

# Comparação de modelos não lineares na descrição da mineralização de carbono em solo de serapilheira

Edilson Marcelino Silva<sup>1</sup>

Ariana Campos Frúhauf<sup>2</sup>

Sérgio Alberto Jane<sup>3</sup>

Édipo Menezes da Silva<sup>4</sup>

Joel Augusto Muniz<sup>5</sup>

Tales Jesus Fernandes<sup>6</sup>

## Resumo

A serapilheira é uma importante fonte de nutrientes para as árvores e pode melhorar a qualidade dos solos degradados. O objetivo deste trabalho foi descrever a dinâmica de mineralização do carbono em solos de serapilheiras por modelos não lineares, estimando os tempos de meia-vida. Foi avaliada a mineralização de carbono de solo sob três coberturas florestais: fragmento florestal de mata atlântica (capoeira), espécies arbóreas de *Acacia auriculiformis* (acácia) e *Mimosa caesalpiniiifolia* (sabiá) de área reflorestada com histórico de degradação. Foram feitas 12 medidas do carbono mineralizado até os 222 dias do início da incubação de solos de serapilheira. Foram ajustados os modelos Stanford e Smith, Juma e Cabrera, pelo método de mínimos quadrados utilizando o algoritmo de Gauss-Newton por meio do software R. O modelo Stanford e Smith foi mais adequado na descrição de todos os tratamentos, com base no Critério de Informação de Akaike com estimativas dos tempos de meia-vida dos solos de Acácia, de Capoeira e de Sabiá de 25, 44 e 51 dias, respectivamente. Os modelos não lineares Stanford e Smith e Juma descreveram de forma satisfatória a mineralização do carbono dos solos de todos os tratamentos.

**Palavras-chave:** Ciclagem de nutrientes. Dióxido de carbono. Solo florestal.

## Introdução

A sustentabilidade das florestas está relacionada à ciclagem de nutrientes de modo a potencializar seu retorno para as árvores, sendo a serapilheira acumulada uma importante fonte de nutrientes para as árvores no ecossistema florestal, pois à medida que as folhas, galhos e raízes são incorporados à serapilheira e sofrem o processo de decomposição, ocorre liberação de nutrientes ao solo e, conseqüentemente, disponibilização para as árvores (BARRETO *et al.*, 2010; GODINHO *et al.*, 2014). Além disso, a plantação de espécies arbóreas é uma alternativa para recuperação de áreas

1 Universidade Federal de Lavras/UFLA. Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária. Lavras, Minas Gerais, Brasil. [edilsonmg3@hotmail.com](mailto:edilsonmg3@hotmail.com). Departamento de Estatística, Caixa Postal 37, Campus Universitário da UFLA, Lavras, Minas Gerais, CEP 37200-000.

2 UFLA. Doutoranda em Estatística e Experimentação Agropecuária. [arianafruhauf@gmail.com](mailto:arianafruhauf@gmail.com).

3 UFLA. Mestre em Estatística e Experimentação Agropecuária. [serztjane@gmail.com](mailto:serztjane@gmail.com).

4 UFLA. Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária. [ediposvm01@gmail.com](mailto:ediposvm01@gmail.com).

5 UFLA. Professor Titular. [joamuniz@ufla.br](mailto:joamuniz@ufla.br).

6 UFLA. Professor Adjunto. [tales.jfernandes@ufla.br](mailto:tales.jfernandes@ufla.br).

degradadas (NUNES *et al.*, 2016), no entanto, pouco se sabe sobre os ecossistemas naturais e a ciclagem de nutrientes em florestas nativas e plantações florestais no Brasil (GODINHO *et al.*, 2014; MORAIS *et al.*, 2017).

A maior quantidade de matéria orgânica e a presença de substâncias de fácil decomposição favorecem a mineralização do carbono no início do processo, ou seja, a dinâmica de decomposição ocorre a taxas decrescentes conforme o material orgânico é mineralizado (PULROLNIK, 2009; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006); de forma similar, ocorre a liberação de outros nutrientes ao solo, esses processos podem ser descritos por modelos não lineares (PAULA *et al.*, 2020; PEREIRA; MUNIZ; SILVA, 2005; SILVA *et al.*, 2019a; SILVA *et al.*, 2019b; ZEVIANI *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2013). O conhecimento da dinâmica de mineralização do carbono (C) no solo é essencial para o desenvolvimento de práticas adequadas no uso dos solos, sendo indicativo da contribuição dos resíduos orgânicos na demanda das árvores ao longo do ciclo da cultura (BARRETO *et al.*, 2010; GODINHO *et al.*, 2014).

