

Comparação de modelos não lineares na descrição da mineralização do carbono no solo tratado com dejetos de suínos

Gustavo Sérgio de Paula¹

Edilson Marcelino Silva²

Thais Destefani Ribeiro Furtado³

Ariana Campos Frühauf⁴

Joel Augusto Muniz⁵

Resumo

Uma estratégia para reduzir os impactos ambientais causados por dejetos de suínos consiste em utilizar esses resíduos em solos para produção de culturas agrícolas. Por meio das curvas de mineralização de carbono é possível determinar os melhores períodos para utilização da matéria orgânica visando ao manejo adequado do solo e das culturas. Objetivou-se com este estudo comparar o ajuste de modelos não lineares que descrevem a mineralização de carbono no solo. O experimento foi realizado usando o delineamento blocos ao acaso com quatro repetições e quatro tratamentos. Foram usados os seguintes tratamentos: sem adição (0), doses mensais de 7,5; 15,0 e 30,0 m³ ha⁻¹ de dejetos de suínos. As amostras de solo coletadas foram incubadas por 26 dias e foram feitas sete observações do volume de carbono mineralizado ao longo do tempo. A descrição da mineralização do carbono foi feita pelos modelos Stanford e Smith, Cabrera e Juma, considerando estrutura de erros autorregressivos AR (1) quando necessário. Para comparar os ajustes foi utilizado o critério de informação Akaike (AIC). Em geral, a descrição da mineralização de carbono nos tratamentos pelos modelos não lineares foi adequada. O modelo Juma foi o mais adequado para descrever o tratamento de dose 0. O modelo Stanford e Smith foi o mais adequado para descrever os tratamentos de dose 7,5 e 15,0 m³ ha⁻¹. O modelo Cabrera foi o mais adequado para descrever o tratamento de dose 30,0 m³ ha⁻¹.

Palavras-chave: Resíduo orgânico. Modelo Stanford e Smith. Modelo Cabrera. Modelo Juma.

Introdução

A suinocultura desempenha relevante papel no agronegócio brasileiro, tendo em vista o grande número de empregos gerados na cadeia produtiva, o expressivo volume de receitas para os produtores e de divisas para o país. O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de carne suína no mundo, ocupando a 4^a colocação (CONAB, 2017; GUIMARÃES et al., 2017). A alta produção de suínos acaba gerando uma grande quantidade de dejetos líquidos que, se não forem devidamente reutilizados ou descartados, podem causar diversos problemas ambientais, como a

1 Universidade Federal de Lavras (UFLA), graduando em Agronomia. gustavo.paula1@agronomia.ufla.br. Departamento de Estatística, Campus Universitário da UFLA, Lavras, Minas Gerais, CEP 37200-000.

2 UFLA, doutorando em Estatística e Experimentação Agropecuária. edilsonmg3@hotmail.com.

3 UFLA, doutoranda em Estatística e Experimentação Agropecuária. t.destefani.ribeiro@gmail.com.

4 UFLA, doutoranda em Estatística e Experimentação Agropecuária. arianafruhauf@gmail.com.

5 UFLA, professor titular. joamuniz@des.ufla.br.

contaminação dos rios e possíveis problemas de saúde pública advindos da liberação de substâncias como o nitrato em cursos d'água (CADONÁ, 2017). Entretanto, existem alternativas para o uso de dejetos de suínos capazes de diminuir o impacto ambiental, e isso pode ser feito por meio da utilização dos dejetos líquidos como fonte de nutrientes para culturas agrícolas. Na composição química dos dejetos é possível encontrar uma grande quantidade de nitrogênio que é requerido em grandes quantidades pelas plantas (BISON PINTO et al., 2014); com a entrada de material orgânico no solo a população de microrganismos é estimulada, o que pode resultar na imobilização do carbono ou mineralização na forma de dióxido de carbono, além disso, a quantidade e a qualidade do substrato e sua interação com a microbiota do solo podem resultar na mineralização da matéria orgânica nativa do solo (FERNANDES et al., 2011).

Vários fatores afetam o processo de decomposição de resíduos orgânicos no solo, como: a relação entre o pH dos dejetos e do solo; a composição química do material, a quantidade de carbono, a relação C:N e a incorporação ou não dos dejetos ao solo. No início da decomposição dos resíduos orgânicos no solo geralmente ocorre a maior parte da mineralização do carbono do material, por apresentar uma fração mais solúvel com compostos lábeis, quando essa fração diminui começa a ocorrer uma mineralização mais lenta por possuir compostos mais resistentes aos microrganismos (GIACOMINI et al., 2008). Este comportamento da curva de mineralização pode ser descrito por funções matemáticas que constituem modelos de regressão não lineares (FERNANDES et al., 2011; SILVA et al., 2019a).

Desta forma, é de extrema importância o estudo das curvas de mineralização do carbono ao longo do tempo, pois é necessário entender a dinâmica de decomposição de resíduos orgânicos que podem auxiliar nas práticas de manejo de solo mais favoráveis à produção de culturas agrícolas. Para descrever as curvas de mineralização de carbono são utilizados os modelos não lineares, eles fornecem bom ajuste, além disso, resumem as informações contidas nos dados em apenas poucos parâmetros fornecendo valores de estimativas com interpretações biológicas e práticas úteis para os produtores rurais (SILVEIRA et al., 2018).

