

Mortalidade de *Diaphorina Citri* em resposta à *Isaria Fumoso rosea*: um estudo de diferentes funções de ligação em modelos para dose-resposta dicotômica

Carla Valéria dos Santos Pacheco^{1†}; Robson Marcelo Rossi¹; Diego Corrêa Alves¹; Rodolfo de Souza Nascimento¹; Ricardo Puziol de Oliveira¹.

¹Programa de Pós-graduação em Bioestatística, Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá/PR.

Resumo: Este estudo investiga a relação entre a mortalidade de *Diaphorina citri*, um importante inseto-praga de citros e a exposição à diferentes concentrações de *Isaria fumoso rosea*, um dos fungos relevantes para o controle biológico. Toda modelagem foi via regressão binomial, considerando quatro funções de ligação (Logito, Probit, Cauchy e Cloglog) no contexto frequentista e bayesiano. A análise frequentista fornece estimativas baseadas apenas nos dados observados, enquanto a abordagem bayesiana incorpora informações prévias, resultando em estimativas mais precisas. O modelo Cauchy foi o que melhor se ajustou aos dados, apresentando parâmetros significativos para os coeficientes do preditor linear. Concluiu-se que há um aumento de aproximadamente 25% na chance de sucesso na mortalidade de *Diaphorina citri* a cada acréscimo de uma unidade no logaritmo natural da concentração dos fungos. A dose letal de 50%, na escala logarítmica, foi identificada como sendo 5,03, ou seja, ao aplicar essa dose, espera-se que metade dos insetos expostos morra.

Palavras-chave: Análise Bayesiana, Dose letal, Fungos Entomopatogênicos, Modelo Cauchy.

Diaphorina citri mortality in response to *Isaria Fumoso rosea*: a study of different linking functions in models for dichotomous response dosage

Abstract: This study investigates the relationship between the mortality of *Diaphorina citri*, an important citrus pest, and exposure to different concentrations of *Isaria fumoso rosea*, one of the relevant fungi for biological control. All modeling was conducted via binomial regression, considering four link functions (Logit, Probit, Cauchy, and Cloglog) in both frequentist and Bayesian contexts. The frequentist analysis provides estimates based solely on observed data, while the Bayesian approach incorporates prior information, resulting in more precise estimates. The Cauchy model provided the best fit to the data, with significant parameters for the linear predictor coefficients. It was concluded that there is an approximately 25% increase in the probability of success in the mortality of *Diaphorina citri* for each unit increase in the natural logarithm of the fungal concentration. The lethal dose 50%, on the logarithmic scale, was identified as 5.03, meaning that applying this dose is expected to result in the death of half of the exposed insects.

Keywords: Bayesian Analysis, Lethal dose, Entomopathogenic Fungi, Cauchy Model.

Introdução

A *Diaphorina citri*, conhecida como vetor do Huanglongbing (HLB) ou *Citrus Greening*, desempenha um papel alarmante na disseminação do agente patogênico *Candidatus Liberibacter Asiaticus*, representando uma ameaça crítica para a indústria citrícola global, resultando em consideráveis perdas na produção de citros (Wang, 2019). A transmissão desse patógeno ocorre quando a *Diaphorina citri* se alimenta da seiva das plantas de citros, infectando-as com a bactéria. Estudos de localização da *Candidatus Liberibacter asiaticus* evidenciaram a presença da bactéria em tecidos específicos do inseto, reforçando seu papel como vetor (Ammar et al., 2011).

[†]Autor correspondente: carla.pacheco@ifsc.edu.br

Em Paranavaí, no estado do Paraná, Brasil, estudos realizados revelaram o impacto econômico devastador do HLB na produção de citros (Costa et al., 2021). Nessa região, mesmo com uma incidência anual de HLB abaixo de 2,5%, houve um aumento significativo de seis vezes na incidência da doença, atingindo de 0,16% para 0,96% no período analisado. Pomares com menos de 10 mil plantas apresentaram maior suscetibilidade à doença, acarretando perdas econômicas estimadas em US\$11,8 milhões no primeiro cenário e US\$39,2 milhões no segundo cenário considerado.

Além disso, uma pesquisa conduzida pelo Departamento de Economia de Alimentos e Recursos da Universidade da Flórida em 2021 evidenciou que a indústria de citros na Flórida sofreu uma redução alarmante de aproximadamente 51% na área de pomares, juntamente com uma drástica queda de 79% no volume de produção desde 2001. Essas perdas significativas foram diretamente atribuídas ao avanço do HLB, introduzido no estado em 2005 (Cruz et al., 2023).

