

Comparação da perda de nitrogênio em fertilizantes aplicados ao cafeeiro por meio das estimativas do modelo Gompertz

Rafaela C. Salvador^{†1}, Edilene C. P. Azarias¹, Natiele A. Gonzaga¹, Isolina A. Vilas Bôas¹, Tales J. Fernandes²

¹Doutorando em Estatística e Experimentação Agropecuária, Universidade Federal de Lavras (UFLA).

²Docente do Departamento de Estatística, Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Resumo: O aumento da produtividade do café está relacionado a muitos fatores, principalmente ao manejo adequado da fertilidade do solo. O nitrogênio (N) está entre os nutrientes mais demandados pelo cafeeiro e o fertilizante nitrogenado convencional mais utilizado para suprimir esta demanda a ureia. Porém, a ureia tem grande perda de N, principalmente por volatilização da amônia. Com o propósito de diminuir as perdas dos fertilizantes convencionais e melhorar o aproveitamento, os pesquisadores tem desenvolvido inovações como os fertilizantes nitrogenados estabilizados, surgindo a necessidade de comparar as perdas de N em cada um deles. O modelo não linear de Gompertz é comumente utilizado para descrever o padrão sigmoidal, característico da perda acumulada de N por volatilização da amônia. Assim, o objetivo deste estudo é comparar a perda acumulada de N dos fertilizantes nitrogenados ureia, ureia + NBPT e Nitrato de Amônio aplicados ao cafeeiro com base nos parâmetros do modelo não linear de Gompertz. A comparação entre os tratamentos foi realizada pelo método proposto por Carvalho et al. (2010), o modelo Gompertz foi ajustado a cada uma das repetições do experimento, a análise de variância foi realizada para cada um dos parâmetros, o teste F foi significativo em todos os casos então aplicou-se o teste Tukey. As análises foram realizadas no software R ao nível de 1% de probabilidade. O fertilizante nitrogenado convencional ureia apresentou maior perda acumulada de N no cafeeiro, já os fertilizantes nitrogenados estabilizados ureia + NBPT e nitrato de amônio não apresentaram diferenças significativas entre si.

Palavras-chave: Análise de Variância, Regressão, Perda de nitrogênio, Ureia, Fertilizantes estabilizados.

Abstract: The increase in coffee productivity is related to many factors, mainly the management of soil fertility. Nitrogen (N) is among the nutrients most demanded by the coffee and the conventional nitrogen fertilizer most used to suppress this demand is urea. However, urea has a large loss of N, mainly due to ammonia volatilization. With the aim of reducing the losses of conventional fertilizers and improving their use, researchers have developed innovations such as stabilized nitrogen fertilizers, resulting in the need to compare N losses in each one of them. The nonlinear Gompertz model is commonly used to describe the sigmoidal pattern, characteristic of the accumulated loss of N by ammonia volatilization. Thus, the objective of this study is to compare the accumulated loss of N from the nitrogen fertilizers urea, urea + NBPT and Ammonium Nitrate applied to coffee plants based on the parameters of the nonlinear Gompertz model. Comparison between treatments was performed using the method proposed by Carvalho et al. (2010), the Gompertz model was adjusted to each of the repetitions of the experiment, the analysis of variance was performed for each of the parameters, the F test was significant in all cases, so the Tukey test was applied. The analyzes were carried out in the R software at the 1% probability level. The conventional nitrogen fertilizer urea showed the highest accumulated loss of N in the coffee tree, whereas the stabilized nitrogen fertilizers urea + NBPT and ammonium nitrate did not show significant differences between them.

Keywords: Analysis of Variance, Regression, Nitrogen loss, Urea, Stabilized fertilizers.

[†] Autora correspondente: rafaela.salvador3@estudante.ufla.br.