Um dos modelos não lineares mais utilizados para descrever a mineralização do carbono em solos ao longo do tempo é o Stanford e Smith (1972). Esse modelo é muito utilizado por diversos autores para estudar a dinâmica do carbono com bons resultados em pesquisas com plantações de eucalipto (BARRETO et al., 2010), lodo de curtume (MARTINES et al., 2006), lodo de tanque séptico, lodo digestor anaeróbio, lodo reator (SILVA, 2017), carcaça e despojo de pequenos ruminantes (PEREIRA, 2014), dejetos de suínos e palha de aveia (SILVA et al., 2019a), lodo de esgoto e palha de aveia (SILVA et al., 2019b).

Em trabalhos com modelos não lineares nos quais são feitas medidas nas mesmas unidades experimentais ao longo do tempo é normal que as observações possam estar correlacionadas, o que ocorre também em estudos de decomposição em áreas de solo (SILVA et al., 2019a), apresentando estruturas de dependência nos erros experimentais. Segundo Silveira et al. (2018), para obter ajuste apropriado é necessário considerar a modelagem dessa correlação.

Objetivou-se com este estudo avaliar o ajuste dos modelos de regressão não lineares Cabrera (1993), Juma et al. (1984) e Stanford e Smith (1972) para descrever a mineralização de carbono de dejetos de suínos no solo, obtidos desde o segundo dia até o vigésimo sexto, e também identificar o modelo mais adequado para descrever a dinâmica de decomposição de resíduo orgânico no solo.

Material e métodos

Os dados que serão utilizados para os ajustes dos modelos foram extraídos de Fernandes et al. (2011) e correspondem aos resultados em médias de um experimento que avaliou a mineralização do carbono de diferentes doses de dejetos de suínos no solo. O experimento foi realizado em São Gabriel do Oeste, Estado de Mato Grosso do Sul. Foi utilizado um solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, ocupado por pastagem para suporte da produção pecuária bovina leiteira. As amostras de solo foram coletadas da camada 0-10 cm. Os dejetos dos suínos são compostos por fezes e urina, restos de alimentos e água de bebedouro e do processo de limpeza.

O delineamento foi em blocos ao acaso com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos consistiram na adição de um controle sem adição (0) e aplicação de doses mensais de 7,5; 15,0 e 30,0 m³ ha⁻¹ de dejetos de suínos. A mineralização do carbono (C) foi obtida em condições de laboratório por meio da medição do C liberado pela atividade microbiana do solo na forma de dióxido de carbono (CO₂). As amostras do solo foram secas ao ar e peneiradas (2,0 mm). Alíquotas de 50,0 g de solo foram acondicionadas em frascos de 100,0 ml. A umidade do solo foi corrigida para 60,0% da capacidade máxima de retenção de água. A quantidade de carbono mineralizado foi avaliado aos 2, 6, 9, 13, 16, 22 e 26 dias de incubação, totalizando 7 observações.

Os modelos não lineares avaliados foram: Cabrera (1), Juma (2) e Stanford & Smith (3) com as seguintes equações:

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

$$C_i = C_0 t_i / (v + t_i) + u_i \quad (2)$$

$$C_i = C_0(1 - \exp(-k t_i)) + u_i \quad (3)$$

em que:

$$u_i = \phi_1 u_{i-1} + \dots + \phi_p u_{i-p} + \varepsilon_i \quad u_i = \phi_1 u_{i-1} + \dots + \phi_p u_{i-p} + \varepsilon_i \text{ com}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

n: o número de tempos em que foram realizadas as medições;

u_i: o resíduo do ajuste no i-ésimo tempo;

φ₁: parâmetro autoregressivo de ordem 1;

u_{i-1}: o resíduo do ajuste do tempo imediatamente anterior à i-ésima medida;

φ_p: φ_p o parâmetro autoregressivo de ordem p;

u_{i-p}: o resíduo do ajuste em p tempos anterior à i-ésima medida;

ε_i: o erro experimental, com distribuição normal, N(0,σ²).

Nos modelos, quando os resíduos forem independentes, os parâmetros φ_i serão nulos e, em consequência, u_i = ε_i (MAZZINI et al., 2003; GUEDES et al., 2004, SAVIAN et al., 2007; MENDES et al., 2008; PRADO et al., 2013; SOUZA et al., 2014)).

Nas equações (1), (2) e (3), C_i define o valor médio da quantidade de carbono mineralizado nos tempos t_i em dias; C₀ indica o valor da quantidade de carbono potencialmente mineralizável; C₁ representa a quantidade de carbono facilmente mineralizável; k, k₁, k₀ são taxas de mineralização; v tempo de meia vida; t_i refere-se ao tempo da i-ésima mensuração, expresso em dias (PEREIRA et al., 2005; PEREIRA et al., 2009). O tempo de meia vida, v, do carbono potencialmente mineralizável considerando o modelo Stanford & Smith e o carbono facilmente mineralizável considerando o modelo Cabrera foi estimado por v = ln(2)/k e v = ln(2)/k₁, respectivamente. É importante ressaltar que,

se o parâmetro k_0 do modelo Cabrera for zero, o modelo se reduz ao Stanford e Smith. Além disso, o modelo Cabrera considera duas frações de carbono, uma que é facilmente mineralizável (C_1) e outra resistente (k_0). Os modelos Juma e Stanford e Smith consideram apenas uma fração de carbono que é potencialmente mineralizável (C_0).