O modelo não linear mais utilizado para descrever a dinâmica do carbono no solo é o Stanford e Smith (ANDRADE; ANDREAZZA; CAMARGO, 2016; ANDRADE *et al.*, 2015), inclusive há dados de decomposição de serapilheira (BARRETO *et al.*, 2010; NUNES *et al.*, 2016). Trata-se de um modelo com dois parâmetros que representam o carbono potencialmente mineralizável e a constante de mineralização. Outro modelo utilizado é o não linear Juma (PAULA *et al.*, 2020; PEREIRA; MUNIZ; SILVA, 2005), com dois parâmetros que apresentam interpretação prática direta, carbono potencialmente mineralizável e tempo de meia-vida, respectivamente. Em solos de serapilheira, pode ser que o processo de mineralização apresente duas fases de mineralização, uma fase devido às substâncias facilmente mineralizáveis e outra fase devido às substâncias mais resistentes. Em processos que apresentam duas fases, a utilização do modelo Cabrera tem apresentado bons ajustes (PAULA *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2019a; SILVA *et al.*, 2019b; ZEVIANI *et al.*, 2012; PEREIRA *et al.*, 2009).

O objetivo do trabalho foi descrever a dinâmica de mineralização do carbono em solos de serapilheira pelos modelos não lineares Stanford e Smith (1972), Juma, Paul e Mary (1984) e Cabrera (1993), indicando o modelo mais adequado e, além disso, estimando-se o carbono potencialmente mineralizável e os tempos de meia-vida.

## Material e métodos

Os dados utilizados para o ajuste dos modelos foram extraídos de Nunes, Rodrigues e Rodrigues (2009) e correspondem aos resultados médios de um experimento com Latossolo Vermelho Amarelo do município Conceição de Macabu/RJ, que avaliou a mineralização de carbono de solo sob três coberturas florestais: fragmento florestal de mata atlântica (capoeira), espécies arbóreas de *Acacia auriculiformis* (acácia) e *Mimosa caesalpiniiifolia* (sabiá) de área reflorestada com histórico de degradação.

O solo avaliado foi coletado nas entrelinhas de plantio da camada 0 - 10 cm de profundidade, as amostras foram duplicadas, sendo utilizados 50 g de cada solo. As amostras foram incubadas em colunas de percolação construídas com tubos de PVC (29,4 cm de altura e 4,7 cm de diâmetro). A mineralização do carbono foi avaliada por meio da emissão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) durante a incubação. O CO<sub>2</sub> liberado foi captado em 10 mL de uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 1 mol L<sup>-1</sup>, cujo excesso foi titulado com uma solução de ácido clorídrico (HCl) 0,5 mol L<sup>-1</sup>. Nas amostras de solos de serapilheira mediu-se o carbono mineralizado sempre nas mesmas unidades experimentais aos 6, 12, 18, 25, 38, 53, 84, 112, 138, 168, 194 e 222 dias do início da incubação.

Avaliaram-se os modelos Stanford e Smith:

$$C_i = C_0 (1 - \exp(-kt_i)) + \varepsilon_i \quad (1)$$

Juma:

$$C_i = \frac{C_0 t_i}{t_{1/2} + t_i} + \varepsilon_i \quad (2)$$

Cabrera:

$$C_i = C_1 (1 - \exp(-k_1 t_i)) + k_0 t_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

Nos modelos,  $C_i$  é o carbono mineralizado, em  $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ , até o tempo  $t_i$  (em dias);  $C_0$  é a fração do carbono orgânico suscetível à mineralização;  $k$ ,  $k_1$  e  $k_0$  são constantes de mineralização;  $t_{1/2}$  é tempo de meia-vida do carbono potencialmente mineralizável;  $C_1$  é a fração do carbono orgânico facilmente mineralizável e  $\varepsilon_i$  é o erro experimental com distribuição normal com média 0 e variância  $\sigma^2$ . O tempo de meia-vida ( $t_{1/2}$ ) dos modelos Stanford e Smith e Cabrera foram estimados por  $t_{1/2} = \ln(2)/k$  e  $t_{1/2} = \ln(2)/k_1$ , respectivamente (ZEVIANI *et al.*, 2012).

