

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

Alencar Junior Zanon

**CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E POTENCIAL DE
RENDIMENTO DE SOJA EM FUNÇÃO DO TIPO DE CRESCIMENTO
E GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA EM
AMBIENTE SUBTROPICAL**

Santa Maria, RS

2015

Alencar Junior Zanon

**CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E POTENCIAL DE RENDIMENTO DE
SOJA EM FUNÇÃO DO TIPO DE CRESCIMENTO E GRUPO DE MATURIDADE
RELATIVA EM AMBIENTE SUBTROPICAL**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, Área de concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Agronomia**

Orientador: Prof. PhD. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Zanon, Alencar Junior

Crescimento, desenvolvimento e potencial de rendimento de soja em função do tipo de crescimento e grupo de maturidade relativa em ambiente subtropical. / Alencar Junior Zanon.-2015.

179 p.; 30cm

Orientador: Nereu Augusto Streck

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, RS, 2015

1. Glycine max 2. Grupo de maturidade relativa 3. Ciclo de desenvolvimento 4. Data de semeadura. Tipo de crescimento 5. Fenologia. Coeficiente fototérmico I. Streck, Nereu Augusto II. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Alencar Junior Zanon. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: alencarzanon@hotmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-graduação em Agronomia**


A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

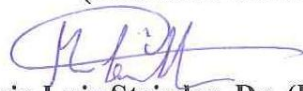
**CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E POTENCIAL DE
RENDIMENTO DE SOJA EM FUNÇÃO DE TIPO DE
CRESCIMENTO E GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA
EM AMBIENTE SUBTROPICAL**

elaborada por
Alencar Junior Zanon

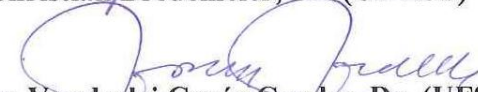
como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor em Agronomia

COMISSÃO EXAMINADORA:


Nereu Augusto Streck, Ph.D.
(Presidente Orientador)


Mércio Luiz Strieder, Dr. (Embrapa Trigo)


Christian Bredemeier, Dr. (UFRGS)


Jerson Vanderlei Carús Guedes, Dr. (UFSM)


Enio Marchesan, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 21 de dezembro de 2015

*Dedico este trabalho
ao meu grande amigo
Bruno Krülich¹*

¹ Bruno foi uma das 242 vítimas fatais da tragédia de 27 de janeiro de 2013 na boate Kiss em Santa Maria, RS, Brasil.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia pela oportunidade de realização do curso e aperfeiçoamento profissional.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro através da concessão da bolsa de doutorado e de recursos financeiros que viabilizaram a coleta de dados de campo, através do Projeto número 471860/2012-3.

À CAPES pelo auxílio financeiro através da concessão da bolsa de Doutorado Sanduíche.

À FAPERGS e ao CNPq pelas bolsas de iniciação científica para alunos de graduação em Agronomia e Meteorologia que auxiliaram na condução dos experimentos e coleta de dados de 2010 até 2015.

Ao professor Nereu pela oportunidade, orientação e ensinamentos durante o doutorado.

Aos meus pais José e Deise e a minha namorada Bruna pelo apoio, amizade e carinho.

Ao Professor Patricio Grassini pela orientação e a University of Nebraska-Lincoln, Nebraska, Estados Unidos da América por ter permitido a realização de parte do meu doutoramento.

Aos agricultores Fernando Giacomini (Restinga Sêca), Claudemir Richter (Tupanciretã) e Adriano Nunes de Almeida (Água Santa) por terem permitido conduzirmos experimentos nas suas propriedades durante os anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Aos professores Cleber Alberto Maus (Unipampa), Isabel Lago (Ufpel), Gizelli Moiano de Paula (UFSM-CESNORS) e seus alunos de iniciação científica pela condução e avaliação de experimento.

A Dra. Liege da Costa e demais pesquisadores e funcionários da Fepagro Sementes de Júlio de Castilhos pela condução e manejo de experimento.

Ao Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) por permitir utilizar os dados do Projeto “Determinação de épocas de semeadura e genótipos de soja adaptados a solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul” na minha Tese e aos colegas do IRGA que auxiliaram na condução e coleta de dados.

Ao extensionista da Emater, Luís Antônio Rocha Barcellos, pelo auxílio na escolha das propriedades e produtores rurais onde foram conduzidos os experimentos.

Um agradecimento especial aos colegas e amigos do Grupo de Agrometeorologia da UFSM, principalmente aos que fizeram parte do “Projeto Soja” pela amizade e ajuda na coleta dos dados durante seis anos de experimento de campo.

Aos membros da banca avaliadora pela disponibilidade, sugestões e contribuições para melhoria do trabalho.

A todos aqueles não listados e que de alguma maneira contribuíram para a realização do trabalho, o meu Muito Obrigado.

