

Modelos estatísticos para descrever a produtividade de batata em função da adubação nitrogenada

Marcelo Cleón de C Silva; Paulo Cezar R Fontes; Glauco V Miranda

UFV, DFT, 36570-000 Viçosa-MG; mdecastro70@yahoo.com.br; pacerefo@ufv.br

RESUMO

Avaliou-se seis modelos matemáticos para prever a dose ótima de nitrogênio (N) para a produção de tubérculos de batata em experimento realizado na UFRV, em solo Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico. Foram avaliadas cinco doses de N (0; 50; 100; 200 e 300 kg ha⁻¹) no delineamento experimental em blocos completos casualizados, com quatro repetições. A aplicação do N foi realizada em sulcos, na forma de sulfato de amônio. A cultivar Monalisa foi plantada em 14/05, seguindo-se as normas agronômicas recomendadas para a batata. Os tubérculos foram colhidos e pesados em 14/09. Foram selecionados seis modelos, linear plateau, quadrático plateau, Mitscherlich, sigmoidal, raiz quadrática e quadrático que foram avaliados com base nos critérios: lógica biológica, significância do quadrado médio do resíduo da regressão, não significância do F ou falta de ajustamento, alto valor do coeficiente de determinação (R²), significância dos parâmetros da regressão, ausência de padrão no gráfico de resíduos versus valores previstos e, quando possível a sobra de dinheiro após vender a batata e pagar o adubo nitrogenado. Pelos critérios adotados, o modelo quadrático foi o escolhido e a dose estimada de N para a máxima eficiência econômica foi 163 ou 171 kg ha⁻¹, em cenários desfavorável ou favorável de preço da batata, respectivamente.

Palavras-chave: *Solanum tuberosum* L., nitrogênio, dose econômica, fertilizante, preço.

ABSTRACT

Statistical models to describe the potato yield as a result of the nitrogen fertilization

Six mathematical models were evaluated to predict nitrogen (N) optimum rate for the potato production in an experiment carried out in a Red Yellow Cambic Podzolic soil. Five N rates (0; 50; 100; 200 and 300 kg ha⁻¹) were evaluated in a completely randomized block design, with four replications. N fertilizer was applied in furrows, as ammonium sulphate. Monalisa cultivar was planted on May 5 following the recommended agronomic practices for the potato. Tubers were harvested and weighed on September 14. Six models, linear plateau, quadratic plateau, Mitscherlich, sigmoidal, square root and quadratic, were selected and evaluated based upon the criteria: biological logic, regression mean square residue, significance of F-test or lack of adjustment, high determination coefficient value (R²), significance of the regression parameters, pattern absence in the graph of residues versus foreseen values and, when possible the money left over after selling the potato and paying the N fertilizer. For the adopted criteria, the quadratic model was chosen and the economic N rate was 163 or 171 kg ha⁻¹, at unfavorable or favorable potato price situations, respectively.

Keywords: *Solanum tuberosum* L., nitrogen, economic rate, fertilizer.

(Recebido para publicação em 16 de fevereiro de 2006; aceito em 1 de agosto de 2007)

O nitrogênio (N) é essencial para o crescimento e desenvolvimento da cultura da batata e tanto a deficiência quanto o excesso de N decresce a produção de tubérculos. De uma maneira ampla, para a produção esperada de 1000 kg de tubérculos são necessários 6,2 kg de N (Fontes, 1997). Mais apropriadamente, a recomendação da dose adequada deve ser baseada no conhecimento obtido em experimento onde é verificado o efeito de doses do fertilizante nitrogenado sobre a produção de tubérculos. A resposta obtida pode ser ajustada por vários modelos estatísticos buscando-se a estimativa da dose ótima do fertilizante nitrogenado (Zimmermann & Conagin, 1986; Seefeldt *et al.*, 1995).

Os vários modelos podem propiciar valores discordantes da estimativa da dose ótima do fertilizante (Nelson *et al.*,

1985; Fontes & Ronchi, 2002) afetando a rentabilidade da cultura e podendo ocasionar impacto negativo sobre o meio ambiente. Assim, a seleção do modelo mais apropriado para descrever a relação entre produtividade das culturas e aplicação de fertilizantes não é padronizada (Bock & Skora, 1990; Angus *et al.*, 1993). Geralmente, nos trabalhos sobre o tema há pequena ou nenhuma discussão de como o modelo foi selecionado, não existindo padronização para a seleção do modelo adequado para descrever a resposta da planta à adubação com N.

