



Curvas de resposta do milho à adubação potássica obtidas através de experimento fatorial. Corn response curves to potassium fertilization through a factorial design.

[Ricardo de Castro Dias](#)¹, [Paulo César Teixeira](#)², Renato Nunes Pereira³, João Augusto Dourado Loiola⁴, Marcos Gervásio Pereira³, [Everaldo Zonta](#)³

¹ Doutorando em Agronomia – Ciência do Solo – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Seropédica – RJ. E-mail: ricardodiasrcd2@ufrj.br

² Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, Rio de Janeiro – RJ.

³ Docente da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Seropédica – RJ.

⁴ Discente do curso de Agronomia – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Seropédica – RJ.

Resumo

O objetivo deste estudo foi determinar o efeito da aplicação de diferentes soluções nutritivas e doses crescentes de potássio (K) na produção de massa seca e acúmulo de potássio na parte aérea de plantas de milho cultivadas em vasos contendo amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo em condições de casa de vegetação. Os tratamentos consistiram em três soluções nutritivas, seis doses de potássio (K) e um tratamento adicional que não recebeu aplicação de solução nutritiva e nem de K. O modelo quadrático de raiz é o mais indicado entre os avaliados para descrever a produção de massa seca de plantas de milho em função da dose de K.

Palavras-chave: Nutrição mineral. Tratamento adicional. Modelagem.

Abstract

The effect of this plant study was determined by the application of different nutrient solutions and increasing doses of dry mass and pots potential on aerial production of corn plants grown in a sample content of a Red-Yellow Latosol in pots under greenhouse conditions. The treatments consist of three nutrient solutions, the treatments of additional doses (K) and a solution that received neither nutrient nor K application. The root quadratic model is the most suitable among the results to describe a dry mass production of corn plants as a function of the K dose.

Keywords: Mineral nutrition. Additional treatment. Modelling.

Introdução

Frequentemente são realizados experimentos para estudar os sintomas das deficiências nutricionais em plantas e os efeitos da aplicação de fertilizantes na produção agrícola (DHAKAL; LANGE, 2021; SOARES et al., 2020). A relação entre a produção agrícola e os níveis de fertilizantes é fundamental para a agricultura, uma vez que este conhecimento possibilita a manutenção da fertilidade do solo, o desenvolvimento de estratégias de adubação e o uso econômico de recursos (FERREIRA; ZOCCHI; BARON, 2017).

Algumas funções matemáticas são geralmente utilizadas para descrever a relação teórica entre a produção de culturas e as doses de fertilizantes (ACKELLO-OGUTU; PARIS; WILLIAMS, 1985; ANDERSON; NELSON, 1975; CERRATO; BLACKMER, 1990; SÁNCHEZ DE LA PUENTE; BELDA, 2001). Há um grande número de pesquisas publicadas sobre modelagem da resposta de culturas à adubação, mas o debate sobre qual modelo melhor descreve esta relação tem perdurado por mais de um século e meio sem definição (BERCK; GEOGHEGAN; STOHS, 2000; PARIS, 1992). Muito se deve ao fato de que os modelos são baseados em duas leis da nutrição mineral de plantas, que são consideradas por muitos autores como contrastantes. Estas são a Lei do Mínimo e a Lei dos acréscimos decrescentes de Mitscherlich.

A lei do mínimo é frequentemente associada às funções de resposta linear e produção de patamares, também denominadas modelos de von Liebig. De acordo com essas funções, a produção cresce linearmente até que o fertilizante atinja uma dose crítica e, após esse ponto, permanece constante (ANDERSON; NELSON, 1975). A lei dos acréscimos decrescentes de Mitscherlich estabelece uma redução da produção marginal à medida que os níveis do fator limitante são elevados. De acordo com essa lei, as culturas aumentam a produção em resposta ao incremento da adubação até atingir um valor máximo. Pressupõe-se que os retornos da adubação sejam proporcionais à diferença entre as produções máxima e atual, de forma que os retornos tendem a zero à medida que a produção se aproxima do seu valor máximo (FERREIRA; ZOCCHI; BARON, 2017; GOMES, 1953).

O potássio (K) é um nutriente essencial para vegetais e animais, envolvido em diversos processos metabólicos e exigido em grandes quantidades pela maioria das culturas. É fundamental na abertura e fechamento de estômatos, além de ser imprescindível para a atividade catalítica de mais de 60 enzimas responsáveis pela degradação de açúcares e síntese proteica, por exemplo. Ao lado do nitrogênio, é o nutriente mineral demandado em maiores quantidades pelas plantas (MURRELL et al., 2021).

Na deficiência de (K), vários processos metabólicos são prejudicados. Nestes casos, a ativação enzimática é prejudicada, tornando as plantas mais suscetíveis ao ataque de fungos. A má regulação estomática dificulta as trocas gasosas, prejudicando a fotossíntese e o controle hídrico da planta, tornando-a mais suscetível a estresses provocados por seca, geada e salinidade do solo. A deficiência de K também prejudica a troca de prótons (H^+) através das membranas tilacóides nos cloroplastos, resultando em piora dos sintomas sob maior intensidade de luz (MARSCHNER; ÇAKMAK, 1989; PANDEY; MAHIWAL, 2015).

Em muitos experimentos fatoriais sobre fertilizantes potássicos, é de interesse do pesquisador avaliar outros fatores, além da dose. Contudo, muitas vezes por não possuir informações sobre a responsividade da cultura à adubação, é necessário a inclusão do fator dose, resultando em experimentos demasiadamente grandes (fatoriais triplos) e com resultados de difícil interpretação. Entretanto, quando se possui a curva de resposta da cultura em estudo à adubação potássica nas condições de solo, temperatura e umidade vigentes no experimento, é possível se definir uma única

dose de K, diminuindo assim o número de tratamentos e a complexidade das análises estatísticas posteriores. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi determinar o efeito da aplicação de diferentes soluções nutritivas e doses crescentes de K na produção de massa seca e acúmulo de potássio na parte aérea de plantas de milho cultivadas em vasos contendo amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo em condições de casa de vegetação. O tratamento adicional foi adotado para verificar os resultados na situação da não aplicação de fertilizantes.

