

# Modelagem não-linear da dinâmica do carbono em solo tratado com lodo de curtume

Maylon Leoncio da Silva<sup>1</sup>, Edilson Marcelino Silva<sup>2</sup>, Ariana Campos Frúhauf<sup>3</sup>,  
Joel Augusto Muniz<sup>4</sup>, Tales Jesus Fernandes<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Lavras (UFLA), mestre em Estatística e Experimentação Agropecuária, maylonleoncio@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), professor adjunto, edilsonest@ufrj.br

<sup>3</sup> Universidade Federal de Lavras (UFLA), doutora em Estatística e Experimentação Agropecuária. arianafruhauf@gmail.com

<sup>4</sup> Universidade Federal de Lavras (UFLA), professor titular, joamuniz@ufla.br

<sup>5</sup> Universidade Federal de Lavras (UFLA), professor adjunto, tales.jfernandes@ufla.br

Recebido em: 07/10/2022

Aceito em: 10/03/2023

## Resumo

Em 2020, o rebanho comercial de bovino brasileiro foi o maior do mundo, representando 14,3% do rebanho mundial, com 201,7 milhões de cabeças. Embora essa atividade produza lucros significativos, contribuindo para o desenvolvimento econômico e social do país, tem sido alvo de preocupações, principalmente em função da grande produção de resíduos/ efluentes observada ao longo do beneficiamento do couro bovino. Diante desse cenário, a mineralização é importante, pois no processo de decomposição dos resíduos orgânicos ocorre também a liberação de nutrientes que são fundamentais para o crescimento das plantas e a dinâmica de liberação do carbono pode ser descrita por modelos de regressão não lineares. Assim, este trabalho foi realizado com o objetivo de modelar a mineralização do carbono orgânico no solo para as doses 6, 12, 24 e 36 megagramas por hectare ( $Mg\ ha^{-1}$ ) de lodo de curtume utilizando os modelos não lineares Stanford & Smith, Cabrera e Juma. Foram utilizadas amostras do solo de textura muito argilosa: Nitossolo vermelho eutroférrico típico (Nvef), em que o carbono mineralizado foi medido em 21 observações ao longo do tempo até o 105º dia de incubação. A estimação dos parâmetros foi feita utilizando o método de mínimos quadrados. Os ajustes foram comparados utilizando os seguintes critérios de seleção: critério de informação de Akaike Corrigido (AICc) e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ). O modelo Cabrera teve os melhores ajustes para as doses 6, 12 e 24  $Mg\ ha^{-1}$  e o Juma para a dose 36  $Mg\ ha^{-1}$ , com base nos critérios de seleção utilizados. Embora o modelo Stanford & Smith seja o mais utilizado na literatura para modelar a dinâmica do carbono no solo, não foi indicado como mais adequado em nenhuma dose estudada neste trabalho. Quanto maior a dose de lodo de curtume aplicada maior a quantidade de carbono potencialmente mineralizável.

**Palavras-chave:** Stanford & Smith, Cabrera, Juma, Regressão.

## Introdução

O curtimento é o nome dado ao processo que consiste em tornar a pele do animal, que é uma matéria-prima em decomposição, em couro (BRITO, 2013). Segundo o Centro das Indústrias de Curtume do Brasil (CICB, 2019), o país exportou, no ano de 2019, cerca de 181,9 milhões de  $m^2$  de curtume. Estima-se que uma pele produza cerca de 15 kg de resíduos sólidos, e destes, 7,5 kg decantem no fundo de lagoa de tratamento primário na forma de lodo (KONRAD, CASTILHOS, 2002).

O método mais usado atualmente para a destinação final dos resíduos de curtume (lodos) é o acondicionamento em depósitos ou aterros

sanitários, que possuem alto risco em virtude do acúmulo e da concentração de material potencialmente tóxico, como fenóis, sulfetos, sódio e cromo, os quais podem ser lixiviados e contaminar os aquíferos (KONRAD, CASTILHO, 2002). De acordo com a legislação ambiental vigente no país, as indústrias curtumeiras são consideradas potencialmente poluidoras e devem destinar os seus resíduos segundo as normas estaduais e/ou federais, dentro dos padrões de qualidade ambiental estabelecidos por lei (BRASIL, 1981).

Contudo, a relevância econômica da indústria curtumeira, conjugada com seu potencial poluidor, vem estimulando estudos para um conhecimento maior sobre possíveis

alternativas de descarte ou de reaproveitamento desses resíduos (MARTINES et al., 2006). Segundo Martines et al. (2006), uma das alternativas refere-se ao uso agrônômico do lodo, principalmente pelas ações corretivas e fertilização em solos que este pode proporcionar. Uma das formas também bastante utilizadas é para a nutrição do solo, salientando a aplicação de critérios técnicos para esse tipo de resíduo na agricultura.

Mesmo sendo rico em macro e micronutrientes, é necessário conhecer a dinâmica de decomposição do lodo de curtume no solo para que se faça o descarte de forma adequada no meio ambiente. De acordo com Feitosa et al. (2015), quando se adiciona um resíduo orgânico ao solo, a atividade microbiana é estimulada e os microrganismos utilizam o carbono como fonte de energia para seus processos metabólicos, assim, parte do carbono é incorporada às células microbianas e parte é liberada na forma de  $CO_2$ .

