	0,87	0,171	0,002	-	0,63
502	17-Mar	0,136	0,009	-	0,06	0,135	0,000	-	0,22
503	17-Mar	ANOVA não significativa							
504	17-Mar	0,187	0,127	-	0,57	0,121	0,001	-	0,56
505	17-Mar	0,152	0,05	-	0,01	0,163	0,000	-	0,42
506	17-Mar	0,190	0,011 ^{NS}	-	0,06	0,188	0,000 ^{NS}	-	0,17
507	17-Mar	0,258 ^{NS}	0,135 ^{NS}	-	0,55	0,151	0,001	-	0,34
508	17-Mar	0,201 ^{NS}	0,143 ^{NS}	-	0,45	0,102	0,000	-	0,08

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa (p≤0,05) para as análises que apresentam todos os parâmetros

Tabela 10. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 1 (direcional, B para D).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
37	16-Nov	0,201	0,326 ^{NS}	-	0,46	0,045	0,000	-	0,06
38	16-Nov	0,222 ^{NS}	0,357 ^{NS}	-	0,69	0,060	0,002	-	0,47
39	16-Nov	0,045	0,074 ^{NS}	-	0,21	0,031	0,000	-	0,01
40	16-Nov	0,066	0,120 ^{NS}	-	0,37	0,088	0,005	-	0,72
197	16-Nov	0,089	0,376	-	0,69	0,022	0,003	-	0,54
198	16-Nov	0,105	0,472 ^{NS}	-	0,73	0,023	0,005	-	0,71
199	16-Nov	ANOVA não significativa							
200	16-Nov	0,037	0,307 ^{NS}	-	0,61	0,012	0,002	-	0,46
204	16-Nov	0,067	0,088 ^{NS}	-	0,54	0,024	0,002	-	0,51
205	16-Nov	0,136 ^{NS}	0,601 ^{NS}	-	0,72	0,020	0,006	-	0,67
206	16-Nov	ANOVA não significativa							

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa (p≤0,05) para as análises que apresentam todos os parâmetros

Tabela 11. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 2 (direcional, B para D).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
33	17-Mar	0,091	0,148	-	0,39	0,046	0,000	-	0,40
34	17-Mar	0,448	0,451	+	0,91	0,090	0,003	-	0,80

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa para todas as análises ($p \leq 0,05$)

Tabela 12. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 3 (direcional, B para D).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
403	17-Mar	0,302 ^{NS}	0,189	-	0,63	0,140	0,001	-	0,43
502	17-Mar	0,325	0,179 ^{NS}	-	0,63	0,184	0,002	-	0,74
503	17-Mar	0,687 ^{NS}	0,367	+	0,89	0,198	0,003	-	0,82
504	17-Mar	0,485 ^{NS}	0,320	-	0,87	0,154	0,002	-	0,75
505	17-Mar	0,292	0,076	-	0,41	0,211	0,000 ^{NS}	-	0,31
506	17-Mar	0,157	0,020 ^{NS}	-	0,08	0,153	0,000 ^{NS}	-	0,28
507	17-Mar	0,519 ^{NS}	0,278	-	0,90	0,201	0,003	-	0,77
508	17-Mar	0,135	0,038	-	0,23	0,119	0,000	-	0,23

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa para todas as análises ($p \leq 0,05$)

Tabela 13. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 1 (direcional, C para A).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
37	16-Nov	0,110	0,154	-	0,46	0,057	0,001	-	0,28
38	16-Nov	ANOVA não significativa							
39	16-Nov	0,102	0,235 ^{NS}	-	0,52	0,040	0,001	-	0,38
40	16-Nov	ANOVA não significativa							
197	16-Nov	0,096	0,362 ^{NS}	-	0,66	0,023	0,002	-	0,48
198	16-Nov	ANOVA não significativa							
199	16-Nov	0,193 ^{NS}	0,539 ^{NS}	-	0,76	0,028	0,004	-	0,57
200	16-Nov	0,052	0,292 ^{NS}	-	0,41	0,014	0,001	-	0,15
204	16-Nov	0,087	0,367 ^{NS}	-	0,60	0,019	0,001	-	0,33
205	16-Nov	0,096	0,641 ^{NS}	-	0,78	0,011	0,006	-	0,58
206	16-Nov	ANOVA não significativa							

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa (p≤0,05) para as análises que apresentam todos os parâmetros

Tabela 14. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 2 (direcional, C para A).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
33	17-Mar	0,213	0,397	-	0,70	0,056	0,004	-	0,48
34	17-Mar	0,112	0,193 ^{NS}	-	0,45	0,046	0,000	-	0,13