Material e métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no município de Seropédica – RJ (22° 45' 33'' - S e 43° 41' 50'' – O). Dentro da casa de vegetação a temperatura foi mantida abaixo de 32,5° C através do sistema de arrefecimento da própria estufa. Foram utilizados 200 kg da camada de 0 - 20 cm de um solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) (SANTOS et al., 2018), localizado no município de Paracambi – RJ. Após a coleta, a amostra de solo foi seca ao ar, peneirada em peneira com abertura de malha de 4 mm e caracterizada química e fisicamente, segundo (TEIXEIRA et al., 2017). Os resultados da análise química são apresentados na Tabela 1. O resultado da análise granulométrica indicou a seguinte composição da amostra: 481 g kg⁻¹ de argila, 114 g kg⁻¹ de silte e 405 g kg⁻¹ de areia.

Tabela 1 - Atributos químicos de amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) coletadas na camada de 0-20 cm de profundidade de acordo com (TEIXEIRA et al., 2017).

pH (H ₂ O)	C.O. g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	SO ₄ ²⁻ mg dm ⁻³	Na	K	Ca	Mg	H + Al	S	T	V	m
				mmol _c dm ⁻³								
				%								
4,4	38	3,7	16	2,2	1,1	17	6	59	26,4	85,4	31	18,5
Microelementos												
	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Co	Mo					
	mg dm ⁻³											
	0,64	0,9	77	18,5	3,9	0,2	0,1					

C.O.: carbono orgânico; S: soma de bases trocáveis; T: capacidade de troca de cátions total; V: percentagem de saturação por bases; m: percentagem de saturação por alumínio.

Posteriormente, procedeu-se com a incubação do solo com calcário dolomítico seguindo Stafanato (2009) com o objetivo de elevar o pH à 6,0. Foram utilizados sacos plásticos contendo 50 kg de solo seco e peneirado ($\emptyset < 4$ mm), 16,8 L de água e 97 g de calcário com PRNT de 80%, 33,5% de CaO e 10,1% de MgO.

A quantidade de calcário foi definida com base em experimento prévio, no qual foram adicionadas doses crescentes de CaCO₃ em recipientes contendo 200 g de solo úmido. O pH foi monitorado até a estabilização (30 dias). Após este período obteve-se a equação de regressão do pH do solo em função da aplicação de doses crescentes de CaCO₃ ($\text{pH} = 4,92 + 0,00348x$; $x =$ dose de CaCO₃, mg parcela⁻¹). Igualando a equação à 6, e resolvendo-a em relação a x , tem-se o valor de CaCO₃ necessário para elevar o pH de 200 g de solo até 6 (310,3 mg). Portanto, são necessários 77,6 g de CaCO₃ para elevar o pH de 50 kg de solo até 6, o equivalente a 97 g de calcário com PRNT de 80%.

Para a determinação da capacidade máxima de retenção de água foram transferidos 100 g de solo seco ao ar ($\emptyset < 4\text{mm}$) para recipiente plástico de 200 mL com pequenas perfurações em sua base. O recipiente foi alocado sobre lâmina d'água de 5 mL durante 16 h. Após este período, o recipiente foi disposto sobre peneira de abertura de malha de 4 mm para a drenagem do excedente de água durante uma hora. Subtraindo-se a massa ao final deste período pela massa no início do ensaio, determinou-se que são retidos 47,7 g de água em 100 g de solo. Portanto, são necessários 16,8 L de água para elevar a umidade de 50 kg de solo até 70% da capacidade máxima de retenção de água.

A incubação foi mantida durante 30 dias. Após este período o solo foi seco e novamente peneirado ($\emptyset < 4\text{ mm}$). A caracterização química do solo após a incubação é dada pela Tabela 2.

Tabela 2 - Atributos químicos de amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) coletadas na camada de 0-20 com de profundidade após incubação (TEIXEIRA et al., 2017).

pH (H ₂ O)	C.O. g dm ³	P mg dm ⁻³	SO ₄ ²⁻ mg dm ⁻³	Na	K	Ca	Mg	H + Al	S	T	V	m
				mmol _c dm ⁻³							%	
5,8	35	2,3	25	1,3	1,1	30	12	29	44,6	73,6	61	0
Microelementos												
B	Cu	Fe	Mn	Zn	Co	Mo						
mg dm ⁻³												
0,64	0,7	86	15	3,5	0,2	0,1						

C.O.: carbono orgânico; S: soma de bases trocáveis; T: capacidade de troca de cátions total; V: percentagem de saturação por bases; m: percentagem de saturação por alumínio

As unidades experimentais consistiram em vasos plásticos nos quais foram adicionados 3 kg de solo corrigido e peneirado. Foi adotado o delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 3 x 6 + 1, com três repetições, totalizando 19 tratamentos e 57 unidades experimentais. Optou-se pelo delineamento em blocos casualizados pois, em função do controle de temperatura da casa de vegetação, as unidades experimentais mais próximas do painel de climatização poderiam ser influenciadas de maneira distinta daquelas localizadas a maiores distâncias do painel. Os tratamentos consistiram na aplicação de três soluções nutritivas contendo os nutrientes essenciais, exceto K (Solução A: utilizada por SANTOS et al. (2016); Solução B: utilizada por BOLDRIN et al. (2019); Solução C: utilizada por DIAS et al. (2020)), seis doses de potássio aplicadas na forma de cloreto de potássio (0, 25, 50, 100, 200 e 400 mg dm⁻³ de K), e um tratamento adicional que não recebeu aplicação de solução nutritiva e de K. Na Tabela 3 é apresentada a composição das soluções nutritivas utilizadas no experimento. As soluções foram preparadas considerando-se a aplicação de 0,1 L por unidade experimental.

Tabela 3 - Composição das soluções nutritivas: Solução A, adaptada de SANTOS et al. (2016); Solução B, adaptada de BOLDRIN et al. (2019); Solução C, adaptado de DIAS et al. (2020).

