

Modelos sigmoidais na descrição do CO₂ evoluído de leguminosas no solo

Edilson Marcelino Silva¹, Ariana Campos Frühauf², Édipo Menezes da Silva³,
Joel Augusto Muniz⁴, Tales Jesus Fernandes⁵

¹ Edilson Marcelino Silva, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), professor adjunto, edilsonest@ufrj.br

² Ariana Campos Frühauf, Universidade Federal de Lavras (UFLA), doutora em Estatística e Experimentação Agropecuária, arianafruhauf@gmail.com

³ Édipo Menezes da Silva, Universidade Federal de Lavras (UFLA), doutor em Estatística e Experimentação Agropecuária, ediposvm01@gmail.com

⁴ Joel Augusto Muniz, Universidade Federal de Lavras (UFLA), professor titular, joamuniz@ufla.br

⁵ Tales Jesus Fernandes, Universidade Federal de Lavras (UFLA), professor adjunto, tales.jfernandes@ufla.br

Recebido em: 08/01/2023

Aceito em: 10/04/2023

Resumo

O processo de decomposição de leguminosas no solo ao longo do tempo pode ser descrito por modelos não lineares sigmoidais. Assim, objetivou-se descrever e comparar o ajuste dos modelos não lineares sigmoidais, Logístico e Gompertz, à mineralização de CO₂ de quatro espécies leguminosas ao longo do tempo no solo e indicar o modelo mais adequado. Além disso, propõe-se também a avaliar a mineralização de CO₂ de leguminosas provenientes de duas condições edafoclimáticas de locais diferentes, quando adicionadas ao solo em condições de temperatura e umidade controladas. Foram avaliadas as seguintes espécies leguminosas utilizadas na adubação verde: *Arachis pintoi* (amendoim forrageiro), *Calopogonium mucunoides* (calopogônio), *Stylosanthes guianensis* (mineirão) e *Stizolobium aterrium* (mucuna). Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados com quatro repetições. Os solos de ambas as áreas são classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo e possuem textura argilosa. Foi medido o carbono mineralizado às 48, 96, 144, 192, 240, 312, 384 e 480 horas do início da incubação. As leguminosas em locais diferentes tiveram a mesma quantidade de carbono potencialmente mineralizável, assim como os micro-organismos tiveram o mesmo tempo de adaptação até atingir a taxa máxima de decomposição. A taxa máxima de decomposição ocorre no início da mineralização e conseqüentemente o modelo Gompertz foi mais adequado que o Logístico na descrição da decomposição das quatro leguminosas no solo.

Palavras-chave: Decomposição. Mineralização. Modelo Gompertz. Modelo Logístico.

Introdução

O uso inadequado e intensivo dos solos tem aumentado seu processo de degradação, sendo necessário a intervenção por meio de práticas adequadas para manter sua capacidade produtiva (TEODORO et al., 2011). Nesse sentido, a adubação verde na superfície do solo é um importante componente que promove o controle da temperatura e da água, o aumento da matéria orgânica, a proteção e a prevenção de diversas modalidades de erosão do solo. Além disso, a cobertura do solo é de grande importância para a agricultura, visto que promove a ciclagem de nutrientes favorecendo as culturas plantadas (RODRIGUES et al., 2012).

Tem se destacado o uso de leguminosas como cultura de cobertura, pois além de proporcionar

benefícios semelhantes aos de outras espécies, possuem a capacidade de acumular N pela fixação biológica (RODRIGUES et al., 2012). O uso de leguminosas como adubo verde também tem sido uma alternativa viável para a agricultura, visto que seu processo de decomposição dos resíduos tem a capacidade de incorporar e liberar nutrientes da sua biomassa ao solo para a cultura subsequente (PEREIRA et al., 2016). Assim, o conhecimento da dinâmica de decomposição ao longo do tempo é imprescindível para se estabelecer estratégias de manejo mais eficientes na utilização dos adubos verdes, de modo a atender às necessidades da cultura de interesse, potencializando o processo de ciclagem e disponibilização de nutrientes (MATOS et al., 2008). Além disso, outros fatores alteram a ciclagem de nutrientes e como exemplos podem ser citados: o sistema de manejo, a

localização geográfica e a época de cultivo, já que esses fatores influenciam a qualidade dos adubos verdes, alterando a sua composição química e bioquímica (THÖNNISSEN et al., 2000; MATOS et al., 2008).

Segundo Giacomini et al. (2008) e Pulrolnik (2009), para resíduos mantidos na superfície do solo a colonização microbiana do substrato é mais lenta no início pela fase de adaptação da população microbiana ao substrato; em seguida, a decomposição é mais intensa, devido à maior quantidade de materiais mais facilmente decomponíveis, e à medida que o processo avança há o predomínio dos materiais mais recalcitrantes que podem reduzir o ataque microbiano. Dentre várias aplicações dos modelos de regressão não lineares (MARTINS FILHO et al., 2008; PEREIRA et al., 2009; SOUZA et al., 2010; SILVEIRA et al., 2018; JANE et al., 2020b; SILVA et al., 2020b; SILVA et al., 2022), os processos de decomposição de leguminosas no solo ao longo do tempo pode ser descrito como modelo não linear sigmoidal e o modelo Logístico, em geral, tem sido utilizado para descrever esse processo (MATOS et al., 2008; MONTEIRO et al., 2002).