Modelos quadráticos segundo Colwel (1994) têm sido muito utilizado em estudos que descrevem o rendimento da cultura em função das doses do fertilizante, porém estes tendem a superestimar a dose do fertilizante quando o ponto de inflexão é considerado

como a melhor dose. Também verifica-se pesquisa utilizando os modelos linear plateau e quadrático plateau (Cerrato & Blackmer, 1990), que a partir do ponto de inflexão verifica-se uma reta constante. Para o modelo raiz quadrático (Colwell, 1994), percebe-se um lento decréscimo a partir do ponto de inflexão, relacionado ao modelo quadrático. No caso dos modelos Mitscherlich e sigmoidal (Bélanger *et al.*, 2000) encontra-se uma curva assintótica que não fornece o ponto máximo (infinita), quando comparado com os modelos anteriores.

A escolha de um modelo estatístico deve-se basear em critérios dentre os quais a lógica biológica do fenômeno, significância do quadrado médio da regressão, não significância do F isto é, falta de ajustamento, alto valor do coeficiente de determinação (R²), significância dos parâmetros da regres-

são e ausência de padrão no gráfico de resíduos versus valores previstos. Além destes critérios é preciso considerar a maximização da produtividade e do lucro (Alvarez, 1994).

Embora vários modelos tenham sido pesquisados mundialmente para descrever o rendimento das culturas, tais como, milho (Cerrato & Blackmer 1990; Bullock & Bullock, 1994), trigo (Makowski *et al.*, 2001) e batata (Bélanger *et al.*, 2000) em resposta à aplicação do fertilizante nitrogenado, não se verifica estudos no Brasil.

O objetivo do trabalho foi avaliar a resposta da produtividade de tubérculos de batata a doses de N utilizando-se seis modelos estatísticos e estimar a dose máxima econômica em cenários desfavorável e favorável de preço da batata.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Horta de Pesquisa da UFV, em solo Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico (Embrapa, 1999). Foram avaliadas cinco doses de N (0; 50; 100; 200 e 300 kg ha⁻¹) no delineamento experimental em blocos completos casualizados, com quatro repetições. A aplicação do N foi realizada em sulcos, na forma de sulfato de amônio. Cada parcela mediu 4,5 m x 2,0 m, sendo composta de 6 fileiras de plantas, espaçadas 0,75 m entre si e 0,25 m entre plantas. As duas fileiras laterais e as duas plantas das extremidades das fileiras foram bordaduras.

Utilizou-se a cultivar Monalisa, de origem holandesa, com plantas altas, possuindo três a quatro hastes por planta e ciclo médio precoce, os tubérculos continham formato alongado, olhos rasos, película amarelo-clara, lisa e brilhante, apresentando alto potencial produtivo (EPAGRI, 2002). O tubérculo estava em início de brotação e continha 86% de umidade. O plantio foi feito em 14/05/04 e o manejo da cultura seguiu as normas agrônomicas recomendadas (Fontes, 2005), incluindo utilização de arado de aiveca e irrigação por aspersão. Uma semana após o total secamento da parte aérea, em 14/09/04, os tubérculos foram colhidos, permanecendo no campo em torno de uma hora e, em seguida, pesados.

Tabela 1. Lógica biológica (LB), resumo da ANOVA da regressão: quadrado médio do resíduo da regressão (QMRr), F da falta de ajuste (FA), coeficiente de determinação (R²) e significância dos parâmetros da regressão (T', T'' e T''') nos modelos (Biological logic (LB), summary of ANOVA of the regression: mean square of residue (QMRr), F of unadjusted (FA), determination coefficient (R²) and significance of the regression parameters (T', T'' and T''') on the models). Viçosa, UFV, 2005.