Nutriente	Solução A		Solução B		Solução C	
	Dose (mg dm ⁻³)	Fonte	Dose (mg dm ⁻³)	Fonte	Dose (mg dm ⁻³)	Fonte
N	200	---	300*	NH ₄ NO ₃	130	---
P	300	NH ₄ H ₂ PO ₄	250	NH ₄ H ₂ PO ₄	300	NH ₄ H ₂ PO ₄
S	80	(NH ₄) ₂ SO ₄	60	(NH ₄) ₂ SO ₄	40	MgSO ₄
Zn	4	ZnSO ₄ .7H ₂ O	5	ZnSO ₄ .7H ₂ O	4	ZnSO ₄ .7H ₂ O
Mn	3,6	MnCl ₂ .4H ₂ O	3,6	MnCl ₂ .4H ₂ O	3,6	MnCl ₂ .4H ₂ O
Fe	1,5	FeCl ₃ .6H ₂ O	0	---	1,5	FeCl ₃ .6H ₂ O
Cu	1,3	CuSO ₄ .5H ₂ O	1,5	CuSO ₄ .5H ₂ O	1,3	CuSO ₄ .5H ₂ O
B	0,8	H ₃ BO ₃	0,5	H ₃ BO ₃	0,8	H ₃ BO ₃
Mo	0,15	Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	0,15	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	0,15	Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O

*: 168 mg dm⁻³ aplicados no momento da semeadura e 132 mg dm⁻³ aplicados 21 dias após a semeadura.

Foram semeadas 8 sementes do milho híbrido BM 3066 (*Zea mays*) por unidade experimental. Após a semeadura, foram aplicadas as soluções nutritivas e as doses crescentes de cloreto de potássio. Posteriormente, acrescentou-se a quantidade de água requerida para elevar a umidade do solo a 70% da capacidade máxima de retenção de água. O desbaste foi realizado cinco dias após o início da emergência das plântulas, permanecendo duas plantas por vaso. Os vasos foram pesados diariamente com o intuito de repor a água do solo perdida por evapotranspiração.

O experimento foi conduzido por 45 dias. Ao fim deste período, a parte aérea das plantas de milho foi coletada com o auxílio de uma tesoura de poda, realizando o corte na altura do nível do solo.

Após coletadas, as partes aéreas das plantas foram armazenadas em sacos de papel e alocadas em estufas de circulação forçada de ar, numa temperatura de 65 °C até atingirem peso constante. Após a determinação da massa seca, procedeu-se com a trituração das amostras, em moinho do tipo Willey. O material foi digerido e posteriormente procedeu-se com a determinação dos teores de K seguindo Tedesco (1995). Multiplicando-se a concentração de K no tecido (g kg⁻¹) pela produção de massa seca (g vaso⁻¹) obteve-se o acúmulo de K na parte aérea (mg vaso⁻¹).

Análise estatística

Todas as análises estatísticas foram realizadas através do software R[®] (R CORE TEAM, 2021). Os resultados obtidos foram submetidos inicialmente a análise de variância através do teste F com o uso do pacote estatístico ExpDes.pt (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2021). Para tanto, considerou-se um delineamento em blocos ao acaso, em esquema fatorial duplo com um tratamento adicional do tipo A x B + 1, em que “A” representa as três soluções nutritivas, “B” representa as 6 doses de K, sendo o tratamento adicional aquele que não recebeu solução nutritiva e nem K.

Em seguida, procedeu-se com o teste de Shapiro-Wilk para a verificação da normalidade dos resíduos e ao teste de Bartlett para a verificação da homoscedasticidade das variâncias. Quando não atendias as suposições os dados foram transformados através da transformação de Box-Cox com o uso do pacote fpp (HYNDMAN, 2013), novamente submetidos à análise de variância e aos testes de Shapiro-Wilk e de Bartlett.

Quando indicada a diferença significativa pelo teste F da análise de variância ($p < 0,5$), as médias dos tratamentos qualitativos foram comparados através do teste de Tukey a 5% de probabilidade. Foram ajustados modelos de regressão polinomial de primeira, segunda e terceira ordem aos dados referentes ao tratamento quantitativo, no caso de diferença significativa indicada pelo teste F. Procedeu-se com a análise de variância de regressão e, em seguida, com o teste t para a verificação da significância dos parâmetros. Em seguida, realizou-se a comparação entre os modelos polinomiais e primeira, segunda e terceira ordem aos modelos raiz quadrática e Mitscherlich através dos critérios de informação de Akaike e Bayesiana, assim como pelo coeficiente de determinação. Para o ajuste do modelo Mitscherlich, foi utilizado o pacote AgroReg (SHIMIZU; GONCALVES, 2021).

Resultados e discussão

Através da análise da Tabela 4 verifica-se a interação significativa, num nível de significância inferior a 1%, entre solução nutritiva e dose na produção de massa seca da parte aérea de plantas de milho. Também houve diferença significativa, num nível de significância inferior a 1%, entre o tratamento adicional e o fatorial.

Tabela 4 - Quadro da análise de variância da produção de massa seca da parte aérea de plantas de milho em função da aplicação de diferentes soluções nutritivas e doses crescentes de potássio.

FV	GL	SQ	QM	FC	pR>Fc
Bloco	2	134,88	67,44	1,795	0,1807
Solução	2	20,89	10,45	0,278	0,7589
Dose	5	18747,36	3749,47	99,796	0,0000
Solução*Dose	10	1113,77	111,38	2,964	0,0080
Ad vs Fatorial	1	13626,58	13626,58	362,686	0,0000
Resíduo	36	1352,57	37,57		
Total	56	34996,05			
CV		9,06			

Foi constatado que o tratamento adicional apresentou média inferior à média do fatorial (Tabela 5). A diferença foi acachapante, na ordem de aproximadamente 35 vezes mais massa seca produzida nas parcelas que receberam aplicação dos tratamentos fatoriais em comparação ao tratamento adicional.

Tabela 5 - Contraste do tratamento adicional com o fatorial.

	Médias
Adicional	2,05 b
Fatorial	71,30 a

Médias seguidas por letras diferentes são estatisticamente diferentes através do teste F ($p < 0,01\%$).

