

MODELO AGROMETEOROLÓGICO DE PREDIÇÃO DO RENDIMENTO DO GIRASSOL: II. AJUSTE E VALIDAÇÃO DO MODELO

NÍDIO ANTONIO BARNI², MOACIR ANTONIO BERLATO³, HOMERO BERGAMASCHI¹, JOÃO RIBOLDI⁴

RESUMO - O rendimento máximo (Y_m') do girassol obtido com base na temperatura efetiva e na radiação solar fotossinteticamente ativa, absorvida, acumulada (PAR_{aa}) e aquele fundamentado no maior rendimento do girassol (Y_m) verificado em 53 ambientes do Estado do Rio Grande do Sul, foram penalizados em função do consumo relativo de água ou índice de seca específico da cultura (CSDI), conforme o modelo multiplicativo de Jensen. Os resultados mostram que o modelo ajustado e validado, com base no consumo relativo de água no subperíodo reprodutivo, explica cerca de 80 % da variação do rendimento do girassol no Rio Grande do Sul. O modelo apresentou bom desempenho na predição do rendimento ($r = 0,926$; $b = 0,993$). O rendimento de grãos de girassol pode ser predito com antecedência de, aproximadamente, 4 semanas da colheita, através do modelo multiplicativo no qual o Y_m seja o rendimento máximo estimado em função da PAR_{aa} (Y_m').

Palavras-chave: Modelo preditivo, rendimento de grãos, disponibilidade hídrica.

AGROMETEOROLOGICAL SUNFLOWER YIELD PREDICTION MODEL: II. MODEL ADJUST AND VALIDATION

ABSTRACT - The maximum yield (Y_m') of sunflower obtained on basis of effective temperature and on the photosynthetically active solar radiation absorbed accumulated (PAR_{aa}) and that based on the highest sunflower yield reached in 53 environments of the State of Rio Grande do Sul, were penalized in function of the relative water consumption or crop specific dryness index (CSDI), according to the Jensen multiplicative model. The results show that the adjusted and validated model, based on the relative water consumption in the reproductive subperiod, explain about 80 % of the variation in the sunflower yield in Rio Grande do Sul. The model showed good performance in the yield prediction ($r = 0.926$; $b = 0.993$). The sunflower grain yield may be predicted with four weeks before the harvest time, using the multiplicative model in which the Y_m be the maximum yield estimated in function of the PAR_{aa} (Y_m').

Key words: Prediction model, grain yield, water availability.

INTRODUÇÃO

A tentativa de elaboração de um modelo matemático de predição do rendimento de uma cultura oferece, segundo THORNLEY (1976), uma série de vantagens pois: (i) um modelo resume, convenientemente, grande quantidade de informações; (ii) a modelagem estimula novas idéias e novas linhas de investigação científica; (iii) a elaboração de um modelo ajuda a detectar áreas onde o conhecimento é limitado; (iv) modelos permitem interpolações e previsões; (v) informações sobre diferentes processos fisiológicos podem ser reunidas em um único modelo para se ter idéia da cultura como um todo; (vi) a base matemática para as hipóteses adotadas permite compreender, quantitativamente, a natureza das interações ambiente-planta.

Inúmeros estudos têm sido realizados com o objetivo de quantificar os efeitos do ambiente sobre o crescimento, desenvolvimento e rendimento de culturas. Para esses estudos e em modelagem dos efeitos sobre

culturas, as três variáveis mais importantes do ambiente, que devem ser consideradas no sentido de saber como elas podem limitar o crescimento e o desenvolvimento, são luz (ou radiação solar), umidade do solo e temperatura do ar (COELHO e DALE, 1980).

BAIER (1979) classificou os modelos de relações quantitativas, entre variáveis meteorológicas e rendimento de plantas cultivadas em três categorias: (i) modelo estatístico empírico; (ii) modelo de análise planta-clima; e (iii) modelo de simulação do crescimento da planta.

Modelos estatísticos de regressão múltipla, tais como, o de THOMPSON (1969), têm feito uso de médias mensais de temperatura e da precipitação total para prever o rendimento de plantas cultivadas.

Modelos intermediários, entre aproximações fisiológicas e de regressão múltipla, também têm sido desenvolvidos. BAIER (1973) analisou a contribuição diária das variáveis do ambiente e do solo para o rendimento final do trigo.

1. Extraído da Tese de Doutorado apresentada pelo primeiro autor à Faculdade de Agronomia da UFRGS, junho de 1994.

2. Eng. Agr., Dr.- FEPAGRO, Rua Gonçalves Dias 570, 90130-060 Porto Alegre-RS/BRASIL. Bolsista do CNPq.

3. Eng. Agr., Dr.- Faculdade de Agronomia da UFRGS, Av. Bento Gonçalves 7712, 90001- 970 Porto Alegre- RS/BRASIL. Bolsista do CNPq.

4. Eng. Agr., Dr.- Professor do Instituto de Matemática da UFRGS.

Recebido para publicação em 19/10/1995.

JENSEN (1968) estabeleceu um modelo multiplicativo, que relaciona o rendimento relativo de grãos com índices hídricos em distintos subperíodos do desenvolvimento da cultura.

Estas distintas tentativas e possibilidades mostram, como resultado das últimas décadas de pesquisa na exploração dos limites da produtividade, que a ciência descritiva busca acompanhar-se, cada vez mais, da ciência quantitativa, determinando, como consequência, aumento da capacidade de gerência dos sistemas (WITTEWER, 1980).

Os objetivos do presente estudo foram os seguintes:

- Quantificar o efeito de estresse hídrico em penalizar o rendimento máximo (Y_m) do girassol.
- Testar o modelo multiplicativo na predição do rendimento do girassol.

MATERIAL E MÉTODOS

O rendimento máximo (Y_m) de grãos de girassol foi penalizado em função do consumo relativo de água, de acordo com o modelo de JENSEN (1968), onde foi substituída a evapotranspiração máxima (ET_m) pela evapotranspiração potencial ou de referência do

girassol (ET_0), calculada pelo método combinado de PENMAN (1956) modificado, conforme BERLATO (1987). O modelo é dado por:

$$Y/Y_m = \prod_{i=1}^n (ET_r/ET_0)_i^{\lambda_i} \quad (2.1)$$

onde Y/Y_m é o rendimento relativo de grãos (Y_m é o rendimento máximo obtido em condições de não limitação hídrica), ET_r/ET_0 (evapotranspiração real/evapotranspiração de referência) é a evapotranspiração relativa em um dado subperíodo do desenvolvimento da planta, λ_i representa a sensibilidade relativa da planta ao déficit hídrico durante o período de desenvolvimento i . Os índices de $i, 1 \dots 4$ representam os subperíodos de desenvolvimento fenológico em que foi dividido o ciclo do girassol, conforme BARNI (1994).

Quando a disponibilidade de água para a cultura é igual à sua demanda, ET_r será igual a ET_0 e Y_m não será reduzido. Entretanto, quando a demanda de água, pela cultura, for maior do que a disponibilidade de água, ET_r será menor do que ET_0 e Y será menor do que Y_m .