O modelo Logístico é simétrico em relação ao ponto de inflexão, e no processo de decomposição espera-se que a taxa máxima de liberação de CO₂ ocorra nos primeiros dias (GIACOMINI et al., 2008). Assim, para melhor compreender essa dinâmica de decomposição e usar manejos adequados do solo outros modelos precisam ser avaliados nesse processo. O modelo Gompertz é uma alternativa para descrever o processo de decomposição, pois é um modelo que considera a abscissa do ponto de inflexão no início do processo (SILVA et al., 2021a; JANE et al., 2020a; FRÜHAUF et al., 2020; PRADO et al., 2020; JANE et al., 2019; SARI et al., 2018; RIBEIRO et al., 2018; MICHAN e PINHO, 2014).

Dessa forma, objetivou-se descrever e comparar o ajuste dos modelos não lineares

sigmoidais, Logístico e Gompertz, à mineralização de CO₂ de quatro espécies leguminosas ao longo do tempo no solo e indicar o modelo mais adequado. Além disso, pretende-se avaliar a mineralização de CO₂ de leguminosas provenientes de duas condições edafoclimáticas de locais diferentes, quando adicionadas ao solo em condições de temperatura e umidade controladas.

Material e métodos

Os dados analisados foram obtidos de um experimento conduzido por Matos et al. (2008). Em parceria com a UFV/EPAMIG/CTA, de dezembro de 2003 a abril de 2004, os adubos verdes foram obtidos em áreas de agricultores familiares nos municípios de Araponga e Pedra Dourada, ambos localizados na região da Zona da Mata do estado de Minas Gerais. A propriedade localizada em Araponga está situada a 20° 38' de latitude sul e 42° 31' de longitude oeste, a uma altitude média de 950 m, em que a unidade experimental possui face oeste de exposição ao sol. O município de Pedra Dourada está situado a 20° 50' de latitude sul e 42° 08' de longitude oeste, com altitude média de 690 m, em que a unidade experimental possui face sul de exposição ao sol.

Os solos de ambas as áreas são classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo e possuem textura argilosa. O café, em espaçamento de 2,8-3,0 × 0,5-0,8 m, é cultivado na área em sistema orgânico desde o plantio das mudas, e na época de introdução dos experimentos encontrava-se em fase de formação, no terceiro ano pós-plantio. Na época de instalação dos experimentos, registrou-se os seguintes atributos do solo para a propriedade de Araponga: pH (H₂O) de 5,2; Al³⁺ de 0,60, Ca²⁺ de 1,77 e Mg²⁺ de 0,70 cmol_c dm⁻³; P e K disponíveis (Mehlich-1) de 1,8 e 74 mg dm⁻³; e teor de carbono orgânico de 28 g kg⁻¹ (Walkey-Black). Para a área de Pedra Dourada registrou-se: pH (H₂O) de 5,0; Al³⁺ de 1,0, Ca²⁺ de 0,48 e Mg²⁺ de

0,14 cmol_c dm⁻³; P e K disponíveis (Mehlich-1) de 2,4 e 56 mg dm⁻³, respectivamente, e teor de carbono orgânico de 36 g kg⁻¹ (Walkey-Black).

Antes do plantio das leguminosas, realizou-se a correção dos solos. Foi aplicado 0,26 t ha⁻¹ de calcário, 64 kg ha⁻¹ de gesso, 125 kg ha⁻¹ de sulfato de potássio e 800 kg ha⁻¹ de termofosfato, em Araponga; e 1,20 t ha⁻¹ de calcário, 300 kg ha⁻¹ de gesso, 125 kg ha⁻¹ de sulfato de potássio e 800 kg ha⁻¹ de termofosfato, em Pedra Dourada. Os corretivos e fertilizantes foram aplicados na entrelinha do cafeeiro e incorporados no momento do plantio. Todas as leguminosas obtidas comercialmente, semeadas em sulcos e incorporadas a uma profundidade média de 1 cm. Não foi realizada inoculação das sementes antes da semeadura.

Os tratamentos constaram de combinações entre dois locais de cultivo de café (Araponga e Pedra Dourada) e quatro espécies de leguminosas utilizadas na adubação verde: *Arachis pintoi* (amendoim forrageiro), *Calopogonium mucunoides* (calopogônio), *Stylosanthes guianensis* (mineirão) e *Stizolobium aterrimum* (mucuna), cultivadas nas entrelinhas dos cafeeiros em parcelas de 2 × 2 m. Aproximadamente 120 dias após o plantio (estádio de floração), foram coletadas as partes aéreas das leguminosas, em que uma amostra de cada material foi usada para determinação da umidade e posteriores análises químicas. Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados, em arranjo fatorial 2 × 4 (dois locais e quatro espécies de leguminosas) com quatro blocos (repetições), totalizando 32 unidades experimentais.

Os adubos verdes, após serem secos em estufa, moídos e passados em peneira de 2 mm, foram caracterizados química e bioquimicamente, sendo os teores de C obtidos por combustão seca em analisador Perkin Elmer CHNS/O 2400. Para avaliação da mineralização dos resíduos, os materiais vegetais foram incubados em amostras

de um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura muito argilosa.