Pela análise da Tabela 6 verifica-se que a solução nutritiva C proporcionou maior produção de massa seca da parte aérea em comparação à solução B quando aplicadas no nível 0 mg dm^{-3} de dose de K, não havendo diferença significativa entre a solução A e as demais.

Tabela 6 - Desdobramento da produção de massa seca da parte aérea de plantas de milho em função da aplicação de diferentes soluções nutritivas dentro de cada nível de dose de K.

Solução	0 mg dm ⁻¹	25 mg dm ⁻¹	50 mg dm ⁻¹	100 mg dm ⁻¹	200 mg dm ⁻¹	400 mg dm ⁻¹
A	35,35 ab	59,78 a	68,27 a	82,67 a	83,74 a	96,27 a
B	29,82 b	55,27 a	76,83 a	74,16 a	95,25 a	92,96 a
C	44,12 a	66,39 a	72,26 a	79,33 a	85,30 a	85,55 a

Médias seguidas pela mesma letra dentro de cada coluna não diferem estatisticamente entre si através do teste de Tukey ($p < 0,05$).

A Tabela 7 indica que, para as soluções nutritivas A e C, o efeito cúbico foi aquele de maior grau com significância ($p < 0,01$) para a produção de massa seca da parte aérea em função da aplicação de doses crescentes e que os desvios de regressão, para este efeito, não foram significativos. Para a solução B o modelo cúbico também foi significativo, entretanto os desvios de regressão apresentaram significância ($p < 0,01$), indicando que há outro modelo mais apropriado.

Tabela 7 - Desdobramento da análise de variância do ajuste de modelos polinomiais de regressão da massa seca da parte aérea de plantas de milho em função da aplicação de doses crescentes de K dentro de cada nível de solução nutritiva.

	GL	SQ	QM	Fc	Valor.p
Solução A					
Efeito linear	1	4.763,56	4.763,56	126,79	0
Efeito Quadrático	1	1.281,14	1.281,14	34,1	0
Efeito Cúbico	1	907,05	907,056	24,14	0,0000
Desvios de Regressão	2	36,06	36,06	0,96	0,3926
Resíduos	36	37,57	37,57		
Solução B					
Efeito linear	1	5.252,72	5.252072	139,81	0
Efeito Quadrático	1	2.717,66	2.717,66	72,33	0
Efeito Cúbico	1	444,31	444,31	11,83	0,0015
Desvios de Regressão	2	754,22	377,11	10,04	0,0003
Resíduos	36	1.352,56	37,57		
Solução C					
Efeito linear	1	1.946,07	1.946,07	51,8	0
Efeito Quadrático	1	1.167,32	1.167,32	31,07	0
Efeito Cúbico	1	385,27	385,27	10,25	0,0028
Desvios de Regressão	2	169,67	84,83	2,26	0,1191
Resíduos	36	1.352,56	37,57		

De acordo com a Figura 1, em todos os níveis de solução foram observados elevados valores de coeficientes de determinação, especialmente para a solução nutritiva A. Todos os parâmetros, em todos os níveis de solução, apresentaram significância pelo teste t ($p < 0,01$). Observa-se que o tratamento adicional apresentou desempenho inferior a todos os demais tratamentos.

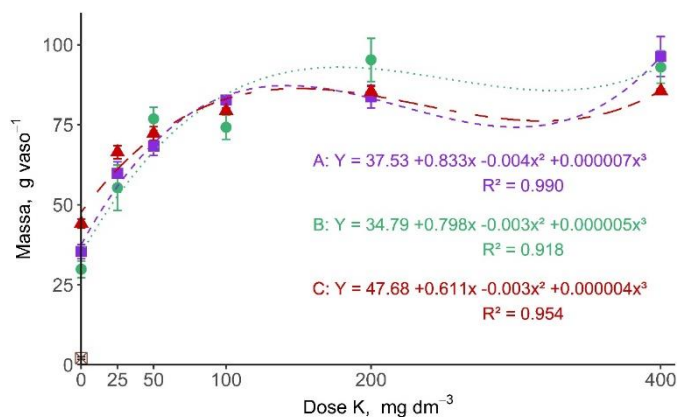


Figura 1 - Equações de regressão, considerando o modelo cúbico, da produção de massa seca da parte aérea de plantas de milho em função da aplicação de doses crescentes de K, dentro de cada nível de solução nutritiva (A representada pelos quadrados, B pelos círculos e C pelos triângulos). Barras verticais representam o erro padrão da média.

Pela análise da Tabela 8 verifica-se que o modelo raiz quadrática apresentou ajuste significativo, em todos os níveis de solução ($p < 0,01$).

Tabela 8 - Desdobramento da análise de variância para o ajuste do modelo raiz quadrática para a massa seca da parte aérea de plantas de milho em função da aplicação de doses crescentes de K, dentro de cada nível de solução nutritiva.

	GL	SQ	QM	Fc	Valor.p
Solução A					
Linear	1	4.763,6	4.763,6	119,210	0,0000
Raiz Quadrática	1	2.133,1	2.133,1	53,381	0,0000
Resíduo	15	599,4	40,0		
Solução B					
Linear	1	5.252,7	5.252,7	59,05	0,0000
Raiz Quadrática	1	3.508,0	3.508,0	39,44	0,0000
Resíduo	15	1.334,4	89,0		
Solução C					
Linear	1	1.946,08	1.946,08	322,29	0,0000
Raiz Quadrática	1	1.719,95	1.719,95	284,84	0,0000
Resíduo	15	90,57	6,04		

A Figura 2 apresenta as equações de regressão, considerando o modelo raiz quadrática, para a produção de massa seca. Todos os parâmetros, em todos os níveis de solução, apresentaram significância pelo teste t ($p < 0,01$). Observou-se que os modelos apresentaram bom ajuste em todos os níveis de solução, indicados pelos valores de coeficientes de determinação próximos a 1.