Foram ajustadas cinco variantes do modelo (2.1), dadas por:

$$(Y/Y_m) = (ET_r/ET_0)_1^{\lambda_1} \times (ET_r/ET_0)_2^{\lambda_2} \times (ET_r/ET_0)_3^{\lambda_3} \times (ET_r/ET_0)_4^{\lambda_4} \quad (2.2)$$

$$(Y/Y_m) = (ET_r/ET_0)_2^{\lambda_2} \times (ET_r/ET_0)_3^{\lambda_3} \times (ET_r/ET_0)_4^{\lambda_4} \quad (2.3)$$

$$(Y/Y_m) = (ET_r/ET_0)_3^{\lambda_3} \times (ET_r/ET_0)_4^{\lambda_4} \quad (2.4)$$

$$(Y/Y_m) = (ET_r/ET_0)_2^{\lambda_2} \times (ET_r/ET_0)_3^{\lambda_3} \quad (2.5)$$

$$(Y/Y_m) = (ET_r/ET_0)_3^{\lambda_3} \quad (2.6)$$

O rendimento máximo (Y_m'), gerado através do modelo que utiliza a radiação e a temperatura como variáveis preditoras (BARNI, 1994; BARNI et al., 1995), foi utilizado para estabelecer a relação com os rendimentos observados (Y) em 53 ambientes do Estado do Rio Grande do Sul. Também foi adotado um Y_m para as cultivares semitardias e tardias. Estes rendimentos máximos (Y_m) representam a média de rendimento de grãos das cultivares dos referidos grupos de maturação em determinado ambiente, conforme descrito em BARNI et al. (1995).

Os parâmetros λ_i foram estimados usando as regressões múltiplas das transformações logarítmicas de (2.2), (2.3), (2.4), (2.5) e (2.6), conforme SCHLOTZHAUER e LITTELL (1987), baseado no método dos quadrados mínimos, passando pela origem, isto é, sem intercepto.

O ajuste do modelo penalizador do rendimento máximo (Y_m) do girassol utilizou dados da cultura, dados meteorológicos, dados do solo e definição de subperíodos de desenvolvimento do girassol, conforme referido em BARNI et al., (1996), na primeira parte deste estudo.

Do conjunto total de dados experimentais de rendimento e fenologia do girassol (51 ambientes para cultivares precoces e médias e 53 para as cultivares semitardias e tardias) foi sorteado, aleatoriamente, um subconjunto de cerca de 33 % do total, destinado à validação do modelo (17 ambientes). Os demais 67 % dos dados (34 ambientes para as cultivares precoces e médias e 36 ambientes para as semitardias e tardias) foram utilizados no ajuste do modelo, conforme BARNI et al. (1996).

Os dados foram submetidos a análises estatísticas, conforme referido anteriormente. As análises de variância foram realizadas pelo método dos mínimos quadrados e testadas pelo teste-F. O Teste de Duncan testou as diferenças entre as médias. Das análises de regressão realizadas, foram obtidos os coeficientes de determinação (r^2) do modelo que melhor se ajustou em cada relação. Na penalização do rendimento máximo, foram obtidos os valores e a significância estatística de cada parâmetro componente de cada uma das formulações do modelo. Foram também obtidas as estatísticas de aferição das formulações do modelo que apresentaram significância ao nível de 1% (relação entre o rendimento relativo de grãos observado versus o rendimento

relativo calculado pelas distintas formulações do modelo), tais como, coeficiente de correlação (r), erro padrão da estimativa (EPE) de cada coeficiente, coeficiente de regressão (b) e valor e significância do teste-F do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do ajuste são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3. Nestas tabelas constam os termos que compõem o modelo, seus respectivos parâmetros acompanhados do erro padrão da estimativa (EPE), do nível de significância e do coeficiente de determinação.

As estatísticas da relação, entre o rendimento de grãos observado e o calculado pelo modelo multiplicativo ajustado, constam na Tabela 4. Nesta tabela encontram-se parâmetros que apresentaram ajuste significativo ao nível de 1%, os coeficientes de regressão, o erro padrão da estimativa desses coeficientes e o coeficiente de correlação.

Na Tabela 1, são apresentados os parâmetros para o modelo multiplicativo completo (4 termos) e os reduzidos com um, dois e três termos. Estes parâmetros foram gerados a partir dos rendimentos e dos índices

TABELA 1 - Valores dos parâmetros do modelo multiplicativo para a estimativa do rendimento de grãos do girassol, no Rio Grande do Sul (Cultivares Precoces, Médias, Semitardias e Tardias)

TERMOS DO MODELO				PARÂMETROS				F-teste
X1+	X2	X3	X4	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	R^2
Média entre grupos de maturação: (1)								
		(ETr/ETo)3++		-	-	1,1561 **	-	163 **
		EPE+++				0,04		0,762
	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3	-		-0,1339 NS	1,2109 **	-	85 **
		EPE			0,07	0,05		0,773
		(ETr/ETo)3	(ETr/ETo)4	-	-	1,2495 **	-0,0722 NS	85 **
			EPE	0,07	0,05	0,772		
	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3	(ETr/ETo)4	-	-0,1291 NS	1,325 **	-0,0826 NS	60 **
		EPE		0,07	0,08	0,05	0,787	
	(ETr/ETo)1	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3	(ETr/ETo)4	0,0446 NS	-0,1575 *	1,318 **	-0,0825 NS45 **
		EPE			0,05	0,08	0,08	0,05
								0,791

+ X1= subperíodo de estabelecimento da cultura (Semeadura ate 20 dias após a emergência das plantas);
 X2= subperíodo vegetativo (20 dias após a emergência à diferenciação do primórdio floral (R1));
 X3= subperíodo reprodutivo (Diferenciação do primórdio floral (R1), ao final da antese (R6));
 X4= subperíodo da maturação (Final da antese (R6), à maturação fisiológica (R9)).
 ++ (ETr/ETo) = índice hídrico. (Evapotranspiração real / Evapotranspiração de referência).
 +++ EPE = Erro padrão da estimativa; * Significativo a 5 %; ** Significativo a 1 %; NS Não Significativo.
 (1) Rendimento máximo (Ym') = 3.069 kg/ha, n = 53.