Introdução

O agronegócio brasileiro possui relevância global, já que o país está entre os maiores produtores/exportadores de alimentos do planeta. Um destaque é o café, de acordo com a Embrapa (2020), a nação é a maior produtora do grão no mundo. Segundo o Conselho dos Exportadores de Café do Brasil (CECAFÉ, 2021) o Brasil exportou mais de 40 milhões de sacas de café em 2021.

O cultivo do cafeeiro propicia desenvolvimento econômico e social. A cultura impacta a economia brasileira, de acordo com o Conselho Nacional do Café (2022), a cultura gera 8,4 milhões de empregos diretos e indiretos na cadeia produtiva, além de contribuir significativamente na arrecadação de impostos.

O aumento da produtividade do café é diretamente impactado pelo manejo adequado da fertilização do solo que deve ser realizado por meio da adição de nutrientes, principalmente de nitrogênio (*N*) que é um dos macronutrientes mais exigidos pela planta cafeeira, sendo muito importante no aumento da quantidade e qualidade dos frutos (MESQUITA, 2016). É de suma importância pesquisar temas que tenham relação com a eficiência agrônômica da adubação nitrogenada do café.

O fertilizante nitrogenado convencional mais usado para suprir a demanda de *N* no Brasil é a ureia, pois tem alta concentração de *N* tendo menor custo por unidade se comparado a outros adubos com este nutriente (CHAGAS et al., 2016). No entanto, a ureia possui grandes perdas de *N*, que podem ocorrer principalmente por volatilização de amônia.

Na busca de técnicas que propiciem a diminuição das perdas de *N* surgiram tecnologias como os fertilizantes nitrogenados estabilizados que segundo Guelfi (2017, p.4), “são aqueles nos quais a ureia é tratada com aditivos para estabilização do *N*”. Portanto, há necessidade de comparar as perdas nos diferentes fertilizantes.

O estudo da adubação cafeeira está relacionado a regressão, pois segundo Trenkel (2010) o padrão de perda de *N* em fertilizantes nitrogenados apresenta um comportamento de um sigmoide (formato de S) em seu desenvolvimento, pois tem um crescimento mais rápido em sua fase inicial, diminuindo de velocidade a seguir e tendendo a uma estabilidade, de acordo com Mischan e Pinho (2014), sendo bem ajustadas por modelos de regressão não linear.

Curvas de desenvolvimento detêm grande relevância em pesquisas de cunho biológico, sendo aplicadas no estudo do crescimento de animais, plantas, frutos dentre outros por meio de modelos não lineares, como no estudo do crescimento diamétrico do cedro ao longo do tempo em uma floresta tropical sazonalmente seca (FRÜHAUF, 2019), na avaliação dos pontos críticos do modelo não linear mais adequado no ajuste de dados de crescimento do coco anão verde (SILVA, 2021), na descrição do crescimento de tilápia do Nilo criada em tanques-rede (MIRANDA, 2019) e em curvas de crescimento de cavalos campolina (TEIXEIRA, 2021).

De acordo com Carvalho et al. (2010) o padrão das curvas pode ser alterado pelos diversos tratamentos aplicados ao material experimental. Entretanto, ainda em conformidade com as autoras não há muitas obras na literatura que comparam quando um mesmo modelo não linear é ajustado a vários tratamentos, embora conforme Banzatto e Kronka (2006), esta comparação seja um dos principais objetivos da estatística aplicada na experimentação agrícola

Desta forma, há interesse em averiguar as possíveis diferenças dentre os tratamentos a partir das curvas ajustadas e com isso verificar se um determinado parâmetro de uma regressão não linear possui valores constantes nos tratamentos.

Na maioria dos trabalhos a comparação dos tratamentos tem sido feita por meio das estimativas pontuais dos parâmetros como nos estudos de Pereira et al. (2016) e Jane et al. (2020), outra estratégia que tem sido usada em trabalhos mais aplicados é realização da análise de variância (ANAVA) apenas para última observação dos modelos estatísticos. A comparação de tratamentos na maior parte dos estudos não considera todos os dados coletados nos experimentos, o que acarreta em perda de informação e gera conclusões menos concretas.