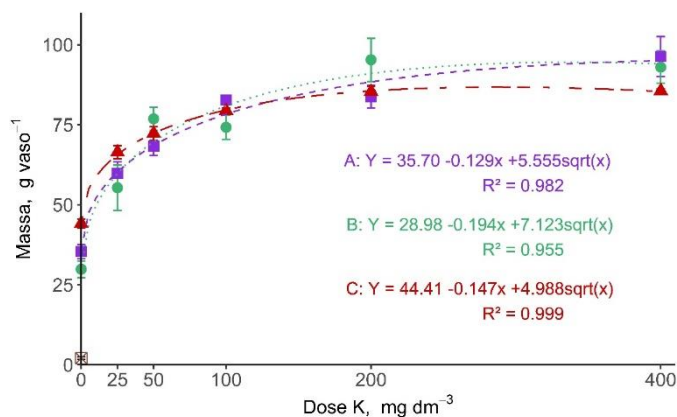


Figura 2 - Equações de regressão, considerando o modelo raiz quadrática, da produção de massa seca da parte aérea de plantas de milho em função da aplicação de doses crescentes de K, dentro de cada nível de solução nutritiva (A representada pelos quadrados, B pelos círculos e C pelos triângulos). As barras verticais representam o erro padrão da média.

Na Figura 3 são apresentadas as equações de regressão, considerando-se o modelo de Mitscherlich, para a produção de massa seca da parte aérea dentro de cada nível de solução. Para todos os parâmetros foi observada significância pelo teste t para os ajustes dos níveis de solução A e C ($p < 0,01$) e para o ajuste do nível B de solução ($p < 0,05$). Foi observado que, em todos os casos, houve bons ajustes, indicados pelos valores dos coeficientes de determinação próximos a 1.

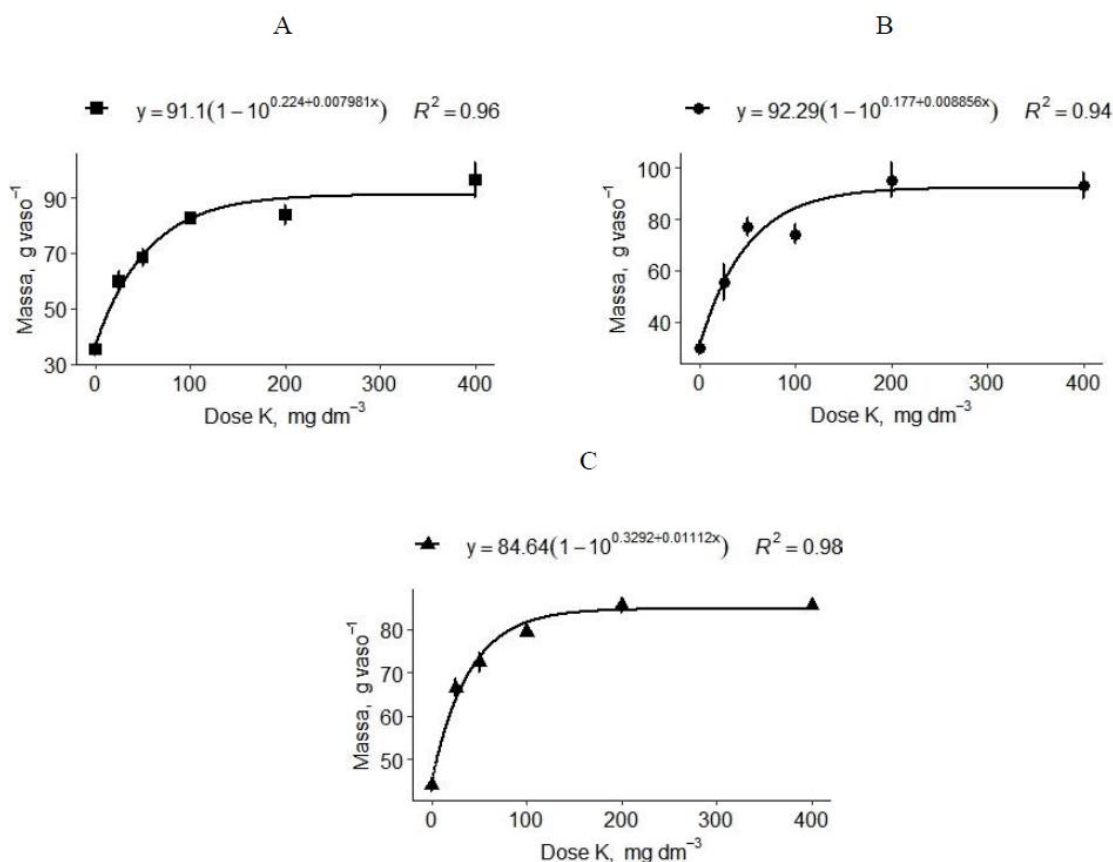


Figura 3 - Equações de regressão, considerando o modelo Mitscherlich, da produção de massa seca da parte aérea de plantas de milho em função da aplicação de doses crescentes de K, dentro de cada nível de solução nutritiva (A representada pelos quadrados, B pelos círculos e C pelos triângulos). Barras verticais representam o erro padrão da média.

Foi observado na Tabela 9 que, quando se utilizou a solução A, o modelo cúbico foi aquele que apresentou os melhores índices, ou seja, menores valores de AIC e BIC e maiores valores de R^2 . Em relação às soluções B e C, o modelo raiz quadrática foi, entre os avaliados, aquele com melhor ajuste.

De acordo com a Tabela 7 os desvios de regressão para o modelo cúbico, quando se aplicou a solução B, foram significativos. Isso indica que há outro modelo com melhor ajuste, o que corrobora com os resultados observados na Tabela 9, em que os modelos Raiz quadrática e Mitscherlich apresentaram melhores ajustes. Ressalta-se que, para a comparação entre modelos lineares e não lineares o R^2 não é um coeficiente adequado, sendo mais apropriado o uso de AIC e BIC.

Tabela 9 - Critérios de Informação de Akaike (AIC) e de Bayesian (BIC) e coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ajustados.