Esses estudos econômicos em diferentes regiões geográficas ressaltam a gravidade do impacto do HLB na produção de citros, impulsionado pela ação disseminadora de *Diaphorina citri*. Diversas estratégias de controle têm sido exploradas, incluindo o uso de fungos entomopatogênicos, como o *Isaria fumosorosea*.

Este fungo que tem demonstrado potencial para controlar populações de *Diaphorina citri*, quando aplicado corretamente, pode colonizar e causar a morte do inseto. Além disso, é uma alternativa sustentável ao controle químico, preservando os inimigos naturais das pragas e não deixando resíduos (Conceschi, 2014).

É crucial enfatizar a relevância de estabelecer a dose ótima do *Isaria fumosorosea*, visando a maximização da eficácia no controle de *Diaphorina citri*, ao mesmo tempo em que minimiza os potenciais efeitos negativos sobre a biodiversidade e os ecossistemas locais. Estudos recentes têm focado em determinar os isolados do *Isaria fumosorosea* (como IBCB 124, IBCB 130, IBCB 201 e IBCB 638) e seu potencial de mortalidade em diferentes níveis de temperatura. Esses estudos são fundamentais para entender a resistência que a *Diaphorina citri* pode adquirir ao fungo e para desenvolver estratégias eficazes de controle de pragas (Conceschi, 2017).

Diante disso, a análise minuciosa da resposta dessa espécie aos fungos entomopatogênicos assume suma importância. Sendo esse o objetivo do estudo em questão, busca-se avaliar diferentes funções de ligação em modelo binomial.

Material e métodos

Dados

Os dados utilizados neste estudo foram provenientes do pacote de dados “hnp” no ambiente estatístico R (MCMURTRIE, 2023; R CORE TEAM, 2024). Esses dados, denominados “fungi”, foram originados de um experimento conduzido por D’Alessandro (2014) e disponibilizados como dados não publicados, com base no modelo de superdispersão discutido por Demétrio, Hinde e Moral (2014).

Em análises que envolvem variáveis dicotômicas, como é o caso da mortalidade de *Diaphorina citri*, que representam o sucesso ou fracasso de um evento (a vida ou morte da espécie em questão), os Modelos Lineares Generalizados (MLG), originalmente propostos por Nelder e Wedderburn (1972), tornam-se ferramentas cruciais. Esses modelos são empregados para investigar as relações entre variáveis independentes e a variável resposta, adotando distribuições de probabilidade pertencentes à família exponencial.

Por meio da Tabela 1 verifica-se informações amostrais do experimento realizado para avaliar a mortalidade de *Diaphorina citri* quando exposta a diferentes concentrações de conídios de *Isaria fumosorosea*.

Tabela 1: Informações amostrais da espécie *Isaria fumosorosea*.

Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
z : Insetos Mortos	5	2	2	5	8	13	12	15	17	14	20	11	13	12	13
m : Total de Insetos	17	18	11	15	20	24	13	17	17	16	21	13	13	14	13
conc: Concentração de Fungos (PPI/ml)	10^4	10^4	10^4	10^5	10^5	10^5	10^6	10^6	10^6	10^7	10^7	10^7	10^8	10^8	10^8
L_{conc} : Logaritmo da Concentração	4	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	7	8	8	8
Proporção de insetos mortos	0,29	0,11	0,18	0,33	0,40	0,54	0,92	0,88	1,00	0,87	0,95	0,85	1,00	0,86	1,00

Fonte: Dos autores (2024)

Concentrações de conídios variando entre 10^4 e 10^8 (CPI/ml) foram testadas. Cada unidade experimental consistiu de aproximadamente 20 adultos de *D. citri*, que foram submetidos à pulverização com soluções dos respectivos fungos. Os insetos foram então mantidos em plantas de *Citrus limonia* por um período de 10 dias, durante o qual o número de insetos mortos foi registrado, incluindo aqueles que faleceram devido à infecção fúngica.

Tabela 2: Estatísticas descritivas.

Mín.	1º quartil	Mediana	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Pearson	3º quartil	Máx.
0,11	0,37	0,86	0,68	0,33	0,71	0,94	1,00

Fonte: Dos autores (2024).