TABELA 2 - Valores dos parâmetros do modelo multiplicativo para a estimativa do rendimento de grãos do girassol, no Rio Grande do Sul. Cultivares Precoces, Médias, Semitardias e Tardias)

TERMOS DO MODELO				PARÂMETROS				F-teste
X1+	X2	X3	X4	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	R ²
Média entre grupos de maturação: (1)								
		(ETr/ETo)3++ EPE+++		-	-	1,024 ** 0,03	-	229 ** 0,818
(ETr/ETo)2		(ETr/ETo)3 EPE		-	-0,1337 * 0,06	1,089 ** 0,04	-	125 ** 0,834
		(ETr/ETo)3 EPE	(ETr/ETo)4	-	-	1,1469 ** 0,06	-0,0944 * 0,04	127 ** 0,836
(ETr/ETo)2		(ETr/ETo)3 EPE	(ETr/ETo)4	-	-0,1532 ** 0,06	1,2367 ** 0,07	0,1067 ** 0,04	97 ** 0,857
(ETr/ETo)1	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3 EPE	(ETr/ETo)4	0,0135NS 0,05	-0,1607 * 0,06	1,2334 ** 0,07	-0,1072 ** 0,04	71 ** 0,857
Grupos de maturação em separado: (2)								
		(ETr/ETo)3 EPE		-	-	1,209 ** 0,03	-	234 ** 0,602
(ETr/ETo)2		(ETr/ETo)3 EPE		-	-	1,2062 ** 0,01	0,0018 NS 0,04	128 ** 0,602
		(ETr/ETo)3 EPE	(ETr/ETo)4	-	-0,0694 NS	1,242 ** 0,07	- 0,05	131 ** 0,606
(ETr/ETo)2		(ETr/ETo)3 EPE	(ETr/ETo)4	-	-0,0696 NS 0,07	1,2437 ** 0,07	-0,0014 NS 0,04	92 ** 0,606
(ETr/ETo)1	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3 EPE	(ETr/ETo)4	0,1354 * 0,06	-0,1382 NS 0,07	1,2112 ** 0,07	-0,0086 NS 0,03	67 ** 0,626

+ X1= subperíodo de estabelecimento da cultura (Semeadura até 20 dias após a emergência das plantas);

X2= subperíodo vegetativo (20 dias após a emergência a diferenciação do primórdio floral (R1));

X3= subperíodo reprodutivo (Diferenciação do primórdio floral (R1), ao final da antese (R6));

X4= subperíodo da maturação (Final da antese (R6), até a maturação fisiológica (R9)).

++ (ETr/ETo) = índice hídrico. (Evapotranspiração real / Evapotranspiração de referência).

+++ EPE = Erro padrão da estimativa; * Significativo a 5 %; ** Significativo a 1 %; NS Não Significativo.

(1) Ym = 2.878 kg/ha, n = 53. (2) Ym = 3.193 kg/ha, n = 104.

TABELA 3 - Valores dos parâmetros do modelo multiplicativo para a estimativa do rendimento de grãos do girassol, por grupo de maturação das cultivares, no Rio Grande do Sul. (Cultivares Precoces e Médias; Semitardias e Tardias)

TERMOS DO MODELO				PARÂMETROS				F-teste
X1+	X2	X3	X4	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	R ²
Cultivares Precoces e Médias: (1)								
		(ETr/ETo)3++ EPE+++		-	-	0,9852 ** 0,04	-	145 ** 0,819
	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3 EPE		-	-0,2042 *	1,071 ** 0,08	- 0,05	89 ** 0,852
		(ETr/ETo)3 EPE	(ETr/ETo)4	-	-	1,1602 ** 0,08	-0,1233 * 0,05	86 ** 0,847
EPE	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3	(ETr/ETo)4	-	-0,2238 ** 0,07	1,2726 ** 0,08	-0,1367 * 0,04	78 ** 0,887
(ETr/ETo)1	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3 EPE	(ETr/ETo)4	0,0173 NS 0,06	-0,2348 ** 0,08	1,2735 ** 0,08	-0,1409 * 0,047	57 ** 0,887
Cultivares Semitardias e Tardias: (2)								
		(ETr/ETo)3 EPE		-	-	1,0699 ** 0,04	-	186 ** 0,846
	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3 EPE		-	0,0904 NS 0,08	1,1102 ** 0,05	-	94 ** 0,851
		(ETr/ETo)3 EPE	(ETr/ETo)4	-	- 0,06	1,1611 ** 0,04	-0,0759 NS	102 ** 0,861
	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3 EPE	(ETr/ETo)4	-	-0,1098 NS 0,08	1,2174 ** 0,07	0,0821 NS 0,039	71 ** 0,869
(ETr/ETo)1	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3 EPE	(ETr/ETo)4	0,1091 NS 0,07	-0,1886 NS 0,09	1,1989 ** 0,07	-0,0807 * 0,04	56 ** 0,878

+ X1= subperíodo de estabelecimento da cultura (Semeadura a 20 dias após a emergência das plantas);
 X2= subperíodo vegetativo (20 dias após a emergência a diferenciação do primórdio floral (R1));
 X3= subperíodo reprodutivo (Diferenciação do primórdio floral (R1), ao final da antese (R6));
 X4= subperíodo da maturação (Final da antese (R6), à maturação fisiológica (R9)).
 ++ (ETr/ETo) = índice hídrico. (Evapotranspiração real/Evapotranspiração de referência).
 +++ EPE=Erro padrão da estimativa; * Significativo a 5 %; ** Significativo a 1 %; NS Não Significativo.
 (1) n = 34. (2) n = 36.

TABELA 4 - Análise estatística da relação entre o rendimento de grãos observado e o calculado pela função ajustada do modelo multiplicativo, para o girassol, no Estado do Rio Grande do Sul-RS

Localidades e Cultivares	TERMOS DO MODELO				E S T A T Í S T I C A S			
	X1	X2	X3	X4	r +	EPE +	b +	F-teste
RS (n=53) (1) Prec. e Médias			(ETr/ETo)3++		0,897	0,01	0,956 **	175 **
Semi e Tardias	(ETr/ETo)1	ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3	(ETr/ETo)4	0,928	0,01	0,955 **	241 **
RS (n=53) (2) Prec. e Médias			(ETr/ETo)3++		0,896	0,01	0,986 **	217 **
Semi e Tardias	(ETr/ETo)1	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3	(ETr/ETo)4	0,926	0,01	0,977 **	306 **
RS (n=34) (3) Precoces e Médias			(ETr/ETo)3		0,884	0,02	0,986 **	113 **
	(ETr/ETo)1	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3	(ETr/ETo)4	0,923	0,01	0,977 **	257 **
RS (n=36) (4) Semitardias e Tardias			(ETr/ETo)3		0,921	0,02	0,981 **	163 **
	(ETr/ETo)1	(ETr/ETo)2	(ETr/ETo)3	(ETr/ETo)4	0,937	0,01	0,976 **	243 **

+ r = coeficiente de correlação; EPE = Erro Padrão da Estimativa de b;

b = Coeficiente de regressão entre o rendimento observado e o estimado pelo modelo ajustado.

++ (ETr/ETo) = índice hídrico. (Evapotranspiração real / Evapotranspiração de referência).

(1) Parametrizado com rendimento máximo (Ym') de 3.069 kg/ha.

(2) Parametrizado com rendimento máximo (Ym) de 2.878 kg/ha.

(3) Parametrizado com rendimento máximo (Ym) de 2.606 kg/ha.

(4) Parametrizado com rendimento máximo (Ym) de 3.193 kg/ha.

hídricos médios, por ambiente, e com o rendimento máximo (Ym') de 3.069 kg/ha, para os 53 ambientes (n = 53). Da mesma forma, na parte superior da Tabela 2, estão os parâmetros gerados a partir da média dos rendimentos e dos índices hídricos, por ambiente, com o rendimento relativo (Y/Ym) calculado com base no Ym de 2.878 kg/ha (maior valor na média de cultivares por ambiente, n = 53). Em razão da pequena variação fenológica e dos rendimentos médios de grãos, as cultivares foram reunidas em dois grupos. O primeiro deles reúne cultivares precoces e médias que, passam a ser chamadas apenas de precoces e o segundo grupo reúne as cultivares semitardias e tardias que passam a denominar-se, simplesmente, de tardias.