A estimação dos parâmetros C_0 , C_1 , k , k_1 , k_0 e v dos modelos foi feita pelo método de mínimos quadrados, por meio do qual é obtido o Sistema de Equações Normais (SEN) não linear. No caso de modelos não lineares, o sistema não apresenta uma solução direta, sendo necessária a utilização de algoritmos iterativos de busca numérica para obter as estimativas dos parâmetros (CARNEIRO et al., 2014; MUIANGA et al., 2016). Vários processos iterativos são descritos na literatura, sendo que será utilizado neste trabalho o algoritmo de Gauss-Newton (MUNIZ et al., 2017; RIBEIRO et al., 2018a; RIBEIRO et al., 2018b). Este algoritmo considera a expansão em série de Taylor para aproximar o modelo de regressão não linear com termos lineares e, então, aplicar o método dos mínimos quadrados ordinários para a estimação dos parâmetros. Os cálculos das estimativas para os dados amostrais, bem como os ajustes gráficos e toda a parte computacional envolvida na elaboração deste trabalho foram obtidas utilizando o software estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016).

Sob a suposição de normalidade dos resíduos foram obtidos os intervalos de confiança para as estimativas dos parâmetros. De acordo com Draper & Smith (2014), define-se o intervalo de 95% de confiança para o parâmetro β_i do modelo como:

$$IC(\beta_i) : b_i \pm t(vv;0;025).S(b_i) \tag{4}$$

em que:

b_i é a estimativa para o parâmetro (β_i);

$S(b_i)$ é o erro padrão da estimativa;

$t(vv;0;025)$ é o quantil superior da distribuição t de Student, considerando $\alpha = 5\%$ e o grau de liberdade, $v = n - d$ é o número de parâmetros do modelo.

Por meio do Teste de Durbin Watson, foi possível verificar a presença de dependência residual entre as medidas, avaliando se o resíduo de uma observação pode estar associado como resíduo das observações adjacentes (FURTADO et al., 2019). O Teste Breusch-Pagam foi utilizado para verificar a homogeneidade dos resíduos e o Teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade.

Os modelos foram comparados quanto à qualidade do ajuste e foi indicado qual o modelo mais adequado para descrever a curva de mineralização em função do tempo. Foram utilizados os seguintes critérios:

i. Coeficiente de determinação ajustado, R^2_{aj} , definido por:

$$R^2_{aj} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - d} \tag{5}$$

em que R^2 é o coeficiente de determinação; n é o número de observações e d é o número de parâmetros do modelo. Um modelo deve ser preferido em relação ao outro se apresentar um maior valor de R^2_{aj} .

ii. Critério de informação de Akaike, AIC, dado pela expressão:

$$AIC = -2\log L(\tilde{\theta}) + 2p \quad (6)$$

em que $L(\tilde{\theta})$ é o máximo da função de verossimilhança, p é o número de parâmetros no modelo e \log é o operador logarítmico natural. Entre dois modelos, quanto menor for o valor de AIC, melhor o modelo se ajusta aos dados.

Resultados e discussão

Os resultados obtidos pela análise dos erros experimentais (TABELA 1) foram expressos pelos Testes de Shapiro-Wilk, Breusch-Pagan e Durbin-Watson. De acordo com os resultados, o Teste de Shapiro-Wilk indicou normalidade residual para todos os modelos e todos os tratamentos com a exceção do tratamento dose 0 do Modelo Stanford e Smith ($p < 0,05$), sendo assim esse modelo foi desconsiderado e não foram apresentadas as estimativas dos parâmetros nem os avaliadores de qualidade do ajuste para este modelo na dose 0. O Teste de Breusch-Pagan indicou homogeneidade residual para todos os modelos e tratamentos ($p > 0,05$). No Teste de Durbin-Watson houve correlação para todos os tratamentos do modelo Juma e no tratamento dose 30,0 do modelo Cabrera, assim, considerou-se a correlação no estudo e foi apresentado ajuste com erros autorregressivos de primeira ordem AR(1) para explicar a dependência dos resíduos desses tratamentos. Essa correlação nos erros já era esperada, visto que as medidas foram feitas na mesma parcela ao longo do tempo. Silva et al. (2019a) também observaram correlação no ajuste de modelos não lineares a dados de mineralização de carbono de dejetos de suínos; além disso, Silveira et al. (2018) também observaram correlação dos erros ao ajustar modelo não linear à produção acumulada de biogás de resíduos de suínos. Os tratamentos avaliados pelo modelo Stanford e Smith e pelo modelo Cabrera nas doses 0; 7,5 e 15,0 apresentaram independência dos erros.

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^2_{aj}) e critério de informação de Akaike (AIC) para o carbono mineralizado, em $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$, dos tratamentos analisados.

Tratamento (Doses de dejetos)	Modelo	SW p-valor	BP p-valor	DW p-valor
0	Stanford e Smith	0,0172	0,7773	0,6880
0	Cabrera	0,3564	0,2199	0,9240
0	Juma	0,4946	0,1730	0,0220
7,5	Stanford e Smith	0,4235	0,0824	0,0620
7,5	Cabrera	0,6256	0,1797	0,1280
7,5	Juma	0,3216	0,1876	0,0120
15	Stanford e Smith	0,7274	0,1939	0,7220
15	Cabrera	0,6247	0,2079	0,7020
15	Juma	0,3421	0,2237	0,0100
30	Stanford e Smith	0,5128	0,8778	0,6260
30	Cabrera	0,2637	0,1472	0,0200
30	Juma	0,3857	0,1469	0,0200

Fonte: Elaboração dos autores (2019).