Segundo Youngquist (2017), esses microrganismos quebram as moléculas complexas à base de carbono, e como resultado os nutrientes são disponibilizados para as plantas e o dióxido de carbono é liberado como um subproduto. Ainda, segundo o autor, a atividade microbiana leva ao aumento das taxas de metabolismo da matéria orgânica no solo e à subsequente perda de carbono do solo com dióxido de carbono. Pulrolnik (2019) destaca que no início do processo de decomposição do resíduo orgânico no solo, a quantidade de carbono mineralizada é maior, uma vez que estão presentes frações de substâncias facilmente degradáveis e, em seguida, essa quantidade é reduzida, por serem mineralizadas frações de carbono mais resistentes. Esse processo tem sido descrito por modelos de regressão não lineares por fornecerem adequados ajustes (PAULA et al., 2019; SILVA et al., 2019a,b) e pela vantagem de os parâmetros fornecerem interpretação prática

(MIRANDA et al., 2021; JANE et al., 2020a; SILVA et al., 2020c; SILVA et al., 2021a).

Paula et al. (2019) e Manzoni e Porporato (2007) afirmam que é de extrema importância o estudo das curvas de mineralização do carbono e conhecer o modelo estatístico que descreve os processos em função do tempo, pois é necessário entender a dinâmica de decomposição de resíduos orgânicos, que pode auxiliar nas práticas de manejo de solo mais favoráveis à produção de culturas agrícolas. Paula (2012) destaca, ainda, que o modelo estatístico possibilita o cálculo das quantidades de resíduos recomendadas para aplicação no solo.

Dentre os modelos mais utilizados para descrever a mineralização do carbono na decomposição de resíduos orgânicos destacam-se os modelos de Stanford & Smith (1972), Cabrera (1993) e Juma (1984). Os modelos Stanford & Smith e Juma consideram que o resíduo tem uma quantidade de carbono que é potencialmente mineralizável. Por outro lado, o modelo Cabrera considera que o resíduo possui quantidades que são facilmente mineralizáveis e outra quantidade que é mineralizada constantemente (PAULA et al., 2020; SILVA et al., 2020a; VILELA et al., 2022). Esses modelos são muito utilizados por diversos autores e possuem ajustes adequados, como no trabalho de Silva et al. (2019a), em que fizeram o ajuste de modelos na decomposição do lodo de esgoto e palha de aveia, e o estudo de Paula et al. (2019), em que fizeram a comparação de modelos não lineares na descrição da mineralização do carbono no solo tratado com dejetos de suínos.

Assim, este trabalho foi realizado com o objetivo de ajustar e comparar os modelos de regressão não lineares Stanford & Smith (1972), Cabrera (1993) e Juma (1984) na descrição da dinâmica do carbono no solo Nitossolo vermelho eutroférico típico tratado com diferentes doses de lodo de curtume.

## Material e métodos

Os dados utilizados para ajuste dos modelos foram extraídos de Martines et al. (2006) e correspondem a um experimento em que foi avaliada a mineralização do carbono orgânico do lodo de curtume, aplicado em solo (0 – 20 cm de profundidade) de textura muito argilosa: Nitossolo Vermelho eutroférrico típico (Nvef).

O lodo de curtume utilizado no experimento foi composto de uma mistura na proporção de 1:1 do lodo de caleiro, gerado na etapa de caleiro, e do lodo primário da Estação de Tratamento de efluentes (ETE), resultante da precipitação dos efluentes gerados no processo, com exceção dos efluentes que contêm cromo. Esse lodo foi coletado no Curtume Vanzella, localizado no município de Rolândia, Paraná. As doses de lodo utilizadas no solo Nvef (muito argiloso) foram equivalentes a 6, 12, 24 e 36 Mg ha<sup>-1</sup> (base seca), considerando 20 cm de profundidade e densidade do solo igual a 1 g cm<sup>-3</sup>.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em parcelas subdivididas no tempo (cinco doses e 21 épocas de avaliação), com três repetições. O correspondente a cada dose de lodo foi aplicado em 200 g de solo. As épocas de avaliação foram de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 25, 40, 60, 80 e 105 dias de incubação. Para analisar e modelar a mineralização do carbono orgânico das doses de lodo de curtume foram utilizados os modelos de regressão não lineares Stanford & Smith (1), Cabrera (2) reparametrizado por Zeviani et al. (2012) e o de Juma (3).

$$C_i = C_0 \left( 1 - e^{-\frac{\ln(2)t_i}{v}} \right) + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$C_i = C_1 \left( 1 - e^{-\frac{\ln(2)t_i}{v_1}} \right) + k_0 t_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$C_i = \frac{C_0 t_i}{v + t_i} + \varepsilon_i \quad (3)$$

Nas equações (1), (2) e (3),  $C_i$  é o valor observado do carbono mineralizado após adição da dose de lodo de curtume no tempo  $t_i$ ;  $C_0$  é o carbono potencialmente mineralizável da dose de lodo de curtume;  $k_0$  é a taxa ou constante de mineralização;  $v$  e  $v_1$  representam o tempo de meia vida do carbono potencialmente mineralizável e facilmente mineralizável, respectivamente, ou seja, é o tempo que leva até que metade do carbono orgânico seja mineralizado; e  $\varepsilon_i$  é o desvio, o qual pressupõe-se com distribuição normal com média 0 e variância constante  $\sigma^2$ , ou seja,  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ .

Inicialmente, o ajuste dos modelos foi feito utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários e como o sistema de equações normais não possui solução explícita foi utilizado o método iterativo de Gauss-Newton (RIBEIRO et al., 2018b; SILVA et al., 2020b; FERNANDES et al., 2022b; FRÜHAUF et al., 2022a,b). Para verificar os pressupostos dos modelos de regressão foram utilizados os testes de Shapiro-Wilk, Durbin-Watson e Breusch-Pagan, para avaliar se os resíduos dos modelos são normalmente distribuídos, independentes e homocedásticos, respectivamente.