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa para todas as análises (p≤0,05)

Tabela 15. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 3 (direcional, C para A).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
403	17-Mar	0,300	0,207	-	0,79	0,141	0,002	-	0,65
502	17-Mar	0,184	0,051	-	0,36	0,156	0,000	-	0,50
503	17-Mar	0,492 ^{NS}	0,271	-	0,81	0,165	0,001	-	0,58
504	17-Mar	0,085	0,030 ^{NS}	-	0,14	0,092	0,000	-	0,25
505	17-Mar	0,504	0,186	-	0,68	0,235	0,000	-	0,42
506	17-Mar	0,171	0,000 ^{NS}	-	0,03	0,170	0,000 ^{NS}	-	0,17
507	17-Mar	0,240	0,122	-	0,62	0,159	0,001	-	0,63
508	17-Mar	0,391 ^{NS}	0,252 ^{NS}	-	0,68	0,169	0,002	-	0,74

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa para todas as análises (p≤0,05)

Tabela 16. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 1 (direcional, D para B).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
37	16-Nov	0,476	0,490	+	0,92	0,088	0,004	-	0,77
38	16-Nov	0,935	0,611	+	0,92	0,114	0,005	-	0,70
39	16-Nov	0,105	0,231 ^{NS}	-	0,55	0,039	0,001	-	0,28
40	16-Nov	0,073	0,146	-	0,53	0,043	0,000	-	0,49
197	16-Nov	0,034	0,195 ^{NS}	-	0,54	0,016	0,001	-	0,34
198	16-Nov	0,093 ^{NS}	0,474 ^{NS}	-	0,63	0,023	0,007	-	0,66
199	16-Nov	0,152	0,461	+	0,86	0,028	0,003	-	0,66
200	16-Nov	0,701 ^{NS}	0,879 ^{NS}	+	0,90	0,052	0,013	-	0,70
204	16-Nov	ANOVA não significativa							
205	16-Nov	ANOVA não significativa							
206	16-Nov	ANOVA não significativa							

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa (p≤0,05) para as análises que apresentam todos os parâmetros

Tabela 17. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 2 (direcional, D para B).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
33	17-Mar	0,051	0,047	-	0,15	0,043	0,000	-	0,38
34	17-Mar	ANOVA não significativa							

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa (p≤0,05) para as análises que apresentam todos os parâmetros

Tabela 18. Resultados das análises de regressão quanto aos ajustes de modelos de gradiente para os lotes da propriedade 3 (direcional, D para B).

Lote	Data (ano-mês)	Potência Inversa				Exponencial Negativo			
		a ¹	b ²	resíduo ³	R ^{2a}	a	b	resíduo	R ²
403	17-Mar	0,347	0,209	-	0,70	0,151	0,001	-	0,54
502	17-Mar	0,314	0,167	-	0,47	0,150	0,000 ^{NS}	-	0,17
503	17-Mar	0,227	0,149 ^{NS}	-	0,42	0,114	0,000 ^{NS}	-	0,08
504	17-Mar	0,222	0,201	-	0,62	0,104	0,001 ^{NS}	-	0,42
505	17-Mar	0,189	0,002 ^{NS}	-	0,01	0,176	0,000 ^{NS}	-	0,28
506	17-Mar	0,279	0,092 ^{NS}	-	0,41	0,192	0,000 ^{NS}	-	0,28
507	17-Mar	0,446 ^{NS}	0,298 ^{NS}	-	0,85	0,184	0,005	-	0,76
508	17-Mar	ANOVA não significativa							

1. Parâmetro relacionado a incidência da doença no perímetro do lote

2. Parâmetro relacionado ao coeficiente angular

3. Resíduo: (+) indica distribuição adequada dos resíduos e (-) indica distribuição inadequada dos resíduos

a. Coeficiente de determinação obtido pelo ajuste do modelo

NS Valores não significativos dos parâmetros em relação ao teste T

ANOVA significativa (p≤0,05) para as análises que apresentam todos os parâmetros

Figura 7. Gradientes de plantas com HLB erradicadas nos lotes 38 e 40 (direcional, de A para C). A linha contínua representa o modelo potência inversa e os pontos os dados observados da proporção de plantas a cada 20 metros.

Figura 8. Gradiente de plantas com HLB erradicadas no lote 34 (direcional, de B para D). A linha contínua representa o modelo potência inversa e os pontos os dados observados da proporção de plantas a cada 20 metros.