Para verificar os pressupostos dos modelos de regressão foram feitos os testes: Shapiro-Wilk, para verificar o pressuposto de normalidade dos erros; Breusch-Pagan, para verificar a hipótese de que os erros são homocedásticos e o teste de Durbin-Watson, para verificar a independência dos erros. Quando o teste de Durbin-Watson rejeitou a hipótese nula de que os erros experimentais foram independentes, os erros do modelo foram considerados da seguinte maneira:  $\varepsilon_t = \phi \varepsilon_{t-1} + \lambda_t$ , em que  $\phi$  é o parâmetro de autocorrelação de primeira ordem AR(1) e  $\lambda_t$  é o ruído branco (MORETTIN; TOLOI, 2006; SAVIAN; MUNIZ, 2007; PRADO; SAVIAN; MUNIZ, 2013; SOUSA *et al.*, 2014; MUIANGA *et al.*, 2016; MUNIZ; NASCIMENTO; FERNANDES, 2017; RIBEIRO *et al.*, 2018a; JANE, *et al.*, 2020; PRADO *et al.*, 2020). Nos casos em que a suposição de normalidade foi atendida, estimou-se o intervalo de confiança com 95 % de probabilidade para os parâmetros dos modelos com base na expressão:

$$IC(\theta) \Rightarrow \hat{\theta}_i \pm t_{(q; 0,025)} S(\hat{\theta}_i) \quad (4)$$

em que:  $\hat{\theta}_i$  é a estimativa do parâmetro do modelo,  $t_{(q; 0,025)}$  é o valor na distribuição t-Student com  $q = n - p$  graus de liberdade e área de 0,025 à sua direita e  $S(\hat{\theta}_i)$  é o erro padrão da estimativa do parâmetro obtido pela raiz quadrada do termo correspondente na diagonal da matriz de variância e covariância estimada (DRAPER; SMITH, 2014).

A qualidade do ajuste foi avaliada pelo coeficiente de determinação ajustado:

$$R_{aj}^2 = 1 - \frac{(n-i)(1-R^2)}{n-p} \quad (5)$$

e pelo desvio padrão residual:

$$DPR = \sqrt{QME} \quad (6)$$

A seleção do melhor modelo foi feita com base no critério de informação de Akaike:

$$AIC = -2 \ln L(\hat{\theta}) + 2p. \quad (7)$$

Nas expressões,  $n$  é o número de observações utilizadas no ajuste do modelo,  $i$  está relacionado ao intercepto do modelo, que é igual a 1 se houver intercepto e 0 em caso contrário,  $p$  é o número de parâmetros,  $R^2 = 1 - \frac{SQE}{SQT}$  é o coeficiente de determinação, sendo SQE a soma de quadrados dos erros, SQT a soma de quadrados total,  $QME = \frac{SQE}{n-p}$  o quadrado médio do erro e  $\ln L(\hat{\theta})$  o valor do logaritmo natural da função de verossimilhança, considerando as estimativas dos parâmetros.

A estimativa dos parâmetros dos modelos de regressão não linear foi feita de maneira aproximada por métodos numéricos iterativos, pois não existe forma fechada para resolver o sistema de equações normais. Entre os métodos iterativos, o de Gauss-Newton é o mais utilizado (PEREIRA; MUNIZ; SILVA, 2005; FERNANDES *et al.*, 2015; FERNANDES; PEREIRA; MUNIZ, 2017; SILVEIRA *et al.*, 2018; RIBEIRO *et al.*, 2018b; JANE *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2019c; SILVA *et al.*, 2019d). A estimativa dos parâmetros foi feita pelo método dos mínimos quadrados generalizados, implementado na função `gnls`, do pacote `nlme` (PINHEIRO *et al.*, 2015), do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2015).

## Resultados e discussão

O modelo Cabrera não se ajustou a tratamento algum, pois os intervalos de confiança para pelo menos um parâmetro incluiu o valor zero, indicando que os tratamentos não apresentaram dois compartimentos de carbono mineralizáveis. Assim não foram apresentados os resultados para este modelo nas tabelas seguintes. No ajuste do modelo Molina (duplo exponencial) a dados de mineralização de C de solo sob plantação de eucalipto, Barreto *et al.* (2010) obtiveram parâmetros não significativos para o modelo, indicando que o processo não apresentou dois compartimentos de carbono. Por outro lado, Silva *et al.* (2019a) observaram duas fases de mineralização de carbono dos tratamentos solo + palha de aveia, solo + dejetos líquidos de suínos e solo + dejetos de suínos + palha de aveia, além disso, Silva *et al.* (2019b) observaram o mesmo comportamento para o tratamento solo + lodo de esgoto + palha de aveia.