Quando detectou-se autocorrelação para os resíduos, o modelo foi ajustado pelo método dos mínimos quadrados generalizados, incorporando o parâmetro autorregressivo de primeira ordem AR(1). Nos casos em que as variâncias residuais foram heterogêneas, o ajuste foi feito pelo método dos mínimos quadrados ponderados, pois no processo de estimação é incorporada a incerteza existente em relação a cada fator (FERNANDES et al., 2014). Quando a pressuposição de normalidade foi atendida, foi construído o intervalo com 95% de confiança dos parâmetros do modelo (DRAPER, SMITH, 2014).

Para selecionar o modelo que melhor descreve a mineralização do carbono orgânico das doses de lodo de curtume foram utilizados o Critério de Informação de Akaike corrigido (AICc) e o coeficiente de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ).

A estimação dos parâmetros dos modelos, os testes de análises dos resíduos, os valores dos critérios de seleção e a construção de gráficos foram feitos utilizando o software estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2022).

## Resultados e discussão

Inicialmente, ajustaram-se os modelos não lineares Stanford & Smith, Cabrera e Juma aos dados da mineralização do carbono orgânico das doses de lodo de curtume, e verificou-se as pressuposições sobre o vetor de erros dos modelos foram atendidas, ou seja, se os resíduos são independentes e identicamente distribuídos, seguindo uma distribuição normal com média zero e variância constante,  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ . Os resultados obtidos pela análise dos resíduos (Tabela 1) foram expressos pelos testes de Shapiro-Wilk, Breusch-Pagan e Durbin-Watson. Diversos autores utilizaram estes testes para verificar os pressupostos dos modelos de regressão (SILVA et al., 2021b; JANE et al., 2020b; PRADO et al., 2020; FRÜHAUF et al., 2020; JANE et al., 2019).

Observa-se que todos os modelos para todas as doses atenderam ao pressuposto de normalidade residual (Tabela 1), e ao nível de significância de 1% ( $p$ -valor  $> 0,01$ ) pelo teste de Shapiro-Wilk. No teste de Breusch-Pagan, observa-se que as variâncias residuais são homogêneas para todos os modelos das doses 6, 12 e 24 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume (Tabela 1).

Na dose 36 Mg ha<sup>-1</sup>, os modelos Cabrera e Juma violaram o pressuposto de homogeneidade dos resíduos ( $p$ -valor  $< 0,01$ ), portanto a estimação dos parâmetros foi feita de forma ponderada (FERNANDES et al., 2014) para os modelos Cabrera e Juma, ajustados à dose 36 Mg ha<sup>-1</sup>.

Pelo teste de Durbin-Watson, considerando o nível de significância de 1%, foi possível perceber que a hipótese de independência dos resíduos não foi atendida ( $p$ -valor  $< 0,01$ ), ou seja, os resíduos são correlacionados em todos os modelos de todas as doses, o que era esperado devido aos dados terem sido obtidos ao longo do tempo na mesma parcela (FERNANDES et al., 2022a; PEREIRA et al., 2022). Paula et al.

**Tabela 1** – P-valores dos testes de Shapiro-Wilk, Durbin-Watson e Breusch-Pagan aplicados aos resíduos dos modelos Stanford & Smith, Cabrera, Juma para as doses 6, 12, 24 e 36 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume.

Tratamento	Modelo	Shapiro-Wilk p-valor	Durbin-Watson p-valor	Breusch-Pagan p-valor
Dose 6	Stanford e Smith	0,6913	<0,01*	0,0228
	Cabrera	0,0699	<0,01*	0,0611
	Juma	0,5906	<0,01*	0,0190
Dose 12	Stanford e Smith	0,2320	<0,01*	0,0527
	Cabrera	0,0451	<0,01*	0,0667
	Juma	0,0576	<0,01*	0,0345
Dose 24	Stanford e Smith	0,3887	<0,01*	0,0323
	Cabrera	0,0493	<0,01*	0,0626
	Juma	0,5870	<0,01*	0,0122
Dose 36	Stanford e Smith	0,7303	<0,01*	0,0122
	Cabrera	0,3473	<0,01*	<0,01*
	Juma	0,9421	<0,01*	<0,01*

Fonte: Elaboração dos autores (2022).

(2019) também observaram autocorrelação no ajuste de modelos não lineares a dados de mineralização do carbono no solo tratado com dejetos de suínos; além disso, Silveira et al. (2018) observaram autocorrelação dos erros ao ajustar o modelo não linear à produção acumulada de biogás de resíduos de suínos.

Devido à dependência residual, os ajustes dos modelos não lineares Stanford & Smith, Cabrera e Juma foram feitos pelo método de mínimos quadrados generalizados, incorporando-se aos modelos o parâmetro autorregressivo de primeira ordem AR(1), pois segundo Ribeiro et al. (2018a) e Pereira et al. (2022), na presença de resíduos correlacionados, é importante modelar essa correlação e incorporá-la ao modelo para garantir maior precisão nas estimativas e melhor qualidade no ajuste.

Na Tabela 2 são apresentadas as estimativas dos parâmetros e seus respectivos intervalos de confiança para os modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma, para a dose de 6 Mg ha<sup>-1</sup> no solo N<sub>vef</sub>.