Figura 9. Gradientes de plantas com HLB erradicadas nos lotes 37, 38 e 199 (direcional, de D para B). A linha contínua representa o modelo potência inversa e os pontos os dados observados da proporção de plantas a cada 20 metros.

Os mapas com as distribuições dos lotes nas propriedades 1 a 3 e as direções avaliadas para os ajustes dos modelos de gradiente estão apresentados nas Figuras 10 a 12. Dos seis ajustes direcionais observados, cinco deles ocorreram para lotes da propriedade 1 (37, 38, 40 e 199) e apenas um para o lote 34 da propriedade 2. Os ajustes ocorreram para lotes localizados lado a lado de pomares mais velhos de citros (lotes 37 e 38, sentido D para B) ou quando os lotes eram vizinhos de áreas sem citros (lotes 38 e 40, sentido A para C, lote 199, sentido A para C, e lote 34, sentido B para D).

Figura 10. Localização dos lotes avaliados na propriedade 1. As setas em branco indicam a direção e sentido para avaliação dos ajustes de modelos de gradiente de forma direcional. Triângulos em branco indicam as áreas sem citros e a estrela a pista de pouso para aviões. A linha em vermelho delimita a divisa da propriedade. Imagem do Google Earth.

Figura 11. Localização dos lotes avaliados na propriedade 2. As setas em branco indicam a direção e sentido para avaliação dos ajustes de modelos de gradiente de forma direcional. Triângulos em branco indicam as áreas sem citros, a estrela a pista de pouso para aviões e os círculos em branco os lotes de citros de propriedades vizinhas. A linha em vermelho delimita a divisa da propriedade. Imagem do Google Earth.

Figura 12. Localização dos lotes avaliados na propriedade 2. As setas em branco indicam a direção e sentido para avaliação dos ajustes de modelos de gradiente de forma direcional. Triângulos em branco indicam as áreas sem citros, a estrela a sede da fazenda e os círculos em branco os lotes de citros de propriedades vizinhas. A linha em vermelho delimita a divisa da propriedade. Imagem do Google Earth.

5. DISCUSSÃO

Este estudo mostra a quantificação de um dos processos epidemiológicos do HLB, isto é, a variação da intensidade da doença em relação à distância das fontes de inóculo. Estudos desse tipo são difíceis de serem realizados, uma vez que as epidemias de HLB têm duração plurianual e são raros os plantios que progridem com uma alta incidência da doença antes de se tornarem improdutivos e serem removidos (Gottwald *et al.*, 2007b; Gottwald, 2010). O aumento do HLB e a distribuição espacial regional, relacionada à população de vetores, são rápidos em comparação com outros patossistemas (Gottwald, 2010). Chinelato (2017) relatou que altas populações de adultos bacterilíferos explicam a rápida propagação do HLB, apesar dos esforços adotados na prevenção de novas infecções, como os adotados nas propriedades 1, 2 e 3.

Os dados aqui apresentados mostram a importância da disseminação primária no progresso da doença. O gradiente de dispersão da doença foi bem descrito pelo modelo da potência inversa. Assim como mostrado por Gasparoto *et al.* (2018), plantas sintomáticas foram observadas principalmente próximas às bordas dos talhões, independentemente da incidência da doença, com subsequente decréscimo de plantas infectadas na medida em que se avança para o interior do talhão. Quando o manejo é feito de forma rigorosa, como nas propriedades aqui estudadas, com pulverização frequente de inseticida e monitoramento do inseto vetor, a disseminação secundária ocorrerá raramente. Essa situação epidemiológica é chamada de disseminação primária contínua por Bergamin Filho *et al.* (2016).

Os ajustes dos dados ao modelo da potência inversa sugerem que os lotes sofreram influência de fontes de inóculo externas, ou seja, psíldeos infectivos pousam preferencialmente nas bordas dos pomares e uma pequena parte adentra o interior dos lotes. Esse cenário é compatível com a ideia da maior importância da disseminação primária neste patossistema, o que tem como consequência a necessidade do manejo regional, como preconizado por Bassanezi *et al.* (2013b) e Bergamin Filho *et al.* (2016).

Ao contrário do modelo potência inversa, evidenciado nesse trabalho, o exponencial negativo nos leva a um cenário onde não há deposição do patógeno longe da fonte e o gradiente tende rapidamente a zero, como por exemplo para patógenos disseminados por respingos de chuva. Esse era o caso do cancro cítrico anteriormente à introdução do minador dos citros (*Phyllocnistis citrella*). Embora o HLB e o cancro cítrico

sejam doenças disseminadas de maneiras diferentes, a propagação do cancro cítrico foi facilitada para plantas localizadas no interior de pomares em razão das galerias feitas pela larva, seguindo o modelo potência (Gottwald *et al.*, 2007a).