Verifica-se (Tabela 1) que o modelo completo (X1-X4), para a média das cultivares e dos índices hídricos, apresentou significância estatística ao nível de 1 % e explicou 79,1 % da variação do rendimento de grãos de todas as cultivares de girassol, nos 53 ambientes avaliados. Por outro lado, na parte superior da Tabela 2, o modelo completo explicou 85,7 % da variação do rendimento de grãos. Isto mostra que a utilização do Ym de 2.878 kg/ha, mais representativo dos ambientes avaliados, explicou uma parcela

maior (6,6 %) da variação do rendimento de grãos, por efeito do fator umidade. Os modelos que utilizam-se de três termos aproximaram-se do desempenho do modelo completo (Tabelas 1 e 2) uma vez que esses modelos contemplam os três subperíodos mais sensíveis quanto à disponibilidade hídrica (BARNI et al., 1996). Os modelos com dois termos (X2-X3 e X3-X4) apresentaram um comportamento intermediário, entre os modelos com três e quatro termos e o modelo reduzido de apenas um termo (X3). É importante destacar que o modelo reduzido (X3) explicou 76,2 e 81,8% da variação do rendimento de grãos de girassol de todos os ambientes estudados, confirmando tratar-se do subperíodo de maior sensibilidade ao fator água, na definição do rendimento desta cultura, no Rio Grande do Sul (BARNI et al., 1996). Para as cinco formulações do modelo, o parâmetro λ_3 apresentou valores elevados, comparativamente aos demais ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_4$), mostrando tratar-se do período de maior contribuição na definição do rendimento de grãos do girassol. Estes resultados são consistentes como o reportado por DOOREMBOS e KASSAM (1979), que se referem a um consumo de 55% do total da água consumida pelo girassol, durante este período.

Na Figura 1, estão representados os comportamentos do modelo completo e reduzido com o Y_m' de 3.069 kg/ha. Verifica-se, na aferição do modelo completo (Figura 1-b e Tabela 4), que o mesmo superestima em 4,5 % o rendimento observado, enquan-

to que o modelo reduzido (X3) superestima em 4,4 % o rendimento observado, com correlações de 0,928 e 0,897, respectivamente, entre os rendimentos observados e estimados pelos modelos.

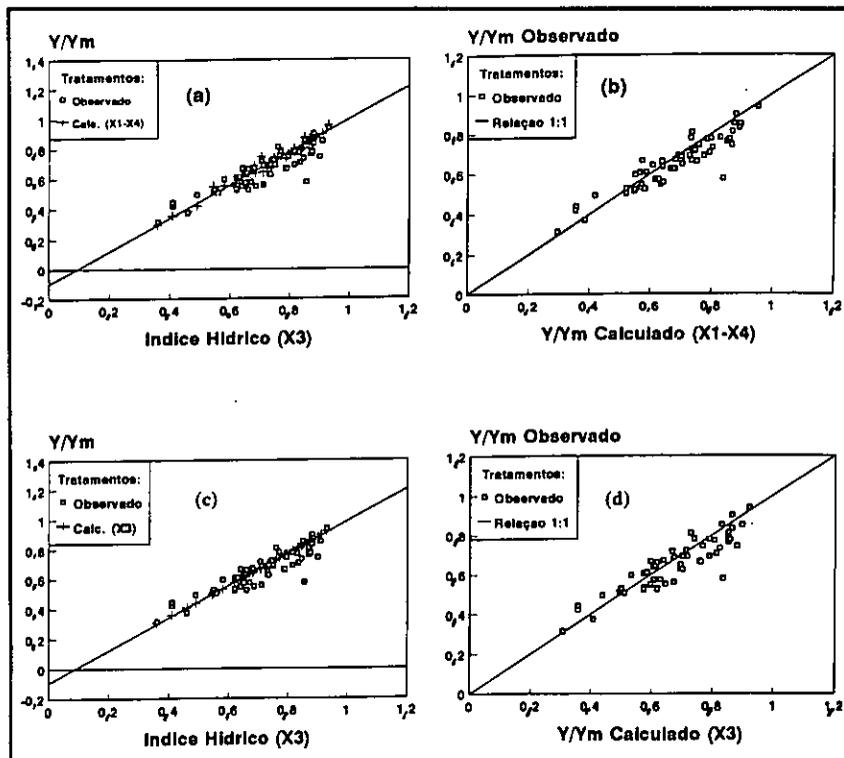


FIGURA 1- Rendimento relativo de grãos de girassol (Y/Y_m) calculado pelo modelo multiplicativo ajustado na formulação completa X1-X4 (a), e reduzida, X3 (c), como função do índice hídrico (E_{Tr}/E_{To}) no período X3 e suas respectivas relações com o rendimento de grãos observado (b, X1-X4; d, X3), na média de cultivares por ambiente (precoces e tardias), e na média de cada índice hídrico (X1,X2,X3,X4), entre cultivares por ambiente, para 53 ambientes do RS. (Y_m é o rendimento calculado de 3.069 kg/ha (Y_m'), na média de cultivares, Taquari 1991/92 e 1992/93)

Os resultados da parte inferior da Tabela 2 também mostram a dependência do rendimento de grãos do girassol às condições hídricas no período reprodutivo (X3). Entretanto, neste caso, os coeficientes de determinação das cinco formulações do modelo variaram de 0,626 (X1-X4) a 0,602 (X3), explicando apenas 62,6 % da variação do rendimento de grãos com o modelo completo. Este fato demonstra, com clareza, o efeito do Y_m em modificar as relações de dependência entre os índices hídricos (E_{Tr}/E_{To}) e o rendimento de grãos. As cultivares preco-

ces apresentaram um Y_m de 2.606 kg/ha, no conjunto de todos os ambientes avaliados, enquanto que as tardias alcançaram 3.193 kg/ha, representando uma diferença de 587 kg/ha, ou cerca de 22,5 % a mais em relação ao Y_m do grupo das cultivares precoces. Isto determinou uma acentuada dispersão de pontos na plotagem dos rendimentos relativos contra os índices hídricos do período reprodutivo (X3), o de maior dependência do rendimento, conforme demonstrado acima. Este comportamento diferenciado está ilustrado nas Figuras 2 e 3.