Observando a Tabela 2, o modelo Stanford & Smith estimou o carbono potencialmente mineralizável para a dose 6 Mg ha<sup>-1</sup> em 103,59 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo com o tempo de meia vida de cinco dias, ou seja, o tempo necessário para que metade desse carbono seja mineralizado. O modelo Cabrera obteve estimativa do carbono facilmente mineralizável para a dose 6 Mg ha<sup>-1</sup> de 66,09 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo com o tempo

de meia vida de quatro dias. Para o modelo Juma, a estimativa do carbono potencialmente mineralizável foi de 120,69 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo com o tempo de meia vida de 12 dias. O carbono potencialmente mineralizável foi estimado por quantidades diferentes pelos modelos Stanford & Smith e Juma e, de acordo com Zeviani et al. (2012), selecionar o modelo mais adequado para descrever este processo é fundamental para fazer inferência sobre essa quantidade.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos critérios de seleção dos modelos. Dos resultados encontrados para a dose de 6 Mg ha<sup>-1</sup>, o modelo Cabrera foi o que obteve maior  $R_{aj}^2$  e menor AICc. Com base no menor valor de AICc, o modelo Cabrera foi o que melhor se ajustou. Assim, essa dose possui frações de carbono mineralizáveis com comportamento exponencial e frações mais resistentes, com mineralização constante (SILVA et al., 2019b; PAULA et al., 2020).

Na Figura 1 estão apresentados o carbono mineralizado da dose de 6 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume e os ajustes dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma no solo N<sub>vef</sub>. Observa-se pela Tabela 3 que os valores de  $R_{aj}^2$  dos modelos Cabrera e Juma foram maiores que 97%, indicando que os modelos foram bem ajustados, o que pode ser confirmado pela Figura 1. Para o modelo Stanford & Smith o  $R_{aj}^2$  foi de 68,88% (Tabela 3).

**Tabela 2** - Estimativa dos parâmetros dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma e seus respectivos intervalos de confiança assintóticos (LI - limite inferior e LS - limite superior) de 95% no ajuste do C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo para a dose 6 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume.

	Stanford & Smith			Cabrera			Juma				
	LI	Estimativa	LS	LI	Estimativa	LS	LI	Estimativa	LS		
$C_0$	63,9701	103,5980	143,2259	$C_1$	59,3417	66,0958	72,8498	$C_0$	109,1738	120,6946	132,2154
$\emptyset$	0,7872	0,9607	0,9932	$k_0$	0,0049	0,0065	0,0081	$\emptyset$	0,5456	0,8720	0,9687
$\nu$	4	5	8	$\emptyset$	0,4969	0,8405	0,9563	$\nu$	8	12	15
				$\nu_1$	3	4	5				

Fonte: Elaboração dos autores (2022).

**Tabela 3** - Critérios de seleção dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma para as doses em Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtureme.

Dose (Mg ha <sup>-1</sup> )	Modelo	Critério de seleção	
		R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	AIC <sub>c</sub>
6	Stanford & Smith	0,6888	114,5913
	Cabrera	0,9891	83,0478
	Juma	0,9773	100,2795
12	Stanford & Smith	0,9532	124,9100
	Cabrera	0,9841	92,2283
	Juma	0,9837	99,4943
24	Stanford & Smith	0,9644	134,6737
	Cabrera	0,9908	100,7563
	Juma	0,9911	105,4970
36	Stanford & Smith	0,9696	145,0586
	Cabrera	0,9947	113,4886
	Juma	0,9935	112,0194

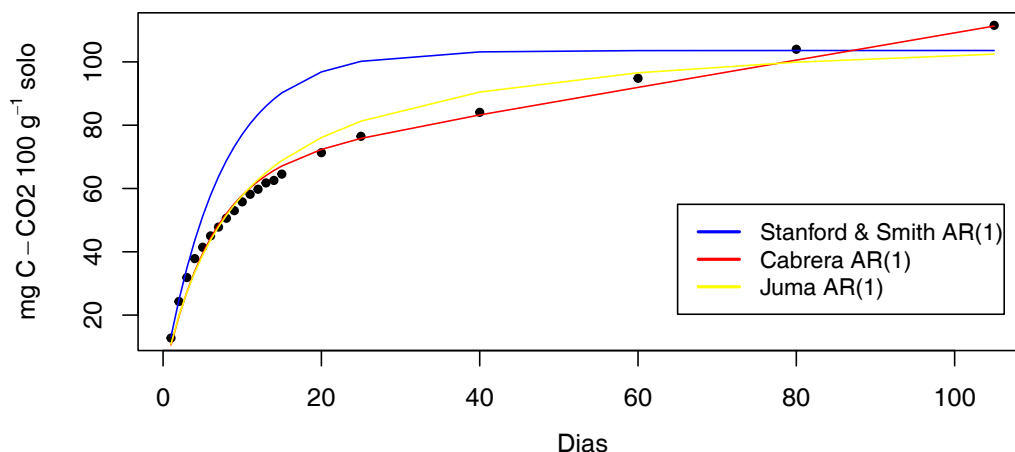
Fonte: Elaboração dos autores (2022).

Na Tabela 4 são apresentadas as estimativas dos parâmetros e seus respectivos intervalos de confiança para os modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma, para a dose de 12 Mg ha<sup>-1</sup> no solo N<sub>vef</sub>. O modelo Stanford & Smith obteve estimativa do carbono potencialmente mineralizável para a dose 12 Mg ha<sup>-1</sup> de 133,53 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo com o tempo de meia vida de oito dias. O modelo Cabrera obteve estimativa do carbono facilmente mineralizável

de 96,83 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo com o tempo de meia vida de cinco dias. Para o modelo Juma, a estimativa do carbono potencialmente mineralizável foi de 152,89 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo com o tempo de meia vida de nove dias.

Dos resultados apresentados na Tabela 3, para a dose 12 Mg ha<sup>-1</sup>, o modelo Cabrera foi o que obteve maior valor de R<sup>2</sup><sub>aj</sub> e menor AIC<sub>c</sub>. Portanto, o modelo Cabrera foi o que melhor se ajustou para a dose 12 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo

**Figura 1** - Ajustes dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma para a mineralização do carbono da dose de 6 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtureme no solo N<sub>vef</sub>.