As estimativas dos parâmetros dos modelos com seus respectivos intervalos de confiança de 95% de probabilidade estão apresentados na Tabela 2. A estimativa do intervalo de confiança do parâmetro k_0 do modelo Cabrera considerando as doses 0; 7,5 e 15 m^3ha^{-1} incluíram o valor zero. De acordo com Zeviani et al. (2012), esse resultado indica um valor paramétrico zero, portanto, o modelo não se ajustou a esses tratamentos; desconsiderando o parâmetro k_0 , o modelo se reduz ao de Stanford e Smith com apenas uma fração de carbono potencialmente mineralizável. Na dose 30 do modelo Cabrera foi constatado pelas estimativas dos intervalos de confiança que todos os parâmetros do modelo não incluíram o valor zero, mostrando que o modelo descreve o tratamento. O tempo de meia vida (v) do carbono facilmente mineralizável foi estimado em 2,5 dias (TABELA 2). Apenas esse tratamento apresentou duas fases de mineralização, uma que é facilmente mineralizável (C_1) e outra resistente (k_0). Silva et al. (2019a) observaram que na utilização de dejetos de suínos com doses de 20 m^3ha^{-1} , incorporado ao solo, o modelo Cabrera foi mais adequado, assim, o tratamento apresentou duas fases de mineralização do carbono.

Tabela 2 – Estimativas para os parâmetros dos modelos e seus respectivos intervalos de confiança assintóticos de 95% (LI – limite inferior e LS – limite superior), no ajuste do C mineralizado, em mg de $CO_2.kg^{-1}$, dos tratamentos analisados.

Modelo Stanford e Smith							
Dose 0				Dose 7,5			
	LI	Estimativa	LS	LI	Estimativa	LS	
C_0	--	--	--	C_0	93,6419	94,9092	96,1986
k	--	--	--	k	0,2499	0,2643	0,2798
v	--	--	--	v	2,4772	2,6225	2,7736
Dose 15				Dose 30			
	LI	Estimativa	LS	LI	Estimativa	LS	
C_0	97,3797	97,9326	98,4894	C_0	100,8229	101,4000	101,9444
k	0,2627	0,2690	0,2755	k	0,2586	0,2647	0,2709
v	2,5159	2,5767	2,6385	v	2,5586	2,6186	2,6803
Modelo Cabrera							
Dose 0				Dose 7,5			
	LI	Estimativa	LS	LI	Estimativa	LS	
C_1	87,0386	91,5985	96,8376	C_1	88,1567	91,5890	95,3962
k_0	=0,2614	0,0285	0,1813	k_0	=0,0177	0,1539	0,3129
k_1	0,2443	0,2694	0,2964	k_1	0,2598	0,2800	0,3013
v	2,3386	2,5729	2,8372	v	2,3005	2,4755	2,6680
Dose 15				Dose 30			
	LI	Estimativa	LS	LI	Estimativa	LS	
C_1	95,2927	98,3546	101,6897	C_1	98,8410	100,0313	100,2218
k_0	-0,1682	-0,0195	0,1199	k_0	0,0548	0,0638	0,0726
k_1	0,2518	0,2672	0,2832	k_1	0,2692	0,2702	0,2711
v	2,4476	2,5941	2,7528	v	2,5568	2,5653	2,5748
				ϕ		-0,9544	

Modelo Juma							
Dose 0				Dose 7,5			
	LI	Estimativa	LS		LI	Estimativa	LS
C_0	95,1644	105,4848	115,8052	C_0	101,679	110,0563	118,4334
v	1,7842	3,0315	4,2789	v	2,1089	3,0908	4,0727
ϕ		0,3152		ϕ		0,3056	
Dose 15				Dose 30			
	LI	Estimativa	LS		LI	Estimativa	LS
C_0	102,9182	113,4426	123,9671	C_0	107,5219	117,7371	127,9524
v	1,8619	3,0481	4,2344	v	1,9906	3,1155	4,2403
ϕ		0,3190		ϕ		0,2985	

Fonte: Elaboração dos autores (2019).

O modelo Stanford & Smith ajustou nas doses 7,5; 15,0 e 30,0 e o modelo Juma ajustou aos dados dos quatro tratamentos, pois, por meio das estimativas dos intervalos de confiança, percebe-se que todos os parâmetros do modelo não incluíram o valor zero.

Considerando os intervalos de confiança para a estimativa do parâmetro C_0 no modelo Stanford e Smith, observa-se que não há sobreposição entre os intervalos de confiança nos tratamentos dose 7,5; 15,0 e 30,0. Com isso, na dose 30,0 houve maior carbono potencialmente mineralizável em relação às doses 15,0 e 7,5 respectivamente, a dose 15,0 teve maior carbono potencialmente mineralizável que a dose 7,5. Esses resultados já eram de se esperar, uma vez que um aumento da dose pode estimular a atividade microbiana, aumentando a mineralização do carbono adicionado ao solo e também a degradação da matéria orgânica nativa do solo, como observou Fernandes et al. (2011). Apesar de ter ocorrido diferença na quantidade de carbono potencialmente mineralizável (C_0), o parâmetro tempo de meia vida (v) de todos os tratamentos no modelo Stanford e Smith tiveram sobreposição entre os intervalos de confiança; com isso, observa-se que todos os tratamentos gastam aproximadamente 2,6 dias para mineralizar metade do carbono potencialmente mineralizável.