Gottwald *et al.* (2009a), estudando a distribuição de plantas com HLB em pomares no sul da Flórida, dimensionaram o chamado “efeito de borda” e verificaram o ajuste do modelo potência para as epidemias de HLB. Os autores encontraram uma forte diminuição curvilínea no número de plantas infectadas por hectare em função da distância da borda. Os parâmetros “a” e “b” do modelo potência encontrados no presente estudo foram similares ao de Gottwald *et al.* (2009a). Isso demonstra que a dispersão dos adultos ao longo de plantas dentro de um pomar ocorre de forma similar nas duas regiões, apesar das maiores incidências de plantas doentes na Florida. Assim, o gradiente de dispersão dos adultos deve ser fortemente dependente do comportamento do inseto e menos de fatores abióticos ou das ações adotadas para o manejo da doença.

A maior incidência da doença na periferia dos lotes, como já mencionado, sugere que grande parte das infecções seja de origem primária, com as fontes de inóculo localizadas externamente aos lotes. A preferência de *D. citri* por plantas de borda é um comportamento inato e não depende apenas do tamanho das plantas. Além disso, essas plantas são caracterizadas por uma maior iluminação, a qual tende a produzir brotos antes das plantas internas (Sétamou & Bartels, 2015). Psílídeos são insetos diurnos (Sétamou *et al.*, 2012), atraídos por áreas de contraste de luz, como aquele que caracteriza a transição de dois ecossistemas (Sétamou & Bartels, 2015), como, por exemplo, a interface de um pomar com matas, carreadores, etc. (Gottwald *et al.*, 2009a; Ulian, 2016). Como visto no presente trabalho, uma pequena parte da população de adultos que chega aos pomares se dispersa para plantas localizadas no seu o interior, enquanto a maior parte se instala nas plantas localizadas nas primeiras dezenas de metros da borda. O parâmetro “b” do modelo potência inversa indica matematicamente a diluição na população do vetor que ocorre da periferia para o centro dos pomares, até algumas centenas de metros de distância, como observado por Gottwald *et al.* (2009a) e Gasparoto *et al.* (2018).

Em ambas as abordagens analisadas, concêntrica e direcional, os dados se ajustaram melhor ao modelo potência inversa. No entanto, para apenas seis situações ocorreram ajustes quando da análise direcional dos gradientes. Isso demonstra que há claramente um gradiente de doença, da borda para o interior dos lotes, e que o influxo de

adultos do vetor ocorre em todas as direções e sentidos, independentemente da presença de carreadores, pomares ou outras coberturas vegetais circunvizinhas. Para os casos em que foram observados ajustes numa única direção, os lotes estavam localizados ao lado de vários pomares mais velhos ou de extensas áreas com pastagem.

Na epidemiologia tradicional considera-se que a função da disseminação primária é introduzir o patógeno em áreas indenidas. Mas para as doenças policíclicas com disseminação primária contínua, como o caso do HLB, a disseminação primária também mantém elevada a taxa de progresso da doença (Bergamin Filho *et al.*, 2016; Bergamin Filho, 2018). O controle químico local do vetor, nesse caso, tem um efeito limitado na taxa de progresso da doença, uma vez que adultos infectivos imigrantes podem transmitir a bactéria antes de serem mortos. A infecção primária, assim, não é evitada (Bergamin Filho *et al.*, 2016). No presente estudo também foi observado que a disseminação primária foi a predominante nas epidemias analisadas nas três propriedades. Apesar dos esforços na erradicação de plantas e controle do vetor, as perdas anuais de plantas chegaram a 4% para alguns lotes na propriedade 3. Segundo Bassanezi *et al.* (2013a), quanto menor a parcela ou lote de citros, maior é a influência da disseminação primária comparada à disseminação secundária e menos eficaz é a tentativa de controlar a doença localmente. Isso ocorre devido ao constante movimento de adultos de *D. citri* entre pomares (Boina *et al.*, 2009) e sua alta capacidade de dispersão, de pelo menos 2 km, como demonstrado por Lewis-Rosenblum *et al.* (2015).