O C mineralizável foi avaliado por ensaio de respirometria, medindo-se a evolução de C-CO₂, com respirômetro de fluxo contínuo. A massa de cada material vegetal, equivalente a 2 g de carbono, foi misturada a 100 cm³ do solo e acondicionada nas câmaras de incubação do respirômetro (potes herméticos de 377 mL) a 70% da capacidade de campo em ambiente com temperatura controlada (25 ± 1°C). O CO₂ resultante da atividade microbiana foi quantificado pela captura em solução de NaOH 0,5 mol L⁻¹ e posterior titulação com solução de HCl 0,25 mol L⁻¹. Foram feitas oito medições de C-CO₂ evoluído, sendo as cinco primeiras a cada 48 horas, duas a cada 72 horas e a última com 96 horas, em um total de 480 horas. Os modelos Logístico (Equação 1) e Gompertz (Equação 2) foram ajustados às evoluções de C-CO₂, expressas em função do tempo (horas), conforme o modelo estatístico:

$$y_i = \frac{C_0}{1 + e^{k(\beta - t_i)}} + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$y_i = C_0 e^{-e^{k(\beta - t_i)}} + \varepsilon_i \quad (2)$$

O parâmetro “C₀” indica o carbono potencialmente mineralizável, enquanto “β” indica a abscissa do ponto de inflexão. O parâmetro “k” indica a constante de evolução de C-CO₂. A magnitude dos parâmetros “C₀” e “β” reflete a degradabilidade da leguminosa e a atividade microbiana, respectivamente. Por sua vez, “ε_i” é o erro aleatório, o qual pressupõe-se com distribuição normal com média 0 e variância constante σ², ou seja, ε_i ~ N(0, σ²). Segundo Fernandes et al. (2015), nessa parametrização do modelo Logístico o ponto de inflexão ocorre na coordenada (B, C₀/2), e no modelo Gompertz ocorre na coordenada (B, C₀/e), ou seja, o modelo Logístico é simétrico em relação ao ponto de inflexão e o modelo Gompertz é precoce.

A estimação dos parâmetros foi realizada por meio do método dos mínimos quadrados, o qual consiste na minimização da soma do quadrado dos resíduos e dá origem a um sistema de equações normais (SEN). Para o modelo não linear, não há solução explícita, logo, faz-se necessário o uso de métodos iterativos para obtenção das estimativas (FRÜHAUF et al., 2022a; VILELA et al., 2022; SILVA et al., 2020a; OLIVEIRA et al., 2013; ZEVIANI et al., 2012; PEREIRA et al., 2005). Entre os vários métodos iterativos propostos na literatura, foi utilizado o algoritmo de Gauss-Newton, em que a escolha dos valores iniciais para execução do processo foi realizada com base em uma análise exploratória inicial dos dados.

Após o ajuste dos modelos, fez-se necessária a verificação das pressuposições de normalidade, independência e homocedasticidade do vetor de resíduos, o que garante a correta inferência sobre os parâmetros (FRÜHAUF et al., 2022b; MIRANDA et al., 2021; ARCHONTOULIS; MIGUEZ, 2015; FERNANDES et al., 2014). Utilizou-se o teste Shapiro-Wilk para verificar o pressuposto de normalidade, o teste Durbin-Watson para independência e o teste Breusch-Pagan para homocedasticidade. Quando os resíduos tiveram autocorrelação, o modelo foi ajustado pelo método dos mínimos quadrados generalizados, incorporando o parâmetro autorregressivo de primeira ordem AR (1) (SILVA et al., 2021b; PAULA et al., 2020; SILVA et al., 2019a; SILVA et al., 2019b). Quando a pressuposição de normalidade foi atendida, foi construído o intervalo com 95% de confiança dos parâmetros do modelo (DRAPER e SMITH, 2014).

A comparação dos modelos quanto à qualidade do ajuste foi feita com base nos resultados encontrados para o coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), o critério de informação de Akaike (AIC) e o desvio padrão residual (DPR). O modelo com melhor ajuste aos dados é aquele que alcança

maior valor para R^2 e R^2_{aj} e menores valores para AIC e DPR. Toda a parte computacional envolvida para realização deste trabalho foi realizada com a utilização do software estatístico R, de acesso livre (R CORE TEAM, 2022).

Resultados e discussão

Após o ajuste dos modelos, foi realizada a análise dos resíduos para verificar se algum dos pressupostos dos modelos de regressão não foi atendido. Caso isso ocorra, esse desvio deve ser incorporado ao ajuste, pois o modelo pode gerar estimativas imprecisas, tornando-o inadequado para representação do conjunto de dados (ARCHONTOULIS; MIGUEZ, 2015; FERNANDES et al., 2014). Sendo assim, na Tabela 1 foram apresentados os resultados obtidos para os testes Shapiro-Wilk, Breusch-Pagan e Durbin-Watson. Observa-se que o p-valor dos testes de Shapiro-Wilk e Breusch-Pagan foram maiores que 0,05 para todos os tratamentos e em ambos os modelos, indicando que não houve evidências para rejeitar as hipóteses de normalidade e homocedasticidade dos resíduos. Por outro lado, exceto para o tratamento solo em Araponga e Pedra Dourada, nos dois modelos, e o modelo Gompertz em Araponga no tratamento *S. guianensis*, o p-valor do teste de Durbin-Watson foi menor que 0,05, indicando que houve evidência para rejeitar a hipótese de que os resíduos dos modelos foram independentes. Nesses casos, para corrigir a dependência residual, foi adicionado o parâmetro autorregressivo de primeira ordem AR(1) na estimação dos parâmetros dos modelos.