Fonte: Elaboração dos autores (2022).



**Tabela 4** – Estimativa dos parâmetros dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma e seus respectivos intervalos de confiança assintóticos (LI – limite inferior e LS – limite superior) de 95% no ajuste do C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo para a dose 12 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume.

Stanford & Smith				Cabrera			Juma				
	LI	Estimativa	LS		LI	Estimativa	LS		LI	Estimativa	LS
C <sub>0</sub>	114,2887	133,5320	152,7754	C <sub>1</sub>	85,8730	96,8380	107,8030	C <sub>0</sub>	141,1697	152,8998	164,6299
∅	0,5863	0,9200	0,9867	k <sub>0</sub>	0,0032	0,0045	0,0058	∅	0,5456	0,8720	0,9687
v	7	8	12	∅	0,6110	0,9286	0,9887	v	7	9	12
				v <sub>1</sub>	4	5	6				

Fonte: Elaboração dos autores (2022).

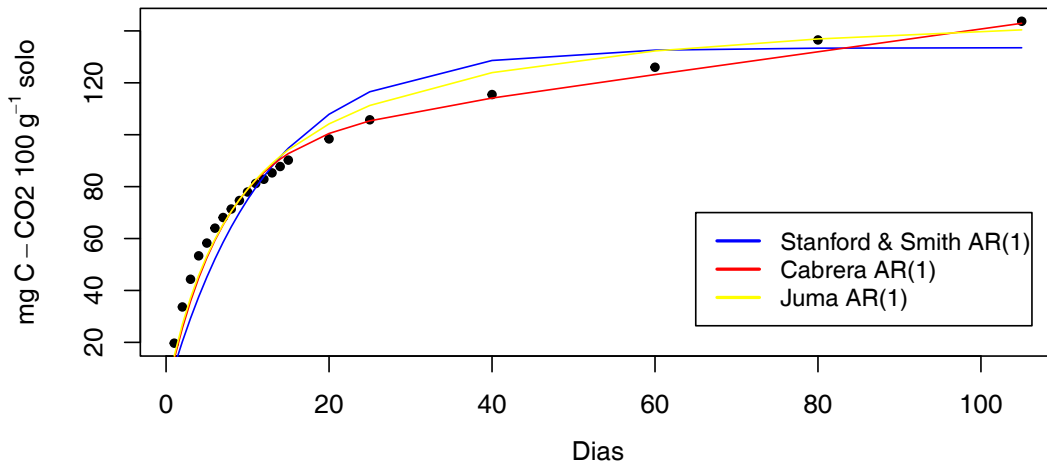
de curtume no solo NVef. Na Figura 2 estão apresentados o carbono mineralizado da dose 12 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume e os ajustes dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma no solo NVef. Pode-se observar que os três modelos tiveram ajuste adequado pois os valores do R<sup>2</sup><sub>aj</sub> dos modelos ajustados foram acima de 95% (Tabela 3). Na descrição de dados de mineralização de resíduos orgânico no solo diversos autores obtiveram ajustes adequados com R<sup>2</sup><sub>aj</sub> acima de 90% (PAULA et al., 2020; VILELA et al. 2022).

Na Tabela 5 são apresentadas as estimativas dos parâmetros e seus respectivos intervalos de confiança para os modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma, para a dose de 24 Mg ha<sup>-1</sup> no solo NVef.

Observando a Tabela 5, o modelo Stanford & Smith obteve estimativa do carbono potencialmente mineralizável para a dose 24 Mg ha<sup>-1</sup> de 187,42 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo com o tempo de meia vida de oito dias. O modelo Cabrera obteve estimativa do carbono facilmente mineralizável de 141,44 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo com o tempo de meia vida de cinco dias. No modelo Juma a estimativa do carbono potencialmente mineralizável foi de 211,15 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo com o tempo de meia vida de nove dias.

Com base no menor valor de AICc (Tabela 3), o modelo Cabrera foi o que melhor se ajustou à dose de 24 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume. O modelo Cabrera obteve o melhor ajuste em um tratamento no estudo de Paula et al. (2019), avaliando a descrição da mineralização em

**Figura 2** - Ajustes dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma para a mineralização do carbono da dose de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume no solo NVef.



Fonte: Elaboração dos autores (2022).

**Tabela 5** - Estimativa dos parâmetros dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma e seus respectivos intervalos de confiança assintóticos (LI - limite inferior e LS - limite superior) de 95% no ajuste do C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo para a dose 24 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume.

Stanford & Smith				Cabrera			Juma				
	LI	Estimativa	LS		LI	Estimativa	LS		LI	Estimativa	LS
C <sub>0</sub>	165,1789	187,4215	209,6641	C <sub>1</sub>	129,5103	141,4471	153,3839	C <sub>0</sub>	199,4941	211,1535	222,8130
∅	0,5663	0,9030	0,9814	k <sub>0</sub>	0,0028	0,0039	0,0049	∅	0,4945	0,8493	0,9614
v	6	8	10	∅	0,5593	0,8877	0,9752	v	7	9	10
				v <sub>1</sub>	4	5	6				

Fonte: Elaboração dos autores (2022).