Modelos	Critérios para escolha do modelo						
	LB	QMRr	FA	R ²	T'	T''	T'''
1- Linear plateau	Sim	17676	NF	0,09	NF	NF	NF
2- Quad. plateau	Sim	952641	NF	0,92	NF	NF	NF
3- Mitscherlich	Sim	639648	NF	0,92	NF	NF	NF
4- Sigmoidal	Sim	11679632	NF	0,92	NF	NF	NF
5- Raiz quad.	Sim	246196	ns	0,97	6,6**	8,5*	NF
6- Quadrático	Sim	1583441	ns	0,87	3,5***	3,1***	NF

ns, não significativo pelo teste F; NF, não fornecido pelo programa, devido serem modelos não lineares; *, ** e *** significativo através do teste t ao nível de 1; 5 e 10% de probabilidade, respectivamente (ns, not significant in the F test, not given in the program due to not linear models; *, ** and *** significant through the t test on 1; 5 and 10% probability, respectively).

Tabela 2. Dose máxima estimada de nitrogênio (DMN), gasto com o sulfato de amônio (GAN) e produtividade máxima física de tubérculos (PMFT) nos modelos (Estimated maximal N dosis (DMN), expense with ammonium sulphate (GAN) and maximum physical yield of tubers (PMFT) in the models). Viçosa, UFV, 2005.

Modelos	DMN (kg ha ⁻¹)	GAN (R\$ ha ⁻¹)	PMFT (kg ha ⁻¹)
1-Linear plateau	50,00	165,00	33.493
2-Quadrático plateau	59,64	196,81	39.125
3-Mitscherlich	65,70	216,81	39.125
4-Sigmoidal	65,70	216,81	39.125
5-Raiz quadrática	133,53	440,65	39.797
6-Quadrático	177,57	585,98	40.720
7-Sem adubar com N *	0,00	0,00	33.813

* Apenas considerou-se os valores de produtividade do tratamento controle (* only the yield values of control treatment were considered).

Os dados de produtividade dos tubérculos foram submetidos à análise de variância e de regressão linear (proc reg) e não linear (proc nlin) utilizando-se estes procedimentos no SAS (SAS, 1990), utilizou-se também o SAEG (Ribeiro Júnior, 2001). Foram selecionados seis modelos, linear plateau, quadrático plateau, Mitscherlich, sigmoidal, raiz quadrática e quadrático. Os quatro primeiros modelos não lineares foram submetidos à metodologia iterativa de Gaus-Newton para estimativa dos parâmetros, os dois últimos considerou-se como lineares. A expressão matemática destes modelos encontra-se a seguir.

1) Modelo linear plateau, definido pelas equações 1 e 2:

$$Y = a + bX, \quad \text{se } X < C \quad (1)$$

$$Y = P, \quad \text{se } X \geq C \quad (2)$$

Onde Y é a produtividade de tubérculo (kg ha⁻¹); a e b são intercepto e coeficiente linear, respectivamente; X é a dose de N (kg ha⁻¹); a constante C é o local da interseção do modelo linear com o plateau; P é a produtividade quando se atinge o plateau.

2) Modelo quadrático plateau, definido pelas equações 3 e 4:

$$Y = a + bX + cX^2 \quad \text{se } X < C \quad (3)$$

$$Y = P \quad \text{se } X \geq C \quad (4)$$

Onde Y, X, a, b e C foram definidos no modelo 1 e c é o coeficiente quadrático.

3) Modelo Mitscherlich, definido pela equação 5:

$$Y = A / (1 - e^{-c(X+b)}) \quad (5)$$

Onde Y e X foram definidos anteriormente; A é a máxima produtivi-

Tabela 3. Recebimento com a venda da batata (RCVB) e sobra após pagar o adubo nitrogenado (SAPN) em cenário desfavorável e favorável de preço da batata nos modelos (Income after selling the potato (RCVB) and remaining after paying N fertilizer (SAPN) in unfavorable and favorable price of the potato in the models). Viçosa, UFV, 2005.