No modelo Juma, considerando os intervalos de confiança para a estimativa do parâmetro C_0 em todos os tratamentos, nota-se que houve sobreposição, sendo assim, todos os tratamentos apresentaram a mesma quantidade de carbono potencialmente mineralizável. Apesar da quantidade de carbono adicionada ser diferente, apenas esse fator não explica totalmente a complexidade existente no ecossistema solo, em que diversos outros fatores como a relação C:N e a forma do íon N podem acelerar ou não a mineralização do carbono pelos microrganismos (FERNANDES et al., 2011). Houve sobreposição entre os intervalos de confiança do parâmetro tempo de meia vida (v) em todos os tratamentos do modelo, indicando que todos os tratamentos gastam aproximadamente 3 dias para decompor metade do carbono potencialmente mineralizável, assim como no modelo Stanford e Smith.

De maneira geral, todos os modelos obtiveram ótimos ajustes em todos os tratamentos, pois os valores do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) foram acima de 94% (TABELA 3). Os ajustes podem ser observados nas Figuras de 1 a 4. No ajuste dos modelos não lineares, Stanford e Smith e Cabrera, na mineralização de carbono de dejetos de suínos e palha de aveia no solo, Silva et al. (2019a) obtiveram valores de R^2_{aj} maiores que 0,97, indicando que os modelos descrevem adequadamente os dados. Na dose 0 o único modelo que descreveu a mineralização de carbono foi o Juma. Nas doses 7,5 e 15,0 o modelo que melhor descreveu a mineralização de carbono é o Stanford e

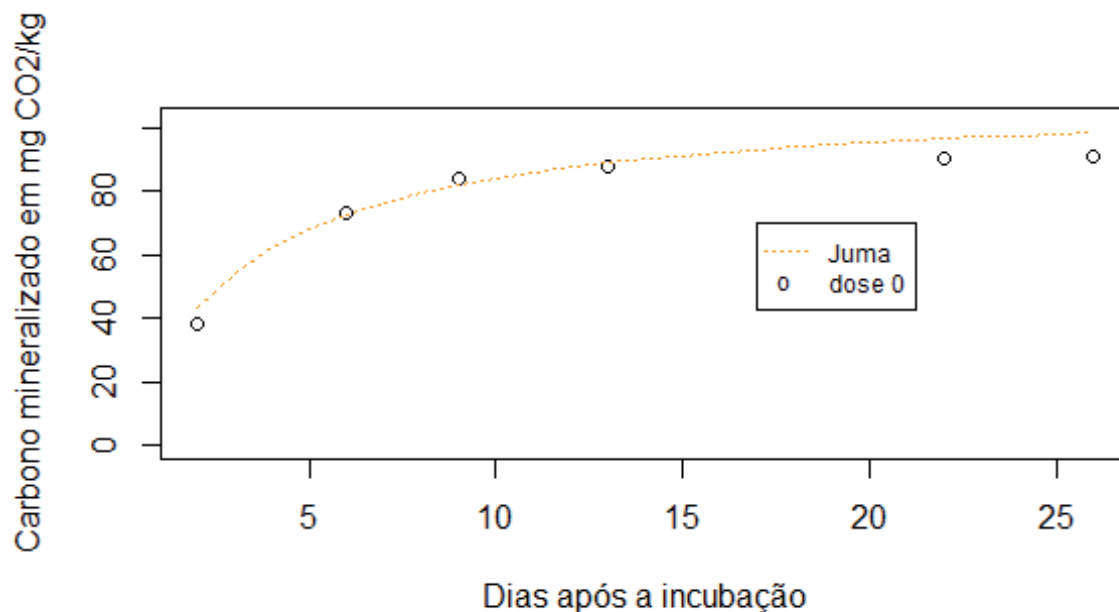
Smith que apresenta os menores valores de AIC e os maiores valores de R^2_{aj} em relação ao modelo Juma. E na dose 30,0 o modelo que melhor descreveu a mineralização de carbono foi o Cabrera por apresentar o menor AIC e maior R^2_{aj} seguido pelo modelo Stanford e Smith e Juma respectivamente.

Tabela 3 – Estimativas dos critérios de seleção: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e critério de Informação de Akaike (AIC), para os modelos ajustados na descrição do carbono mineralizado, em $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$, dos tratamentos analisados.

Tratamento	Modelo	Critério de seleção	
		R^2_{aj}	AIC
Dose 0	Stanford e Smith	0,9993	12,4458
	Cabrera	0,9992	14,1103
	Juma	0,9482	39,5166
Dose 7,5	Stanford e Smith	0,9988	16,9311
	Cabrera	0,9995	11,0225
	Juma	0,9701	36,9607
Dose 15,0	Stanford e Smith	0,9997	7,1026
	Cabrera	0,9997	8,7364
	Juma	0,9544	39,6909
Dose 30,0	Stanford e Smith	0,9998	7,1097
	Cabrera	0,9999	1,5950
	Juma	0,9610	37,3420