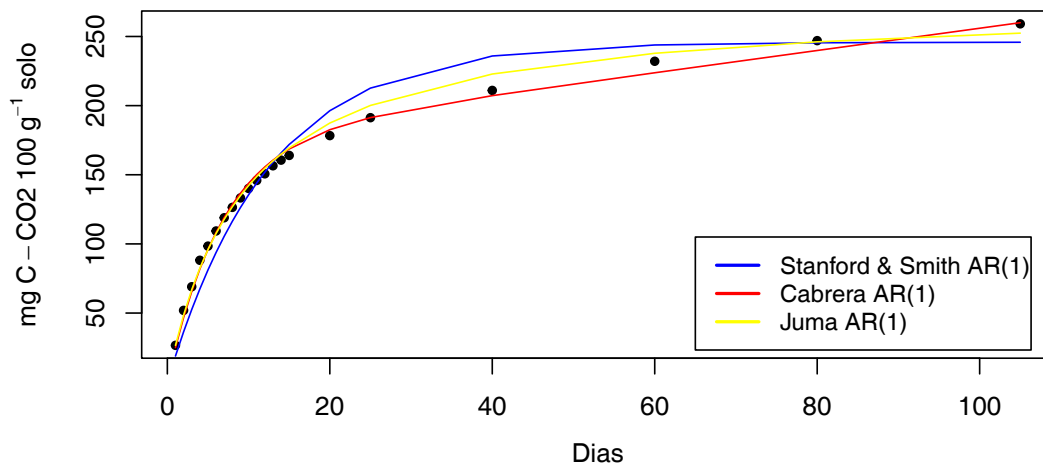
solo tratado com dejetos de suíno. Essa dose, assim como as demais doses apresentadas anteriormente, possui frações de carbono mineralizáveis com comportamento exponencial e frações mais resistentes, com mineralização constante. Na Figura 3 estão apresentados o carbono mineralizado da dose de 24 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume e os ajustes adequados, obtidos com os modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma no solo Nvef, U pois os R<sup>2</sup><sub>aj</sub> dos modelos foram acima de 96% (Tabela 3).

Na Tabela 6 são apresentadas as estimativas dos parâmetros e seus respectivos intervalos de confiança para os modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma, para a dose de 36 Mg ha<sup>-1</sup> no solo Nvef. O modelo Stanford & Smith obteve estimativa do carbono potencialmente

mineralizável de 245,87 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo com o tempo de meia vida de nove dias. O modelo Cabrera obteve estimativa do carbono facilmente mineralizável de 175,50 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo com o tempo de meia vida de cinco dias. Para o modelo Juma a estimativa do carbono potencialmente mineralizável foi de 274,84 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo com o tempo de meia vida de nove dias. Apesar de o parâmetro C<sub>0</sub> ter a mesma interpretação nos modelos Juma e Stanford & Smith, eles estimam quantidade de carbono potencialmente mineralizável diferentes (Tabela 6); e, segundo Sari et al. (2018), selecionar o modelo mais adequado é fundamental para conhecimento do fenômeno estudado.

Dos resultados apresentados na Tabela 3, o modelo Juma foi o que obteve menor valor de

**Figura 3** - Ajustes dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma para a mineralização do carbono da dose de 24 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume no solo Nvef.



Fonte: Elaboração dos autores (2022).



**Tabela 6** - Estimativa dos parâmetros dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma e seus respectivos intervalos de confiança assintóticos (LI - limite inferior e LS - limite superior) de 95% no ajuste do C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo para a dose 36 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume.

Stanford & Smith				Cabrera			Juma				
	LI	Estimativa	LS		LI	Estimativa	LS		LI	Estimativa	LS
C <sub>0</sub>	219,7508	245,8742	271,9976	C <sub>1</sub>	161,6583	175,5068	189,3552	C <sub>0</sub>	259,5319	274,8435	290,1551
∅	0,5467	0,8819	0,9735	k <sub>0</sub>	0,0033	0,0045	0,0058	∅	0,4025	0,7924	0,9389
v	7	9	11	∅	0,3848	0,7626	0,9215	v	8	9	11
				v <sub>1</sub>	4	5	6				

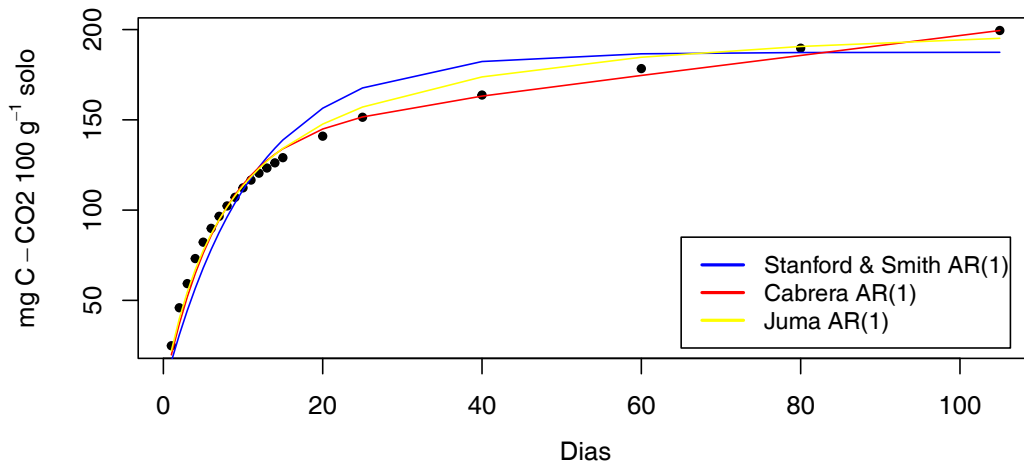
Fonte: Elaboração dos autores (2022).