Modelos	Cenário desfavorável (R\$ ha ⁻¹)		Cenário favorável (R\$ ha ⁻¹)	
	RCVB	SAPN	RCVB	SAPN
1- Linear plateau	20.096	19.931	40.192	40.027
2- Quadrático plateau	23.475	23.278	46.950	46.753
3- Mitscherlich	23.475	23.258	46.950	46.733
4- Sigmoidal	23.475	23.258	46.950	46.733
5- Raiz quadrática	23.878	23.437	47.756	47.315
6- Quadrático	24.432	23.846	48.864	48.278
7- Sem adubar com N	20.288	20.288	40.576	40.576

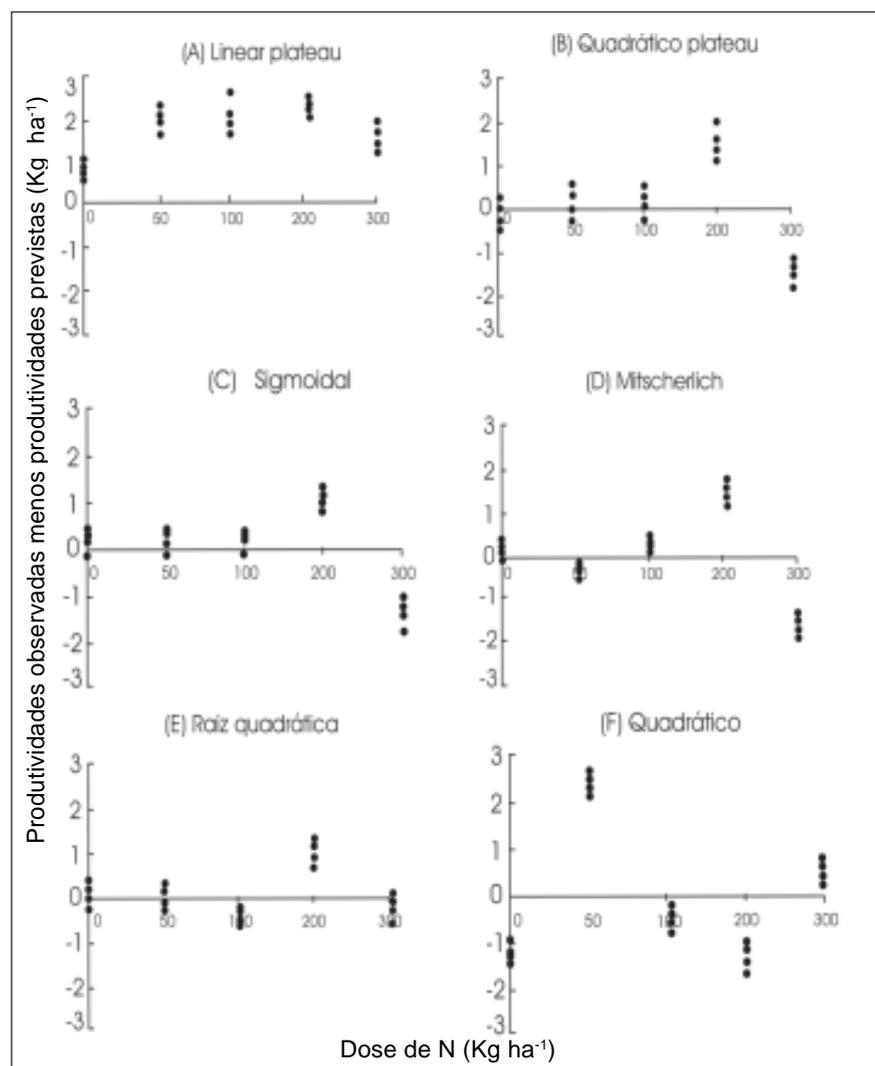


Figura 1. Resíduos da regressão (produtividades observadas menos produtividades previstas) quando ajustou-se os modelos linear plateau (A), quadrático plateau (B), sigmoidal (C), Mitscherlich (D), raiz quadrática (E) e quadrático (F) (Residues of the regression (observed yield minus predicted yield) adjusting the models linear plateau (A), quadratic plateau (B), sigmoidal (C), Mitscherlich (D) square root (E) and quadratic (F)). Viçosa, UFV, 2005.

idade atingível; c e b são constantes e correspondem ao coeficiente de eficácia

do fertilizante nitrogenado e a estimativa do teor de N contido no solo, em

forma assimilável pelas plantas, respectivamente.

4) Modelo sigmoidal, definido pela da equação (6):

$$Y = Y_0 + \frac{a}{1 + e^{-[(x-x_0)/b]}} \quad (6)$$

Onde Y e X foram definidos anteriormente; a e b são parâmetros de regressão não linear do modelo; X₀ é a dose inicial ou 0 kg ha⁻¹ de N; Y₀ é a produtividade obtida com a dose inicial (kg ha⁻¹).