De modo geral, os dados revelam informações significativas sobre as proporções de morte de *Diaphorina citri* (Tabela 2). A menor taxa de mortalidade observada em uma das diluições foi de 0,11, indicando uma eficácia mais baixa nessa diluição específica para a redução da população de *Diaphorina citri*. O primeiro quartil, situado em 0,37, revela que 25% das diluições apresentaram uma proporção de insetos mortos igual ou inferior a esse valor, sugerindo uma predominância de taxas moderadas de mortalidade entre as diluições testadas. A mediana, estabelecida em 0,86, indica que metade das diluições mostraram uma proporção de insetos mortos igual ou inferior a esse valor, enquanto a outra metade apresentou valores iguais ou superiores, evidenciando uma variação considerável nas taxas de mortalidade entre as diluições. A média, registrada em 0,68, representa o valor médio das proporções de insetos mortos. Esta média, em comparação com a mediana, sugere que a distribuição das taxas de mortalidade seja ligeiramente assimétrica a esquerda. O desvio padrão de 0,33 indica a variabilidade das proporções de insetos mortos nas diferentes diluições do fungo *Isaria fumosorosea*. Um desvio padrão menor sugere que as proporções de mortalidade estão mais próximas da média (0,68), enquanto um desvio padrão maior indicaria maior dispersão dos dados. Neste caso, um desvio padrão de 0,33 sugere uma variação moderada nas taxas de mortalidade entre as diferentes diluições testadas. Isso significa que, embora haja alguma variabilidade nos resultados, a maioria das diluições tende a produzir taxas de mortalidade relativamente próximas ao valor médio. O coeficiente de Pearson de 0,71 indica uma correlação positiva forte entre o número de insetos mortos e as diluições (logaritmo da concentração de conídios). Este coeficiente próximo a 1 sugere que, à medida que a concentração de conídios aumenta, a proporção de insetos mortos também tende a aumentar de maneira consistente. Portanto, pode-se inferir que concentrações mais altas de conídios de *Isaria fumosorosea* são efetivas na mortalidade de *Diaphorina citri*, demonstrando a eficácia do fungo em doses maiores. O terceiro quartil, situado em 0,94, revela que 75% das diluições exibiram uma proporção de insetos mortos igual ou inferior a esse valor, indicando predominantemente taxas mais altas de mortalidade entre as diluições. O valor máximo das proporções de

insetos mortos foi de 1,00, indicando que, em pelo menos uma diluição, todos os insetos foram afetados. Isso sugere uma alta eficácia em uma diluição específica para a redução da população de *Diaphorina citri*.

Em resumo, os dados demonstram uma ampla variação nas taxas de mortalidade dos insetos, *Diaphorina citri*, entre diferentes diluições do fungo *Isaria fumosorosea*. Algumas diluições apresentaram taxas muito baixas de mortalidade, enquanto outras demonstraram uma eficácia significativa na redução da população de *Diaphorina citri*.

Modelagem

Para a análise proposta neste trabalho, foram consideradas funções de ligação listadas de forma resumida na Tabela 3. Essas funções incluem características como simetria (L: logit, P: probit e C: Cauchy) e assimetria (CLL: cloglog). Estamos interessados em estudar a morte de *Diaphorina citri* que representa a probabilidade de sucesso. A probabilidade de mortalidade estará relacionada com a seguinte variável explicativa: *Lconc* (logaritmo natural da concentração de fungos). Denotaremos por y_i a mortalidade da i -ésima *Diaphorina*. Em que, 0: vivo e 1: morto.

Foi considerado que y_i , é descrita por uma distribuição Bernoulli, isto é, o valor observado da mortalidade de uma Diaphorina, com probabilidade de sucesso,

$$P(y_i = 1) = p_i, \quad \text{isto é: } y_i \sim \text{Bernoulli}(p_i) : \begin{cases} 1 & : p_i \\ 0 & : 1 - p_i \end{cases}$$

Tabela 3: Funções de ligação (básicas) para regressão binária, a f.d.a da distribuição ($\mathcal{F}(\cdot)$) e a função de ligação ($\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$).

¹ Distribuição	$\mathcal{F}(\cdot)$	Nome da Ligação	$\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$
L	$p = \frac{\exp(\eta)}{1 + \exp(\eta)}$	Logit (L)	$\eta = \log\left(\frac{p}{1-p}\right)$
N	$p = \Phi(\eta)$	Probit (P)	$\eta = \Phi^{-1}(p)$
C	$p = 0,5 + \frac{\arctan(\eta)}{\pi}$	Cauchit (C)	$\eta = \tan(\pi(p - 0,5))$
GVMi	$p = 1 - \exp(-\exp(\eta))$	Cloglog (CLL)	$\eta = \log(-\log(1 - p))$

Fonte: Fonte: Adaptado de Anyosa (2017).