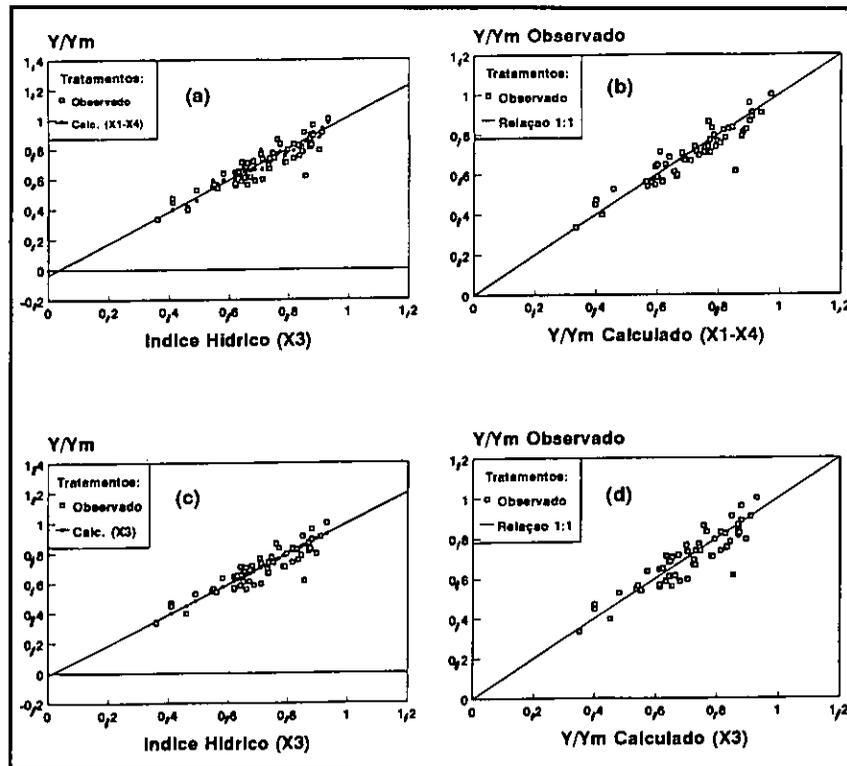


FIGURA 2 -Rendimento relativo de grãos de girassol (Y/Y_m) calculado pelo modelo multiplicativo ajustado na formulação completa X1-X4 (a), e reduzida, X3 (c), como função do índice hídrico (E_{Tr}/E_{To}) no período X3 e suas respectivas relações com o rendimento de grãos observado (b, X1-X4; d, X3), na média de cultivares por ambiente (precoce e tardias), e na média de cada índice hídrico (X1,X2,X3,X4), entre cultivares por ambiente, para 53 ambientes do RS. (Y_m é o rendimento máximo entre os 53 ambientes, na média de cultivares, $n=53$)

O coeficiente angular de regressão ($b = 0,986$) evidencia que o modelo ajustado, com base na formulação reduzida (X3), superestima em 1,4 % o rendimento observado (Tabela 4). Este valor, de apenas 1,4 %, mostra que o Y_m de 2.878 kg/ha ajustou melhor o modelo, obtendo uma sintonia mais fina do que o Y_m' de 3.069 kg/ha, ilustrado na Figura 1. Já a formulação completa (X1-X4) superestima em 2,3 %, embora seu coeficiente de correlação tenha alcançado o valor de 0,926. O ideal, nesta análise, seria que a relação entre os valores observados e os estimados pelo modelo ajustado se aproximasse de 1 ($b = 1$), o erro padrão da estimativa (EPE) desse coeficiente fosse o menor possível e o coeficiente de correlação elevado. Este fato evidencia que o Y_m expressa o nível de adaptação do genótipo, ou grupo de genótipos de mesma carga genética, ao ambiente. Por isso, as modificações no ambiente, provocadas por variações tecnológicas (adubação, irrigação, e outras) modificam o potencial deste ambiente da mesma forma que os genótipos podem ser modificados, ampliando sua capacidade ou eficiência de adaptação ao ambiente

(FINLAY e WILKINSON, 1963; EBERHART e RUSSEL, 1966; LIN et al., 1986; VERNETTI et al., 1990).

Portanto, a relação entre o índice hídrico e o rendimento de grãos é válida em qualquer situação, desde que os genótipos avaliados apresentem a mesma eficiência de uso da água. Quando a eficiência de uso da água for modificada, intrinsecamente pela mudança no genótipo, ou extrinsecamente pelo manejo cultural, a associação da relação diminui e a estimativa produzida pelo modelo perde acuracidade (Figura 3). Da análise dos resultados apresentados na Tabela 2, fica claro que a predição do rendimento do girassol, com base nos índices hídricos, é válida, quando, tanto os rendimentos de grãos, quanto os índices hídricos forem os valores médios entre grupos de maturação. Dentro do mesmo grupo de maturação, o modelo perde qualidade, quando a eficiência de uso da água for modificada pelo manejo da cultura ou por mudança de genótipos. Também neste caso, a análise conjunta deve fundamentar-se na média dos rendimentos entre os locais e na média dos

índices hídricos, em cada subperíodo, entre os locais. O rendimento relativo será estabelecido tendo por base o rendimento máximo (Y_m), obtido na média entre os dois locais.

Na Tabela 3, são apresentadas as estimativas dos parâmetros, do modelo multiplicativo de Jensen, para as cultivares precoces e tardias, em separado.

Na parte superior da Tabela 3, verifica-se que o modelo completo ($X1-X4$) explicou cerca de 88,7 % da variação do rendimento das cultivares precoces e que o modelo reduzido ($X3$) explicou 81,9 %, para as mesmas cultivares. Entretanto, as cultivares precoces estenderam sua dependência para o subperíodo vegetativo ($X2$) e, com menor intensidade, para o subperíodo da

maturação ($X4$), onde os parâmetros das diferentes formulações do modelo apresentaram significância estatística ao nível de 1 % e 5 %, respectivamente.

Para as cultivares tardias (Tabela 3) a dependência do rendimento de grãos concentrou-se, quase que exclusivamente, no subperíodo reprodutivo ($X3$). Apenas no modelo completo ($X1-X4$) o parâmetro λ_4 alcançou significância ao nível de 5 %. Comparativamente com as cultivares precoces, o modelo para as tardias explica um percentual menor da variação do rendimento de grãos, em função do consumo relativo de água expresso pelo índice ET_r/ET_o . As ilustrações desta relação de dependência encontram-se na Figura 4 e as estatísticas deste ajuste estão registradas na Tabela 4.