5) Modelo de raiz quadrática, definido pela da equação (7):

$$Y = a + bX + cX^{1/2} \quad (7)$$

Onde Y, a, b, c e X foram anteriormente definidos.

6) Modelo quadrático, definido pela equação 8:

$$Y = a + bX + cX^2 \quad (8)$$

Onde Y, a, b, c e X foram anteriormente definidos.

Os modelos foram avaliados com base nos critérios: lógica biológica, quando verifica-se que após uma certa dose do fertilizante não ocorre acréscimo na produtividade (LB), significância do quadrado médio do resíduo da regressão (QMRr), não significância do F ou falta de ajustamento, alto valor do coeficiente de determinação (R²), significância dos parâmetros da regressão, quando possível utilizando-se o teste t a 1; 5 e 10% e o teste F a 1 e 5% de probabilidade, ausência de padrão no gráfico de resíduos versus valores previstos e, finalmente, a sobra de dinheiro após vender a batata e pagar o adubo nitrogenado (SAPN).

A estimativa de SAPN foi obtida a partir da dose máxima estimada de N (DMN) e a correspondente produtividade máxima física de tubérculos. Para cada modelo foi considerada a PMFT, exceto no Mitscherlich e sigmoidal que foi usado 90% da estimativa máxima, visto que nestes casos não é possível determinar o ponto máximo por se tratarem de curvas assintótica (Alvarez, 1994). O recebimento com a venda da batata (RCVB) foi calculado a partir da multiplicação da produtividade máxima física de tubérculos (PMFT) pelo preço da batata. Para os cálculos foram adotados os valores de R\$ 3,30 por kg

de N (pagamento a prazo); R\$ 0,60 (cenário considerado desfavorável) e R\$ 1,20 por kg de batata (cenário favorável), considerando o período da safra e entressafra, respectivamente. Foi considerado que o preço da aplicação do fertilizante é igual para qualquer quantidade de N e que a variação de produtividade não implica em gastos extras. Calculou-se também a dose máxima econômica de nitrogênio (DEN) utilizando-se o modelo quadrático. Essa foi calculada igualando-se a derivada primeira da função com a relação de preços do N e da batata, nos dois cenários. Contabilizou-se ainda o gasto com o sulfato de amônio (GAN) e a DEN.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos testados preencheram os critérios de lógica biológica (LB), significância do quadrado médio do resíduo da regressão (QMRr), não significância do F ou falta de ajustamento (FA), alto valor do R^2 e significância dos parâmetros da regressão, quando possível (Tabela 1). Na Figura 1 percebe-se perfeitamente a ausência de padrão no gráfico de resíduos versus valores previstos para o modelo linear plateau. Os modelos Mitscherlich, e sigmoidal apresentam lógica biológica discutível, visto que os acréscimos nos valores de produtividade tendem a um valor constante, porém não se verifica um ponto máximo, pois são curvas assintótica. Menor QMRr indica melhor ajuste do modelo, porém, não evidenciou-se para o modelo linear plateau, visto que o R^2 foi bastante baixo (Tabela 1) e ocorreu uma enorme diferença entre os valores observados e preditos (Figura 2). Os valores de T evidenciaram diferença entre as doses estudadas. O coeficiente de determinação (R^2) é a medida da correlação entre a dose de N e a produtividade de tubérculos não devendo ser o único critério para escolha do modelo. Diversos modelos (linear plateau, quadrático plateau, quadrático, raiz quadrática e Mitscherlich) foram testados para descrever a resposta da produtividade de milho a doses de N propiciando valores de R^2 variando de 0,77 a 0,99 não sendo um critério seguro para a seleção do modelo e da identi-