¹ L: Logística; N: Normal; C: Cauchy; GVMi: Gumbel de valor mínimo. $\log(\cdot)$ representa a função $\ln(\cdot)$; $\tan(\cdot)$ a função tangente; $\arctan(\cdot)$ a função inversa da tangente; $\Phi(\cdot)$ a função de distribuição acumulada normal padrão.

Para apresentar o comportamento teórico de p em função de valores η com as ligações apresentadas no Tabela 3, foi considerado o preditor linear $\eta = \beta_0 + \beta_1 Lconc$, em que β_0 e β_1 são os coeficientes de regressão.

Os Modelos de regressão foram ajustados para analisar a relação entre a mortalidade (variável resposta) e o logaritmo da concentração de fungos (variável explicativa) para a espécie *Isaria*. Para avaliar a qualidade dos modelos ajustados, foi utilizado o Critério de Informação de Akaike (AIC), que considera tanto o ajuste aos dados quanto a complexidade do modelo. O AIC penaliza modelos mais complexos para evitar o sobreajuste, de modo que um menor valor de AIC indica um modelo mais equilibrado entre simplicidade e ajuste adequado aos dados (Akaike, 1973). Além disso, uma análise gráfica foi realizada por meio de gráficos QQ-Plot com Envelope Simulado para avaliar a normalidade dos resíduos de cada modelo ajustado, complementada por uma análise detalhada dos resíduos dos respectivos modelos (ATKINSON, 1985).

A análise frequentista gera estimativas exclusivamente a partir dos dados observados, enquanto a abordagem bayesiana utiliza informações prévias, o que pode levar a estimativas mais precisas. Para a modelagem Bayesiana foram consideradas distribuições normais a priori não

informativas para β_0 e β_1 , tal que: $\beta_0 \sim N(0, 10^{-6})$ e $\beta_1 \sim N(0, 10^{-6})$ (parametrização OpenBUGS, Spiegelhalter et al., 1996). O critério DIC (Deviance Information Criterion) foi calculado para avaliar a qualidade do ajuste de cada modelo, sendo escolhido o que apresentou o menor DIC (SPIEGELHALTER et al., 2002).

As estimativas dos parâmetros foram obtidas por meio do pacote BRugs do programa R (R CORE TEAM, 2024), considerando chutes iniciais para os parâmetros, estimativas frequentistas. O algoritmo de Gibbs Sampling foi utilizado para realizar a amostragem no processo MCMC (Monte Carlo Markov Chain). Foram gerados 100.000 valores, considerando um período de descarte amostral de 10.000 valores iniciais. Assim, a amostra final, tomada em saltos de tamanho 10, contém 9.000 valores gerados. A verificação da convergência das cadeias foi realizada por meio do pacote coda do programa R, utilizando o critério de Heidelberger e Welch (1983). O critério de Heidelberger e Welch foi utilizado por sua objetividade na verificação da convergência das cadeias de Markov. Este método é eficaz para detectar a falta de convergência e analisar a autocorrelação nas cadeias. Além disso, sua implementação é mais direta e menos computacionalmente intensiva. Por essas razões, ele foi preferido ao critério de Gelman e Rubin. Foram utilizadas as estimativas da média a posteriori da distribuição dos parâmetros. A significância desses parâmetros no modelo foi verificada considerando que o valor zero não pertencesse ao respectivo intervalo de 95% de credibilidade. Com base nessas estimativas, foram gerados valores previstos para a variável resposta que foram usados para construir o envelope simulado Bayesiano. A técnica MCMC é bem estabelecida na literatura para estimativas bayesianas, conforme discutido por Brooks et al. (2011), sendo o algoritmo de Gibbs uma escolha eficiente para modelos complexos devido à sua capacidade de amostrar a partir de distribuições condicionais completas.

A escala logarítmica foi utilizada para o cálculo da DL50 com o objetivo de linearizar a relação entre a dose e a resposta observada, facilitando a interpretação dos parâmetros ajustados aos dados observados para cada modelo (β_0 e β_1) nas diferentes funções, conforme demonstrado na Tabela 4. A DL50 foi determinada usando a fórmula $x_{50} = \frac{-\beta_0}{\beta_1}$, para cada função de ligação. No caso da Log-log complementar (CLL), a DL50 é calculada pela fórmula $x_{50} = \frac{-\log(-\log(0.5))-\beta_0}{\beta_1}$.

Tabela 4: DL50 nas escalas logarítmica e natural para diferentes funções de ligação.