Estão apresentados na Tabela 1 os resultados da análise dos erros estimados pelos modelos Stanford e Smith e Juma, com base nos dados de mineralização do carbono no solo de serapilheira para os testes de Shapiro-Wilk (SW), Breusch-Pagan (BP) e Durbin-Watson (DW). Para todos os tratamentos e ambos os modelos, o teste de SW não foi significativo ( $p$ -valor  $> 0,05$ ), assim, foi corroborada a suposição de normalidade dos erros pelo teste. Pelo teste de BP verificou-se que a hipótese de homogeneidade de variâncias não foi rejeitada ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) para todos os tratamentos e ambos os modelos, indicando que a variância residual foi homogênea. Pelo teste de DW percebeu-se que para todos os tratamentos e ambos os modelos, os erros foram independentes ( $p$ -valor  $> 0,05$ ), exceto para o modelo Juma ajustado ao tratamento solo de Acácia ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). A independência

dos erros foi rejeitada para este tratamento pelo fato de as medidas serem feitas na mesma unidade experimental, assim foi adicionado o parâmetro  $\phi$  para explicar esta correlação do estudo (TABELA 3), ou seja, para esse tratamento foi apresentado ajuste com erro autorregressivo de primeira ordem AR(1). Silva *et al.* (2019a), Silva *et al.* (2019b) e Hess e Schmidt (1995) também observaram correlação nos erros ao ajustarem modelos não lineares a dados acumulados de mineralização de CO<sub>2</sub> de diversos resíduos orgânicos no solo.

**Tabela 1** – P-valores dos testes de Shapiro-Wilk (SW), Durbin-Watson (DW) e Breusch-Pagan (BP) aplicados aos erros dos modelos e avaliadores de qualidade de ajuste, coeficiente de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ), desvio padrão residual (DPR) e critério de informação de Akaike (AIC) para o carbono mineralizado, para os tratamentos.

Tratamento	Modelo	SW p-valor	DW p-valor	BP p-valor	$R_{aj}^2$	DPR	AIC
Acácia	Stanford e Smith	0,5489	0,3620	0,2516	<b>0,9887</b>	<b>21,53</b>	<b>120,52</b>
	Juma	0,7665	<b>0,0060</b>	0,1790	0,9690	33,61	130,28
Capoeira	Stanford e Smith	0,4174	0,9540	0,1371	<b>0,9947</b>	<b>19,86</b>	<b>118,42</b>
	Juma	0,9507	0,3700	0,7260	0,9921	23,58	122,89
Sabiá	Stanford e Smith	0,7716	0,7100	0,7228	<b>0,9827</b>	<b>35,17</b>	<b>133,28</b>
	Juma	0,9561	0,2400	0,4232	0,9744	42,48	138,19

Fonte: Elaboração dos autores (2020).

As estimativas dos parâmetros do modelo Stanford e Smith e o tempo de meia-vida ( $t_{1/2}$ ) com seus respectivos intervalos com 95% de confiança estão apresentados na Tabela 2. Observa-se pelos intervalos de confiança que todos os parâmetros do modelo não incluíram o valor zero, indicando que são significativos para todos os tratamentos.

**Tabela 2** – Estimativas para os parâmetros do modelo Stanford e Smith ajustado ao carbono mineralizado dos tratamentos, tempo de meia-vida ( $t_{1/2}$ ) e seus respectivos intervalos de confiança assintóticos de 95% (LI – limite inferior e LS – limite superior).

Parâmetro	LI	Estimativa	LS
		Acácia	
$C_0$	546,1478	569,0000	592,9476
$k$	0,0238	0,0273	0,0313
$t_{1/2}$	22,1198	25,3714	29,1238
		Capoeira	
$C_0$	737,3757	770,00000	806,7935
$k$	0,0137	0,0156	0,0176
$t_{1/2}$	39,3609	44,3472	50,2644
		Sabiá	
$C_0$	722,6286	785,7000	867,2678
$k$	0,0106	0,0135	0,0167
$t_{1/2}$	41,4066	51,2682	64,9622

Fonte: Elaboração dos autores (2020).