Historicamente, considera-se que o controle do HLB deve ser preventivo e seu princípio basear-se em um tripé que consiste na utilização de mudas sadias, no controle do vetor e na erradicação de plantas sintomáticas (Bové, 2006). Belasque Jr *et al.* (2010) ainda pontuam características importantes para o possível sucesso no controle do HLB: grandes propriedades (com mais de um milhão de árvores); plantios em áreas de baixa incidência da doença; pomares adultos (mais ou menos 5 anos); pomares vizinhos com distância de pelo menos 5 km; manejar a doença desde seu início. Porém sabe-se que esses fatores não são fáceis e aplicáveis para todas as situações. Hoje, podemos considerar essencial para o sucesso do manejo seu aspecto regional. A efetividade do manejo regional foi demonstrada experimentalmente pela primeira vez por Bassanezi *et al.* (2013b). O gradiente de dispersão da doença demonstrado neste trabalho é consequência da disseminação primária, a qual só poderá ser evitada com o manejo regional. Se tal disseminação não for evitada, de nada

adiantará o correto manejo local. Plantas cítricas presentes em áreas residenciais, matas, canaviais, pastagens ou áreas de preservação permanente são mais importantes como fonte de inóculo de HLB do que pomares comerciais de laranja submetidos a rigoroso controle químico (Arruda, 2017). A importância de um controle mais intensivo do patógeno e do psíldeo no entorno dos pomares vem sendo bastante enfatizada atualmente (Bassanezi *et al.*, 2013b; Bergamin Filho *et al.*, 2016; Gasparoto *et al.*, 2018).

O tratamento químico mais intensivo realizado na borda de algumas propriedades tem efeito limitado para o controle do vetor, pois não impede a entrada de adultos infectivos que se dispersaram de fontes de inóculo de áreas vizinhas. Sétamou & Bartels (2015) afirmam que essas aplicações de inseticidas apenas nas bordas têm potencial para reduzir a incidência da doença na periferia dessas áreas, mas isso não impede o avanço da doença para o interior do lote. Outra forma de manejo adotada é o plantio de novas áreas com linhas de plantas paralelas à divisa da propriedade. Em hipótese, essa prática reduziria o número de adultos do vetor que adentram os pomares. Ensaio de campo estão sendo realizados, ainda sem resultados disponíveis. No mesmo conceito para o manejo, em algumas propriedades já estão sendo instaladas plantas de *Murraya koenigii*, conhecida por *curry* (Beloti *et al.*, 2018), uma espécie de rutácea atrativa para *D. citri*, mas imune ao patógeno. Essas plantas serviriam como “isca”, atraindo os adultos imigrantes, os quais morreriam pela ação dos inseticidas frequentemente aplicados nas mesmas.

6. CONCLUSÕES

O modelo potência inversa descreveu adequadamente o gradiente de plantas erradicadas com HLB para a maioria dos lotes estudados. A dispersão dos adultos do vetor ocorreu, nesses lotes, em várias direções e sentidos, independentemente da localização dos lotes e das suas vizinhanças. Plantas doentes se concentraram nas primeiras dezenas de metros a partir da borda dos lotes e avançaram para o interior do mesmo com baixa incidência.

