

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico

Evento: XXI Jornada de Pesquisa

MODELAGEM MATEMÁTICA NA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE AVEIA PELOS COMPONENTES DA PANÍCULA E USO DE REGULADOR DE CRESCIMENTO NAS CONDIÇÕES DE ANO FAVORÁVEL E DESFAVORÁVEL DE CULTIVO¹

Anderson Marolli², Ana Paula Brezolin³, Ângela Teresinha Woschinski De Mamann⁴, Ari Haigino Scremin⁵, Douglas César Reginatto⁶, José Antonio Gonzales Da Silva⁷.

¹ Parte dos resultados de pesquisa desenvolvida pelo DEAg/UNIJUÍ

² Doutorando em Modelagem Matemática do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul/UNIJUÍ.

³ Doutorando em Modelagem Matemática do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul/UNIJUÍ.

⁴ Mestre em Modelagem Matemática pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul/UNIJUÍ.

⁵ Mestrando em Modelagem Matemática do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul/UNIJUÍ.

⁶ Mestrando em Modelagem Matemática do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul/UNIJUÍ.

⁷ Professor do Departamento de Estudos Agrários, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul/UNIJUÍ.

INTRODUÇÃO

A aveia branca vem ganhando destaque na estação fria do ano (Hawerth et al., 2015). O uso de tecnologias de manejo, clima e solo são fatores que atuam diretamente nos componentes da produtividade de grãos de aveia (Mantai et al., 2016). Flores et al. (2012) destacam que para incrementar a produtividade de grãos em cereais a adubação nitrogenada é a mais importante dentre as tecnologias de manejo. O nitrogênio exerce forte influência sobre o número e a massa de grãos da panícula de aveia (Mantai et al., 2016). Para Wang et al. (2009) diferentes níveis de fertilizantes em aveia podem aumentar o número de espiguetas, o comprimento e a massa da panícula, incidindo sobre a alteração da produtividade de grãos. Porém, o incremento excessivo de nitrogênio junto a condições climáticas favoráveis aumentam o crescimento vegetativo da planta, facilitando a ocorrência do acamamento (Flores et al., 2012). O acamamento está diretamente relacionado à estatura das plantas e à resistência do colmo (Hawerth et al., 2015). Uma prática já utilizada em outras culturas, é o uso de reguladores de crescimento que promovem a redução do comprimento do colmo, tornando a planta mais adaptada e eficiente ao uso dos recursos naturais e de insumos (Souza et al., 2013). A regressão linear múltipla é uma técnica utilizada para estabelecer a importância relativa e a magnitude do efeito das variáveis independentes sobre a variável dependente, possibilitando a construção de modelos de simulação (Junges & Fontana 2011). A modelagem matemática da produção agrícola visa a orientação do produtor rural na tomada de decisão, a qual poderá vir a afetar diretamente as atividades operacionais e táticas da condução de cada cultura (Figueiredo, 2006). As relações existentes entre os componentes da panícula da aveia e a produtividade de grãos podem favorecer a construção de modelos de simulação de produtividade,

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico

Evento: XXI Jornada de Pesquisa

contribuindo para o planejamento mais eficiente de manejo do nitrogênio com o uso do regulador de crescimento. O objetivo do estudo é a definição da dose ideal do regulador de crescimento para no máximo 5% de acamamento de plantas de aveia. Identificar variáveis potenciais ligadas a panícula da aveia pelo uso do regulador de crescimento para compor o modelo de regressão linear múltipla e a simulação da produtividade de grãos, em condições de reduzida e alta fertilização com nitrogênio.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido nos anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, no Instituto Regional de Desenvolvimento Rural (IRDeR), pertencente ao Departamento de Estudos Agrários (DEAg) da Unijuí, localizado no município de Augusto Pestana-RS. A semeadura foi realizada com semeadora-adubadora sobre a cobertura vegetal de reduzida relação C/N (sistema soja/aveia). O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com quatro repetições, seguindo um esquema fatorial 4x2 nas fontes de variação doses de regulador de crescimento (0, 200, 400 e 600 mL ha⁻¹) e doses de N-fertilizante (fonte ureia) (30 e 90 kg ha⁻¹), respectivamente, totalizando 32 unidades experimentais. Na análise da inflorescência da aveia (Figura 1), anterior a colheita, realizou-se a coleta aleatória de 20 panículas por unidade experimental, que foram trilhadas para decomposição dos componentes da inflorescência. Ao atender os pressupostos de homogeneidade e normalidade via testes de Bartlett foi realizada análise de variância (ANOVA) para detecção da presença ou ausência de interação entre os fatores. Procedeu-se a escolha das variáveis potenciais para o modelo de regressão linear múltipla via técnica de Stepwise. Este procedimento constrói iterativamente uma sequência de modelos de regressão pela adição e remoção de variáveis, selecionando aquelas que possuem maior relação com a variável principal (Y), utilizando a estatística de F parcial, conforme modelo:

$$F_j = \frac{SQ_R(\beta_j | \beta_1, \beta_0)}{MQ_E(x_j, x_1)}$$

onde, SQ_R é a soma quadrática da regressão e $MQ_E(x_j, x_1)$ é a média quadrática do erro para o modelo contendo as variáveis x_1 e x_j . As variáveis selecionadas via Stepwise foram utilizadas para determinar a equação de regressão linear múltipla, para a simulação da produtividade de grãos de aveia, tal equação é composta por duas ou mais variáveis na geração de uma equação do tipo:

$$y = b_0 \pm b_1x \pm b_2x_2 \pm b_3x_3 \pm \dots \pm b_nx_n$$

descrita na forma matricial como:

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico

Evento: XXI Jornada de Pesquisa

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ M \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{p1} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{p2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ M & M & M & \dots & M \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{pn} \end{bmatrix}; \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ M \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}; e \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ M \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

A partir dessas matrizes, é obtido o valor dos coeficientes de regressão, sendo:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y$$

e a variância destes coeficientes são obtidas pela matriz de covariância do vetor dos coeficientes de regressão:

$$\text{Cov}(\hat{\beta}) = (X'X)^{-1}\hat{\sigma}^2$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(Y - X\hat{\beta})(Y - X\hat{\beta})'}{n - p - 1}$$

sendo n o número de equações e p o número de parâmetros. O teste de hipótese verificou $H_0: \beta_i = 0$ vs $H_a: \beta_i \neq 0$, expresso por:

$$t = \frac{\hat{\beta}_i - \beta_i}{\sqrt{\widehat{V}(\hat{\beta}_i)}}$$

Os valores da dose ideal de regulador de crescimento foram empregados no modelo de regressão linear múltipla junto aos valores médios dos componentes da panícula de aveia validados pela técnica Stepwise. Para realização das análises foi utilizado o programa computacional Genes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, no momento de aplicação de N-fertilizante em 2014, a média de temperatura máxima se mostrou a mais elevada ($\pm 27^\circ\text{C}$) em relação a 2015 e 2013. Além disso, em 2014 a aplicação de nitrogênio foi seguida de precipitações superiores a 50 mm, volume também observado próximo a colheita de grãos. Estes fatos, justificam a baixa produtividade de grãos obtida neste ano (Tabela 1), caracterizando o ano como desfavorável (AD). O ano de 2015, apresenta a menor temperatura máxima ($\pm 12^\circ\text{C}$) próxima a aplicação de N-fertilizante em relação aos demais anos. Além disso, o

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: XXI Jornada de Pesquisa

solo se apresentava com condições de umidade favorável devido ao acúmulo de chuvas dos dias anteriores (Figura 2). Contudo, o elevado volume de chuvas durante o ciclo proporcionaram menores períodos de insolação que somado as média de produtividade de grãos (Tabela 1), caracteriza o ano como intermediário (AI). No ano agrícola de 2013, a temperatura máxima obtida no momento da aplicação de N-fertilizante foi ao redor de 20 °C e a aplicação ocorreu em condições favoráveis de umidade do solo (Figura 2). Nesta condição, a adequada distribuição de precipitação ao longo do ciclo (Figura 2) foi decisiva para a maior produtividade de grãos, caracterizando o ano de 2013 como favorável (AF).