Para o tratamento solo em Araponga, pela Tabela 1, foram obtidos maiores valores de R^2_{aj} e R^2 para o modelo Logístico, além de menores valores de DPR e AIC, portanto o modelo Logístico foi mais indicado para descrever a dinâmica de decomposição nesse tratamento. Para os demais tratamentos foram obtidos maiores valores de R^2_{aj} e R^2 e menores valores de

Tabela 1. Valor-p para os testes Shapiro-Wilk (SW), Durbin-Watson (DW) e Breusch-Pagan (BP) utilizados na análise do vetor de resíduos para o ajuste dos modelos Logístico e Gompertz, e critérios de avaliação da qualidade de ajuste para o carbono mineralizado em função das horas.

Cidade	Modelo	Tratamento	SW	BP	DW	R ² _{aj}	R ²	DPR	AIC
Pedra D.	Logístico	Solo	0,0837	0,2191	0,1042	0,9839	0,9885	0,5727	18,0257
Pedra D.	Gompertz	Solo	0,6187	0,2476	0,1399	0,9941	0,9957	0,3553	10,3851
Pedra D.	Logístico	<i>S.atterimum</i>	0,8164	0,3059	0,0012	0,9755	0,9825	19,3693	76,2445
Pedra D.	Gompertz	<i>S.atterimum</i>	0,5420	0,2067	0,0024	0,9917	0,9941	11,5384	67,9518
Pedra D.	Logístico	<i>S.mucunoides</i>	0,7120	0,3100	0,0010	0,9771	0,9836	19,5709	76,4039
Pedra D.	Gompertz	<i>S.mucunoides</i>	0,6035	0,2641	0,0021	0,9930	0,9950	11,0708	67,2875
Pedra D.	Logístico	<i>S.guianensis</i>	0,7908	0,3202	0,0007	0,9770	0,9836	21,2581	77,6974
Pedra D.	Gompertz	<i>S.guianensis</i>	0,6776	0,2609	0,0012	0,9929	0,9949	12,1247	68,6793
Pedra D.	Logístico	<i>A.pinto</i>	0,8291	0,3375	0,0007	0,9816	0,9869	20,7784	77,3406
Pedra D.	Gompertz	<i>A.pinto</i>	0,8416	0,1925	0,0020	0,9956	0,9969	10,3425	66,2403
Araponga	Logístico	Solo	0,6068	0,0768	0,1759	0,9870	0,9907	0,5262	16,6703
Araponga	Gompertz	Solo	0,1912	0,1758	0,0747	0,9696	0,9783	0,8180	23,7278
Araponga	Logístico	<i>S.atterimum</i>	0,8858	0,2638	0,0022	0,9776	0,9840	18,2665	75,3922
Araponga	Gompertz	<i>S.atterimum</i>	0,7385	0,1059	0,0078	0,9934	0,9953	10,1372	65,9890
Araponga	Logístico	<i>S.mucunoides</i>	0,8292	0,2390	0,0033	0,9815	0,9868	17,3508	74,5885
Araponga	Gompertz	<i>S.mucunoides</i>	0,5575	0,1181	0,0162	0,9952	0,9966	9,0069	64,0247
Araponga	Logístico	<i>S.guianensis</i>	0,7651	0,2117	0,0066	0,9854	0,9895	16,8184	74,0424
Araponga	Gompertz	<i>S.guianensis</i>	0,7786	0,0897	0,0794	0,9967	0,9976	8,1660	60,5420
Araponga	Logístico	<i>A.pinto</i>	0,9530	0,3016	0,0009	0,9886	0,9918	15,4877	72,6829
Araponga	Gompertz	<i>A.pinto</i>	0,4588	0,0945	0,0187	0,9983	0,9987	6,1296	57,6090

Fonte: Elaboração dos autores (2023).

DPR e AIC para o modelo Gompertz, indicando ser o mais adequado para modelar a dinâmica de decomposição nesses tratamentos. Exceto para o solo em Araponga, todos os tratamentos foram melhor descritos pelo modelo Gompertz, que é precoce em relação ao ponto de inflexão se comparado ao modelo Logístico (FERNANDES et al., 2015), indicando que a taxa máxima de mineralização ocorre nas primeiras horas (GIACOMINI et al., 2008).

Na Tabela 2 estão apresentadas as estimativas dos parâmetros e os seus respectivos intervalos com 95% de confiança do melhor modelo selecionado para descrever os tratamentos de Pedra Dourada. Observa-se que não houve sobreposição nos intervalos de confiança do parâmetro C_0 , que indica a quantidade de

carbono potencialmente mineralizável do solo e dos demais tratamentos. A adição da leguminosa no solo estimulou a atividade microbiana, aumentando a mineralização do carbono das leguminosas no solo e a degradação da matéria orgânica nativa do solo (PAULA et al., 2019; FERNANDES et al., 2011). Além disso, não houve sobreposição do parâmetro C_0 dos tratamentos *S. atterimum*, *S. mucunoides* e *A. pinto*, indicando que a mineralização do carbono do tratamento *A. pinto* foi maior que nos outros dois, como também foi observado por Matos et al. (2008).