AICc para a dose 36 Mg ha<sup>-1</sup>, assim, o modelo Juma foi o que melhor se ajustou aos dados da mineralização do carbono para essa dose de lodo de curtume no solo NVef. Conseqüentemente, essa dose possui apenas uma fração de carbono que é mineralizável. Na Figura 4 estão apresentados o carbono mineralizado da dose de 36 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume e os ajustes dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma no solo NVef.

Observa-se que no ajuste dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma para todas as doses (Tabela 2, 4, 5 e 6) em nenhum dos intervalos de confiança dos modelos foi incluído o valor zero e, de acordo com Zeviani et al. (2012), os modelos se ajustaram aos tratamentos.

Para as doses 24 e 36 Mg ha<sup>-1</sup> não houve sobreposição entre os intervalos de confiança para o parâmetro C<sub>0</sub> dos modelos Stanford & Smith e Juma (Tabelas 5 e 6). Com isso, a dose de 36 Mg ha<sup>-1</sup> foi a que proporcionou maior carbono potencialmente mineralizável em relação a todas as outras doses ajustadas. Assim, aumentando a dose, houve estímulo da atividade microbiana, aumentando a mineralização do carbono adicionado ao solo e a degradação da matéria orgânica nativa do solo, como também foi observado por Fernandes et al. (2011). Apesar de ter ocorrido diferença na quantidade de carbono potencialmente mineralizável (C<sub>0</sub>), o parâmetro tempo de meia vida (v) de todas as doses no modelo Stanford & Smith teve sobreposição entre os intervalos de confiança, com isso, observa-se

**Figura 4** - Ajustes dos modelos Stanford & Smith, Cabrera e Juma para a mineralização do carbono da dose de 36 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume no solo NVef.



Fonte: Elaboração dos autores (2022).

que todas as doses necessitam aproximadamente de oito dias para mineralizar metade do carbono potencialmente mineralizável.

Para o modelo Cabrera, os intervalos de confiança do parâmetro  $C_1$  não se sobrepueram para as doses 6, 12, 24 e 36 Mg ha<sup>-1</sup> (Tabelas 2, 4, 5 e 6). Com isso, na dose 36 Mg ha<sup>-1</sup> é onde há maior carbono facilmente mineralizável. Observa-se também que houve sobreposição no tempo de meia vida do carbono facilmente mineralizável ( $v_1$ ) para todas as doses, além de que todas as doses gastam aproximadamente cinco dias para mineralizar metade do carbono facilmente mineralizável.

Apesar de o modelo Stanford & Smith ser o mais utilizado para modelar o carbono mineralizado de resíduos orgânicos (MARTINES et al., 2006; NUNES et al., 2016; ANDRADE et al., 2016), pela Tabela 3 observa-se que o modelo Stanford e Smith não foi indicado como melhor em nenhuma situação quando comparado aos modelos Cabrera ou Juma, pois o AICc foi maior em todas as situações. Assim, a inferência para o carbono potencialmente mineralizável ( $C_0$ ) será feita com base no modelo Juma. Nele, os intervalos de confiança para a estimativa do parâmetro  $C_0$  não se sobrepueram para as doses 6, 12, 24 e 36 Mg ha<sup>-1</sup> (Tabela 2, 4, 5 e 6), indicando que quanto maior a dose aplicada maior a quantidade de carbono potencialmente mineralizável. Por outro lado, houve sobreposição no parâmetro do tempo de meia vida ( $v$ ) de todas as doses do modelo Juma e observa-se que todas as doses gastam aproximadamente nove dias para mineralizar metade do carbono potencialmente mineralizável.

Comparando as estimativas do carbono potencialmente mineralizado ( $C_0$ ) no estudo de Martines et al. (2006), a dose 36 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume, estimou  $C_0$  em 175 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup> solo. Por outro lado, em nosso estudo, com base no modelo Juma que foi melhor ajustado, o  $C_0$  foi de 274 C-CO<sub>2</sub> mg 100 g<sup>-1</sup>

solo. No estudo de Paula et al. (2019), na descrição do carbono mineralizado no solo tratado com dejetos de suínos em uma das suas doses, obtiveram o melhor ajuste utilizando o modelo Juma.

## Conclusões

Os modelos não lineares Stanford & Smith, Cabrera e Juma ajustaram as doses de mineralização de carbono de 6, 12, 24 e 36 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume no solo Nitossolo Vermelho eutroférico típico (Nvef). Quanto maior a dose aplicada maior a quantidade de carbono potencialmente mineralizável.

O modelo Cabrera foi o mais adequado para descrever a mineralização do carbono das doses 6, 12 e 24 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de curtume. Para a dose de 36 Mg ha<sup>-1</sup>, o modelo Juma foi o mais adequado. Embora o modelo Stanford & Smith seja o mais utilizado na literatura para modelar a dinâmica do carbono no solo, não foi indicado como mais adequado em nenhuma dose estudada neste trabalho.

## Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao núcleo de estudos em regressão não linear aplicada (NLIN) da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

## Referências

ANDRADE, L. C.; ANDREAZZA, R.; CAMARGO, F. A. O. Soil microbial activity under wastewater treatment plant sludge doses from an industrial landfill. **Ciência Rural**, v. 46, n. 2, p. 267-272, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20140871>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782016000200267](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782016000200267). Acesso em: 13 maio 2019.

BRASIL. Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. **Diário Oficial da União**. Dispõe sobre a política nacional do meio ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF, 1981.

BRITO, G. A. **Impactos ambientais gerados pelos curtumes**. Disponível em: <http://www.coloquiomoda.com.br/anais/Coloquio%20de%20Moda%20%202013/ARTIGOS-DE-GT/Artigo-GT-Moda-e-Sustentabilidade/Impactos-ambientais-gerados-pelos-curtumes.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2022.