Ligação	DL50 (Logarítmica)	DL50 (Natural)
L	$x_{50} = -\frac{\beta_0}{\beta_1}$	$DL50 = e^{x_{50}} = e^{-\frac{\beta_0}{\beta_1}}$
P	$x_{50} = -\frac{\beta_0}{\beta_1}$	$DL50 = e^{x_{50}} = e^{-\frac{\beta_0}{\beta_1}}$
C	$x_{50} = -\frac{\beta_0}{\beta_1}$	$DL50 = e^{x_{50}} = e^{-\frac{\beta_0}{\beta_1}}$
CLL	$x_{50} = \frac{-\log(-\log(0.5))-\beta_0}{\beta_1}$	$DL50 = e^{x_{50}} = e^{\frac{-\log(-\log(0.5))-\beta_0}{\beta_1}}$

Fonte: Fonte: Dos autores (2024).

Após a escolha do melhor modelo com base no critério DIC, é fundamental interpretar a relação entre as variáveis preditoras e o desfecho. Isso pode ser feito pelo cálculo do Odds Ratio (OR), que quantifica a mudança nas chances do desfecho associada a uma variação na variável preditora (DANIEL; CROSS, 2018). O OR é obtido pela exponenciação do coeficiente de regressão (β_1) nas funções de ligação mais comuns, como Logit e Complementary Log-Log (CLL):

$$OR = e^{\beta_1}$$

No caso da função de ligação Cauchit, o cálculo do OR é mais complexo devido à distribuição de Cauchy, com caudas mais pesadas. A probabilidade p e o preditor linear η estão relacionados por:

$$p = 0.5 + \frac{1}{\pi} \arctan(\eta)$$

O OR, nesse caso, envolve a razão das chances para $\eta_1 = \beta_0$ e $\eta_2 = \beta_0 + \beta_1$, resultando na fórmula:

$$OR = \frac{[0, 5\pi + \tan^{-1}(\beta_0 + \beta_1)] [0, 5\pi - \tan^{-1}(\beta_0)]}{[0, 5\pi - \tan^{-1}(\beta_0 + \beta_1)] [0, 5\pi + \tan^{-1}(\beta_0)]}$$

Resultados e discussão

A Tabela 5 apresenta o resultado das análises frequentistas dos modelos considerados. O AIC para o modelo Cauchy foi 53,29, o menor entre os quatro, indicando que o modelo Cauchy tem o melhor ajuste com base nesse critério.

As fórmulas para DL50 nas escalas natural e logarítmica estão apresentadas na Tabela 4. As estimativas da DL50 na escala logarítmica variaram de 5.01 (Logito) a 5.05 (Cloglog).

Tabela 5: Resultados das análises frequentistas.

Modelo	Parâmetros	Estimativa	Desvio padrão	p-valor	AIC	DL50
L	β_0	-6,70	0,95	$1,59 \times 10^{-12}$	59,29	5,01
	β_1	1,34	0,18	$4,96 \times 10^{-14}$		
P	β_0	-3,68	0,49	$1,01 \times 10^{-13}$	61,94	5,02
	β_1	0,73	0,09	$3,60 \times 10^{-16}$		
C	β_0	-10,64	2,54	$2,91 \times 10^{-05}$	53,29	5,03
	β_1	2,11	0,50	$2,76 \times 10^{-05}$		
CLL	β_0	-3,57	0,50	$8,13 \times 10^{-13}$	68,85	5,05
	β_1	0,63	0,08	$1,55 \times 10^{-14}$		

Fonte: Dos autores (2024).

Essas variações nas estimativas entre os diferentes modelos destacam a importância de considerar múltiplos modelos ao realizar análises de regressão.

A análise dos resíduos evidenciou que o modelo Cauchy, além de apresentar o menor Critério de Informação de Akaike (AIC) na comparação entre modelos, foi o único que não exibiu valores discrepantes, confirmando sua seleção como o modelo mais apropriado. Tanto a análise gráfica, ilustrada na Figura por meio de gráficos de Envelope Simulado para avaliar a normalidade dos resíduos, quanto a avaliação complementar, ilustrada na Figura , através dos gráficos de resíduos deviance e Pearson, reforçaram a superioridade do modelo Cauchy como o melhor ajuste para os dados analisados.