Na Tabela 2, pelos intervalos de confiança do parâmetro β , que indica a abscissa do ponto de inflexão – ou seja, quantas horas são necessárias para atingir o ponto máximo de mineralização

Tabela 2. Estimativas para os parâmetros do modelo Gompertz ajustado ao carbono mineralizado de Pedra Dourada e seus respectivos intervalos com 95% de confiança (LI – limite inferior e LS – limite superior).

Tratamento	Modelo	Parâmetro	LI	estimativa	LS
Solo	Gompertz	C ₀	15,3652	15,8718	16,4081
		β	67,2177	73,6884	79,9413
		k	0,0163	0,0195	0,0235
<i>S. atterrimum</i>	Gompertz	C ₀	377,1442	406,2102	435,2761
		β	98,2786	112,1668	126,0548
		k	0,0083	0,0110	0,0136
		φ	-0,6292	0,1315	0,7635
<i>S. mucunoides</i>	Gompertz	C ₀	390,2938	418,3660	446,4382
		β	103,1348	116,0771	129,0193
		k	0,0085	0,0110	0,0134
		φ	-0,6316	0,1327	0,7663
<i>S. guianensis</i>	Gompertz	C ₀	423,6578	454,7148	485,7719
		β	101,9599	115,2655	128,5711
		k	0,0085	0,0110	0,0135
		φ	-0,6098	0,1625	0,7766
<i>A. pintoii</i>	Gompertz	C ₀	456,0008	481,1145	506,2283
		β	109,8073	119,7426	129,6779
		k	0,0094	0,0115	0,0135
		φ	-0,6675	0,1084	0,7715

Fonte: Elaboração dos autores (2023).

que está relacionado à atividade microbiana –, não houve sobreposição entre intervalo do solo e os tratamentos com leguminosa, indicando que com a adição do vegetal a taxa máxima de mineralização ocorreu mais tarde. Além disso, a taxa máxima de mineralização dos tratamentos com leguminosa de Pedra Dourada ocorreu entre 112 e 119 h, aproximadamente (estimativa de β – Tabela 2). Matos et al. (2008) encontraram as estimativas entre 145 e 152 h e essa diferença se deve ao fato de os autores utilizarem o modelo Logístico, que é simétrico em relação ao ponto de inflexão para descrever o processo de decomposição. Segundo Giacomini et al. (2008), a taxa máxima de mineralização ocorre no início do processo, o que foi confirmado por este estudo na comparação dos modelos Logístico e Gompertz, indicando o modelo Gompertz, que é precoce ao ponto de inflexão, como mais adequado.

Na Tabela 3 estão apresentadas as estimativas dos parâmetros e os seus respectivos intervalos com 95% de confiança do melhor modelo selecionado para descrever os tratamentos de Araponga. Observa-se que não houve sobreposição nos intervalos de confiança do parâmetro C₀ do solo e dos demais tratamentos. Adicionando a leguminosa no solo a atividade microbiana foi estimulada, aumentando a mineralização do carbono das leguminosas no solo, bem como a degradação da matéria orgânica nativa (PAULA et al., 2019; FERNANDES et al., 2011). Além disso, não houve sobreposição do parâmetro C₀ dos tratamentos *S. atterrimum*, *S. mucunoides* e *A. pintoii*, indicando que a mineralização do carbono dos tratamentos *S. atterrimum* e *S. mucunoides* foi menor que no tratamento *A. pintoii*, resultado semelhante ao obtido por Matos et al. (2008).

Tabela 3. Estimativas para os parâmetros dos modelos Logístico e Gompertz ajustados ao carbono mineralizado de Araponga e seus respectivos intervalos com 95% de confiança (LI – limite inferior e LS – limite superior).

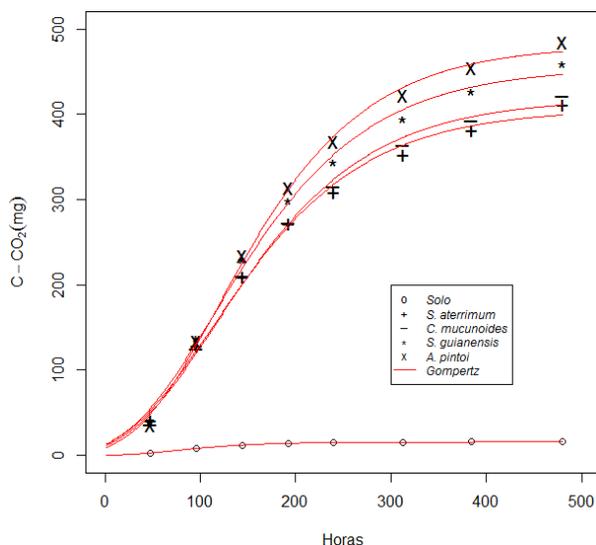
Tratamento	Modelo	Parâmetro	LI	estimativa	LS
Solo	Logístico	C_0	12,4542	13,1800	13,9343
		β	111,7258	124,500	136,9970
		k	0,0193	0,0255	0,0340
<i>S. atterrimum</i>	Gompertz	C_0	364,9784	387,8968	410,8152
		β	106,9949	117,8570	128,7192
		k	0,0091	0,0114	0,0137
		φ	-0,7603	-0,0437	0,7208
<i>S. mucunoides</i>	Gompertz	C_0	388,2605	409,3751	430,4896
		β	111,9140	121,1793	130,4446
		k	0,0089	0,0107	0,0125
		φ	-0,7862	-0,1105	0,6854
<i>S. guianensis</i>	Gompertz	C_0	426,4942	447,2000	471,4895
		β	118,2788	127,1000	136,3839
		k	0,0087	0,0102	0,0119
<i>A. pintoii</i>	Gompertz	C_0	439,7498	452,8538	465,9578
		β	118,9809	124,0424	129,1038
		k	0,0100	0,0110	0,0121
		φ	-0,8522	-0,2189	0,6745

Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Na Tabela 3, pelos intervalos de confiança do parâmetro β , nota-se que houve sobreposição entre o intervalo de confiança do solo e os tratamentos com leguminosa, e por esse fato houve melhor ajuste do modelo Logístico para o tratamento apenas com solo (Tabela 1). Além disso, a taxa máxima de mineralização dos tratamentos com leguminosa de Araponga ocorreu entre 117 e 127 h, aproximadamente (estimativa de β – tabela 3). Matos et al. (2008) encontraram as estimativas entre 150 e 161 h e essa diferença se deve ao fato de os autores utilizarem o modelo Logístico, que é simétrico em relação ao ponto de inflexão para descrever o processo de decomposição. Segundo Giacomini et al. (2008), a taxa máxima de mineralização ocorre no início do processo, sendo assim, o modelo Logístico não é o mais indicado para descrever essa dinâmica.

Comparando os intervalos de confiança do parâmetro C_0 , percebe-se que nos tratamentos em Pedra Dourada (Tabela 2) e em Araponga (Tabela 3) sempre houve interseção nos intervalos, indicando que os mesmos tratamentos em locais diferentes não alteraram a quantidade de carbono potencialmente mineralizável das leguminosas. Além disso, a influência dos diferentes locais não alterou o tempo de adaptação dos micro-organismos até atingirem a taxa máxima de decomposição, pois houve sobreposição nos intervalos de confiança do parâmetro β .

Ambos os modelos tiveram ótimos ajustes aos dados, conforme pode ser visto pelo valor do coeficiente de determinação (R^2), todos acima de 97% (Tabela 1), bem como pelo ajuste do melhor modelo aos valores evoluídos de CO_2 do solo e das leguminosas (Figuras 1 e 2).

Figura 1. Ajuste do modelo Gompertz aos dados de mineralização de carbono de Pedra Dourada.

Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Conclusão

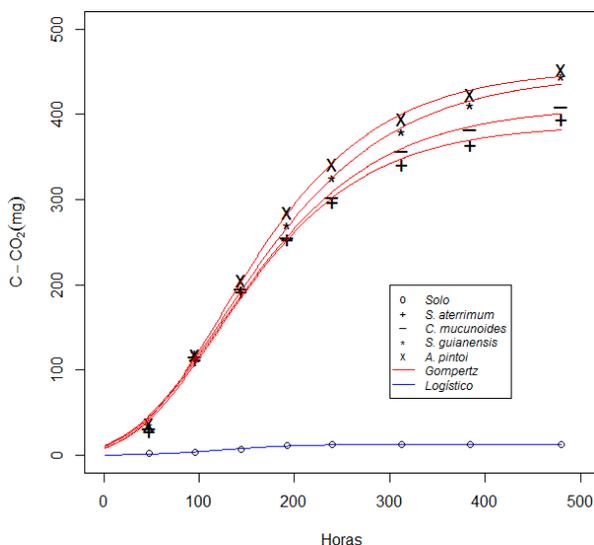
O modelo Gompertz foi mais adequado que o modelo Logístico na descrição da decomposição das leguminosas no solo, devido à taxa máxima de decomposição ocorrer no início da mineralização. Sob temperatura e umidades controladas, as leguminosas de Pedra Dourada e Araponga tiveram a mesma quantidade de carbono potencialmente mineralizável, assim como os micro-organismos tiveram o mesmo tempo de adaptação até atingir a taxa máxima de decomposição.

Agradecimentos

Ao núcleo de estudos em regressão não linear aplicada (NLIN) da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Referências

ARCHONTOULIS, S. V.; MIGUEZ, F. E. Nonlinear Regression Models and Applications in Agricultural Research. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 2, p. 786-798, 2015.

Figura 2. Ajuste dos modelos Logístico e Gompertz aos dados de mineralização de carbono de Araponga.

Fonte: Elaboração dos autores (2023).

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Aplied regression analysis**. 3.ed. reprint. New York: J. Wiley, 2014. 706 p.

FERNANDES, A. H. B. M. F.; CARDOSO, M. A.; SOUZA, R. A. C.; FERNANDES, F. A.; SOARES, M. T. S.; CRISPIM, S. M. A.; GALVANI, F.; LISITA, F. O. **Nitrificação e mineralização de carbono em solos tratados com dejetos de suínos biodigeridos**. Corumbá, MS: Embrapa Pantanal, 2011. 15 p.