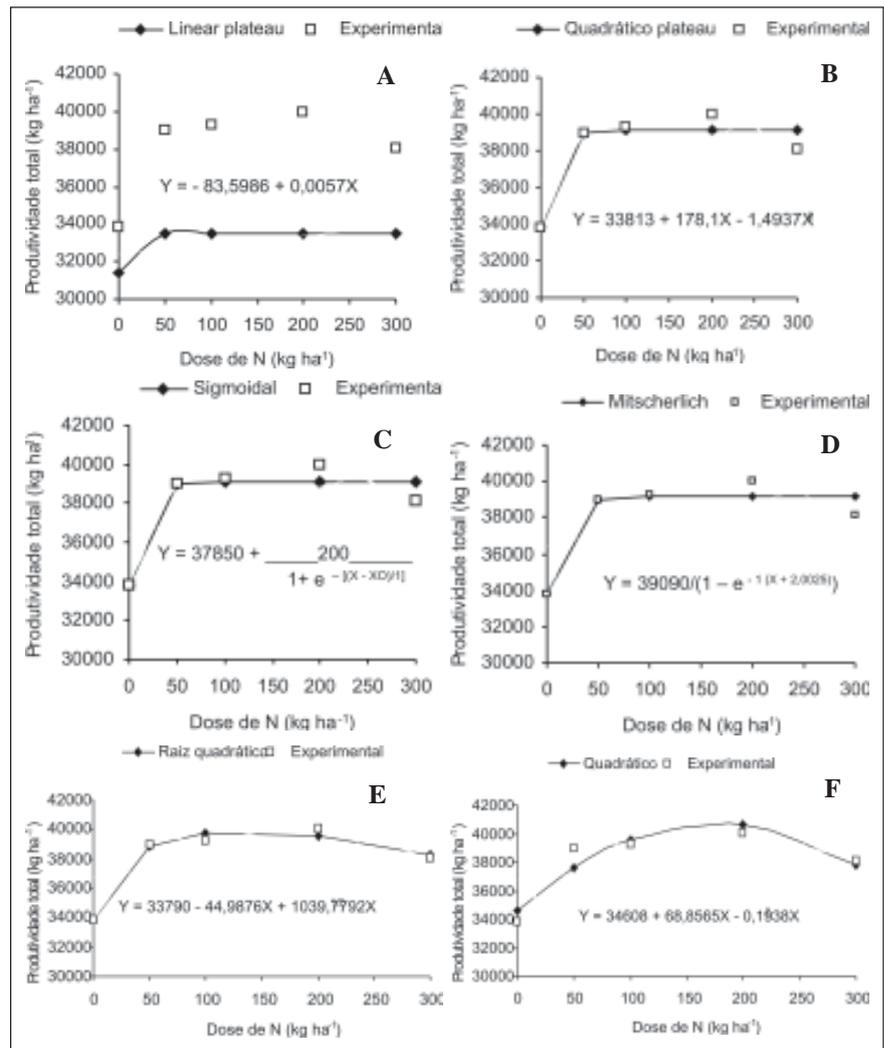


Figura 2. Relação entre produtividade de tubérculos de batata e doses de nitrogênio nos modelos linear plateau (A), quadrático plateau (B), sigmoidal (C), Mitscherlich (D), raiz quadrática (E) e quadrático (F) (Relation between potato tuber yield and N dosis in the models linear plateau (A), quadratic plateau (B), sigmoidal (C), Mitscherlich (D) square root (E) and quadratic (F)). Viçosa, UFV, 2005.

ficação da dose ótima econômica (Cerrato & Blackmer, 1990), devido à grande variabilidade nos valores da dose ótima (75 a 870 kg ha⁻¹ de N), estes resultados de R^2 foram diferentes aos encontrados neste experimento, visto que os valores de R^2 variaram de 0,09 a 0,97 com doses ótimas entre 50 a 178 kg ha⁻¹ de N.

Modelos com valores distantes de R^2 podem propiciar estimativas próximas de valores da dose máxima estimada de nitrogênio (DMN) e correspondente valor da PMFT (Tabela 2). Os diversos modelos levaram a estimativa de DMN variando de 50 a 178 kg ha⁻¹, ao gasto de 96 a 586 R\$ ha⁻¹ e PMFT de 33.493 a 40.720 kg ha⁻¹ (Tabela 2), sendo que as

maiores DMN, gasto com sulfato de amônio (GAN) e PMFT foram estimadas pelo modelo quadrático (Tabela 2). Em estudos conduzidos em diversos locais da Holanda há indicação de que a dose ótima de N para a cultura da batata depende de vários fatores dentre os quais o modelo estatístico (Neeteson & Wadman, 1987), condições edafoclimáticas, cultivares e a forma de manejo (Alvarez, 1994).