CABRERA, M. L. Modeling the flush of nitrogen mineralization caused by drying and rewetting soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, n. 1, p. 63-66, 1993.

CICB. Centro das Indústrias de curtumes do Brasil (2019). **Exportações brasileiras de couros e peles**. Disponível em: <http://cicb.org.br/storage/files/repositories/phpyx41FX-total-expdez19-vr.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2022.

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

FEITOSA, M. M.; MARTINS, T. da S.; TANIGUCHI, C. A. K.; SOUZA, H. A. Mineralização do carbono de composto de orgânico proveniente de resíduos da produção e abate de pequenos ruminantes em Neossolo Fúlvio. 2015. **XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Natal – RN.

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, F. A.; SILVA, M. A. J. G.; SILVA, W. D.; FERNANDES, T. J.; MUNIZ, J. A. Cross-sectional and longitudinal method for describing growth curve of rabbits. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 74, n. 4, p. 731-740, 2022a. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4162-12534>

FERNANDES, J. G.; SILVA, E. M.; FURTADO, T. D. R.; FERNANDES, T. J.; MUNIZ, J. A. Description of the peach fruit growth curve by diphasic sigmoidal nonlinear models. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 44, n. 3, p. 1-10, 2022b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452022875>

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: [doi: 10.28951/bjb.v40i2.543](https://doi.org/10.28951/bjb.v40i2.543)

- 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: 10.5039/agraria.v14i4a7180
- 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, 2020a. DOI: 10.5935/1806-6690.20200062
- 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, 2020b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20190408>
- JUMA, N. G.; PAUL, E. A.; MARY, B. Kinetic analysis of net mineralization in soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 1, p. 465-472, 1984.
- KONRAD, E. E.; CASTILHOS, D. D. Alterações químicas do solo e crescimento do milho decorrentes da adição de lodos de curtume. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, p. 257-265, 2002.
- MANZONI, S.; PORPORATO, A. A. theoretical analysis of nonlinearities and feedbacks in soilcarbon and nitrogen cycles. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 39, n. 7, p. 1542–1556, 2007.
- MARTINES, A. M.; ANDRADE, C. A.; CARDOSO, E. J. B. N. Mineralização do carbono orgânico em solos tratados com lodo de curtume. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1149-1155, 2006.
- MIRANDA, L. F.; FRÜHAUF, A. C.; LIMA, K. P.; SILVA, E. M.; MUNIZ, J. A. Nonlinear models to describe the growth of *Jatropha* plant (*Jatropha curcas* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, n. 4, p. 1-9, 2021. DOI: 10.5935/1806-6690.20210061
- NUNES, D. A. D.; RODRIGUES, E. F. G.; BARRETO, P. A. B.; RODRIGUES, A. C. G.; MONROE, P. H. M. Carbon and nitrogen mineralization in soil of leguminous trees in a degraded pasture in northern Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Forest Research**, v. 27, n. 1, p. 91-99, 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/283081169\\_Carbon\\_and\\_nitrogen\\_mineralization\\_in\\_soil\\_of\\_leguminous\\_trees\\_in\\_a\\_degraded\\_pasture\\_in\\_northern\\_Rio\\_de\\_Janeiro\\_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/283081169_Carbon_and_nitrogen_mineralization_in_soil_of_leguminous_trees_in_a_degraded_pasture_in_northern_Rio_de_Janeiro_Brazil). Acesso em: 13 maio 2019. DOI: 10.1007/s11676-015-0164-3
- PAULA, J. R. **Mineralização de resíduos orgânicos no solo em condições de campo**. 2012. 33 p. Doutorado (Tese em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- 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>. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1412>. Acesso em: 10 out. 2019.
- 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, A. A.; SILVA, E. M.; FERNANDES, T. J.; MORAIS, A. R.; SÁFADI, T.; MUNIZ, J. A. Bayesian modeling of the coffee tree growth

curve. **Ciência Rural**, v. 52, n. 9, p. 1-10, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210275>

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 Agrônômica**, v. 51, n. 3, p. 1-7, 2020. DOI: <http://doi.org/10.5935/1806-6690.20200041>

PULROLNIK, K. **Transformações do carbono no solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009. 36 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/664366>. Acessado em: 10 jul. 2020.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2022.

RIBEIRO, T. D.; SAVIAN, T. V.; FERNANDES, T. J.; MUNIZ, J. A. The use of the nonlinear models in the growth of pears of "Shinseiki" cultivar. **Ciência Rural**, v. 48, n. 1, p. 1-7, 2018a. Available at: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782018000100202](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782018000100202). Access em: 20 dez. 2019.

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, 2018b. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-29452018949>

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: 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. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1299/pdf>. Acesso em: 30 set. 2021. 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. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1287/pdf>. Acesso em: 30 set. 2021. 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, 2020<sup>a</sup>. 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: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452020177>

SILVA, E. M.; FURTADO, T. D. R.; FRÜHAUF, A. C.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J. Bayesian approach to the zinc extraction curve of soil with sewage sludge. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 42, p. 1-9, 2020c. DOI: 10.4025/actascitechnol.v42i1.46893

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: <http://dx.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>

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. Available at: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1168/pdf>. Access em: 26 nov. 2019.

STANFORD, G.; SMITH, S. J. Nitrogen mineralization potentials of soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 36, n. 3, p. 465-471, 1972.

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, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18406/2316-1817v14n120221680>

YOUNGQUIST, C. Understanding soil carbon dynamics. **Acres USA**, v. 47, n. 12, 2017.

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. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782012001000012](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782012001000012). Acesso em: 13 maio 2019. DOI: <http://dx.DOI.org/10.1590/S0103-84782012001000012>