FERNANDES, T. J.; MUNIZ, J. A.; PEREIRA, A. A.; MUNIZ, F. R.; MUIANGA, C. A. Parameterization effects in nonlinear models to describe growth curves. **Acta Scientiarum Technology**, v. 37, n. 4, p. 397-402, 2015.

FERNANDES, T. J.; PEREIRA, A. A.; MUNIZ, J. A.; SAVIAN, T. V. Selection of nonlinear models for the description of the growth curves of coffee fruit. **Coffee Science**, v. 9, n. 2, p. 207-215, 2014.

FRÜHAUF, A. C.; PEREIRA, G. A.; BARBOSA, A. C. M. C.; FERNANDES, T. J.; MUNIZ, J. A. Nonlinear models in the study of the cedar

diametric growth in a seasonally dry tropical forest. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 4, p. 1-8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8558>

FRÜHAUF, A. C.; SILVA, E. M.; FERNANDES, T. J.; MUNIZ, J. A. Predicting height growth in bean plants using non-linear and polynomial models. **Revista Agrogeoambiental**, v. 13, n. 3, p. 488-497, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.18406/2316-1817v13n320211625>

FRÜHAUF, A. C.; SILVA, É. M. da; GRANATO-SOUZA, D.; SILVA, E. M.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J. Description of height growth of hybrid eucalyptus clones in semi-arid region using non-linear models. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 40, n. 2, p. 138-151, 2022b. DOI: <https://doi.org/10.28951/bjb.v40i2.543>

GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; MIOLA, E. C. C.; RECOUS, S. Mineralização do carbono da palha de aveia e dejetos de suínos aplicados na superfície ou incorporados ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. especial, p. 2661-2668, 2008.

JANE, S. A.; FERNANDES, F. A.; SILVA, E. M.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J. Comparison of the polynomial and logistic models on description of pepper growth. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 4, p. 1-7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i4a7180>

JANE, S. A.; FERNANDES, F. A.; SILVA, E. M.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J.; PIMENTEL, G. V. Adjusting the growth curve of sugarcane varieties using nonlinear models. **Ciência Rural**, v. 50, n. 3, p. 1-10, 2020a. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20190408>

JANE, S. A.; FERNANDES, F. A.; FERNANDES, T. J.; MUNIZ, J. A. Nonlinear models to describe height and diameter of sugarcane RB92579 variety. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 4,

p. 1-7, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200062>

MARTINS FILHO, S.; SILVA, F. F.; CARNEIRO, A. P. S.; MUNIZ, J. A. Abordagem Bayesiana das curvas de crescimento de duas cultivares de feijoeiro. **Ciência Rural**, v. 38, n. 6, p. 1516-1521, 2008.

MATOS, E. S.; MENDONÇA, E. S.; LIMA, P. C.; COELHO, M. S.; MATEUS, R. F.; CARDOSO, I. M. Green manure in coffee systems in the region of Zona da Mata, Minas Gerais: characteristics and kinetics of carbon and nitrogen mineralization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 2027-2035, 2008.

MIRANDA, L. F.; FRÜHAUF, A. C.; LIMA, K. P.; SILVA, E. M.; MUNIZ, J. A. Nonlinear models to describe the growth of *Jatropha curcas* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, n. 4, p. 1-9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210061>

MISCHAN, M. M.; PINHO, S. Z. **Modelos não lineares: funções assintóticas de crescimento**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2014. 184p.

MONTEIRO, H. C. F.; CANTARUTTI, R. B.; NASCIMENTO JUNIOR, D.; REGAZZI, A. J.; FONSECA, D. M. Dinâmica e mineralização de nitrogênio em função da qualidade de resíduos de gramíneas e leguminosas forrageiras. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, n. 3, p. 1092-1102, 2002.

OLIVEIRA, W. S. J.; SILVA, C. A.; MUNIZ, J. A.; SAVIAN, T. V. Mineralização de nitrogênio em latossolos adubados com resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 715-725, 2013.

PAULA, G. S.; SILVA, E. M.; FURTADO, T. D. R.; FRÜHAUF, A. C.; MUNIZ, J. A. Comparison of nonlinear models for the description of carbon