Portanto, se faz necessário buscar por métodos que possibilitem a verificação de igualdade de parâmetros em modelos de regressão não linear e leve em consideração todos os dados do experimento. O objetivo deste estudo é comparar a perda acumulada de *N* dos fertilizantes nitrogenados ureia, ureia + NBPT e nitrato de amônio aplicados ao cafeeiro com base nos parâmetros do modelo não linear de Gompertz.

Materiais e Métodos

Os dados a serem analisados nesta pesquisa foram retirados da tese de doutorado de Souza (2019). O experimento foi realizado em uma fazenda de café comercial no município de Santo Antônio do Amparo, MG, Brasil.

O delineamento foi em blocos casualizados com 4 repetições dos tratamentos ureia comum (granulada), ureia + NBPT (n-butil tiofosfórico triamida) e nitrato de amônio) na dose de 150 kg ha^{-1} de N . As parcelas experimentais foram compostas por 16 plantas, sendo consideradas apenas as 10 plantas centrais. Os blocos foram dispostos em uma linha. Foi deixada uma linha de bordadura entre blocos.

As doses de nitrogênio foram aplicadas em três parcelamentos no ano/safra 2015/2016. O primeiro parcelamento foi realizado no início do mês de novembro, os dois restantes foram aplicados em intervalos de 40 a 50 dias após a última adubação. Sendo que os dados estudados neste trabalho correspondem ao primeiro parcelamento.

As perdas por volatilização de amônia foram quantificadas pelo método do coletor semiaberto de PVC (LARA CABEZAS, 1999). Foram quantificadas as perdas diárias de nitrogênio por volatilização na safra 15/16, as perdas diárias foram determinadas no 1º, 2º, 3º, 4º, 5º, 7º, 9º, 11º, 15º, 18º, 24º, 30º e 39º dia após a adubação nitrogenada.

Para análise dos dados foi usando o *software R* e o modelo de regressão não linear Gompertz:

$$Y = \alpha e^{-e^{[k(\beta-x)]}} + \varepsilon \quad (1)$$

onde, α - assíntota horizontal; β - parâmetro associado a abscissa do ponto de inflexão e k - parâmetro relacionado a velocidade de crescimento e ε_i - erros associados ao modelo.

A estimação dos parâmetros foi feita usando o método de mínimos quadrados através do algoritmo de Gauss-Newton. A avaliação da qualidade do ajuste foi realizada com base no coeficiente de determinação.

Os efeitos dos tratamentos na curva de crescimento e o efeito de parâmetros foi calculado, os pressupostos básicos da análise de variância foram analisados.

Para averiguar a igualdade de parâmetros de curvas de desenvolvimento, é necessário que se tenha todas as repetições das estimativas dos tratamentos e não apenas as estimativas médias. O método proposto por Carvalho et al. (2010), recomenda que seja feito um ajuste do modelo não linear mais adequado para descrever os dados, a cada uma das repetições. Após o ajuste, há uma curva para cada tratamento, foi feita a ANOVA utilizando a função *lm* do *software R* para cada um dos parâmetros. Nos casos em que o teste F foi significativo, as diferenças entre os parâmetros foram avaliadas por meio do teste Tukey usando o pacote *agricolae*.

Resultados e Discussões

Os pressupostos básicos de análise de variância do modelo Gompertz foram satisfeitos. O coeficiente de determinação foi acima de 95% nos ajustes do modelo aos dados dos três fertilizantes. Os parâmetros foram estimados para todas as quatro repetições de cada tratamento, com as estimativas médias de α observou-se que as maiores perda acumulada assintótica de N , foram referentes ao tratamento ureia. Com as estimativas médias de β percebeu-se que as maiores abscissas do ponto de inflexão, foram estimadas no tratamento ureia + NBPT. E as maiores estimativas médias de k parecem estar no tratamento ureia + NBPT.