Considerando os intervalos de confiança do  $C_0$  dos solos de serapilheira, observa-se que não houve sobreposição entre o solo Acácia e os solos Capoeira e Sabiá, indicando que o carbono

potencialmente mineralizável desse tratamento foi menor que dos dois tratamentos (TABELA 2). Resultado similar foi obtido para os  $t_{1/2}$ . Os tempos de meia-vida dos solos Acácia, Capoeira e Sabiá considerando-se o modelo Stanford e Smith foram de aproximadamente 25, 44 e 51 dias e carbono potencialmente mineralizável estimado em 569, 770 e 785 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

Na Tabela 3, apresentam-se as estimativas dos parâmetros do modelo Juma com seus respectivos intervalos com 95% de confiança.

**Tabela 3** – Estimativas para os parâmetros do modelo Juma ajustado ao carbono mineralizado dos tratamentos e seus respectivos intervalos de confiança assintóticos de 95% (LI – limite inferior e LS – limite superior).

Parâmetro	LI	Estimativa	LS
		Acácia	
$C_0$	585,2125	669,3164	753,4202
$t_{1/2}$	18,8531	33,3629	47,8727
$\varphi$		0,5225	
		Capoeira	
$C_0$	943,9254	1019,3420	1109,4929
$t_{1/2}$	59,5298	72,7270	89,5100
		Sabiá	
$C_0$	932,3150	1084,1800	1305,0996
$t_{1/2}$	63,4984	91,6100	136,6673

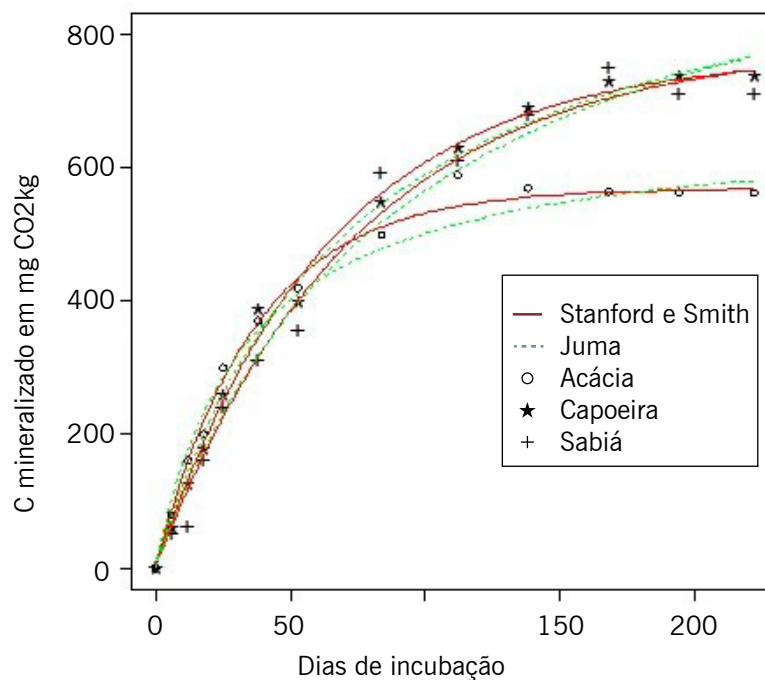
**Fonte:** Elaboração dos autores (2020).

Pelo intervalo de confiança do parâmetro  $C_0$  (TABELA 3) foi obtida menor quantidade de carbono potencialmente mineralizável para o tratamento Acácia em relação aos tratamentos Capoeira e Sabiá, pois não houve sobreposição dos intervalos de confiança. O  $t_{1/2}$  foi estimado em aproximadamente 33, 72 e 91 dias para os tratamentos Acácia, Capoeira e Sabiá, respectivamente.