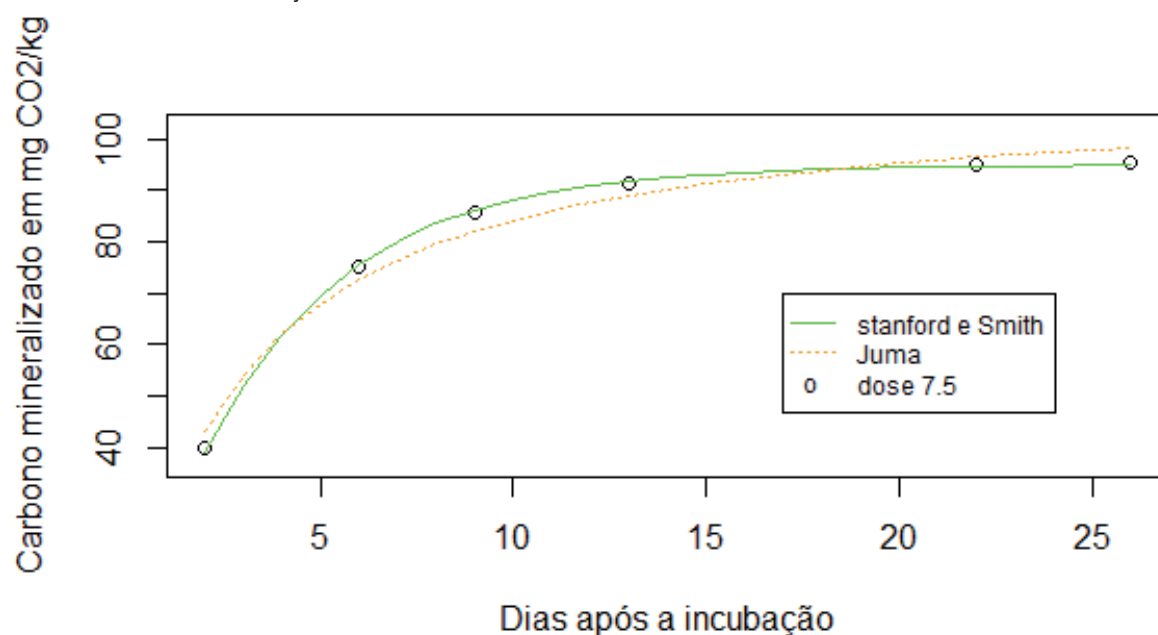
Fonte: Elaboração dos autores (2019).

Figura 1 – Modelo ajustado à mineralização de carbono, em $\text{mg de CO}_2 \text{ kg}^{-1}$, em função do tempo de incubação, na dose $0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de dejetos de suínos.



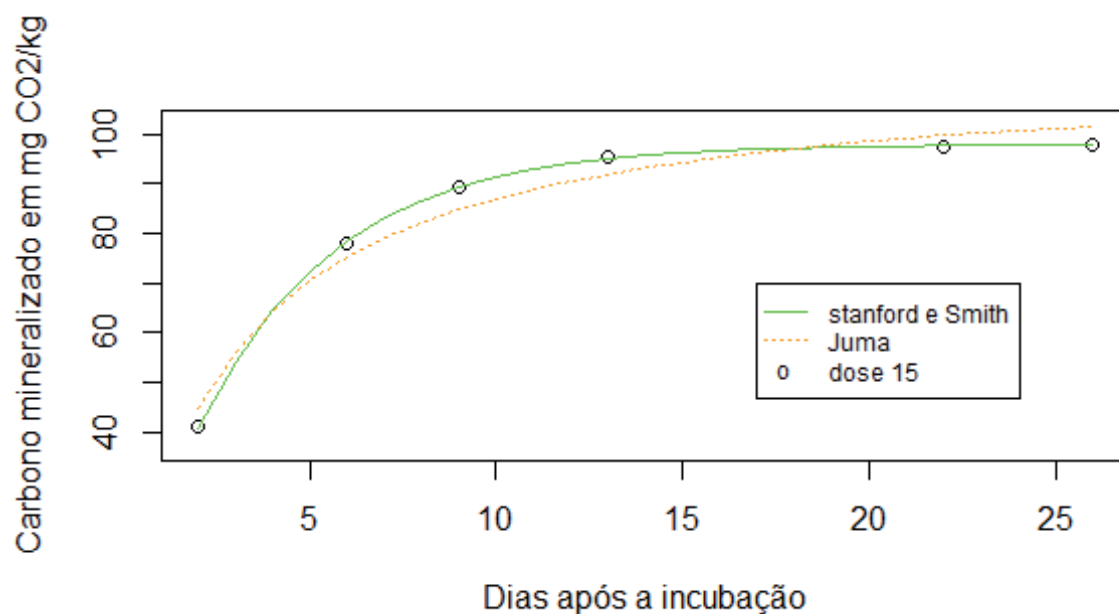
Fonte: Elaboração dos autores (2019).

Figura 2 – Modelo ajustado à mineralização de carbono, em mg de CO₂ kg⁻¹, em função do tempo de incubação, na dose 7.5 m³ ha⁻¹ de dejetos de suínos.