“En las complejidades de la existencia contemporánea, el especialista que está capacitado pero no educado, y que está técnicamente calificado pero es culturalmente incompetente, constituye una amenaza” David B. Truman

RESUMO

CRESCIMENTO, DESENVOLVIMENTO E POTENCIAL DE RENDIMENTO DE SOJA EM FUNÇÃO DO TIPO DE CRESCIMENTO E GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA EM AMBIENTE SUBTROPICAL

AUTOR: Alencar Junior Zanon
ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

Os objetivos desta tese foram: Estimar o grupo de maturidade relativa de cultivares antigas e modernas de soja; Quantificar a contribuição das ramificações no índice de área foliar; Caracterizar o desenvolvimento e a duração do período de sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva, o crescimento em estatura e a emissão de nós após o início do florescimento em cultivares modernas de soja com diferentes grupos de maturidade relativa, tipos de crescimento, sementeiras em épocas e regiões produtoras de soja no Rio Grande do Sul e; Identificar as variáveis meteorológicas e de manejo que governam o potencial de rendimento em soja no sul do Brasil. Foram conduzidos 47 experimentos utilizando 23 cultivares de soja, durante cinco estações de crescimento (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015) em 12 locais no Rio Grande do Sul. O grupo de maturidade relativa das cultivares que ainda não tinham sido classificadas variou de 4.8 a 7.3. Há redução dos valores de índice de área foliar máximo, da haste principal e das ramificações, da duração da fase reprodutiva e do ciclo total de desenvolvimento, com o atraso da época de sementeira, independentemente do grupo de maturidade relativa e tipo de crescimento. As cultivares com tipo de crescimento indeterminado apresentam maior período de sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva, crescimento em estatura e emissão de nós após o início do florescimento do que as cultivares determinadas. O potencial rendimento de soja variou de 2,8 até 6,0 Mg ha⁻¹, dependendo da quantidade e distribuição da água durante a estação de crescimento e do coeficiente fototérmico durante os estágios reprodutivos da soja.

Palavras-chave: *Glycine max.* Grupo de maturidade relativa. Ciclo de desenvolvimento. Data de sementeira. Tipo de crescimento. Fenologia. Coeficiente fototérmico.

ABSTRACT

GROWTH, DEVELOPMENT AND SOYBEAN YIELD POTENTIAL AS A FUNCTION OF GROWING TYPE AND MATURITY GROUP IN SUBTROPICAL ENVIRONMENT

AUTHOR: Alencar Junior Zanon
ADVISOR: Nereu Augusto Streck

The objectives of this thesis were: To estimate the relative maturity group of old and modern soybean cultivars used in Southern Brazil; To quantify the branches contribution in the leaf area index; To characterize the development and the overlap period of vegetative and reproductive phases, growth in height and the emission of nodes after the beginning of flowering in determinate and indeterminate plant type cultivars in different sowing dates and soybean regions in Rio Grande do Sul and; To identify key biophysical and management factors governing variation in soybean yield potential in Southern Brazil. Were conducted 47 experiments using 23 soybean cultivars in five growing seasons (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 and 2014/2015) at 12 sites in Rio Grande do Sul. The relative maturity group these cultivars that had not yet been classified ranged from 4.8 to 7.3. Most cultivars showed a reduction on total leaf area index, maximum, of main stem and of branches, in the duration of the reproductive phase, of the total development cycle with delay on sowing date regardless of the maturity group and type of growth. The indeterminate type cultivars had a higher overlap period of vegetative and reproductive phases, growing in height and emission nodes after the beginning of flowering bigger than determinate type cultivars. The potential yield ranged from 2.8 up to 6.0 Mg ha⁻¹, depending on the amount and distribution of water during the growing season and the photothermal coefficient during reproductive stages of the soybean.

Key-words: *Glycine max.* Relative maturity group. Developmental cycle. Sowing date. Growth habit. Phenology. Photo-thermal quotient.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- FIGURA 1 – Evolução do ciclo de desenvolvimento no tempo (22/04/2012 (a), 30/04/2012 (b) e 06/05/2012 (c)) de quatro cultivares de soja com diferente grupo de maturidade relativa (GMR) em Santa Maria, Rio Grande do Sul. A semeadura ocorreu em 28/01/2012. Fonte: Bruno Kraulich (*in memoriam*).45
- FIGURA 2 – Relação entre grupo de maturidade relativa das cultivares padrão e duração do ciclo de desenvolvimento (semeadura até R8), em dias, nas semeaduras de 03/11/2012 em Santa Maria (a) e 09/11/2012 em Capão do Leão (b), Rio Grande do Sul.....46

CAPÍTULO 2

- FIGURA 1 – Mapa do Rio Grande do Sul com os locais onde foram conduzidos experimentos com a cultura da soja no ano agrícola 2013/2014, RS68
- FIGURA 2 – Evolução do índice de área foliar total (IAFtotal), na haste principal (IAF haste principal) e nas ramificações (IAF ramificações) das cultivares de soja de tipo de crescimento determinado (a) IAS 5, (b) Fepagro 36 RR, (c) Bragg, (d) BRS 246 RR e (e) CD 219 semeadas em 27/09/2013. A seta contínua indica o estágio R1 e a seta tracejada indica o estágio R5. Santa Maria, 2013-2014.....69
- FIGURA 3 – Evolução do índice de área foliar total (IAFtotal), na haste principal (IAF haste principal) e nas ramificações (IAF ramificações) das cultivares de soja de tipo de crescimento determinado (a) IAS 5, (b) Fepagro 36 RR, (c) Bragg, (d) BRS 246 RR e (e) CD 219 semeadas em 15/11/2013. A seta contínua indica o estágio R1 e a seta tracejada indica o estágio R5. Santa Maria, 2013-2014.....70
- FIGURA 4 – Evolução do índice de área foliar total (IAFtotal), na haste principal (IAF haste principal) e nas ramificações (IAF ramificações) das cultivares de soja de tipo de crescimento determinado (a) IAS 5, (b) Fepagro 36 RR, (c) Bragg, (d) BRS 246 RR e (e) CD 219 semeadas em 19/02/2014. A seta contínua indica o estágio R1 e a seta tracejada indica o estágio R5. Santa Maria, 2013-2014.....71
- FIGURA 5 – Evolução do índice de área foliar total (IAFtotal), na haste principal (IAF haste principal) e nas ramificações (IAF ramificações) das cultivares de soja de tipo de crescimento indeterminado (a) BMX Turbo RR, (b) BMX Energia RR, (c) NA 5909 RR, (d) NS 4823 RR, (e) Igra 518 RR, (f) BMX Potência RR, (g) TMG 7161 RR Inox e (h) TEC 5936 IPRO semeadas em 27/09/2013. A seta contínua indica o estágio R1 e a seta tracejada indica o estágio R5. Santa Maria, 2013-2014.....72