- mineralization in soils treated with pig slurry. **Revista Agrogeoambiental**, v. 11, n. 4, p. 82-95, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v11n420191412>.
- PAULA, G. S.; SILVA, E. M.; FRÜHAUF, A. C.; SILVA, E. M.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J. Modeling the amount of mineralized carbon from swine manure and wheat straw. **Revista Agrogeoambiental**, v. 12, n. 3, p. 60-77, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v12n320201466>
- PEREIRA, J. M.; MUNIZ, J. A.; SÁFADI, T.; SILVA, C. A. Comparação entre modelos para predição do nitrogênio mineralizado: uma abordagem bayesiana. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. especial, p. 1792-1797, 2009.
- PEREIRA, J. M.; MUNIZ, J. A.; SILVA, C. A. Nonlinear models to predict nitrogen mineralization in an Oxisol. **Scientia Agricola**, v. 62, n. 4, p. 395-400, 2005.
- PEREIRA, N. S.; SOARES, I.; MIRANDA, F. R. Decomposition and nutrient release of leguminous green manure species in the Jaguaribe-Apodi region, Ceará, Brazil. **Ciência Rural**, v. 46, n. 6, p. 970-975, 2016.
- PRADO, T. K. L. do; SAVIAN, T. V.; FERNANDES, T. J.; MUNIZ, J. A. Study on the growth curve of the internal cavity of 'Dwarf green' coconut fruits. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 3, p. 1-7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200041>
- PULROLNIK, K. **Transformações do carbono no solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009. 36p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/664366> Acesso em: 10 jul. 2020.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022.
- RIBEIRO, T. D.; MATTOS, R. W. P.; MORAIS, A. R. de; MUNIZ, J. A. Description of the growth of pequi fruits by nonlinear models. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 40, n. 4, p. 1-11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-29452018949>
- RODRIGUES, G. B.; SÁ, M. E.; VALÉRIO FILHO, W. V. V.; BUZETTI, S.; BERTOLIN, D. C.; PINA, T. P. Matéria e nutrientes da parte aérea de adubos verdes em cultivos exclusivo e consorciado. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 380-385, 2012.
- SARI, B. G.; OLIVOTO, T.; DIEL, M. I.; KRYSCZUN, D. K.; LÚCIO, A. D. C.; SAVIAN, T. V. Nonlinear modeling for analyzing data from multiple harvest crops. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 6, p. 2331-2342, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2018.05.0307>
- SILVA, E. M.; FURTADO, T. D. R.; FERNANDES, J. G. F.; MUNIZ, J. A. Description of the carbon mineralization of swine manure and oat straw in the soil through nonlinear models. **Revista Agrogeoambiental**, v. 11, n. 2, p. 71-86, 2019a. DOI: <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v11n220191299>
- SILVA, E. M.; SILVEIRA, S. C.; FURTADO, T. D. R.; MUNIZ, J. A. Fitting of decomposition of sewage sludge and oat straw by nonlinear models. **Revista Agrogeoambiental**, v. 11, n. 2, p. 18-28, 2019b. DOI: <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v11n220191287>
- SILVA, E. M.; FRÜHAUF, A. C.; JANE, S. A.; SILVA, É, M da; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J. Comparison of nonlinear models in the description of carbon mineralization in litter soil. **Revista Agrogeoambiental**, v. 12, n. 4, p. 58-69, 2020a. DOI: <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v12n420201484>
- SILVA, E. M. da; TADEU, M. H.; SILVA, V. F. da; PIO, R.; FERNANDES, T. J.; MUNIZ, J.

A. Description of blackberry fruit growth by nonlinear regression models. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 42, n. 2, p. 1-11, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-29452020177>

SILVA, E. M. da; FRÜHAUF, A. C.; SILVA, E. M.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J.; SILVA, V. F. da. Evaluation of the critical points of the most adequate nonlinear model in adjusting growth data of 'green dwarf' coconut fruits. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 43, n. 1, p. 1-11, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-29452021726>

SILVA, W da S. e; FERNANDES, F. A.; MUNIZ, F. R.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J. *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* growth curve in different site classifications, considering residual autocorrelation. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 39, n. 1, p. 122-138, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.28951/rbb.v39i1.511>

SILVA, E. M.; JANE, S. A.; FERNANDES, F. A.; SILVA, É. M.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J. Stanford & Smith nonlinear model in the description of CO₂ evolved from soil treated with swine manure: maximum entropy prior. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 45, n. 1, p. 1-11, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v45i1.56360>

SILVEIRA, S. C; MUNIZ, J. A.; SOUSA, F. A.; CAMPOS, A. T. Non-linear models adjusted to the accumulated production of biogas originating from swine deep bedding. **Revista Agrogeoambiental**, v. 10, n. 3, p. 91-103, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18406/2316-1817v10n320181168>

SOUZA, E. M.; MUNIZ, J. A.; MARCHI, G.; GUILHERME, L. R. G. Modelagem não-linear da extração de zinco de um lodo de esgoto. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 32, n. 2, p. 193-199, 2010.

TEODORO, R. B.; OLIVEIRA, F. L.; SILVA, D. M. N.; FÁVERO, C.; QUARESMA, M. A. L. Aspectos agronômicos de leguminosas para adubação verde no cerrado do alto vale do Jequitinhonha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 635-643, 2011.

THÖNNISSEN, C.; MIDMORE, D. J.; LADHA, J. K.; OLK, D. C.; SCHMIDHALTER, U. Legume decomposition and nitrogen release when applied as green manures to tropical vegetable production systems. **Agronomy Journal**, v. 92, n. 2, p. 253-260, 2000.

VILELA, M. S. L.; SILVA, E. M.; FRÜHAUF, A. C.; SILVA, É. M.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J. Comparison of nonlinear models for the description of carbon mineralization in degraded pasture soil and in soils with plant cover. **Revista Agrogeoambiental**, v. 14, n. 1, p. 1-12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18406/2316-1817v14n120221680>

ZEVIANI, W. M.; SILVA, C. A.; OLIVEIRA, W. J.; MUNIZ, J. A. Non linear models to potassium release from animals manure in latosols. **Ciência Rural**, v. 42, n. 10, p. 1789-1796, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782012001000012>