Tabela 1: Análise de variância para as estimativas do parâmetro α .

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M	F	p-valor
Fertilizantes	2	902.89	451.44	25.067	0.0002093 *
Resíduo	9	162.08	18.01		
Total	11	1064.97			

Fonte: Dos autores (2022)

No entanto, para analisar se realmente há diferenças significativas nas estimativas dos parâmetros não basta apenas uma análise observacional é necessário que seja feita uma análise de variância para cada um dos parâmetros de interesse, a seguir estão as tabelas (1, 2 e 3) de ANAVA para os parâmetros α , β e k .

Tabela 2: Análise de variância para as estimativas do parâmetro β .

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M	F	p-valor
Fertilizantes	2	96.762	48.381	15.218	0.001296 *
Resíduo	9	28.612	3.179		
Total	11	125.374			

Fonte: Dos autores (2022)

Tabela 3: Análise de variância para as estimativas do parâmetro k .

Fonte de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M	F	p-valor
Fertilizantes	2	6.5817	3.2909	5.5979	0.02633 *
Resíduo	9	5.2908	0.5879		
Total	11	11.8725			

Fonte: Dos autores (2022)

Como o teste F foi significativo ao nível de 1% para fertilizantes em todos parâmetros estudados, realizou-se o teste Tukey, buscando comparar as perdas acumuladas de N em cada um dos fertilizantes nitrogenados. A seguir se encontra a tabela 4, referente ao teste Tukey para os parâmetros α , β e k .

Tabela 4: Estimativas dos parâmetros do modelo Gompertz ajustado aos dados.

Fertilizantes	$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	\hat{k}
Ureia	21.720860 a	4.358740 b	2.093523 a
Ureia + NBPT	6.745515 b	8.175583 a	1.005572 ab
Nitrato de amônia	1.179955 b	1.231345 b	0.292400 b

As médias seguidas da mesma letra não diferem ao nível de 1 % de probabilidade pelo teste Tukey.

Fonte: Dos autores (2022)

Na tabela 4 é possível constatar que a ureia apresenta maior perda acumulada assintótica de nitrogênio em relação aos outros fertilizantes estudados, o que já era esperado uma vez que conforme já comentado neste estudo este fertilizante apesar de possuir um baixo custo de N por unidade é muito criticado na literatura por apresentar perdas significativas do nutriente, que ocorrem principalmente por volatilização de amônia conforme Rodrigues et al. (2012).

Os fertilizantes nitrogenados estabilizados: ureia + NBPT e nitrato de amônio, apresentaram perdas assintóticas acumuladas de N (parâmetro α) iguais entre si, mas menores do que a ureia convencional, o que está em conformidade com a proposta deste fertilizante que é melhorar a eficiência agrônômica da adubação nitrogenada convencional, segundo Guelfi (2017).

Em relação a abscissa do ponto de inflexão (parâmetro β), constatou-se que, no fertilizante ureia + NBPT o valor foi maior, constatando que o NBPT de fato contribui pra retardar a perda máxima, pois tem um ponto de inflexão maior, isto é, retardou o dia que ocorre a perda máxima, comprovando a eficácia da tecnologia de fertilizantes estabilizados.

Quanto as estimativas do parâmetro k (índice de crescimento), quanto maior for o valor deste parâmetro mais rapidamente a assíntota superior é atingida. Constatou-se que os tratamentos ureia e ureia + NBPT possuem maior valor de estimativa para este parâmetro, portanto a perda acumulada de N cresce mais rapidamente nestes fertilizantes.

Vale ressaltar que embora o método tenha sido aplicado para comparar os três parâmetros do modelo Gompertz é possível aplicá-lo, sem prejuízo, apenas no parâmetro de interesse, conforme Carvalho et al. (2010).