- FIGURA 6 – Evolução do índice de área foliar total (IAF_{total}), na haste principal (IAF haste principal) e nas ramificações (IAF ramificações) das cultivares de soja de tipo de crescimento indeterminado (a) BMX Turbo RR, (b) BMX Energia RR, (c) NA 5909 RR, (d) NS 4823 RR, (e) Igra 518 RR, (f) BMX Potência RR, (g) TMG 7161 RR Inox e (h) TEC 5936 IPRO semeadas em 15/11/2013. A seta contínua indica o estágio R1 e a seta tracejada indica o estágio R5. Santa Maria, 2013-2014 73
- FIGURA 7 – Evolução do índice de área foliar total (IAF_{total}), na haste principal (IAF haste principal) e nas ramificações (IAF ramificações) das cultivares de soja de tipo de crescimento indeterminado (a) BMX Turbo RR, (b) BMX Energia RR, (c) NA 5909 RR, (d) NS 4823 RR, (e) Igra 518 RR, (f) BMX Potência RR, (g) TMG 7161 RR Inox e (h) TEC 5936 IPRO semeadas em 19/02/2014. A seta contínua indica o estágio R1 e a seta tracejada indica o estágio R5. Santa Maria, 2013-2014 74
- FIGURA 8 – Número de ramificações médio de treze cultivares de soja (BMX Turbo RR, BMX Energia RR, NA 5909 RR, NS 4823 RR, Igra 518 RR, BMX Potência RR, TMG 7161 RR Inox, TEC 5936 IPRO, IAS 5, Fepagro 36 RR, Bragg, BRS 246 RR e CD 219 RR) semeadas em 27/09/2013 (SMEP1), 15/11/2013 (SMEP2) e 19/02/2014 (SMEP3) em Santa Maria, 14/11/2013 em Restinga Sêca, 17/11/2013 em Tupanciretã, 18/11/2013 em Júlio de Castilhos e 03/12/2013 em Água Santa no ano agrícola 2013-2014, RS 75
- FIGURA 9 – Índice de área foliar na haste principal (barra sólida) e nas ramificações (barra vazada) de treze cultivares de soja semeadas em Água Santa (a), Júlio de Castilhos (b), Restinga Sêca (c) e Tupanciretã (d), RS, 2013-2014. * No experimento em Júlio de Castilhos e Restinga Sêca não foram realizadas avaliações nas cultivares BMX Turbo RR e Bragg, IAS 5, respectivamente 76

CAPÍTULO 3

- FIGURA 1 – Temperatura média do ar (°C) e fotoperíodo diários (horas) ((a), (c), (e) e (g)), e precipitação (mm dia⁻¹) e densidade de fluxo de radiação solar global incidente (MJ m⁻² dia⁻¹) ((b), (d), (f) e (h)), durante os experimentos em Santa Maria nos anos agrícolas 2010/2011, 2011/2012 e 2012/2013, e em Capão do Leão, no ano agrícola 2012/2013. As setas indicam as datas de semeadura 96
- FIGURA 2 – Duração, em °C dia, das fases semeadura-emergência (SEM-EM), emergência-R1 (EM-R1) e das subfases R1-R3, R3-R5, R5-R7 e R7-R8 de onze cultivares de soja, em duas datas de semeadura (10/12/2010 e 8/1/2011), no ano agrícola 2010-2011 em Santa Maria, RS. *Médias da duração do ciclo de desenvolvimento (EM-R8) seguidas pelas mesmas letras maiúsculas (comparação entre cultivares na mesma data de semeadura) e minúsculas (comparação de uma cultivar em diferentes datas de semeadura) não diferem entre si pelo Teste Duncan, a 5% de probabilidade de erro 97