Comparando-se as amplitudes (limite superior – limite inferior) dos intervalos de confiança dos parâmetros  $C_0$  e  $t_{1/2}$  do modelo Juma (TABELA 3) e do modelo Stanford e Smith (TABELA 2), observa-se que para todos os tratamentos a amplitude dos parâmetros do modelo Juma foi maior, assim, os intervalos das estimativas foram menos precisos. Além disso, comparando-se os intervalos de confiança do parâmetro  $C_0$  do modelo Stanford e Smith (TABELA 2) com os do modelo Juma (TABELA 3), percebe-se que o modelo Juma estimou quantidade de carbono potencialmente mineralizável maior que o modelo Stanford e Smith, pois não houve sobreposição nos intervalos, exceto para o tratamento Acácia. Dessa maneira, é importante ressaltar que a variação observada nas estimadas de  $C_0$  e  $t_{1/2}$  nos diversos modelos se deve às peculiaridades dos modelos estatísticos (ZEVIANI *et al.*, 2012).

Para ambos os modelos ajustados, foram obtidos valores de  $R_{aj}^2$  superiores a 96% (TABELA 1) indicando bom ajuste dos modelos aos dados, como pode ser observado na Figura 1, além do desvio padrão residual (DPR) próximo para ambos os modelos sendo menores para o modelo Stanford e Smith. Os dois modelos foram adequados para descrever a mineralização de carbono no solo. Como foram obtidos valores de AIC (TABELA 1) menores para todos os tratamentos para o modelo Stanford e Smith, este modelo se mostrou mais adequado para descrever todos os tratamentos em estudo.

**Figura 1** – Modelos Stanford e Smith e Juma ajustados ao CO<sub>2</sub> mineralizado acumulado durante o período de incubação dos solos sob povoamentos de Acácia, Sabiá e Capoeira.



**Fonte:** Elaboração dos autores (2020).

## Conclusão

Os modelos não lineares de Stanford e Smith e de Juma descreveram adequadamente o processo de mineralização do carbono dos solos de serapilheira. O modelo Stanford e Smith foi o mais adequado na descrição de todos os tratamentos com estimativas do carbono potencialmente mineralizável de 569, 770 e 785 mg CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> e tempos de meia-vida de 25, 44 e 51 dias dos solos Acácia, Capoeira e Sabiá, respectivamente. O solo Acácia obteve quantidade de carbono potencialmente mineralizável menor que os solos Capoeira e Sabiá.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Instituto de Bolsas de Estudos de Moçambique (IBE).

## Comparison of nonlinear models in the description of carbon mineralization in litter soil

### Abstract

Litter is an important source of nutrients for trees and can improve the quality of degraded soils. The objective of this study was to describe the dynamics of carbon mineralization in litter soils using

nonlinear models, estimating half-life times. Soil carbon mineralization under three types of forest cover was evaluated: Atlantic forest fragment (capoeira), *Acacia auriculiformis* trees (acacia), and *Mimosa caesalpiniiifolia* (sabiá) from a reforested area with a history of degradation. Twelve measurements of the mineralized carbon were made up to 222 days after the beginning of the incubation of litter soils. Stanford and Smith, Juma, and Cabrera models were fitted by the least squares method using the Gauss-Newton algorithm in the R software. The Stanford and Smith model was more appropriate in describing all treatments, based on the Akaike Information Criterion, with estimates of half-life for Acácia, Capoeira, and Sabiá soils at 25, 44, and 51 days, respectively. The Stanford and Smith and Juma nonlinear models satisfactorily described the carbon mineralization of soils of all treatments.

**Keywords:** Nutrient cycling. Carbon dioxide. Forest soil.

## Referências

ANDRADE, C. A.; BIBAR, M. P. S.; COSCIONE, A. R.; PIRES, A. M. M.; SOARES, A. G. Mineralization and effects of poultry litter biochar on soil cation exchange capacity. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 5, p. 407-416, 2015. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X20150005000407](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X20150005000407). Acesso em: 13 maio 2019. DOI: <http://dx.Doi.org/10.1590/S0100-204X20150005000008>.

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. 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. DOI: <http://dx.Doi.org/10.1590/0103-8478cr20140871>.

BARRETO, P. A. B.; RODRIGUES, E. F. G.; RODRIGUES, A. C. G.; BARROS, N. F.; ALVES, B. J. R.; FONSECA, S. Carbon and nitrogen mineralization in soils under an eucalyptus plantation chronosequence. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 735-745, 2010. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832010000300015](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832010000300015). Acesso em: 13 maio 2019. DOI: <http://dx.Doi.org/10.1590/S0100-06832010000300015>.

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

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**, 3<sup>rd</sup> ed, reprint, New York: J. Wiley, 2014.