REFERÊNCIAS

- Albrecht U, Bowman KD, 2009. *Candidatus Liberibacter asiaticus* and *Huanglongbing* Effects on Citrus Seeds and Seedlings. *HortScience* **44**, 1967–1973.
- Albrecht U, Bowman KD, 2011. Tolerance of the Trifoliate Citrus Hybrid US-897 (Citrus reticulata Blanco x Poncirus trifoliata L. Raf.) to *Huanglongbing*. *Hortscience* **46**, 16–22.
- Arruda JH, 2017. Disseminação primária e influência de fontes de inóculo sobre o progresso temporal do *Huanglongbing* em pomares com manejo da doença e seu vetor (*Diaphorina citri*). Universidade de São Paulo.
- Asato FP, 2018. Eficiência da pulverização de inseticida na borda dos talhões no manejo do *huanglongbing*. FUNDECITRUS.
- Bassanezi RB, Bassanezi RC, 2008. An approach to model the impact of *Huanglongbing* on citrus yield.
- Bassanezi RB, Belasque J, Montesino LH, 2013a. Frequency of symptomatic trees removal in small citrus blocks on citrus *huanglongbing* epidemics. *Crop Protection* **52**, 72–77.
- Bassanezi RB, Lopes SA, Belasque Jr J *et al.*, 2010. Epidemiologia do *huanglongbing* e suas implicações para o manejo da doença. *Citrus Research & Technology* **31**, 11–23.
- Bassanezi RB, Montesino LH, Gimenes-Fernandes N *et al.*, 2013b. Efficacy of Area-Wide Inoculum Reduction and Vector Control on Temporal Progress of *Huanglongbing* in Young Sweet Orange Plantings. *Plant Disease* **97**, 789–796.
- Bassanezi RB, Montesino LH, Stuchi ES, 2009. Effects of *huanglongbing* on fruit quality of sweet orange cultivars in Brazil. *European Journal of Plant Pathology* **125**, 565–572.
- Belasque Jr J, Bassanezi RB, Yamamoto PT *et al.*, 2010. Lessons from *Huanglongbing* management in São Paulo State, Brazil. *Journal of Plant Pathology* **92**, 285–302.
- Belasque Jr J, Bergamin Filho A, Bassanezi RB *et al.*, 2009. Base científica para a erradicação de plantas sintomáticas e assintomáticas de *Huanglongbing* (HLB, Greening) visando o controle efetivo da doença. *Tropical Plant Pathology* **34**, 137–145.
- Beloti VH, Alves GR, Coletta-Filho HD, Yamamoto PT, 2018. The Asian Citrus Psyllid Host *Murraya koenigii* Is Immune to Citrus Huanglongbing Pathogen “*Candidatus Liberibacter asiaticus*.” *Phytopathology* **108**, 1089–1094.
- Bergamin Filho A, 2018. Análise Temporal de Epidemias. In: Amorim L, Rezende JAM, Bergamin Filho A, eds. *Manual de Fitopatologia*. Ouro Fino- MG: Agrônômica Ceres, 519–550.
- Bergamin Filho A, Hau B, Amorim L, Laranjeira FF, 2002. Análise espacial de epidemias. *Revisão Anual de Patologia de Plantas*, 155–218.
- Bergamin Filho A, Inoue-Nagata AK, Bassanezi RB *et al.*, 2016. The importance of primary inoculum and area-wide disease management to crop health and food security. *Food Security* **8**, 221–238.
- Boina DR, Meyer WL, Onagbola EO, Stelinski LL, 2009. Quantifying Dispersal of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) by Immunomarking and Potential Impact of Unmanaged Groves on Commercial Citrus Management. *Environmental Entomology* **38**, 1250–1258.
- Bonani JP, 2009. Caracterização do aparelho bucal e comportamento alimentar de *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) em Citrus sinensis (L.) Osbeck. Piracicaba: Universidade de São Paulo.
- Bové JM, 2006. *Huanglongbing*: A destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. *Journal of Plant Pathology* **88**, 7–37.
- Bové JM, 2014. *Huanglongbing* or yellow shoot, a disease of Gondwanan origin: Will it destroy citrus worldwide? *Phytoparasitica* **42**, 579–583.