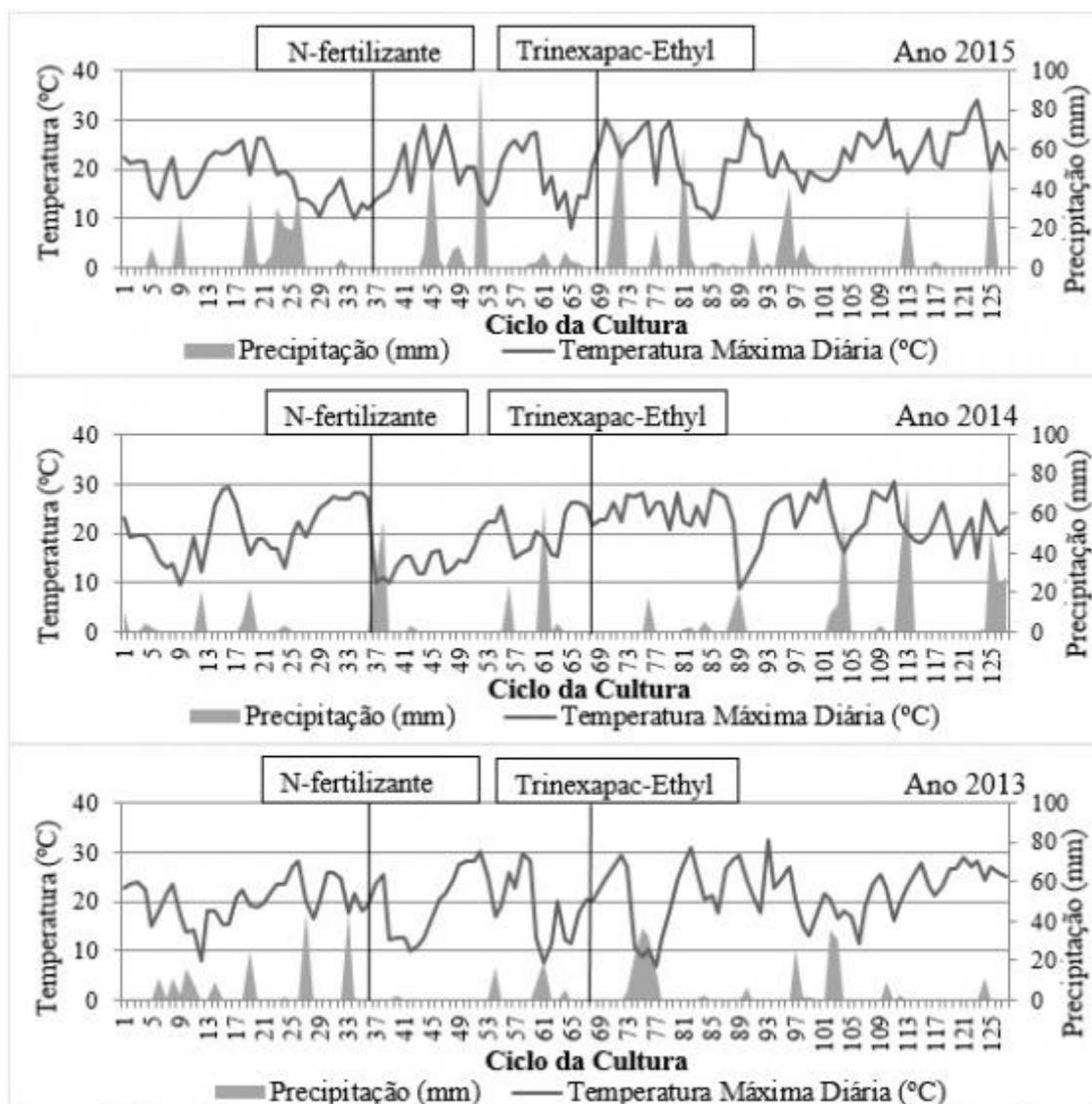


Figura 1. Precipitação pluviométrica, temperatura máxima no ciclo de aveia, aplicação de N-fertilizante e aplicação de Trinexapac-Ethyl.

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: XXI Jornada de Pesquisa

Tabela 1. Dados de temperatura e precipitação nos meses e anos de cultivo de aveia, média da produtividade de grãos e classificação dos anos agrícolas.