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. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/283735241\\_Parameterization\\_effects\\_in\\_nonlinear\\_models\\_to\\_describe\\_growth\\_curves](https://www.researchgate.net/publication/283735241_Parameterization_effects_in_nonlinear_models_to_describe_growth_curves). Acesso em: 30 set. 2019.

FERNANDES, T. J.; PEREIRA, A. A.; MUNIZ, J. A. Double sigmoidal models describing the growth of coffee berries. **Ciência Rural**, v. 47, n. 8, p. 1-7, 2017. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782017000800401](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782017000800401). Acesso em: 30 set. 2019.



GODINHO, T. O.; CALDEIRA, M. V. W.; ROCHA, J. H. T.; CALIMAN, J. P.; TRAZZI, P. A. Quantification of biomass and nutrients in the accumulated litter in a section of submontane seasonal semideciduous forest, ES. **Cerne**, v. 20, n. 1, p. 11-20, 2014. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-77602014000100002](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602014000100002). Acesso em: 13 maio 2019. DOI: <http://dx.Doi.org/10.1590/S0104-77602014000100002>.

HESS, T. F.; SCHMIDT, S. K. Improved procedure for obtaining statistically valid parameter estimates from soil respiration data. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.27, p. 1-7, 1995. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/003807179400166X?via%3Dihub>. Acesso em: 13 maio 2019. DOI: [https://DOI.org/10.1016/0038-0717\(94\)00166-X](https://DOI.org/10.1016/0038-0717(94)00166-X).

JANE, S. A.; FERNANDES, F. A.; SILVA, E. M.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J. Comparison of the polynomial and nonlinear models on description of pepper growth. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n.4, p. 1-7, 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/337935579\\_Recife\\_v14\\_n4\\_e7180](https://www.researchgate.net/publication/337935579_Recife_v14_n4_e7180). Acesso em: 13 maio 2019.

JANE, S. A.; FERNANDES, F. A.; SILVA, E. M.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J.; PIMENTEL, G. V. Adjustment of growth curve of different sugarcane varieties using nonlinear models. **Ciência Rural**, v. 50, n.3, p. 1-10, 2020. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-84782020000300204&script=sci\\_arttext&tIng=en](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-84782020000300204&script=sci_arttext&tIng=en). Acesso em: 13 maio 2019.

JUMA, N. G., PAUL, E. A.; MARY, B. Kinetic analysis of net mineralization in soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, p. 465-472, 1984.

MORAIS, V. A.; SANTOS, C. A.; MELLO, J. M.; DADID, H. C.; ARAÚJO, E. J. G.; SCOLFORO, J. R. S. Spatial and vertical distribution of litter and belowground carbon in a brazilian cerrado vegetation. **Cerne**, v. 23, n. 1, p. 43-52, 2017. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-77602017000100043](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602017000100043). Acesso em: 13 maio 2019. DOI: <http://dx.Doi.org/10.1590/01047760201723012247>.

MOREIRA, F. M. S, SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Editora da UFLA, p. 1-729, 2006.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**, 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

MUIANGA, C. A.; MUNIZ, J. A.; NASCIMENTO, M. S.; FERNANDES, T. J.; SAVIAN, T. V. Descrição da curva de crescimento de frutos do cajueiro por modelos não lineares. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 38, n. 1, p. 22-32, 2016. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-29452016000100022&lng=en&nrm=iso&tIng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-29452016000100022&lng=en&nrm=iso&tIng=pt). Acesso em: 30 set. 2019.

MUNIZ, J. A.; NASCIMENTO, M. S.; FERNANDES, T. J. Nonlinear models for description of cacao fruit growth with assumption violations. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 250-257, 2017. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1983-21252017000100250](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-21252017000100250) Acesso em: 30 set. 2019.

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**, n. 27, 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.

NUNES, D. A. D.; RODRIGUES, E. F. G.; RODRIGUES, A. C. G. Mineralization of C in soil and non-litter addition of plant under different coverage. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 4, n. 2, p. 2176-2179, 2009. Disponível em: <http://revistas.aba-agroecologia.org.br/index.php/rbagroecologia/article/view/7912/5656> . Acesso em: 30 set. 2019.

OLIVEIRA, W. J.; SILVA, C. A.; MUNIZ, J. A.; SAVIAN, T. V. Nitrogen mineralization in latosols fertilized with organic residues. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 715-725, 2013. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832013000300018&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-06832013000300018&script=sci_abstract) . Acesso em: 06 set. 2019.