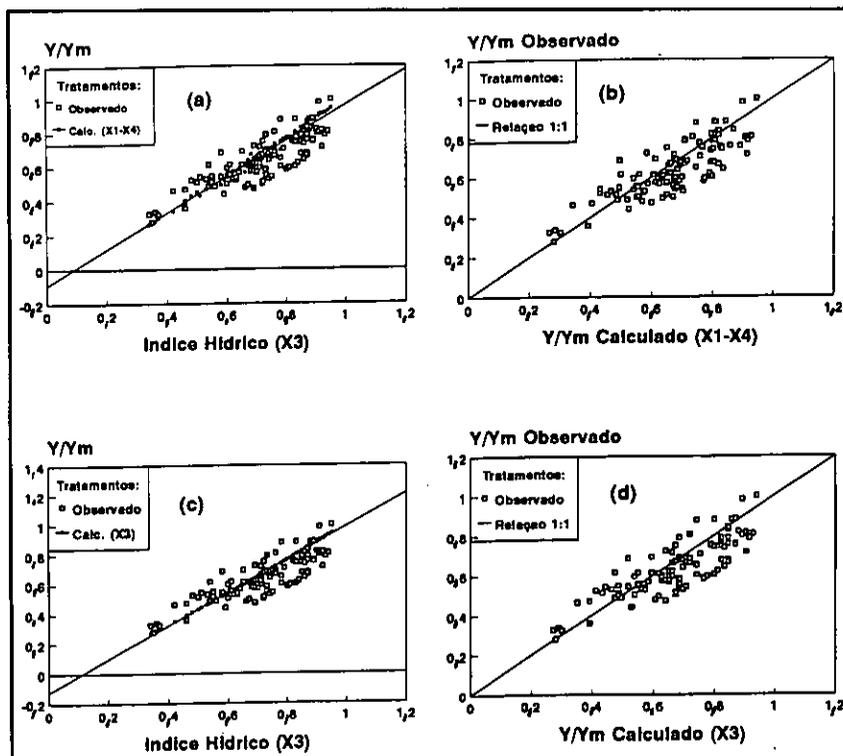


FIGURA 3 - Rendimento relativo de grãos de girassol (Y/Y_m) calculado pelo modelo multiplicativo ajustado na formulação completa, $X1-X4$ (a) e reduzida, $X3$ (c), como função do índice hídrico (ET_r/ET_o) no período $X3$ e suas respectivas relações com o rendimento de grãos observado (b, $X1-X4$; d, $X3$). Cultivares (precoces e tardias) e índices hídricos ($X1, X2, X3$, e $X4$) para 51 e 53 ambientes do RS. (Y_m , é o rendimento máximo das cultivares tardias, $n = 104$)

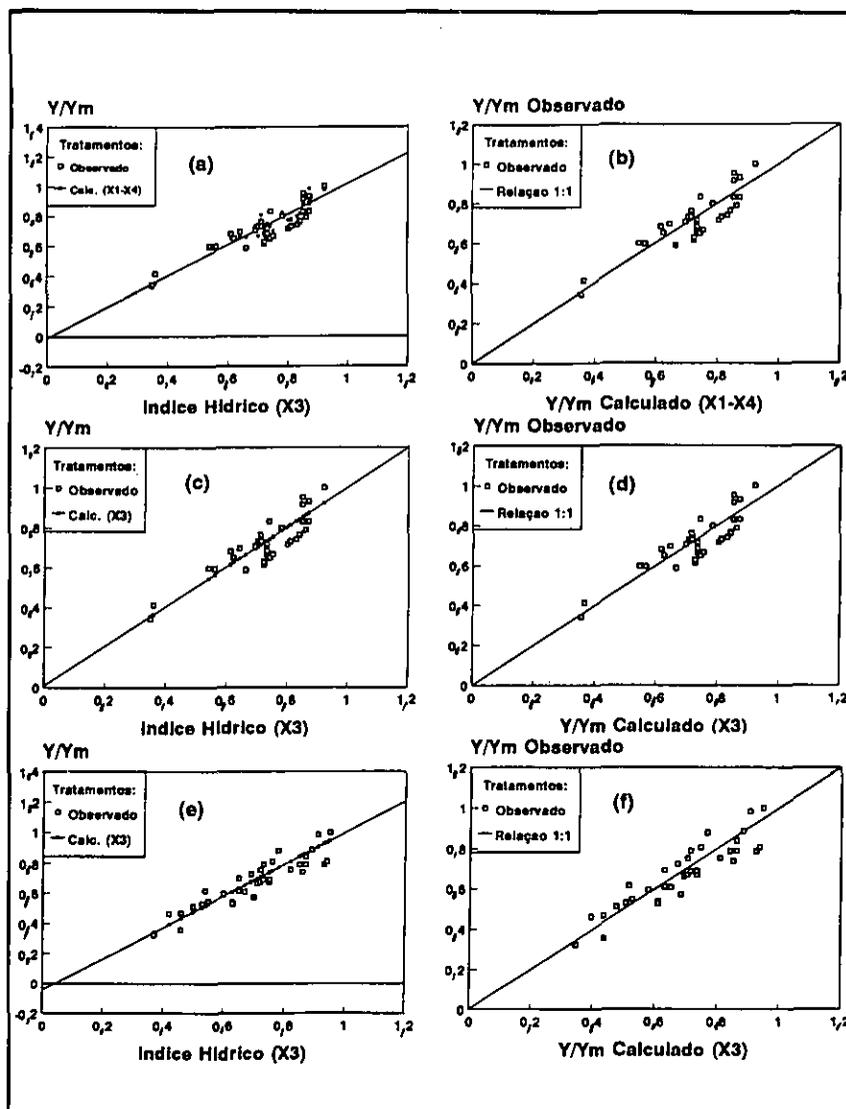


FIGURA 4 -Rendimento relativo de grãos de girassol (Y/Ym) calculado pelo modelo multiplicativo ajustado na formulação completa X1-X4 (a) e reduzida X3 (c) para as cultivares precoces; e X3 (e) para as tardias, como função do índice hídrico (ETr/ETo) no período X3 e suas respectivas relações com o rendimento de grãos observado (b, X1-X4; d, X3; precoces) e (f, X3; tardias). Índices hídricos (X1,X2,X3,X4) para 34 e 36 ambientes do RS. (Ym é independente por grupo de maturação)

Estes resultados mostram que as cultivares precoces apresentam maior sensibilidade ao fator água, concordando com informações obtidas por SANGOI (1985). Por sua vez, BERLATO (1987), ao estudar a cultura da soja, e MATZENAUER (1994), ao estudar a do milho, relataram serem as cultivares precoces as mais sensíveis às variações de disponibilidade hídrica. As cultivares precoces respondem favoravelmente aos bons ambientes, elevando os rendimentos, e são penalizadas, de forma marcante, nos ambientes de menores disponibilidades. As cultivares tardias apresentaram tendência de maior estabilidade, não

oscilando tanto, entre ambientes favoráveis e limitados, semelhante ao constatado por SANGOI (1985). Entretanto, a análise individual dos resultados obtidos em distintas regiões do Estado poderá retirar parte da sustentação desta afirmação.

A Figura 5 apresenta o resultado do teste do modelo com uma série de dados independentes daqueles utilizados para o seu ajuste. Esta Figura ilustra a validação do modelo geral para o Estado, com cultivares precoces e tardias. O desempenho do modelo, indicado pelos coeficientes de correlação ($r = 0,922$; $r = 0,935$; $r = 0,882$; $r = 0,917$), é promissor.