Ano	Mês	Temperatura °C			Precipitação (mm)		PG _g (kg ha ⁻¹)	Classe
		Mínima	Máxima	Média	Média*	Ocorrida		
2015	Maio	10,5	22,7	16,6	149	100	3404	AI
	Junho	07,9	18,4	13,1	162	191		
	Julho	08,3	19,2	13,7	135	200		
	Agosto	09,3	20,4	14,8	138	223		
	Setembro	09,5	23,7	16,6	167	046		
	Outubro	12,2	25,1	18,6	156	211		
	Total	-	-	-	909	973		
2014	Maio	11,1	24,5	17,8	149	020	2841	AD
	Junho	09,3	19,7	14,5	162	059		
	Julho	07,4	17,5	12,4	135	176		
	Agosto	12,9	23,4	18,1	138	061		
	Setembro	12,0	23,0	17,5	167	194		
	Outubro	15,0	25,5	20,2	156	286		
	Total	-	-	-	909	798		
2013	Maio	10,0	22,6	16,3	149	108	4163	AF
	Junho	08,9	20,0	14,5	162	086		
	Julho	07,0	20,6	13,8	135	097		
	Agosto	06,6	19,8	13,2	138	163		
	Setembro	09,6	21,0	15,3	167	119		
	Outubro	13,2	27,1	20,2	156	138		
	Total	-	-	-	909	712		

*= Média de precipitação pluviométrica obtida nos meses de maio a outubro de 1982 a 2007; AF= ano favorável; AD= ano desfavorável; AI= ano intermediário; PG_g= produtividade média de grãos.

A proposta de simulação da produtividade de grãos por ano agrícola não contempla modelos eficientes, visto a forte variação existente pelo ano de cultivo, modificando a capacidade de uso do nitrogênio pela aveia à elaboração da produtividade de grãos e os efeitos no acamamento. Portanto, foi realizado o desenvolvimento de equações pelo efeito cumulativo da variabilidade entre ano favorável, intermediário e desfavorável para obtenção de coeficientes mais ajustados aos modelos de regressão polinomial na estimativa da dose ótima de regulador de crescimento e de regressão linear múltipla voltada as simulações de produtividade de grãos, independente de ano agrícola.

Na Tabela 2, para estimativa da dose ideal de regulador de crescimento pela produtividade de grãos, equações de grau dois se mostraram significativas, independente da condição de N-fertilizante, reportando nas doses ajustadas do regulador de 255 e 300 mL ha⁻¹ nas condições de reduzida e alta fertilização por nitrogênio, respectivamente. Destaca-se que estas doses não garantem simultaneamente produtividade de grãos com redução do acamamento de plantas, necessitando de ajustes da dose ideal do regulador pela redução efetiva na queda de plantas. Desta forma, foi

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: XXI Jornada de Pesquisa

realizada a estimativa da dose ideal de regulador de crescimento pela expressão do acamamento (Tabela 2). As equações de regressão testadas identificaram tendência linear, independente das doses de N-fertilizante. Em se tratando de comportamento linear, foi levado em consideração a possibilidade de acamamento de plantas de no máximo 5%, valor adicionado ao parâmetro “Y” da equação. Desta forma foram obtidas as doses ideais de regulador de crescimento de 395 e 450 mL ha⁻¹ em reduzida e alta fertilização por nitrogênio, respectivamente (Tabela 2). Destaca-se que a simulação da produtividade de grãos com a dose ideal de regulador para acamamento de plantas de no máximo 5%, possibilitou simultaneamente produtividade de grãos com reduzido acamamento, confirmando a eficiência da utilização destas doses de regulador em cada condição de N-fertilizante.

Tabela 2 - Estimativa e simulação da dose ideal de regulador de crescimento na restrição do acamamento de plantas e produtividade de grãos.

N-fertilizante (Kg ha ⁻¹)	Equação $Y = b_0 \pm b_1x \pm b_2x^2$	P (b _{ix})	R ²	Dose ideal (mL ha ⁻¹)	Y _E
Produtividade de grãos (Kg ha ⁻¹) (2015+2014+2013)					
30	$3457 + 1,86x - 3,0 \cdot 10^{-3}x^2$	*	0,87	255	3736
90	$3725 + 1,58x - 2,9 \cdot 10^{-3}x^2$	*	0,88	300	3938
Acamamento/AC (%) (2015+2014+2013)					
30	$24 - 0,05x$	*	0,87	395	(5)
90	$59 - 0,12x$	*	0,82	450	(5)
N-fertilizante (Kg ha ⁻¹)	Equação $PG = b_0 \pm b_1x \pm b_2x^2$	P(b _{ix})	R ²	Dose ideal (mL ha ⁻¹)	PG _E
30	$3457 + 1,86x - 3,0 \cdot 10^{-3}x^2$	*	0,87	395	3725
90	$3725 + 1,58x - 2,9 \cdot 10^{-3}x^2$	*	0,88	450	3848

P(b_{ix})= parâmetro que mede a significância de inclinação da reta; R²= coeficiente de determinação; * = Significativo a 5% de probabilidade de erro; () = consideração da possibilidade de acamamento de plantas de no máximo 5%; Y_E = valor estimado; PG_E = produtividade de grãos estimada (Kg ha⁻¹).