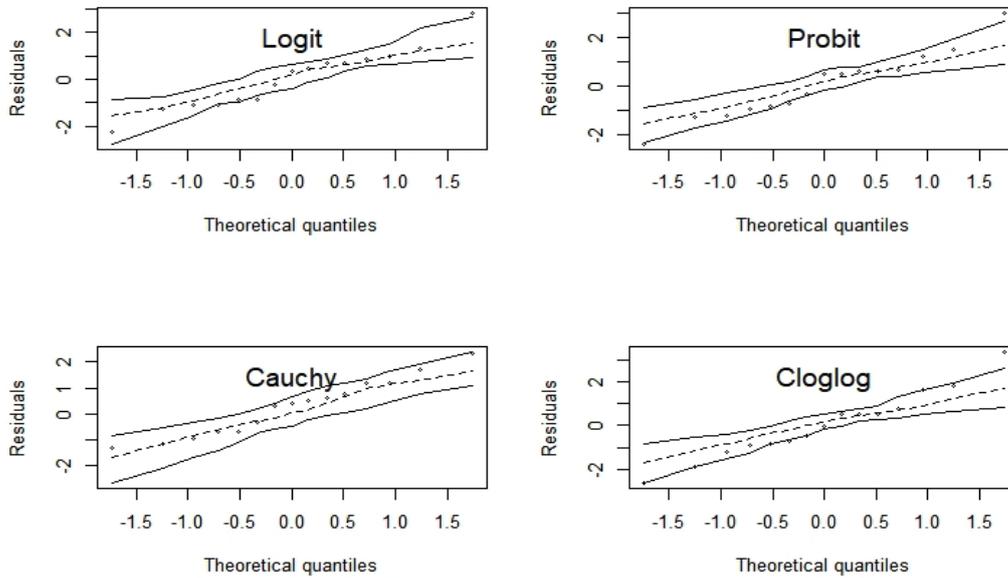
A Tabela 6 apresenta os resultados das estimativas Bayesianas. O modelo Cauchy, apresentou o menor DIC, reforçando sua seleção como o modelo mais apropriado para descrever a relação entre a mortalidade e o logaritmo da concentração de fungos.

Tabela 6: Resultados das análises.

Modelo	Parâmetros	Média	Desvio padrão	Mediana	$P_{2,5\%}$	$P_{97,5\%}$	DIC	DL50
L	β_0	-6,83	0,97	-6,81	-8,80	-5,01	59,32	5,01
	β_1	1,36	0,18	1,36	1,03	1,74		
P	β_0	-3,67	0,47	-3,67	-4,59	-2,74	61,82	5,02
	β_1	0,73	0,08	0,73	0,56	0,90		
C	β_0	-11,95	3,11	-11,53	-19,19	-7,16	53,41	5,03
	β_1	2,37	0,61	2,29	1,44	3,81		
CLL	β_0	-3,60	0,45	-3,59	-4,49	-2,71	68,76	5,06
	β_1	0,64	0,073	0,64	0,50	0,78		

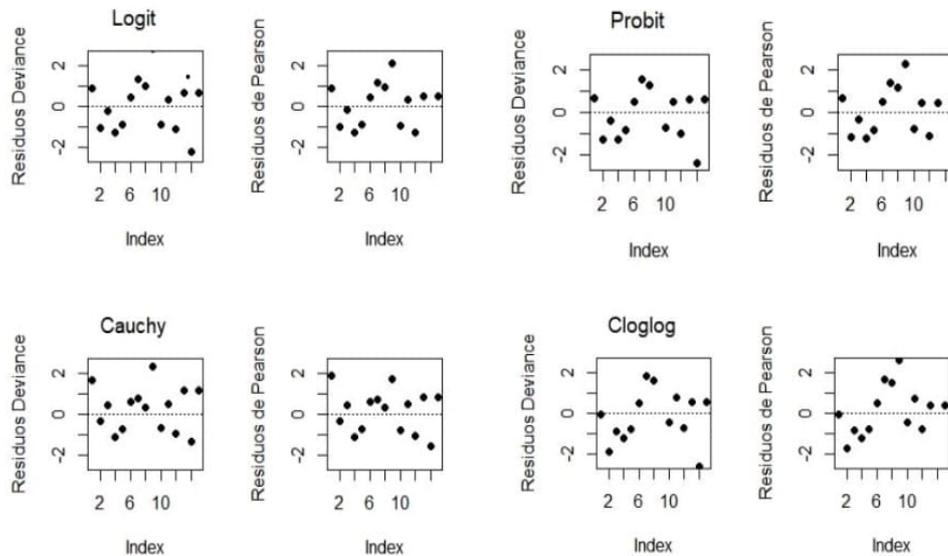
Fonte: Dos autores (2024).

Figura 1: Gráficos envelope simulado dos modelos considerando as funções de ligação.



Fonte: Dos autores (2024).