- Bové JM, Teixeira D do C, Wulff NA *et al.*, 2008. Several *Liberibacter* and *Phytoplasma* Species are Individually Associated with HLB. In: *IRCHLB Proceedings*. 152–155.
- Campbell CL, Madden L V, 1990. *Introduction to plant disease epidemiology*. New York.
- Capoor SP, Rao DG, Viswanath SM, 1974. Greening Disease of Citrus in the Deccan Trap Country and its Relationship with the Vector, *Diaphorina citri* Kuwayama. In: *Proceedings of the 6th Conference of the International Organization of Citrus Virologists*. University of California, Division of Agricultural Sciences, 43–49.
- Chinelato GA, 2017. Dinâmica temporal e distribuição espacial de *Huanglongbing* (HLB, Greening) e seu inseto vetor (*Diaphorina citri*) Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). Universidade de São Paulo.
- Coletta-Filho HD, Targon MLPN, Takita MA *et al.*, 2004. First Report of the Causal Agent of *Huanglongbing* (“*Candidatus Liberibacter asiaticus*”) in Brazil. *Plant Disease* **88**, 1382–1382.
- Coordenadoria de Defesa Agropecuária do Estado de São Paulo, 2017. Dados da Citricultura Paulista.
- Costa Lima AM, 1942. *Insetos Do Brasil, Homoptera* (GEN De Agronomia, Ed.). Rio de Janeiro: Escola Nacional De Agronomia.
- Esker PD, Sparks AH, Antony G *et al.*, 2007. Ecology and Epidemiology in R: Modeling dispersal gradients. *The Plant Health Instructor*.
- FAOSTAT, 2017. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FNP, 2016. *Agrianual 2016: anuário de agricultura brasileira*. São Paulo.
- FUNDECITRUS, 2017. INVENTÁRIO DE ÁRVORES E ESTIMATIVA DE SAFRA DE LARANJA 2017/18 DO CINTURÃO CITRÍCOLA DE SÃO PAULO E TRIÂNGULO/SUDOESTE MINEIRO. *FUNDECITRUS - Fundo de Defesa da Citricultura*.
- FUNDECITRUS, 2018a. LEVANTAMENTO DA INCIDÊNCIA DAS DOENÇAS DOS CITROS GREENING, CVC E CANCRO CÍTRICO NO CINTURÃO CITRÍCOLA DE SÃO PAULO E TRIÂNGULO/SUDOESTE MINEIRO 2018. *Funde de Defesa da Citricultura, FUNDECITRUS*, 1–57.
- FUNDECITRUS, 2018b. INVENTÁRIO DE ÁRVORES E ESTIMATIVA DA SAFRA DE LARANJA 2018/19 DO CINTURÃO CITRÍCOLA DE SÃO PAULO E TRIÂNGULO/SUDOESTE MINEIRO SEÇÃO I. *FUNDECITRUS - Fundo de Defesa da Citricultura*.
- FUNDECITRUS, 2019. Reestimativa da Safra de Laranja 2018/2019 do Cinturão Citrícola de São Paulo e Triângulo/Sudoeste Mineiro - Cenário em Fevereiro/2019. *FUNDECITRUS (Fundo de Defesa da Citricultura)*, 1–2.
- Gasparoto MCG, Hau B, Bassanezi RB, Rodrigues JC, Amorim L, 2018. Spatiotemporal dynamics of citrus *huanglongbing* spread: a case study. *Plant Pathology* **67**, 1621–1628.
- George J, Ammar E-D, Hall DG, Lapointe SL, 2017. Sclerenchymatous ring as a barrier to phloem feeding by Asian citrus psyllid: Evidence from electrical penetration graph and visualization of stylet pathways (M Ghanim, Ed.). *PLOS ONE* **12**, 1–15.
- Gottwald TR, 2010. Current Epidemiological Understanding on Citrus *Huanglongbing*. *Annual review of phytopathology* **48**, 119–139.
- Gottwald TR, Bassanezi RB, Amorim L, Bergamin Filho A, 2007a. Spatial Pattern Analysis of Citrus Canker-Infected Plantings in São Paulo, Brazil, and Augmentation of Infection Elicited by the Asian Leafminer. *Phytopathology* **97**, 674–683.
- Gottwald TR, Bassanezi RB, Graça J V., 2007b. Citrus *Huanglongbing*: The Pathogen and Its Impact. *Plant Health Progress*, 1–35.

- Gottwald TR, Gast T, Parnell SR, Taylor EL, Hilf ME, 2010. Spatio-temporal Analysis of an HLB Epidemic in Florida and Implications for Spread. In: *Conference IOCV-Insect Transmitted Procarlyotes*. 84–97.
- Gottwald T, Irey M, Gast T, 2009a. The Plantation Edge Effect of HLB – A Geostatistical Analysis. *IRCHLB Proceedings*, 305–308.
- Gottwald T, Irey M, Gast T, Taylor E, 2009b. HLB Survival Analysis – A Spatiotemporal Assessment of the Threat of an HLB- positive Tree to its Neighbors. In: *IRCHLB Proceedings*. 291-295,.
- Grafton-Cardwell EE, Stelinski LL, Stansly PA, 2013. Biology and Management of Asian Citrus Psyllid, Vector of the *Huanglongbing* Pathogens. *Annual Review of Entomology* **58**, 413–432.
- Hall DG, Hentz MG, Ciomperlik MA, 2007. A comparison of traps and stem tap sampling for monitoring adult Asian citrus psyllid (Hemiptera: Psyllidae) in citrus. *Florida Entomologist* **90**, 327–334.
- Hall DG, Richardson ML, Ammar E-D, Halbert SE, 2012. Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* , vector of citrus *huanglongbing* disease. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **146**, 207–223.
- Hung T-H, Hung S-C, Chen C-N, Hsu M-H, Su H-J, 2004. Detection by PCR of *Candidatus Liberibacter asiaticus*, the bacterium causing citrus *huanglongbing* in vector psyllids: application to the study of vector-pathogen relationships. *Plant Pathology* **53**, 96–102.
- Inoue H, Ohnishi J, Ito T *et al.*, 2009. Enhanced proliferation and efficient transmission of *Candidatus Liberibacter asiaticus* by adult *Diaphorina citri* after acquisition feeding in the nymphal stage. *Annals of Applied Biology* **155**, 29–36.
- Lee JA, Halbert SE, Dawson WO, Robertson CJ, Keesling JE, Singer BH, 2015. Asymptomatic spread of *huanglongbing* and implications for disease control. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **112**, 7605–7610.
- Lewis-Rosenblum H, Martini X, Tiwari S, Stelinski LL, 2015. Seasonal Movement Patterns and Long-Range Dispersal of Asian Citrus Psyllid in Florida Citrus. *Journal of Economic Entomology* **108**, 3–10.
- Liu YH, Tsai JH, 2000. Effects of temperature on biology and life table parameters of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Homoptera: Psyllidae). *Annals of Applied Biology* **137**, 201–206.
- Lopes SA, Bertolini E, Frare GF *et al.*, 2009. Graft Transmission Efficiencies and Multiplication of “ *Candidatus Liberibacter americanus*” and “ *Ca. Liberibacter asiaticus*” in Citrus Plants. *Phytopathology* **99**, 301–306.
- Lopes SA, Luiz FQBF, Oliveira HT, Cifuentes-Arenas JC, Raiol-Junior LL, 2017. Seasonal Variation of “ *Candidatus Liberibacter asiaticus*” Titters in New Shoots of Citrus in Distinct Environments. *Plant Disease* **101**, 583–590.
- Van Maanen A, Xu X-M, 2003. *Modelling plant disease epidemics*.
- Martini X, Hoyte A, Stelinski LL, 2014. Abdominal Color of the Asian Citrus Psyllid (Hemiptera: Liviidae) Is Associated With Flight Capabilities. *Annals of the Entomological Society of America* **107**, 842–847.
- Maschio F, 2011. Ações Adotadas pelo Citricultor para o Manejo do *Huanglongbing* (HLB, Greening) no Parque Citrícola Paulista. FUNDECITRUS.
- Neves MF, Trombin VG, Milan P, Lopes FF, Cressoni F, Kalaki R, 2010. O Retrato da Citricultura Brasileira. In: *MARKESTRAT: Centro de Pesquisa e Projetos em Marketing e Estratégia*, FEA-USP, Ribeirão Preto. 138.