- FIGURA 3 – Duração, em °C dia, das fases semeadura-emergência (SEM-EM), emergência-R1 (EM-R1) e das subfases R1-R3, R3-R5, R5-R7 e R7-R8 de onze cultivares de soja, em três épocas de semeadura (24/9/2011, 19/11/2011 e 28/1/2012), no ano agrícola 2011-2012 em Santa Maria, RS. *Médias da duração do ciclo de desenvolvimento (EM-R8) seguidas pelas mesmas letras maiúsculas (comparação entre cultivares na mesma data de semeadura) e minúsculas (comparação de uma cultivar em diferentes datas de semeadura) não diferem entre si pelo Teste Duncan, a 5% de probabilidade de erro 98
- FIGURA 4 – Duração, em °C dia, das fases semeadura-emergência (SEM-EM), emergência-R1 (EM-R1) e das subfases R1-R3, R3-R5, R5-R7 e R7-R8 de onze cultivares de soja, em quatro épocas de semeadura (22/9/2012, 3/11/2012, 2/12/2012 e 6/2/2013), no ano agrícola 2012-2013 em Santa Maria, RS. *Médias da duração do ciclo de desenvolvimento (EM-R8) seguidas pelas mesmas letras maiúsculas (comparação entre cultivares na mesma data de semeadura) e minúsculas (comparação de uma cultivar em diferentes datas de semeadura) não diferem entre si pelo Teste Duncan, a 5% de probabilidade de erro 99
- FIGURA 5 – Duração, em °C dia, das fases semeadura-emergência (SEM-EM), emergência-R1 (EM-R1) e das subfases R1-R3, R3-R5, R5-R7 e R7-R8 de onze cultivares de soja, semeadas em Santa Maria (3/11/2012) e em Capão do Leão (9/11/2012), no ano agrícola 2012-2013 (RS). 100
- FIGURA 6 – Sobreposição, em °C dia, entre o início do florescimento (R1) e o número final de nós (NFN) de onze cultivares de soja com tipo de crescimento determinado e indeterminado, em duas datas de semeadura (10/12/2010 e 8/01/2011) no ano agrícola 2010-2011 (a), três datas de semeadura (24/9/2011, 19/11/2011 e 28/1/2012) no ano agrícola 2011-2012 (b), e quatro datas de semeadura (22/9/2012, 3/11/2012, 2/12/2012 e 06/02/2013) no ano agrícola 2012-2013 (c) nos experimentos em Santa Maria, RS. *Médias da sobreposição entre o início do florescimento e o número final de nós seguida pelas mesmas letras maiúsculas (comparação entre cultivares na mesma data de semeadura) e minúsculas (comparação de cultivar dentro das datas de semeadura) não diferem pelo Teste Duncan, a 5% de probabilidade de erro. 101
- FIGURA 7 – Sobreposição, em °C dia, entre o início do florescimento (R1) e o número final de nós (NFN) de onze cultivares de soja com tipo de crescimento determinado e indeterminado, semeadas em Santa Maria (3/11/2012) e em Capão do Leão (9/11/2012), no ano agrícola 2012-2013 (RS). *Médias da sobreposição entre o início do florescimento e o número final de nós seguida pelas mesmas letras maiúsculas (comparação entre cultivares no mesmo local de semeadura) e minúsculas (comparação de uma cultivar em diferentes locais de semeadura) não diferem entre si pelo Teste Duncan, a 5% de probabilidade de erro. 102

CAPÍTULO 4

- FIGURA 1 – Locais onde foram conduzidos experimentos com a cultura da soja no Rio Grande do Sul durante os anos agrícolas 2012/2013 e 2013/2014..... 120
- FIGURA 2 – Temperatura média do ar (°C), fotoperíodo (horas dia-1), precipitação (mm dia-1) e Radiação solar (MJ m⁻² dia⁻¹) durante os experimentos em Santa Maria (a, b), Itaqui (c, d), Capão do Leão (e, f), Júlio de Castilhos (g, h) e Frederico Westphalen (i, j). As setas indicam as datas de semeadura 121
- FIGURA 3 – Sobreposição, em dias, entre o início do florescimento (R1) e o número final de nós (NFN) (a), diferença em estatura no R8 e no R1 (E R8 - R1) (b) e a diferença no número de nós no R8 e no R1 (N R8 - R1) (c) em cultivares de soja semeadas em 27/09/2013, 15/11/2013 e 6/2/2014 em Santa Maria, RS. *Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas (comparação entre cultivares na mesma data de semeadura) não diferem entre si pelo Teste Tukey. **Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas não diferiram entre si pela análise de contraste a 5% de probabilidade de erro..... 122
- FIGURA 4 – Sobreposição, em dias, entre o início do florescimento (R1) e o número final de nós (NFN) (a), diferença em estatura no R8 e no R1 (E R8 - R1) (b) e a diferença no número de nós no R8 e no R1 (N R8 - R1) (c) em cultivares de soja semeadas em 16/10/2013, 25/11/2013 e 23/12/2014 em Itaqui, RS. *Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas (comparação entre cultivares na mesma data de semeadura) não diferem entre si pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. **Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas não diferiram entre si pela análise de contraste a 5% de probabilidade de erro..... 123
- FIGURA 5 – Sobreposição, em dias, entre o início do florescimento (R1) e o número final de nós (NFN) ((a), (b) e (c)), diferença em estatura no R8 e no R1 (E R8 - R1) ((d), (e) e (f)) e diferença no número de nós no R8 e no R1 (N R8 - R1) ((g), (h) e (i)) em cultivares de soja semeadas em Capão do Leão ((a), (d) e (g)), Júlio de Castilhos ((b), (e) e (h)) e Frederico Westphalen ((c), (f) e (i)), RS, durante o ano agrícola 2013/2014. *Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas (comparação entre cultivares no mesmo local de semeadura) não diferem entre si pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. **Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas não diferiram entre si pela análise de contraste a 5% de probabilidade de erro 124
- FIGURA 6 – Sobreposição, em dias, entre o início do florescimento (R1) e o número final de nós (NFN) ((a), (b) e (c)), diferença em estatura no R8 e no R1 (E R8 - R1) ((d), (e) e (f)) e a diferença no número de nós no R8 e no R1 (N R8 - R1) ((g), (h) e (i)) em cultivares de soja cultivadas em lavouras comerciais em Restinga Sêca ((a), (d) e (g)), Tupanciretã ((b), (e) e (h)) e Água Santa ((c), (f) e (i)), RS durante o ano agrícola 2013/2014 125