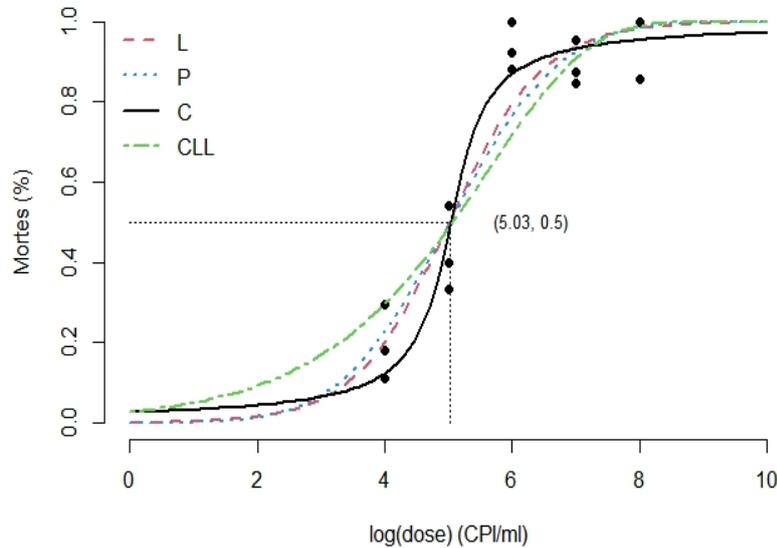
Figura 2: Gráficos da análise de resíduos deviance e Pearson.



Fonte: Dos autores (2024).

No gráfico das curvas de regressão apresentado na Figura , as curvas que representam os modelos que produzem estimativas maiores de DL50 estão mais à direita no gráfico.

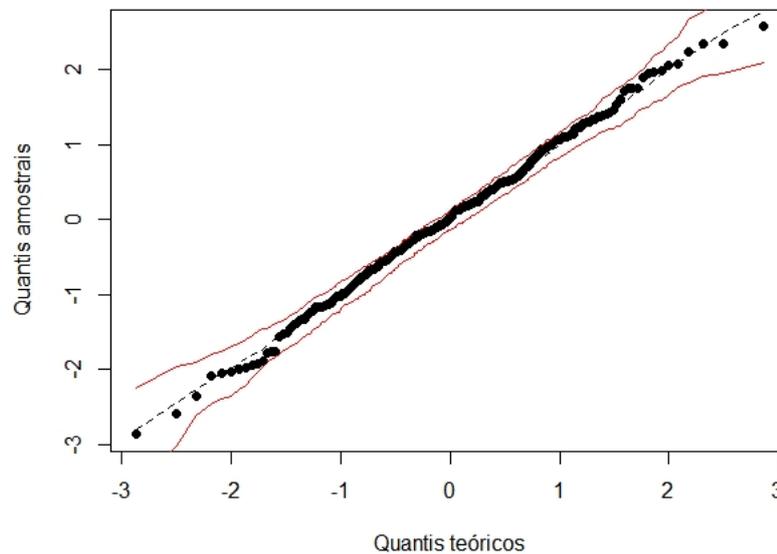
Figura 3: Gráfico das curvas ajustadas da probabilidade de morte de *Diaphorina citri* em função do logaritmo natural da concentração de fungos.



Fonte: Dos autores (2024).

A verificação do ajuste é apresentada na Figura , indicando adequação do modelo Cauchy aos dados.

Figura 4: Gráfico de envelope simulado do modelo Cauchy.



Fonte: Dos autores (2024).

Com base no modelo Cauchy ajustado, foi calculada uma estimativa para a média a posteriori do Odds Ratio (OR). Esse valor estimado foi de 1,25, indicando que, para cada aumento de uma unidade no logaritmo natural da concentração de fungos, há um acréscimo de 25% na chance de morte de *Diaphorina Citri*.

Conclusão

A aplicação do método Bayesiano revelou-se não apenas acessível, mas eficaz na avaliação da probabilidade de mortalidade associada ao logaritmo da concentração de fungos. O modelo Cauchy destacou-se no contexto do estudo, identificando a dose letal de 50% (DL50) em 5,03 como valor médio a posteriori.

Esses resultados não apenas fortalecem a compreensão estatística do problema, mas também oferecem insights cruciais para a dinâmica entre *Isaria fumosorosea*, *Diaphorina citri* e o efeito da concentração de fungos na mortalidade. Essas descobertas têm implicações diretas e promissoras para estudos futuros no campo da biologia e da farmacologia aplicada.