Na Tabela 3, na análise individual das doses do regulador de crescimento as variáveis massa do grão da panícula (MGP) e índice de colheita da panícula (ICP) se mostraram significativas para compor o modelo de regressão linear múltipla, independente da condição de N-fertilizante. Além disso, na análise conjunta das doses do regulador de crescimento (0-600 mL ha⁻¹), para a proposta principal que envolve a possibilidade da combinação de componentes da panícula da aveia com o uso da dose ideal de regulador de crescimento (Tabela 2), confirmou a significância da massa do grão da panícula (MGP), do índice de colheita da panícula (ICP) e da dose ideal de regulador de crescimento na composição do modelo de regressão linear múltipla. Na avaliação individual das doses de regulador de crescimento (Tabela 3) é possível perceber uma tendência linear decrescente nas médias observadas das variáveis MGP e ICP com o incremento da dose de regulador, independente da condição de nitrogênio. Na avaliação conjunta das doses do regulador de crescimento (0-600 mL ha⁻¹), estão apresentadas as médias das variáveis MGP e ICP da análise individual das doses do regulador e as doses ideais de regulador de crescimento (Tabela 2).



Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: XXI Jornada de Pesquisa

Tabela 3 - Identificação de variáveis com potencial para compor o modelo de regressão linear múltipla e suas médias observadas durante os três anos de estudo.

N (kg ha ⁻¹)	Fonte de Variação	Significância/ Modelo Stepwise (2015+2014+2013)				
		0	200	400	600	0-600
30	Regressão	*	*	*	*	*
	PG (kg ha ⁻¹)	ns	ns	ns	ns	ns
	CP (cm)	ns	ns	ns	ns	ns
	NEP (n)	ns	ns	ns	ns	ns
	NGP (n)	ns	ns	ns	ns	ns
	MP (g)	ns	ns	ns	ns	ns
	MGP (g)	*	*	*	*	*
	ICP (g g ⁻¹)	*	*	*	*	*
	Dose R (mL ha ⁻¹)	ns	ns	ns	ns	*
90	Regressão	*	*	*	*	*
	PG (kg ha ⁻¹)	ns	ns	ns	ns	ns
	CP (cm)	ns	ns	ns	ns	ns
	NEP (n)	ns	ns	ns	ns	ns
	NGP (n)	ns	ns	ns	ns	ns
	MP (g)	ns	ns	ns	ns	ns
	MGP (g)	*	*	*	*	*
	ICP (g g ⁻¹)	*	*	*	*	*
	Dose R (mL ha ⁻¹)	ns	ns	ns	ns	*
N (kg ha ⁻¹)	Variáveis Selecionadas	Médias Observadas (2015+2014+2013)				
30	MGP (g)	2,70 A	2,50 B	2,30 C	2,06 D	2,39
	ICP (g g ⁻¹)	0,84 A	0,83 A	0,82 A	0,78 B	0,82
	Dose R (mL ha ⁻¹)	-	-	-	-	395
90	MGP (g)	2,90 A	2,62 B	2,43 C	2,00 D	2,5
	ICP (g g ⁻¹)	0,88 A	0,86 A	0,82 B	0,80 B	0,84
	Dose R (mL ha ⁻¹)	-	-	-	-	450

PG= produtividade de grãos; CP = comprimento da panícula; NEP=número de espiguetas da panícula; NGP = número de grãos da panícula; MP= massa da panícula; MGP: massa de grãos da panícula; ICP = índice de colheita da panícula; Dose R= dose ideal de regulador (Tabela 2); * = significativo a 5% de probabilidade de erro; ns= não significativo; N= nitrogênio; Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si na probabilidade de 5% de erro pelo teste de Scott & Knott.

Na Tabela 4, estão apresentadas as equações de regressão linear múltipla para simulação da produtividade de grãos de aveia, para cada dose de regulador de crescimento testada e a proposta principal que envolve a combinação de componentes da panícula com o uso da dose ideal de regulador de crescimento (Tabela 2), em condições de reduzida e alta fertilização por nitrogênio.