CAPÍTULO 5

- FIGURE 1 – Monthly average incoming solar radiation and maximum (Tmax) and minimum temperatures (Tmin) ((a), (b) and (c)), total grass-based reference evapotranspiration (ETo), and total rainfall ((d), (e) and (f)) based on 5-year (solar radiation and ETo) and 30-year (Tmax, Tmin, and rainfall) weather data collected at three locations in Rio Grande do Sul (RS) State, Brazil: Santa Maria (central RS), Passo Fundo (north RS), and Pelotas (south RS). Arrows inside panels indicate average dates of sowing (S), flowering (R1), beginning of seed filling (R5), and physiological maturity (R7) of soybean. 151
- FIGURE 2 – Map of the state of Rio Grande do Sul (RS), Brazil. Solid circles indicate location of experimental sites. Inset indicates location of RS within Brazil .. 152
- FIGURE 3 – Relationship between yield and seasonal water supply in rainfed (yellow circles) and irrigated (blue circles) soybean crops grown during four growing seasons in southern Brazil. Seasonal water supply was estimated as the sum of available soil water at sowing and in season precipitation plus irrigation. Solid line shows the fitted boundary function ($y = -6528 + 12588(1 - \exp(-0.004x))$) 153
- FIGURE 4 – Relationship between yield and sowing date (expressed as days after Sept 20) for rainfed (yellow circles) and irrigated (blue circles) soybean crops grown in southern Brazil during four growing seasons. Solid line shows the fitted boundary function ($y = 5842$ before Nov 4; $y = 5842 - 0.026x$, after Nov 4) 154
- FIGURE 5 – Upper panel: relationship between soybean yield and photothermal quotient (Q) between R3 and R7 stages in rainfed (yellow circles) and irrigated crops (blue circles). Lower panel: photothermal quotient between R3 and R7 as a function of sowing date in short (MG 4.7-5.4, diamonds), intermediate (MG 5.5-6.9, circles) and long (MG 7.0-8.2, triangle) cultivars. Data were collected during four growing seasons. Fitted regression lines are shown only when significant. 155

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

TABELA 1 – Grupo de maturidade relativa (GMR) estimado em experimentos semeados em 19/11/2011, 3/11/2012 e 15/11/2013 em Santa Maria (SM), em 9/11/2012 em Capão do Leão (CL), em 14/11/2013 em Restinga Sêca (RS), em 18/11/2013 em Júlio de Castilhos (JC) e em 18/11/2013 em Água Santa (AS) no Rio Grande do Sul.....	47
---	----

CAPÍTULO 2

TABELA 1 – Local de condução, data de semeadura, textura do solo, número de plantas e frequência de avaliação de fenologia e área foliar dos experimentos conduzidos no Rio Grande do Sul no ano agrícola 2013/2014.....	66
TABELA 2 – Porcentagem do índice de área foliar total que está na haste principal e nas ramificações nas 13 cultivares de soja, nas três datas de semeadura em Santa Maria, RS, no ano agrícola 2013/2014.	67

CAPÍTULO 3

TABELA 1 – Cultivares de soja, grupo de maturação (GM) e tipo de crescimento utilizados nos experimentos de campo em Santa Maria e em Capão do Leão (RS).....	94
TABELA 2 – Valores do quadrado médio da ANOVA para as variáveis duração do ciclo de desenvolvimento (EM-R8), duração da fase vegetativa (EM-R1), duração da fase reprodutiva (R1-R8), duração da sobreposição da fase vegetativa e reprodutiva (R1-NFN), para onze cultivares de soja em duas datas de semeadura no ano agrícola 2010/2011, três datas de semeadura no ano agrícola 2011/2012, quatro datas de semeadura no ano agrícola 2012/2013 em Santa Maria, e os valores do quadrado médio da ANOVA para as mesmas variáveis (EM-R8, EM-R1, R1-R8 e R1-NFN) para onze cultivares de soja e dois locais de semeadura (Santa Maria e Capão do Leão), RS, Brasil.....	95

CAPÍTULO 4

TABELA 1 – Cultivares de soja, grupos de maturidade relativa (GMR) e tipos de crescimento que foram utilizadas nos experimentos de campo em Santa Maria, Itaqui, Frederico Westphalen, Capão do Leão, Júlio de Castilhos, Restinga Sêca, Tupanciretã e Água Santa, Rio Grande do Sul.....	126
TABELA 2 – Local do experimento, altitude, textura do solo, data de semeadura, número de plantas por cultivar e frequência de avaliação de fenologia e número de nós (NN) nos experimentos conduzidos em Santa Maria, Itaqui, Frederico Westphalen, Capão do Leão, Júlio de Castilhos, Restinga Sêca, Tupanciretã e Água Santa, Rio Grande do Sul	127

TABELA 3 – Estimativa dos contrastes entre cultivares com tipo de crescimento determinado (IAS 5, Fepagro 36 RR, BRS 246 RR, Bragg e CD 219 RR) x cultivares com tipo de crescimento indeterminado (NS 4725 RR, NS 4823 RR, TMG 7161 RR Inox, BMX Energia RR, TEC 5936 IPRO, BMX Turbo RR, NS 6262 RR, NA 5909 RG, Igra RA 518 RR e BMX Potência RR) para as variáveis estatuta em R1 (Estatura R1), estatura em R8 (Estatura R8), número de nós em R1 (NN R1) e número de nós em R8 (NN R8) em experimentos conduzidos Santa Maria, Itaqui, Capão do Leão, Júlio de Castilhos e Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul.	128
--	-----