Referências

- AKAIKE, Hirotugu. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: PETROV, B. N.; CSAKI, F. (Eds.). 2nd International Symposium on Information Theory. Budapest: Akademia Kiado, 1973. p. 267-281.
- AMMAR, E. D.; SHATTERS, R. G.; HALL, D. G. Localization of Candidatus Liberibacter asiaticus, Associated with Citrus Huanglongbing Disease, in its Psyllid Vector using Fluorescence in situ Hybridization. *Journal of Phytopathology*, v. 159, n. 11-12, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.2011.01836.x>.
- ANYOSA, S. A. C. Regressão binária usando ligações potência e reversa de potência. Dissertação (Mestrado em Estatística - Programa Interinstitucional de Pós-Graduação em Estatística) — Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2017.
- ATKINSON, A. C. Plots, Transformations, and Regression: An Introduction to Graphical Methods of Diagnostic Regression Analysis. Oxford: Clarendon Press, 1985.
- BROOKS, S.; GELMAN, A.; JONES, G.; MENG, X. L. (Eds.). *Handbook of Markov Chain Monte Carlo*. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- CASELLA, George; BERGER, Roger L. *Statistical Inference*. 2nd ed. Pacific Grove, CA: Duxbury Press, 2002.
- CONCESCHI, M. R. (2014). Potencialidade dos fungos entomopatogênicos *Isaria fumosorosea* e *Beauveria bassiana* para o controle de pragas dos citros [Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.11.2014.tde-04022014-102408>.
- CONCESCHI, M. R. (2017). Parâmetros a serem considerados nas pulverizações do fungo *Isaria fumosorosea* para o manejo de *Diaphorina citri*; [Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/T.11.2017.tde-29082017-091810>.
- COSTA, G. V. da et al. Economic impact of Huanglongbing on orange production. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 43, n. 3, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0100-29452021472>.
- CRUZ, J.; TRIBUNAL, C. D.; FERREIRA, J. P. 2020-2021 Contribuições econômicas da indústria de citros da Flórida. Programa de Análise de Impacto Econômico da UF/IFAS, Departamento de Economia de Alimentos e Recursos. Disponível em: <https://fred.ifas.ufl.edu/extension/economic-impact-analysis-program/publications/2020-21-citrus-economic-contributions-report/>.
- D’ALESSANDRO, P. *Diaphorina citri* mortality data (fungi dataset). Dados obtidos no pacote

hnp do software R (versão 4.1.3). Disponível em: <https://www.r-project.org>. Acesso em: 25 ago. 2024.

DANIEL, Wayne W.; CROSS, Chad L. Biostatistics: a foundation for analysis in the health sciences. 11. ed. Hoboken, NJ: John Wiley Sons, 2018.

DEMÉTRIO, C. G. B.; HINDE, J.; MORAL, R. A. Models for overdispersed data in entomology. In: GODOY, W. A. C.; FERREIRA, C. P. (Eds.). Ecological modelling applied to entomology. Springer, 2014.

GELMAN, Andrew et al. Bayesian Data Analysis. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013.

HEIDELBERGER, P.; WELCH, P. D. Simulation Run Length Control in the Presence of an Initial Transient. Operations Research, v. 31, n. 6, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/opre.31.6.1109>.

MCMURTRIE, Ross E. fungi: Data for Fungal Diversity Analysis. R package version 1.0. 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=fungi>.

MOORE, D. S. (2005). A estatística básica e sua prática. Trad. Cristiana Filizola Carneiro Pessoa. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC.

NELDER, J. A.; WEDDERBURN, R. W. M. Generalized Linear Models. Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General), v. 135, n. 3, 1972. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2344614>.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

RIBEIRO, Leandro Do Prado et al. In vitro compatibility of an acetogenin-based bioinsecticide with three species of entomopathogenic fungi. Florida entomologist, v. 97, n. 4, p. 1395-1403, 2014.

ROSSI, R. M. (2011). Introdução aos métodos Bayesianos na análise de dados zootécnicos com uso do WinBUGS e R. (Eduem, Ed.).

SPIEGELHALTER, D. et al. BUGS 0.5: Bayesian inference using Gibbs sampling manual (version ii). MRC Biostatistics Unit, 1996. Disponível em: <https://www.mrc-bsu.cam.ac.uk/wp-content/uploads/manual14.pdf>.

SPIEGELHALTER, D. J.; BEST, N. G.; CARLIN, B. P.; VAN DER LINDE, A. Bayesian measures of model complexity and fit. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), v. 64, n. 4, p. 583-639, 2002.

WANG, N. The Citrus Huanglongbing Crisis and Potential Solutions. In: Molecular Plant, v. 12, n. 5, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2019.03.008>.