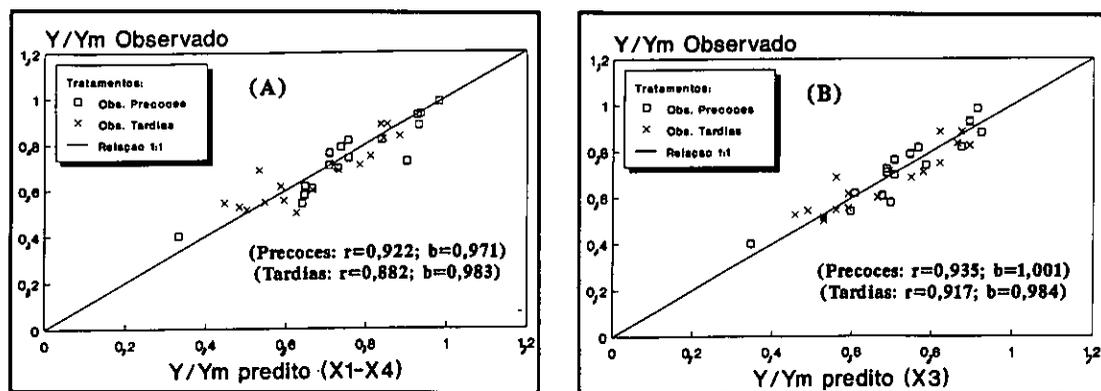


FIGURA 5 -Rendimento relativo de grãos de girassol observado no Rio Grande do Sul e predito pelo modelo multiplicativo: (A) modelo multiplicativo com quatro termos; (B) modelo multiplicativo com um termo.

O modelo reduzido de apenas um termo apresentou desempenho superior ao modelo completo. Este fato confirma resultados obtidos por MATZENAUER (1994) com a cultura do milho e reforça a afirmativa de BERLATO (1987) de que o caminho para melhorar o desempenho desses modelos não é, necessariamente, o aumento de variáveis predictoras, mas sim a inclusão da variável ou das variáveis que, numa determinada região, respondam pela maior parcela da variação dos rendimentos da espécie cultivada, assim como o conhecimento dos períodos fenológicos da planta em que essa dependência é máxima (subperíodos críticos).

Os resultados mostram valores de lambda pequenos ou próximos a zero no estabelecimento da cultura, nos subperíodos vegetativo e de maturação. Isso determina que não ocorra diferença significativa do poder preditivo, entre o modelo que utiliza quatro termos e o de somente um termo. O modelo de apenas um termo (subperíodo reprodutivo), além de sua simplicidade e facilidade de cálculo, tem a vantagem de antecipar, em cerca de 4 semanas, a informação sobre o rendimento da cultura, constituindo-se numa ferramenta importante de previsão de safras.

A Tabela 5 apresenta os rendimentos de grãos de girassol observados e preditos pelo modelo multiplicativo com quatro e um termos, assim como os desvios em kg/ha e em percentagem. Os desvios extremos variaram de zero a 25 %, sendo os desvios médios, no modelo completo, de 7,3 % e 8,5 % para as cultivares precoces e tardias, respectivamente. Por sua vez, o modelo reduzido apresentou desvios médios de 6,8 % e 7,6 % para as cultivares precoces e tardias, além de menores desvios extremos. Estes dados evidenciam que o modelo reduzido apresentou maior acuracidade preditiva.

Merece apreciação o fato de que o modelo para o girassol foi ajustado com um conjunto de dados relativamente pequeno (34 ambientes para as precoces e 36

para as tardias) e validado com resultados de 17 ambientes para os dois grupos de maturação de cultivares. É facilmente compreensível que um conjunto maior de dados, com amostragem mais ampla, traria, como consequência, um ajuste mais fino decorrente da maior sensibilidade do modelo, onde o poder preditivo seria aumentado e os desvios de predição minorados. Entretanto, é importante lembrar que na estimativa dos parâmetros do modelo foram utilizados dados obtidos em nove localidades, de cinco regiões climáticas do Estado, com grande variabilidade de solos e das normais dos elementos meteorológicos. Provavelmente, o poder preditivo do modelo ajustado, por região, seja mais acurado, como ficou evidente na aferição do modelo para a região de Santo Augusto (BARNI, 1994). Mas, a validação do modelo, por região, não foi possível tendo em conta o número limitado de dados disponíveis.

Confirma-se para o girassol, o que BERLATO (1987) constatou para a cultura da soja, isto é, que o modelo multiplicativo de JENSEN (1968), adaptado, representa uma grande simplificação, em relação a outros modelos, em quatro aspectos fundamentais relacionados com a praticidade de sua aplicação: (i) uso da variável evapotranspiração real (E_{Tr}) e não a transpiração (T); (ii) utiliza a evapotranspiração potencial (E_{To}) e não a evapotranspiração máxima (E_{Tm}), sendo esta uma adaptação em relação ao modelo original; (iii) estima o saldo de radiação, principal variável no cálculo da evapotranspiração pelo método combinado (Penman), através de uma relação de regressão com a radiação solar global (R_s). A relação encontrada para o girassol foi $R_n = 0,98606R_s - 102,42$; (iv) estima a evapotranspiração real (E_{Tr}) a partir de um balanço hídrico do solo.

A limitação do modelo apontada por BERLATO (1987), se refere ao rendimento máximo (Y_m) o qual pode variar a longo prazo com a criação de cultivares

TABELA 5 - Valores do rendimento de grãos de girassol (kg/ha) observado no Rio Grande do Sul e predito pelo modelo multiplicativo completo(X1-X4) e reduzido (X3)

No*	PREDITOS				PELO MODELO			Data da Semeadura	Localidades
	OBSERVADO (X1-X4)	Desvio (X3)		Desvio	Desvio				
Amb.	(A)	(B)	(B-A)	(%)	(C)	(C-A)	(%)		
Cultivares Precoces e Médias:									
2	1409	1666	257	18	1550	141	10	07/08/85	Viamão
5	1507	1682	175	12	1808	301	20	20/08/86	Viamão
6	1926	1969	43	2	2040	114	6	21/08/86	Viamão
10	1813	1897	84	5	1834	21	1	17/08/88	Viamão
14	1883	2348	465	25	1782	-101	-5	22/09/89	Viamão
17	2423	2436	13	1	2323	-100	-4	04/09/89	Rio Pardo
19	1582	1730	148	9	1756	174	11	04/11/82	Sto. Augusto
23	1607	1683	76	5	1576	-31	-2	16/08/85	Sto. Augusto
24	1040	864	-176	-17	900	-140	-13	19/09/85	Sto. Augusto
27	2130	2183	53	3	2272	142	7	25/08/86	Sto. Augusto
29	2122	1964	-158	-7	1989	-133	-6	16/08/88	Sto. Augusto
33	2562	2558	-4	0	2375	-187	-7	16/08/89	Sto. Augusto
36	1983	1845	-138	-7	1834	-149	-8	30/08/89	Paim Filho
40	2405	2419	14	1	2323	-82	-3	15/10/91	Paim Filho
45	2290	2425	135	6	2400	110	5	12/09/84	Veranópolis
48	2047	1918	-129	-6	1937	-110	-5	25/09/91	Veranópolis
51	1841	1839	-2	0	1782	-59	-3	06/10/88	Guabiju
Cultivares Semitardias e Tardias:									
1	1739	1746	7	0	1783	44	3	22/08/84	Viamão
4	1595	1996	401	25	1684	89	6	26/09/85	Viamão
6	2814	2673	-141	-5	2785	-29	-1	21/08/86	Viamão
7	1639	1601	-38	-2	1684	45	3	02/10/86	Viamão
11	2284	2302	18	1	2213	-71	-3	07/10/88	Viamão
18	1732	1424	-308	-18	1553	-179	-10	04/11/81	Sto. Augusto
21	2190	1699	-491	-22	1783	-407	-19	15/08/84	Sto. Augusto
24	1673	1543	-130	-8	1456	-217	-13	19/09/85	Sto. Augusto
28	2381	2589	208	9	2616	235	10	22/09/86	Sto. Augusto
29	2656	2819	163	6	2751	95	4	16/08/88	Sto. Augusto
31	2814	2725	-89	-3	2616	-198	-7	15/09/88	Sto. Augusto
36	1964	1872	-92	-5	1882	-82	-4	30/08/89	Paim Filho
38	2186	2332	146	7	2381	195	9	29/08/90	Paim Filho
42	1763	1898	135	8	1882	119	7	20/08/87	J. Castilhos
45	2260	2503	243	11	2481	221	10	12/09/84	Veranópolis
46	1910	2124	214	11	2113	203	11	01/10/90	Veranópolis
49	2621	2692	71	3	2853	232	9	11/08/88	Guabiju