PAULA, G. S.; SILVA, E. M.; FURTADO, T. D. R.; FRUHAUF, 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. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1412> . Acesso em: 10 out. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v11n420191412> .

PEREIRA, J. M.; MUNIZ, J. A.; SILVA, C. A. Nonlinear models to predict nitrogen mineralization in an oxisol. **Scientia Agricola**, v. 62, p. 395-400, 2005. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-90162005000400014](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162005000400014) . Acesso em: 13 maio 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162005000400014> .

PEREIRA, J. M.; MUNIZ, J. A.; SÁFADI, T.; SILVA, C. A. Comparison of the models for prediction of the mineralized nitrogen: a Bayesian approach. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 1792-1797, 2009. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-70542009000700016&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542009000700016&lng=en&nrm=iso&tlng=pt) . Acesso em: 30 set. 2019.

PINHEIRO, J.; BATES, D.; DEBROY, S.; SARKAR, D. nlme: linear and nonlinear mixed effects models. **R package version 3**. p. 1-122. 2015. URL: <http://CRAN.R-project.org/package=nlme> . Acesso em: 10 fev. 2019.

PRADO, T.K.L. do; SAVIAN, T.V.; FERNANDES, T.J.; MUNIZ, J.A. Study of the growth curve of the internal cavity of fruit dwarf green coconut. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 51, n.3, p. 1-7, 2020. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-66902020000300401&lng=en&nrm=iso&tlng=en](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-66902020000300401&lng=en&nrm=iso&tlng=en) . Acesso em: 10 out. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200041> .

PRADO, T. K. L.; SAVIAN, T. V.; MUNIZ, J. A. Ajuste dos modelos Gompertz e Logístico aos dados de crescimento de frutos de coqueiro anão verde. **Ciência Rural**, v. 43, n. 5, p. 803-809, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cr/v43n5/a13313cr5976.pdf> Acesso em: 30 set. 2019.

- PULROLNIK, K. **Transformações do carbono no solo**. 1. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2015.
- RIBEIRO, T. D.; MATTOS, R. W. P.; MORAIS, A. R.; MUNIZ, J. A. Description of the growth of Pequi fruits by nonlinear models. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 40, n. 4, p. 1-11, 2018a. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-29452018000400705](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-29452018000400705). Acesso em: 20 dez. 2019.
- 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, 2018b. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782018000100202](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782018000100202). Acesso em: 20 dez. 2019.
- SAVIAN, T. V.; MUNIZ, J. A. A study of in situ degradability: heterogeneity of variances and correlated errors. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 5, p. 548-554, 2007. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-90162007000500013](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162007000500013). Acesso em: 30 set. 2019.
- 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. 2019.
- 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. 2019.
- SILVA, E. M.; FRUHAUF, A. C.; FERNANDES, F. A.; PAULA, G. S.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J. Método de Newton e Gauss-Newton na estimação dos parâmetros de modelo de regressão não linear. **Sigmae**, v. 8, n. 2, p. 728-734, 2019c. Disponível em: <https://publicacoes.unifal-mg.edu.br/revistas/index.php/sigmae/article/view/946/692>. Acesso em: 30 set. 2019.
- SILVA, E. M.; SILVA, V. F.; FERNANDES, F. A.; MUNIZ, J. A.; FERNANDES, T. J. O crescimento de frutos de pêssegos caracterizados por modelos de regressão não lineares. **Sigmae**, v. 8, n. 2, p. 290-294, 2019d. Disponível em: <https://publicacoes.unifal-mg.edu.br/revistas/index.php/sigmae/article/view/958/643>. Acesso em: 30 set. 2019.
- 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. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1168/pdf>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- SOUSA, I. F.; KUNZLE, J. E.; MUNIZ, J. A.; GUIMARÃES, R. M.; SAVIAN, T. V.; MUNIZ, F. R. Fitting nonlinear autoregressive models to describe coffee seed germination. **Ciência Rural**, v. 44, n. 11, p. 2016-2021, 2014. DOI:10.1590/0103-8478cr20131341. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782014001102016](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782014001102016). Acesso em: 06 set. 2019.

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

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, 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>.

**Submetido:** 04/10/2019

**Aceito:** 24/06/2020