CAPÍTULO 5

TABLE 1 – Experiments with soybean conducted during four growing seasons (2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, and 2014/2015) at 12 locations in the Rio Grande do Sul State, Brazil, used in the study.	156
TABLE 2 – Mean incident solar radiation, maximum (Tmax) and minimum air temperature (Tmin), photothermal quotient (Q), relative humidity (RH), total precipitation, and total grass-based Penman-Monteithreference evapotranspiration (ETo)during the 2-month period (January-February) that coincides roughly with the reproductive phase of soybean crops grown in Rio State of Rio Grande do Sul (RS), Brazil. Values are shown for four crop growing seasons (2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, and 2014/2015) at three locations: Pelotas (south RS), Santa Maria (central RS), and Passo Fundo (north RS).....	157
TABLE 3 – Means of several crop, management, and climatic factors in water-limited (water supply < 800 mm) and non-water limited (water supply ≥ 800 mm) field classes with low-residuals and high-residuals (i.e., difference between actual yield and the yield derived from the boundary function for the relationship between yield and water supply). Significance of difference (dif) between means of variables (dif.), in the small-versus large-residual field classes was tested, separately for the WL and NWL categories, using <i>t</i> -tests.	158
TABLE 4 – Predicted yield and photothermal quotient (Q) between R3 and R7 for short (MG 4.7-5.4), intermediate (MG 5.5-6.9), and long (MG 7.0-8.2) cultivars sown at four different dates. Values were estimated based on the fitted regression models shown in Figure 5.....	159

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	OBJETIVOS	28
	1.1.1 Objetivo geral	28
	1.1.2 Objetivos específicos	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	EVOLUÇÃO DO CULTIVO DA SOJA NO BRASIL E NO RIO GRANDE DO SUL	29
2.2	CICLO DE DESENVOLVIMENTO E TIPOS DE CRESCIMENTO DA SOJA	32
2.4	ÉPOCA DE SEMEADURA EM SOJA	33
2.5	POTENCIAL DE RENDIMENTO EM SOJA	35
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
3.1	CAPÍTULO 1 – ESTIMATIVA DO GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA EM CULTIVARES ANTIGAS E MODERNAS DE SOJA.....	37
	Resumo.....	39
	Abstract	39
	Referências.....	43
3.2	CAPÍTULO 2 – CONTRIBUIÇÃO DAS RAMIFICAÇÕES NA EVOLUÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM CULTIVARES MODERNAS DE SOJA	49
	Resumo.....	51
	Abstract	52
	1 INTRODUÇÃO	52
	2 MATERIAL E MÉTODOS	54
	3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
	4 CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	63
3.3	CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO EM CULTIVARES DE SOJA EM FUNÇÃO DO GRUPO DE MATUREZAÇÃO E TIPO DE CRESCIMENTO EM TERRAS ALTAS E TERRAS BAIXAS.....	77
	Resumo.....	78
	Abstract	79
	1 INTRODUÇÃO	80
	2 MATERIAIS E MÉTODOS	82
	3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
	4 CONCLUSÃO	90
	REFERÊNCIAS	91
3.4	CAPÍTULO 4 – EFEITO DO TIPO DE CRESCIMENTO NO DESENVOLVIMENTO DE CULTIVARES MODERNAS DE SOJA APÓS O INÍCIO DO FLORESCIMENTO NO RIO GRANDE DO SUL.....	103
	Resumo.....	105
	Abstract	106
	1 INTRODUÇÃO	106
	2 MATERIAL E MÉTODOS	108
	3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
	4 CONCLUSÕES	117
	REFERÊNCIAS	118

3.5	CAPÍTULO 5 – CLIMATE AND MANAGEMENT FACTORS INFLUENCE SOYBEAN YIELD POTENTIAL IN A SUBTROPICAL ENVIRONMENT.....	129
	Abstract.....	131
	1 Introduction	132
	2 Materials and methods.....	134
	3 Results & Discussion.....	140
	4 Conclusions	144
	References	145
4	DISCUSSÃO	161
5	CONCLUSÃO.....	173
	REFERÊNCIAS.....	175

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja é a principal *commodity* agrícola do Brasil, que responde por 28% da produção mundial, produzindo 70 Mt de grãos anualmente (FAOSTAT, 2015). A produtividade média da soja brasileira cresceu de 1,5 Mg ha⁻¹ (1976-1981) para 2,9 Mg ha⁻¹ (2010-2015) (IBGE, 2015). O Rio Grande do Sul (RS) é o terceiro Estado entre os produtores de soja no Brasil, produzindo 10,8 Mt, com rendimento médio de 2,5 Mg ha⁻¹ (IBGE, 2015).