* Número do ambiente, sorteado entre os 53 disponíveis.

de maior potencial produtivo, pode ser minorada ou eliminada através da estimativa do Y_m , via modelos que utilizem o conceito de crescimento energético das culturas, como o apresentado e discutido por BARNI (1994) e BARNI et al. (1995). Os modelos ajustados (BARNI, 1994; BARNI et al., 1995), com base na temperatura, para estimar o crescimento da área foliar, e na radiação solar absorvida pelo dossel, para estimar a produção de matéria seca aérea, mostram-se altamente promissores, uma vez que as equações geradas reproduzem resulta-

dos de rendimento de grãos máximos, equivalentes aos obtidos nos 53 ambientes utilizados para o ajuste do modelo multiplicativo. Apenas necessita uma base de dados mais abrangente para o cálculo dos parâmetros, especialmente para as cultivares precoces que são mais sensíveis às variações do meio, como referido e demonstrado anteriormente.

Outra característica a destacar, na aplicação do modelo de JENSEN à cultura do girassol, é o pressuposto de que o estresse, em determinado subperíodo,

estende seus efeitos a outros subperíodos do ciclo da cultura. Isto ficou claro em dois momentos: o primeiro relacionou-se com o modelo completo, quando os coeficientes de determinação, no ajuste dos modelos, foram sempre superiores às formulações reduzidas, apesar da grande contribuição do consumo relativo de água no subperíodo reprodutivo (X3), fazendo com que a formulação reduzida fosse superior ao modelo completo na validação, como demonstrado na Figura 5; o segundo fundamentou-se no comportamento das cultivares precoces que estenderam sua dependência para mais de um subperíodo.

CONCLUSÕES

1. O modelo multiplicativo mostra-se válido para o girassol, apresentando elevada associação entre o rendimento relativo observado e predito pelas diferentes formulações. Na forma reduzida (consumo relativo de água somente no subperíodo crítico) apresenta desempenho promissor constituindo-se numa possibilidade prática para a previsão de rendimentos.

2. O rendimento de grãos de girassol pode ser predito, no Rio Grande do Sul, através do modelo multiplicativo, no qual o Y_m é o rendimento máximo estimado em função da radiação e temperatura (Y_m').

3. O estresse hídrico, no subperíodo de estabelecimento da cultura, não apresenta influência sobre o rendimento de grãos, desde que não determine redução e desuniformidade na população de plantas.

4. As condições hídricas no subperíodo reprodutivo (R1 a R6) são determinantes do rendimento final do girassol.

5. A formulação reduzida, de apenas um termo, apresenta desempenho superior à completa (4 termos), na predição do rendimento do girassol pelo modelo multiplicativo.

BIBLIOGRAFIA CITADA

BAIER, W. Crop-weather analysis model: review and model development. *Journal of Applied Meteorology*, Boston, v.12, p.937-947, 1973.

BAIER, W. Note on the terminology of crop-weather models. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, v.20, p. 137-145, 1979.

BARNI, N.A. **Modelos de crescimento, desenvolvimento e rendimento do girassol em função da radiação solar, temperatura e disponibilidade hídrica**. Porto Alegre, 1994. 249p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Departamento de Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, UFRGS, 1994.

BARNI, N.A.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H.; RIBOLDI, J. Rendimento máximo do girassol com base na radiação solar e temperatura: II. Produção de fitomassa e rendimento de grãos. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, Porto Alegre, v.1, n.2, p.201-216, 1995.

BARNI, N.A.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H.; RIBOLDI, J. Modelo agrometeorológico de predição do rendimento do girassol: I. Relação entre rendimento e índice hídrico. *Pesquisa Agropecuária Gaúcha*, Porto Alegre, v.2, n.1, 1996. (no presente número)

BERLATO, M.A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos da soja e o déficit hídrico para o estado do Rio Grande do Sul**. São José dos Campos, 1987. 83p. Tese (Doutorado em Agrometeorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Ministério da Ciência e Tecnologia, 1987.

COELHO, D.T.; DALE, R.F. An energy-crop growth variable and temperature function for predicting corn growth and development: planting to silking. *Agronomy Journal*, Madison, v.72, p.503-510, 1980.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 33).

EBERHART, S.A.; RUSSEL, W.A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*, Madison, v.6, p. 36-40, 1966.

FINLAY, K.W.; WILKINSON, G.N. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research*, Melbourne, v.14, p.742-754, 1963.

JENSEN, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: KOZLOWSKI, T.T., (Ed.). **Water deficits and plant growth**. New York: Academic, 1968. v.2, p.48.

LIN, C.S.; BINNS, M.R.; LEFKOVITCH, L.P. Stability analysis: where do we stand? *Crop Science*, Madison, v.26, p.894-900, 1986.

MATZENAUER, R. **Modelos agrometeorológicos para estimativa do rendimento de milho em função da disponibilidade hídrica no estado do Rio Grande do sul**. Porto Alegre, 1994. 172p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Departamento de Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, UFRGS, 1994.

PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, Wageningen, v.4, p.9-29, 1956.

SANGOI, L. **Efeitos de épocas de semeadura em duas cultivares de girassol sob condições naturais de precipitação hídrica**. Porto Alegre, 1985. 186p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Departamento de Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, UFRGS, 1985.

SCHLOTZHAUER, S.D.; LITTELL, R.C. **System for elementary statistical analysis**. Cary: SAS Institute, 1987. 416p.

THOMPSON, L.M. Weather and technology in the prediction of corn in the Corn Belt. *Agronomy Journal*, Madison, v.61, p.453-456, 1969.

THORNLEY, J.H.M. **Mathematical models in plant physiology: a quantitative approach to problems in plant and crop physiology**. London: Academic, 1976. 318p.

VERNETTI, F. de J.; GASTAL, M.F. da C.; ZONTA, E.P. Estabilidade fenotípica de cultivares de soja no sudeste do Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.25, n.11, p.1593-1602, 1990.

WITTEWER, S.H. The shape of things to come. In: **THE BIOLOGY of crop productivity**. London: Academic, 1980. p.413-453.