Modelo	----Solução A----			----Solução B----			----Solução C----		
	AIC	BIC	R^2	AIC	BIC	R^2	AIC	BIC	R^2
Linear	52,03	51,40	0,678	55,32	54,70	0,573	50,39	49,76	0,530
Quadrático	49,00	48,17	0,861	50,22	49,38	0,869	45,60	44,76	0,848
Cúbico	35,35	34,31	0,990	49,44	48,40	0,919	40,48	36,44	0,954
Raiz Quadrática	36,76	35,93	0,982	43,75	42,92	0,955	12,65	11,82	0,999
Mitscherlich	40,20	39,37	0,96	44,92	44,09	0,94	31,03	30,20	0,98

Apesar do melhor ajuste do modelo cúbico quando aplicada a solução A, do ponto de vista biológico, os modelos raiz quadrática e Mitscherlich são mais lógicos. Assumindo a lei dos acréscimos decrescentes, a produção de massa aumenta em resposta ao acréscimo da dose de fertilizante até atingir um valor máximo. Os acréscimos diminuem, tendendo a zero até o ponto de máxima produção (FERREIRA; ZOCCHI; BARON, 2017). Portanto, seguindo a lógica biológica, o modelo cúbico não explica de maneira apropriada o fenômeno em questão.

Ressalta-se também a importância da concentração de potássio disponível no solo em experimentos envolvendo fertilizantes potássicos. O nível crítico é definido como o teor de K disponível no solo acima do qual não há incremento no rendimento pela adição de fertilizante (NOVAIS et al., 2007). É reconhecido que, se a concentração de K disponível no solo esteja além do limite crítico, as respostas à aplicação de fertilizantes é diminuta (MULUGETA et al., 2019). Caso comparações entre fertilizantes e doses sejam realizadas nesta circunstância, os resultados tendem a ser inconclusivos e equivocados quanto mais além do limite crítico se encontra a concentração de K disponível no solo.

Segundo o Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro (FREIRE et al., 2013), solos com teores de K inferiores à 45 mg kg^{-1} são classificados como com baixa disponibilidade deste nutriente. O solo utilizado no presente estudo apresentava um teor de K disponível de 43 mg dm^{-1} , o que justifica a grande responsividade da produção de massa seca da parte aérea em função da aplicação de doses de K. Entretanto, os manuais se baseiam em experimentos de campo, onde o volume de solo explorado pelo sistema radicular das plantas é muito maior do que quando comparados à estudos em vaso. Portanto, os resultados aqui obtidos podem vir a subsidiar futuros estudos sobre fertilizantes potássicos realizados em condições semelhantes.

O nível crítico pode ser compreendido como a concentração de nutriente associada a 90% da produtividade máxima, sendo um bom critério para a definição da dose mais apropriada. Ao extrair os pontos de máxima das equações do modelo raiz quadrática dentro do intervalo de doses avaliadas

têm-se que as soluções nutritivas A, B e C proporcionaram, respectivamente, produção máxima de 95,2; 94,4 e 86,7 g vaso⁻¹. Portanto tem-se que os valores equivalentes à 90% da produção máxima para solução A, B e C são, respectivamente, 85,7; 84,9 e 78,1 g vaso⁻¹. As doses de K associadas a esse valor de produção são: 163 mg dm⁻³ para solução A, 130 mg dm⁻³ para solução B e 86 mg dm⁻³ para solução C, considerando-se o modelo raiz quadrática.

A solução C proporcionou menor diferença de produtividade entre as doses zero e a dose equivalente ao nível crítico, assim como implicou no menor ponto de máxima entre as três soluções. Apesar de não haver diferença quanto a produção de massa seca entre as soluções A e B, a solução A proporcionou maior ponto de máxima assim como melhor ajuste. Portanto, a solução A é a mais indicada, associada à dose de K de 163 mg dm⁻³.

Na Tabela 10 é apresentada a análise de variância do acúmulo de K da parte aérea de plantas de milho em função da aplicação de diferentes soluções nutritivas e doses crescentes de potássio. Foi constatada a diferença significativa entre o tratamento adicional e o fatorial, assim como o efeito significativo das doses de K.

Tabela 10 - Quadro da análise de variância do acúmulo de potássio da parte aérea de plantas de milho em função da aplicação de diferentes soluções nutritivas e doses crescentes de potássio. Dados transformados através da transformação de Box-Cox, com $\lambda = 0,45$.

FV	GL	SQ	QM	FC	pR>Fc
Bloco	2	125,15	62,57	7,05	0,0026
Solução	2	25,69	12,85	1,44	0,2487
Dose	5	3.738,79	747,76	84,22	0,0000
Solução*Dose	10	40,35	4,04	0,45	0,9079
Ad vs fatorial	1	1.731,38	1.731,37	195,00	0,0000
Resíduo	36	319,52	8,88		
Total	56	5980,99			
CV	10,42				

Através da análise da Tabela 11 verifica-se que o acúmulo de potássio pela parte aérea no tratamento adicional foi estatisticamente inferior ao fatorial.

Tabela 11 - Contraste entre o tratamento adicional e o fatorial para o acúmulo de potássio (mg vaso⁻¹). Dados transformados através da transformação de Box-Cox com $\lambda = 0,45$.

	Médias transformadas	Médias originais
Adicional	5,21 b	14,87
Fatorial	29,89 a	417,53

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste F a 1% de probabilidade.

Na Tabela 12 é apresentada a análise de variância da regressão polinomial do acúmulo de potássio na parte aérea. O modelo indicado pela análise foi o modelo quadrático, uma vez que este modelo apresentou significância ($p < 0,01$) ao mesmo tempo que seus desvios não foram significativos.

Tabela 12 - Análise de variância da regressão polinomial do acúmulo de potássio em função da aplicação de doses crescentes de potássio. Dados transformados através da transformação de Box-Cox, com $\lambda = 0,45$.