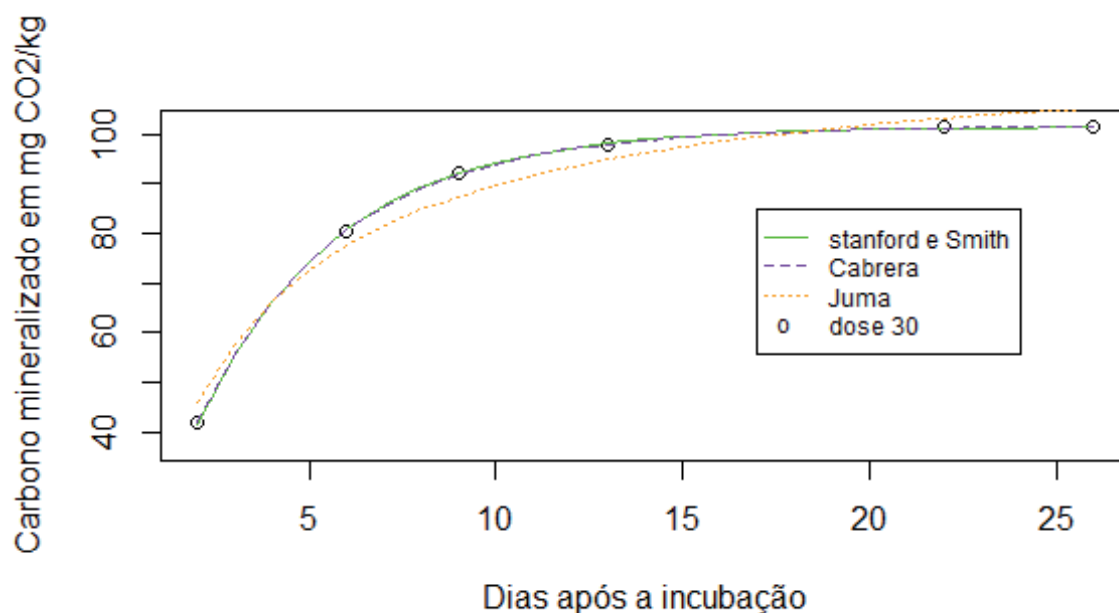
Fonte: Elaboração dos autores (2019).

Figura 3 – Modelo ajustado à mineralização de carbono, em mg de CO₂ kg⁻¹, em função do tempo de incubação, na dose 15,0 m³ ha⁻¹ de dejetos de suínos.



Fonte: Elaboração dos autores (2019).

Figura 4 – Modelo ajustado à mineralização de carbono, em mg de CO₂ kg⁻¹, em função do tempo de incubação, na dose 30,0 m³ ha⁻¹ de dejetos de suínos.



Fonte: Elaboração dos autores (2019).

Conclusões

O modelo Juma foi o mais adequado na descrição da mineralização do carbono no tratamento de dose 0 m³ha⁻¹, desta forma, esse tratamento apresenta apenas uma fração de carbono que é mineralizável.

O modelo Stanford e Smith foi melhor na descrição da mineralização do carbono em dois tratamentos, nas doses 7,5 m³ ha⁻¹ e 15 m³ ha⁻¹, ou seja, esses tratamentos apresentaram apenas frações de carbono que são mineralizados exponencialmente.

O modelo Cabrera foi o mais adequado para descrever a mineralização de carbono no tratamento de dose 30,0 m³ ha⁻¹, portanto, esse tratamento certamente apresenta frações de carbono mineralizáveis com comportamento exponencial e frações mais resistentes, com mineralização constante.

Comparison of nonlinear models for the description of carbon mineralization in soils treated with pig slurry

Abstract

One of the strategies to reduce environmental impacts caused by pig slurry is its application to soils for agricultural productions. Carbon mineralization curves can be used to determine the best periods for the use of organic matter for an adequate management of soils and growing plants. The objective of this study was to evaluate the fit of nonlinear models for soil carbon mineralization. The experiment was conducted using a randomized block design with four replications and four treatments. The treatments consisted of monthly applications of pig slurry at rates of 0, 7.5, 15.0, and 30.0 m³ ha⁻¹ of pig slurry.

Soil samples were collected and incubated for 26 days; then, seven observations of mineralized carbon volume were made over time. The description of the carbon mineralization followed the Stanford and Smith, Cabrera, and Juma models, considering the structure of autoregressive errors AR (1), when necessary; the fits were compared using the Akaike Information Criterion (AIC). The description of carbon mineralization in the treatments by nonlinear models was, in general, adequate. Juma was the most adequate model to describe the treatment with rate of 0. Stanford and Smith was the most adequate model to describe the treatments with rates of 7.5 and 15.0 m³ ha⁻¹. Cabrera was the most adequate model to describe the treatment with rate of 30.0 m³ ha⁻¹.

Keywords: Organic waste. Stanford and Smith model. Cabrera model. Juma model.

Referências

BARRETO, P. A. B.; RODRIGUES, E. F. G.; RODRIGUES, A. C. G.; BARROS, N. F.; ALVES, B. J. R.; FONSECA, S. Mineralização de nitrogênio e carbono em solos sob plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 735-745, jun. 2010. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832010000300015&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 14 jan. 2019.

BISON PINTO, M. A.; FABBRIS, C.; BASSO, C. J.; SANTI, A. L.; GIROTTO, E. Aplicação de dejetos líquido de suínos e manejo do solo na sucessão aveia/milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 2, p. 205-212, abr./jun. 2014. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/25759/16779>. Acesso em: 14 jan. 2019.

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.

CADONÁ, E. A. **Contaminação da água pelo uso agrícola de dejetos de suínos na bacia hidrográfica rio coruja/bonito, braço do Norte/SC**. 2017. 127 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CARNEIRO, A. P. S.; MUNIZ, J.A; CARNEIRO, P.L.S; MALHADO, C.H.M.M; MARTINS FILHO, R.; SILVA, F.F. Identidade de modelos não lineares para comparar curvas de crescimento de bovinos da raça Tabapuã. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 1, p. 57-62, 2014. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/18183>. Acesso em: 14 jan 2019.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Análise mensal de carne suína**, dezembro/2017, 5 p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-carne-suina>. Acesso em: 14 jan 2020.