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: XXI Jornada de Pesquisa

Tabela 4 - Regressão linear múltipla para estimativa da produtividade de grãos de aveia por componentes da panícula e doses de regulador de crescimento.

N (kg ha ⁻¹)	PG _R	Equação PG = f ₁ (x ₁ , x ₂ , ...) (2015+2014+2013)	PG		IC	
			E	O	LI	LS
30	PG ₀	PG = 3831 + 2588 _{ICP} - 906 _{MGP}	3531	3531	3189	3829
	PG ₂₀₀	PG = 5812 - 5015 _{ICP} + 732 _{MGP}	3479	3499	3184	3773
	PG ₄₀₀	PG = 16585 - 13767 _{ICP} - 818 _{MGP}	3275	3303	3101	3680
	PG ₆₀₀	PG = 5428 + 2207 _{ICP} - 1928 _{MGP}	3178	3181	2715	3588
	PG ₀₋₆₀₀	PG = 5744 - 0,8 _{DR} - 1670 _{ICP} - 272,8 _{MGP}	3398	3246	2655	3478
90	PG ₀	PG = 1949 + 175 _{ICP} - 582 _{MGP}	3792	3792	3569	3987
	PG ₂₀₀	PG = 6625 - 4257 _{ICP} + 303 _{MGP}	3758	3758	3564	3927
	PG ₄₀₀	PG = 2458 - 1252 _{ICP} + 954 _{MGP}	3751	3750	3465	3948
	PG ₆₀₀	PG = 9827 - 5273 _{ICP} - 948 _{MGP}	3710	3629	3321	3898
	PG ₀₋₆₀₀	PG = 5475 + 0,2 _{DR} - 3486 _{ICP} + 488 _{MGP}	3863	3757	3643	3864

PG = produtividade de grãos (kg ha⁻¹); MGP: massa dos grãos da panícula (g); ICP = índice de colheita da panícula (MGP/MP, g g⁻¹); R= dose de regulador de crescimento (mL ha⁻¹); DR = dose ideal de regulador de crescimento (Tabela 2) (mL ha⁻¹).

Nas simulações da produtividade de grãos na análise individual das doses do regulador de crescimento, os valores estimados se mostraram altamente eficientes, com resultados muito próximos aos observados em campo. Na simulação do modelo mais completo, com o emprego das doses ideais de regulador (Tabela 2), todos os resultados estimados foram satisfatórios, com valores estimados próximos aos valores observados em campo e entre os limites de confiança, dando expectativas de simulações confiáveis.

CONCLUSÕES

As doses de 395 e 450 mL ha⁻¹ de regulador de crescimento, se mostram eficientes, apresentando acamamento de plantas de aveia inferior a 5%, em condição de reduzida e alta fertilização com nitrogênio, respectivamente. A massa de grãos da panícula e o índice de colheita da panícula são variáveis potenciais para compor o modelo de regressão linear múltipla. As equações de regressão linear múltipla foram eficientes na simulação da produtividade de grãos de aveia nas condições de uso de regulador de crescimento, independente da dose de N-fertilizante.

Palavras-Chaves: Avena sativa, otimização, regressão linear e múltipla, trinexapac-ethyl

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Corrêa, P. C. et al. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. Rev. Ceres, v. 57, n.5, p. 595-601, 2010.
- Flores, R. A. et al. Adubação nitrogenada e idade de corte na produção de matéria seca do capim-elefante no Cerrado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.16, p.1282-1288, 2012.

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico

Evento: XXI Jornada de Pesquisa

Hawerth, M. C. et al. Redução do acamamento em aveia-branca com uso do regulador de crescimento etil-trinexapac. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.50, p.115-125, 2015.

Junges, A. H. & Fontana, D. C. Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul. *Rev. Ceres*, v. 58, p. 9-16, 2011.

Mantai, R. D. et al. The dynamics of relation oat panicle with grain yield by nitrogen. *American Journal of Plant Sciences*, v.7, p.17-27, 2016.

Souza, C. A. et al. Plant architecture and productivity of soybean affected by plant growth retardants. *Bioscience Journal*, v. 29, n. 3, p. 634-643, 2013.

Wang, J. et al. Effects of different levels of nitrogen and potassium on production trait of Qingyin No.1 oat. *Pratacultural Science*, v.1, p.1243-1251, 2009.