No RS a expansão da soja dos últimos anos foi devido a: 1) consolidação da semeadura direta, 2) introdução de cultivares precoces, com maior potencial genético e resistente ao herbicida glifosato, 3) semeaduras precoces (final de setembro e início de outubro) e tardias (final de dezembro e janeiro), permitindo assim dois cultivos de verão no mesmo ano agrícola, principalmente na região noroeste do RS, 4) aumento do cultivo de soja em terras baixas, tradicionalmente cultivadas com arroz irrigado, 5) incorporação de novas áreas da metade Sul do Estado onde historicamente foi realizada pecuária extensiva, e 6) elevados preços da soja no mercado internacional. O aumento da produtividade esta relacionada às novas tecnologias de produção, como a utilização de cultivares com grupo de maturidade relativa (GMR) menor que 7.0 e tipo de crescimento indeterminado. Este novo grupo de cultivares começou a ser semeado no RS a partir dos anos 2000 e representou mais de 90% da área semeada com soja no ano agrícola 2013/2014 e 2014/2015 (EMATER, 2015), em contraste com as cultivares de tipo determinado e de ciclo médio ou tardio cultivadas desde os primeiros relatos do cultivo da soja no RS (BARNI; MATZENAUER, 2000). A mudança no tipo de crescimento (de determinado para indeterminado) e, principalmente, a redução da duração do ciclo de desenvolvimento das cultivares modernas (grupo de maturidade relativa menor que 7.0) promoveu ajustes no manejo realizado na cultura da soja desde a década de 1940 no Sul do Brasil (TIAN et al., 2010).

A obtenção de lavouras de soja com alto potencial produtivo depende do conhecimento detalhado do crescimento e desenvolvimento da cultura, das suas exigências edafoclimáticas, bem como do potencial genético das cultivares (SETIYONO et al., 2011). Durante a estação de cultivo da soja no RS, os fatores (radiação solar, fotoperíodo e temperatura média do ar) que governam o crescimento em área foliar, duração das fases de desenvolvimento e o potencial de rendimento de grãos são crescentes nos meses de setembro a dezembro, e diminuem a partir do mês de janeiro. Nesse sentido, estudos básicos que descrevam de forma detalhada crescimento foliar, desenvolvimento e potencial de rendimento

de grãos das novas cultivares de soja necessitam ser realizados em épocas de semeadura, locais e anos agrícolas no Rio Grande do Sul.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Quantificar e caracterizar a influência das variáveis meteorológicas e de manejo na área foliar, desenvolvimento e potencial de rendimento em soja no Rio Grande do Sul.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Estimar o grupo de maturidade relativa de cultivares antigas e modernas de soja cultivadas no Sul do Brasil;
2. Quantificar a contribuição das ramificações na área foliar em cultivares modernas de soja com diferentes grupos de maturação, tipos de crescimento, semeadas em épocas e regiões produtoras de soja no Rio Grande do Sul;
3. Caracterizar o desenvolvimento de cultivares de soja com diferentes grupos de maturação e tipos de crescimento em terras altas e terras baixas no Rio Grande do Sul;
4. Caracterizar a duração do período de sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva, o crescimento em estatura e a emissão de nós após o início do florescimento em cultivares de tipo de crescimento determinado e indeterminado semeadas em épocas e regiões produtoras de soja no Rio Grande do Sul;
5. Identificar variáveis meteorológicas e de manejo que governam a variação do potencial de rendimento e o potencial de rendimento limitado por água em soja em ambiente subtropical;

Os objetivos específicos são abordados nos cinco capítulos que seguem nesta tese.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EVOLUÇÃO DO CULTIVO DA SOJA NO BRASIL E NO RIO GRANDE DO SUL

No Brasil, a primeira referência encontrada sobre soja é a do Professor da Escola de Agronomia, Gustavo Dutra, em 1882, que relatou estudos de adaptação de cultivares de soja utilizada como forrageira na Bahia. O primeiro registro de cultivo comercial de soja no Brasil data de 1914 em Santa Rosa, atualmente município de Tuparandi, no RS. Os materiais genéticos introduzidos no Brasil encontraram efetivas condições para se desenvolver e expandir no RS, dadas as semelhanças climáticas do ecossistema de origem (sul dos Estados Unidos) (BONETTI, 1981).

Em 1930, a soja foi introduzida na Estação Experimental Alfredo Chaves, pertencente à Secretaria de Agricultura do Rio Grande do Sul, no município de Veranópolis (RUBIN, 1995). Os primeiros trabalhos constavam da manutenção de uma pequena coleção de cultivares, entre as quais estavam Laredo, Tokio, Biloxi, Prolific e Mammouth (FERES et al., 1982). Nesta Estação Experimental, em 1941, foi realizado o primeiro experimento com a cultura da soja no RS, comparando espaçamentos entre fileiras. Em Veranópolis, também foram realizados os primeiros cruzamentos comerciais em 1947, por Orlando Mello. Como resultado deste trabalho, foi lançada, em 1960, a primeira cultivar desenvolvida no Rio Grande do Sul, denominada “Pioneira” (FERES et al., 1982).

A partir dos anos 40, a soja adquiriu importância econômica, com o primeiro registro estatístico nacional em 1941, no Anuário Agrícola do RS: área cultivada de 640 ha, produção de 450 t e rendimento de $0,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ (MEDINA, 1981). Nesse mesmo ano, instalou-se a primeira indústria processadora de soja do País (Santa Rosa, RS) e, em 1949, com produção de 25.000 t, o Brasil figurou pela primeira vez como produtor de soja nas estatísticas internacionais (MEDINA, 1981). O Ministério da Agricultura, através do Instituto Agrônomo do Sul, atualmente Centro de Pesquisa Agropecuária de Clima Temperado (CPACT) da EMBRAPA, em Pelotas, iniciou em 1948 os trabalhos com a cultura da soja, introduzindo cultivares americanas e avaliando-as quanto à produção de massa verde e grãos (MEDINA, 1981). Com a criação do programa oficial de incentivo à triticultura nacional, no início dos anos 50, a cultura da soja foi igualmente incentivada, por ser, sob o ponto de vista técnico (leguminosa sucedendo poácea), e econômico (melhor aproveitamento da terra, das máquinas/implementos, da infra-estrutura e da mão de obra), a melhor alternativa de verão para suceder o trigo cultivado no inverno (MEDINA, 1981). Destaca-se, que durante as

décadas de 40 e 50, a cultivar de soja “Amarela Comum”, ocupou mais de 80% da área semeada com soja no RS (SANTOS, 1975).