	GL	SQ	QM	Fc	Valor.p
Efeito linear					
Linear	1	3.526,22	3.526,22	397,17	0,0000
Desvios	4	212,57	53,14	5,99	0,0008
Resíduos	36	319,62	8,88		
Efeito Quadrático					
Linear	1	3.526,22	3.526,22	397,17	0,0000
Quadrático	1	204,40	204,40	23,02	0,0000
Desvios	3	8,17	2,72	0,31	0,8203
Resíduos	36	319,62	8,88		
Efeito Cúbico					
Linear	1	3.526,22	3.526,22	397,17	0,0000
Quadrático	1	204,40	204,40	23,02	0,0000
Cúbico	1	4,99	4,99	0,56	0,4584
Desvios	2	3,18	1,59	0,18	0,8366
Resíduos	36	319,62	8,88		

A Figura 4 indica o bom ajuste do modelo quadrático, identificado pelo valor do coeficiente de determinação próximo a 1. Todos os parâmetros da equação foram significativos de acordo com o teste t ($p < 0,01$).

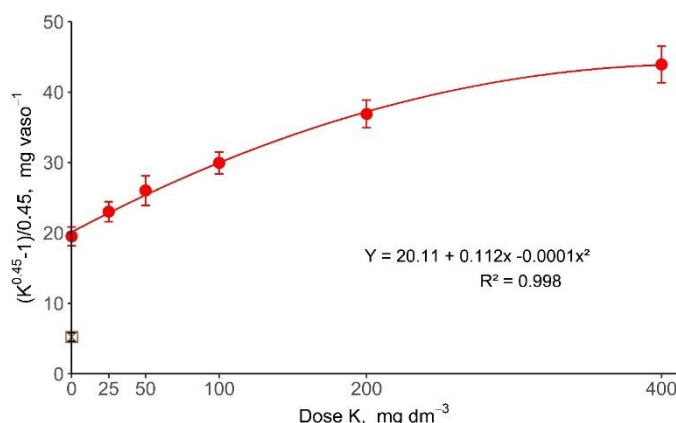


Figura 4 - Equação de regressão do acúmulo de potássio da parte aérea de plantas de milho em função da aplicação de doses crescentes de potássio. Barras verticais representam o erro padrão da média. Dados transformados através da transformação de Box-Cox, com $\lambda = 0,45$.

As células vegetais contêm vários canais (baixa afinidade) e transportadores (alta afinidade) de K^+ . Esses canais e transportadores são responsáveis pela absorção de baixa afinidade e também de alta afinidade, dependendo da disponibilidade de K^+ no solo (PANDEY; MAHIWAL, 2015).

A absorção de potássio pelas plantas apresenta cinética de saturação, ou seja, quando a concentração é mínima, próxima de zero, a velocidade de absorção do íon é muito baixa. Paralelo ao aumento da concentração em solução do íon, ocorre também um incremento da velocidade de absorção. Entretanto, o fenômeno não é linear e à medida que se aumenta a concentração do íon em solução, há um determinado ponto a partir do qual os incrementos na velocidade de absorção são negligíveis, mesmo que a concentração do íon continue a crescer. Entretanto, a partir da concentração

de, aproximadamente, 1 mM de K em solução, inicia-se o mecanismo de absorção de baixa afinidade, surgindo uma segunda isoterma (FERNANDES; SOUZA; SANTOS, 2018).

Em estudo realizado por Santos et al. (2016), foi avaliada a aplicação de doses crescentes de diferentes fontes de potássio na produção de massa seca e acúmulo de K em plantas de milho, girassol e eucalipto cultivados em um solo classificado como Typic Hapludox, equivalente aos Latossolos no Sistema Brasileiro de Classificação de solos (VALADARES; COELHO; DE MEDEIROS OLIVEIRA, 2019). O solo continha inicialmente 16 mg kg⁻¹ de K disponível e recebeu aplicação de quatro fertilizantes potássicos em doses crescentes, partindo de 0 até 200 mg kg⁻¹. Os autores relatam que o melhor ajuste para o acúmulo de potássio pelas plantas foi o modelo linear.

A diferença no ajuste de modelos entre o presente estudo e o estudo supracitado muito se deve às doses aplicadas e aos teores iniciais de potássio no solo. Santos et al. (2016) trabalharam com um solo com menor conteúdo de potássio e com doses menores, enquanto no presente trabalho partiu-se de um solo com 43 mg dm⁻³ de K disponível no solo e aplicou-se, no caso das maiores doses, até o dobro de K via fertilizante em relação ao estudo de Santos et al. (2016). Portanto, o estudo de Santos et al. (2016) foi realizado numa faixa de potássio disponível no solo menos ampla e mais responsiva à adubação, justificando assim as diferenças entre os resultados encontrados.

Conclusão

A aplicação de doses crescentes de potássio proporcionou o aumento na produção de massa seca e acúmulo de K na parte aérea das plantas de milho. A solução C proporcionou maior produção de massa seca na dose zero de K em relação à solução A. Os modelos cúbico, raiz quadrada e Mitscherlich se mostraram estatisticamente adequados para descrever o aumento da produção de massa seca da parte aérea de plantas de milho em função do aumento das doses de K, em todos os níveis de solução nutritiva. Entretanto, o modelo quadrático de raiz é o mais indicado entre os modelos avaliados. Para o acúmulo de potássio da parte aérea de plantas de milho observou-se padrão quadrático com o aumento de doses de K. O tratamento adicional foi aquele com pior desempenho na produção de massa seca e no acúmulo de potássio da parte aérea. Em experimentos com condições similares, recomenda-se a aplicação da solução nutritiva A associada a dose de potássio de 163 mg dm⁻³.

Conflitos de interesse

Não houve conflito de interesses dos autores.

Contribuição dos autores

Ricardo de Castro Dias – execução, investigação, metodologia, visualização, análises estatísticas, redação e rascunho original; Paulo César Teixeira – conceituação, aquisição de financiamento, metodologia, recursos, supervisão, visualização, redação, revisão e edição; Renato Nunes Pereira – análises estatísticas, supervisão, redação e revisão; João Augusto Dourado Loiola – execução e visualização; Marcos Gervasio Pereira – conceituação, supervisão, visualização, redação, revisão e edição; Everaldo Zonta – aquisição de financiamento, recursos, redação, revisão e edição.