Conclusões

O método de verificação de igualdade de parâmetros pode auxiliar o pesquisador na comparação dos tratamentos, pois tal comparação é realizada apenas com os parâmetros do modelo estimado. Levando em consideração o padrão de desenvolvimento da característica em estudo ao longo do tempo.

Com base na ANAVA dos parâmetros do modelo Gompertz observou-se que há diferença significativas entre os tratamentos ao nível de 1% de probabilidade, o teste Tukey mostrou que entre os fertilizantes estudados, a ureia convencional é o que apresenta maior perda acumulada de nitrogênio no cafeeiro.

Agradecimentos

A Fundação de Amparo à Pesquisa em Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de estudos e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro para participar da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBras).

Referências

- BANZATTO, D.A.; KRONKA, S.N. *Experimentação agrícola*. 4ª ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 237p.
- CARVALHO, L. R. et al. Methods to verify parameter equality in nonlinear regression models. *Ciência Agrícola*, v.67, n.2, p.218-222, 2010.
- CHAGAS, W. F. T. et al. Ammonia volatilization from blends with stabilized and controlled-released urea in the coffee system. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, n. 5, p. 497–509, 2016.
- CONSELHO DOS EXPORTADORES DE CAFÉ DO BRASIL (CECAFE). *Estatísticas*: ago. de 2021. Disponível em: <https://www.cecafe.com.br/publicacoes/relatorio-de-exportacoes/>. Acesso em: 25 de ago. de 2022.
- CONSELHO NACIONAL DO CAFÉ. *Estatísticas*: ago. de 2022. Acesso em: 18 ago. 2022. Disponível em: <https://cncafe.com.br/brasil-a-nacao-do-cafe/>.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. *Applied regression analysis*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. 706 p.
- EMBRAPA, *Café. Produção mundial de café no ano cafeeiro 2019-2020 está estimada em 169,34 milhões de sacas de 60kg. 2020*. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/56523064/producao-mundial-de-cafe-no-ano-cafeeiro-2019-2020-esta-estimada-em-16934-milhoes-de-sacas-de-60kg>. Acesso em: 26 ago. 2022.
- FRÜHAUF, A.C. et al. Nonlinear models in the study of the cedar diametric growth in a seasonally dry tropical forest. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 15, p. 1-8, 2020.
- GUELFÍ, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. *Informações Agrônomicas*, Canadá, n. 157, p. 1-14, mar. de 2017.

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, p. e20190408, 2020.

LARA CABEZAS, W. A. R. et al. Calibration of a semi-open static collector for determination of ammonia volatilization from nitrogen fertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 30, n. 3/4, p. 389-406, 1999.

MESQUITA, C. M. de et al. *Manual do café: manejo de cafezais em produção*. Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016.

MIRANDA, L. F. et al. Modelos não lineares na descrição do crescimento de tilápia do Nilo criada em tanques-rede. *Sigmae*, v. 8, p. 606-611, 2019.

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

SEBER, G. A. F.; WILD, C. J. *Nonlinear regression*. New Jersey: J. Wiley & Sons, Inc. Hoboken, 2003.

SILVA, É. M. et al. 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, p. 01, 2021.

SOUZA, T. L. *Fertilizantes nitrogenados convencionais e estabilizados na cafeicultura: análises agronômicas, de qualidade, ambientais econômica*. 2019. 152 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

PEREIRA, A. A.; FERNANDES, T. J.; SCALCO, M. S.; DE MORAIS, A. R. Modelagem não linear do crescimento em altura do cafeeiro irrigado e não irrigado em diferentes densidades. *Irriga*. Unesp: Botucatu, v. 1, p. 140-149, 2016.

RODRIGUES, J. O. et al. Demanda nutricional. *Revista Cultivar*, Pelotas, n. 158, p. 16 -17, jun. de 2012.

TEIXEIRA, G. L. et al. Growth curves of campolina horses using nonlinear models. *Livestock Science*, v. 251, p. 104631, 2021.

TRENKEL, M. E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: *International Fertilizer Industry Association*, 2010.