- Parra JRP, Lopes JRS, Torres MLG, Nava DE, Paiva PEB, 2010. Bioecologia do vetor *Diaphorina citri* e transmissão de bactérias associadas ao *huanglongbing*. *Citrus Research & Technology* **31**, 37–51.
- Pelz-Stelinski KS, Brlansky RH, Ebert TA, Rogers ME, 2010. Transmission Parameters for *Candidatus Liberibacter asiaticus* by Asian Citrus Psyllid (Hemiptera: Psyllidae). *Journal of Economic Entomology* **103**, 1531–1541.
- Sétamou M, Bartels DW, 2015. Living on the Edges: Spatial Niche Occupation of Asian Citrus Psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae), in Citrus Groves (RP Niedz, Ed.). *PLOS ONE* **10**, 1–21.
- Sétamou M, Sanchez A, Patt JM, Nelson SD, Jifon J, Louzada ES, 2012. Diurnal Patterns of Flight Activity and Effects of Light on Host Finding Behavior of the Asian Citrus Psyllid. *Journal of Insect Behavior* **25**, 264–276.
- Teixeira D do C, Saillard C, Eveillard S *et al.*, 2005. “*Candidatus Liberibacter americanus*”, associated with citrus *huanglongbing* (greening disease) in São Paulo state, Brazil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **55**, 1857–1862.
- Teixeira D do C, Wulff NA, Lopes SA *et al.*, 2010. Caracterização e etiologia das bactérias associadas ao *huanglongbing*. *Citrus Research & Technology* **31**, 115–128.
- Teixeira D do C, Wulff NA, Martins EC *et al.*, 2008. A Phytoplasma Closely Related to the Pigeon Pea Witches’-Broom Phytoplasma (16Sr IX) Is Associated with Citrus *Huanglongbing* Symptoms in the State of São Paulo, Brazil. *Phytopathology* **98**, 977–984.
- Ulian LF, 2016. *Diaphorina citri* e *Huanglongbing*: dinâmica, relações epidemiológicas e monitoramento do vetor em pomar de laranja com manejo da doença. FUNDECITRUS.
- Wenninger EJ, Hall DG, 2007. Daily Timing of Mating and Age at Reproductive Maturity in *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). *Florida Entomologist* **90**, 715–722.
- Xu CF, Xia YH, Li KB, Ke C, 1988. Further Study of the Transmission of Citrus *Huanglongbing* by a Psyllid, *Diaphorina citri* Kuawayama. In: *Proceedings 10th Conference of the International Organization of Citrus Virologists*. Riverside, CA, 243–248.
- Yamamoto PT, Paiva PEB, Gravena ES, 2001. Flutuação Populacional de *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) em Pomares de Citros na Região Norte do Estado de São Paulo. *Neotropical Entomology* **30**, 165–170.