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

FERNANDES, A. H. B. M.; 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: Embrapa Pantanal, 2011.

FURTADO, T. D. R.; MUNIZ, J. A.; SILVA, E. M.; FERNANDES, J. G. Drying kinetics of jaboticaba pulp by regression models. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 41, n. 1, p. e-097, 2019.

GUEDES, M. H. P.; MUNIZ, J. A.; PEREZ, J. R. O.; SILVA, F. F.; AQUINO, L. H.; SANTOS, C. L. Estudo das curvas de crescimento de cordeiros das raças Santa Inês e Bergamácia considerando Heterogeneidade de variâncias. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 2, p. 381-388, mar./abr. 2004. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542004000200019&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 15 jan. 2019.

GUIMARÃES, D. D.; AMARAL, G. F.; MAIA, G. B. S.; LEMOS, M. L. F.; ITO, M.; CUSTODIO, S. **Suinocultura: estrutura da cadeia produtiva, panorama do setor no brasil e no mundo e o apoio do BNDES**. Agroindústria, 2017.

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.

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**, Brasília, v. 41, n. 7, p. 1149-1155, jul. 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2006000700011&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 14 jan. 2019.

MAZZINI, A. R. A.; MUNIZ, J. A.; AQUINO, L. H.; SILVA, F. F. Análise da curva de crescimento de machos Hereford. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 5, p. 1105-1112, 2003.

MENDES, P. N.; MUNIZ, J. A.; SILVA, F. F.; MAZZINI, A. R. A. Modelo Logístico difásico no estudo do crescimento de fêmeas da raça Hereford. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 7, p. 1984-1990, 2008.

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**, Jaboticabal, v. 38, n. 1, p. 22-32, 2016.

MUNIZ, J. A.; NASCIMENTO, M. S.; FERNANDES, T. J. Nonlinear models for description of cacao fruit growth with assumption violations. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 1, p. 250-257, 2017.

PEREIRA, J. M.; MUNIZ, J. A.; SILVA, C. A. Nonlinear models to predict nitrogen mineralization in an Oxisol. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 4, p. 395-400, ago. 2005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162005000400014&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 15 jan. 2019.

PEREIRA, J. M.; MUNIZ, J. A.; SAFADI, T.; SILVA, C. A. Comparação entre modelos para predição do nitrogênio mineralizado: uma abordagem bayesiana. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v. 33, p. 1792-1797, 2009.

PEREIRA, M. S. **Avaliação das taxas de mineralização de carbono e nitrogênio do composto orgânico proveniente de carcaça e despojo de pequenos ruminantes**. 2014. 48 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

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**, Santa Maria, v. 43, n. 5, p. 803-809, maio 2013.

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**, Santa Maria, v. 48, n. 1, e20161097, jan. 2018 (a). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20161097>. Acesso em: 16 jan. 2019.

RIBEIRO, T. D.; PACOPAHYBA, R. W. M.; MORAIS, A. R.; MUNIZ, J. M. Description of the growth of pequi fruits by nonlinear models. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 40, n. 4, p. e-949, 2018 (b). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452018949>. Acesso em: 16 jan. 2019.

SAVIAN T. V.; MUNIZ, J. A. A Study of in situ degradability: Heterogeneity of variances and correlated errors. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 64, p. 548-554, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590%2Fs0103-90162007000500013>. Acesso em: 16 jan. 2019.

SILVA, D. A. P. **Mineralização da matéria orgânica de lodo aplicado no solo e produtividade do capim-tifton 85**. 2017. 92 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SILVA, D. M.; ANTONIOLLI, Z. I.; JACQUES, R. J. S.; SILVEIRA, A. O.; SILVA, D. A. A.; RACHE, M. M.; PASSOS, V. H. G.; SILVA, B. R. Indicadores Microbiológicos de Solo em Pastagem com Aplicação Sucessiva de Dejetos de Suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1585-1594, dez. 2015. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832015000601585&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 14 jan. 2019.

SILVA, E. M.; RIBEIRO, T. D.; FERNANDES, J. G.; MUNIZ, J. A. Descrição da mineralização do carbono de dejetos de suíno e palha de aveia no solo por modelos não lineares. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 11, p. 210-225, 2019a. Disponível em: https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1299/pdf_1. Acesso em: 14 jan. 2020

SILVA, E. M.; SILVEIRA, S. C.; RIBEIRO, T. D.; MUNIZ, J. A. Descrição da decomposição do lodo de esgoto e palha de aveia por modelos não lineares. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 11, p. 153-164, 2019b. Disponível em: https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1287/pdf_1. Acesso em: 14 jan. 2020

SILVEIRA, S. C.; MUNIZ, J. A.; SOUSA, F. A.; CAMPOS, A. T. Modelos não lineares ajustados à produção acumulada de biogás provenientes de camas sobrepostas de suínos. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 10, n. 3, p. 91-103, jul./set. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1168>. Acesso em: 14 jan. 2019.

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

SOUSA, I. F.; KUNZLE NETO, 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**, Santa Maria, v. 44, p. 2016-2021, 2014.

ZEVIANI, W. M.; SILVA, C. A.; CARNEIRO, W. J. O.; MUNIZ, J. A. Modelos não lineares para a liberação de potássio de esterco animal em latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 10, p. 1789-1796, out., 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cr/v42n10/a28712cr3006.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2019.

Submetido em: 27/02/2019

Aceito em: 10/05/2019