Após a venda da batata e o pagamento do adubo sobraría mais dinheiro ao ser escolhido o modelo quadrático (Tabela 3). Além disto, a maior quantidade de N estimada pelo modelo poderia ser um seguro contra eventuais perdas de N, o que provavelmente não ocorreu,

pois a fonte foi o sulfato de amônio aplicado em sulco, em solo argiloso (61%) e período de seca, com precipitação de 255 mm durante o período de cultivo. Pelo modelo quadrático, a dose máxima estimada de N (DMN) foi 178 kg ha⁻¹ propiciando a máxima produtividade física de 40.720 kg ha⁻¹ de tubérculos. A dose máxima econômica de N (DEN) foi menor, 163 ou 171 kg ha⁻¹, nos cenários desfavorável ou favorável de preços da batata, respectivamente. Para o estado de Minas Gerais a recomendação é de 190 kg ha⁻¹ de N (Fontes, 1999).

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de bolsas de Pós-Graduação e de Produtividade em Pesquisa; à FAPEMIG por recursos financeiros e à UFV pela estrutura física e profissional.

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ VH. 1994. *Avaliação da fertilidade do solo (Superfície de resposta – modelos aproximativos para expressar a relação fator resposta)*. Viçosa: UFV. 75p.
- ANGUS JF; BOWDEN JW; KEATING BA. 1993. Modeling nutrient responses in the field. *Plant and Soil* 155/156: 57-66.
- BÉLANGER G; WALSH JR; RICHARDS JE; MILBURN PH; ZIADI N. 2000. Comparison of three statistical models describing potato yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal* 92: 902-908.
- BOCK BR; SKORA FJ. 1990. Modified-quadratic/plateau model for describing plant responses to fertilizer. *Soil Science Society American Journal* 54: 1784-1789.
- BULLOCK DG; BULLOCK DS. 1994. Quadratic and quadratic-plus-plateau models for predicting optimal nitrogen rate of corn: A comparison. *Agronomy Journal* 86: 191-195.
- CERRATO, ME; BLACKMER, AM. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal* 82: 138-143.
- COLWELL JD. 1994. Estimating fertilizer requirements. A quantitative approach. CAB International, Wallingford, UK. 262p.
- EMBRAPA. 1999. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ) *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro: Embrapa-Solos. 412p.
- EPAGRI. 2002. *Sistemas de produção para batata-consumo e batata semente em Santa Catarina*. Florianópolis: EPAGRI. 123p.
- FONTES PCR. 1997. *Preparo do solo, nutrição mineral e adubação da batateira*. Viçosa: UFV. 42p.
- FONTES PCR. Batata. In: RIBEIRO AC; GUIMARÃES PTG; ALVAREZ V, VH. 1999. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação*. Viçosa: CFSEMG. 179p.
- FONTES PCR; RONCHI CP. 2002. Critical values of nitrogen indices in tomato plants grown in soil and nutrient solution determined by different statistical procedures. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37: 1421-1429.
- FONTES PCR. 2005. *Olericultura: teoria e prática*. Viçosa: UFV. 486p.
- MAKOVSKI D; WALLACH D; MEYNARD JM. 2001. Statistical methods for predicting responses to applied nitrogen and calculating optimal nitrogen rates. *Agronomy Journal* 93: 531-539.
- NEETESON JJ; WADMAN WP. 1987. Assessment of economically optimum application rates of fertilizer N on the basis of response curves. *Fertilizer Research*, Springer 12: 37-52.
- NELSON LA; VOSS RD; PESEK J. 1985. Agronomic and statistical evaluation of fertilizer response. In ENGELSTAD, O.P. (ed.). *Fertilizer technology and use*. 3rd. ed. Madison: S.S.S.A. p.53-90.
- RIBEIRO JÚNIOR JI. 2001. *Análises estatísticas no SAEG – Viçosa*: UFV. 301p.
- SAS INSTITUTE INC. 1990. *SAS/STAT User's Guide*. Version 6, 4^a ed., volume 02, Cary, NC: SAS Institute Inc.
- SEEFELDT SS; JENSEN JE; FUERST EP. 1995. Log-logistic analysis of herbicide dose-response relationships. *Weed Technology* 9: 218-227.
- ZIMMERMANN FJP; CONAGINA A. 1986. Ajuste de modelos polinomiais do 2º grau em pesquisas com fertilizantes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 21: 971-978.