Fonte de financiamento

Este estudo foi financiado pela Agência Federal de Apoio e Avaliação da Pós-Graduação (CAPES, código de financiamento 001).

Referências bibliográficas

- ACKELLO-OGUTU, C.; PARIS, Q.; WILLIAMS, W. A. Testing a von Liebig Crop Response Function against Polynomial Specifications. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 67, n. 4, p. 873-880, 1985. <https://doi.org/10.2307/1241829>
- ANDERSON, R. L.; NELSON, L. A. A Family of Models Involving Intersecting Straight Lines and Concomitant Experimental Designs Useful in Evaluating Response to Fertilizer Nutrients. **Biometrics**, v. 31, n. 2, p. 303-312, 1975. <https://doi.org/10.2307/2529422>
- BERCK, P.; GEOGHEGAN, J.; STOHS, S. A Strong Test of the von Liebig Hypothesis. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 82, n. 4, p. 948-955, 2000. <https://doi.org/10.1111/0002-9092.00093>
- BOLDRIN, P. F.; SOUTO, H. F.; SALLES, L. S.; FURTINI NETO, A. E. Alternative sources of potassium for maize cultivation. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 43, 2019. <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943023619>
- CERRATO, M. E.; BLACKMER, A. M. Comparison of Models for Describing; Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer. **Agronomy Journal**, v. 82, n. 1, p. 138-143, 1990. <https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200010030x>
- DHAKAL, C.; LANGE, K. Crop yield response functions in nutrient application: A review. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 6, p. 5222-5234, 2021. <https://doi.org/10.1002/agj2.20863>
- DIAS, R. D. C.; CASTRO, T. A.; GONÇALVES, R. G. da M.; POLIDORO, J. C.; ZONTA, E.; PEREIRA, M. G.; STRALIOTTO, R.; TEIXEIRA, P. C. Acúmulo de biomassa e potássio em gramíneas em função da fonte fertilizante e do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 33506-33518, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-053>
- FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. de; SANTOS, L. A. **Nutrição Mineral de Plantas**. 2ª ed. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018.
- FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portugues), 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=ExpDes.pt>
- FERREIRA, I. E. P.; ZOCCHI, S. S.; BARON, D. Reconciling the Mitscherlich's law of diminishing returns with Liebig's law of the minimum. Some results on crop modeling. **Mathematical Biosciences**, v. 293, p. 29-37, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mbs.2017.08.008>
- FREIRE, L. R. et al. **Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Seropédica - RJ: Editora Universidade Rural, 2013.
- GOMES, F. P. The Use of Mitscherlich's Regression Law in the Analysis of Experiments with Fertilizers. **Biometrics**, v. 9, n. 4, p. 498-516, 1953. <https://doi.org/10.2307/3001441>
- HYNDMAN, R. J. fpp: **Data for "Forecasting: principles and practice"**, 2013. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=fpp>
- MARSCHNER, H.; CAKMAK, I. High Light Intensity Enhances Chlorosis and Necrosis in Leaves of Zinc, Potassium, and Magnesium Deficient Bean (*Phaseolus vulgaris*) Plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 134, n. 3, p. 308-315, 1989. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(89\)80248-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(89)80248-2)

- MULUGETA, D.; TEKALIGN, M.; SHELEME, B.; SELAMYIHUN, K. Potassium critical level in soil for Teff (*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter) grown in the central highland soils of Ethiopia. **SN Applied Sciences**, v. 1, 958, p. 1-9, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0873-x>
- MURRELL, T. S.; MIKKELSEN, R. L.; SULEWSKI, G.; NORTON, R.; THOMPSON, M. L. **Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops**. Cham: Springer, 2021. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-59197-7>
- NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do Solo**. 1ª ed. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- PANDEY, G. K.; MAHIWAL, S. **Role of Potassium: An Overview Introduction**. In: PANDEY, G. K.; MAHIWAL, S. (Eds.). *Role of Potassium in Plants*. Cham: Springer, p. 1-7, 2015.
- PARIS, Q. The von Liebig Hypothesis. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 74, n. 4, p. 1019-1028, 1992. <https://doi.org/10.2307/1243200>
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: <https://www.r-project.org/>
- SÁNCHEZ DE LA PUENTE, L.; BELDA, R. M. A simple mathematical model for diagnosis of nutrient content and dry matter production in wheat. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 4-5, p. 651-660, 2001. <https://doi.org/10.1081/PLN-100103659>
- SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed., Brasília, DF : EMBRAPA, 2018.
- SANTOS, W. O.; MATTIELLO, E. M.; VERGUTZ, L.; COSTA, R. F. Production and evaluation of potassium fertilizers from silicate rock. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, n. 4, p. 547-556, 2016. <https://doi.org/10.1002/jpln.201500484>
- SHIMIZU, G. D.; GONCALVES, L. S. A. **AgroReg: Regression Analysis Linear and Nonlinear for Agriculture**, 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=AgroReg>
- SOARES, M. E. P.; CAVALCANTE, A. C. P.; ANDRADE, G. A. V. de; BARBOSA, I. R.; LIMA, N. J. C.; AQUINO, L. A. de. Productivity, cation absorption and severity of alternaria potato influenced by potassium fertilization. **Scientia Plena**, v. 16, n. 7, 2020. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2020.070203>
- STAFANATO, J. B. **Aplicação de misturas granuladas NK e NS em cultivar de arroz (*Oryza sativa*)**. 67f. Dissertação (Mestrado) - Programa de PósGraduação em Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2009. <https://tede.ufrjr.br/jspui/handle/tede/282>
- TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2ª ed. Porto Alegre - RS: Departamento de Solos, UFRGS, 1995.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ª ed. Brasília: Embrapa, 2017.
- VALADARES, A. P.; COELHO, R. M.; MEDEIROS OLIVEIRA, S. R. Preprocessing procedures and supervised classification applied to a database of systematic soil survey. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 5, p. 439-447, 2019. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0171>

Recebido em 16 de março de 2022
Retornado para ajustes em 12 de maio de 2022
Recebido com ajustes em 24 de maio de 2022
Aceito em 27 de maio de 2022