Na década de 1960, impulsionada pela política de subsídios ao trigo e ao estabelecimento da “Operação Tatu” no RS, projeto que promoveu calagem e correção da fertilidade de solos, a produção aumentou de 200 mil para 1 milhão de toneladas, no final da década de 60 (EMBRAPA, 2004). Na década seguinte, a soja se consolidou como a principal cultura do agronegócio brasileiro, passando de 1,5 milhão no início para mais de 15 milhões de toneladas no final da década de 1970. Esse crescimento foi relacionado ao aumento da área cultivada (de 1,3 para 8,8 milhões de hectares), e, também, ao incremento da produtividade (1,1 Mg ha⁻¹ para 1,5 Mg ha⁻¹). Durante significativo período das décadas de 70 e 80, as cultivares com tipo de crescimento determinado Bragg, IAS 4, IAS 5, BR-4, e Cobb ocuparam mais de 70% da área cultivada com soja no RS (RUBIN, 1996).

O crescimento do cultivo de soja na região Centro-Oeste do Brasil a partir dos anos 80 deve-se principalmente ao desenvolvimento de cultivares de soja adaptadas à condição de cultivo em baixas latitudes. A introdução e a seleção dirigida para haver na planta período juvenil longo foi a solução encontrada por melhoristas de soja para retardar o início do florescimento em condições de dias curtos (HARTWIG; KIIHL, 1979; KIIHL et al., 1985; HINSON, 1989; SINCLAIR et al., 2005). O controle do estímulo ao florescimento e, conseqüentemente, da altura da planta e da inserção do primeiro legume, representaram fatores chaves para o desenvolvimento de cultivares menos sensíveis às variações de data de semeadura e com adaptação em latitudes mais baixas. Os genótipos IAC73-2736, OCEPAR 9, Paranagoiana, Doko-pjl, Savanão e BR-1-pjl, expressando grau variado de juvenilidade, foram os primeiros genótipos identificados e usados como progenitores nos cruzamentos para o desenvolvimento de cultivares adaptadas a baixas latitudes (ALMEIDA; KIIHL, 1998). As primeiras cultivares brasileiras desenvolvidas e indicadas para as áreas tropicais foram Tropical, Timbira, BR-10 (Teresina) e BR-11 (Carajás) (KIIHL et al., 1985).

Durante as décadas de 1980 e 1990 verificou-se, na região tropical do Brasil, o crescimento da produção de soja anteriormente ocorrido na Região Sul. Até 1970, menos de 2% da produção nacional era colhida no Centro-Oeste brasileiro. Em 1980, esse percentual passou para 20% e em 1990 já era superior a 40% (IBGE, 2015). Nos anos agrícolas 1998/1999 e 2001/2002, a região Centro-Oeste ultrapassou a região Sul em produção e em área cultivada com soja, respectivamente, pela primeira vez na história. Na última safra (2014/2015) a região Centro-Oeste alcançou aproximadamente 50% do total da produção brasileira (IBGE, 2015), com tendência a ocupar maior espaço a cada nova safra, em virtude

dos incentivos fiscais disponibilizados para a expansão da fronteira agrícola, a topografia do relevo (permite o uso intensivo da mecanização) e o regime pluviométrico da região favorável aos cultivos de verão, em contraste com frequentes secas ocorrentes na região Sul.

A publicação da Lei de Proteção de Cultivares, em 1997, possibilitou e estimulou a instalação de programas de pesquisa privados no Brasil, que passaram a lançar grande número de cultivares de soja a cada novo ano agrícola. Em virtude disso, nos últimos 15 anos ocorreram grandes mudanças nas lavouras de soja no País, destacando-se, a introdução de cultivares transgênicos, inicialmente com resistência ao herbicida glifosato (SOJA RR) e posteriormente com resistência a algumas espécies de insetos desfolhadores (Soja RR2PRO) e outros mecanismos de ação de herbicidas (Soja Cultivance). Além disso, no RS, a quase totalidade dos agricultores passou a semear cultivares precoces (grupo de maturidade relativa menor que 7.0) e com tipo de crescimento indeterminado, em substituição às cultivares semeadas até os anos 2000, que apresentavam quase na sua totalidade ciclo médio ou longo e tipo de crescimento determinado (BARNI; MATZENAUER, 2000). Destaca-se também que esta crescendo o cultivo de soja “safrinha” no RS. Na região noroeste do RS nos últimos cinco anos foi cultivada uma área de aproximadamente 100 mil ha de soja, normalmente semeados no final de janeiro e início de fevereiro em sucessão a cultura do milho (EMATER, 2015).

Juntamente com a introdução das novas cultivares por empresas privadas no Brasil, a clássica abordagem para descrever maturidade relativa (ciclo precoce, médio e tardio) (ALLIPRANDINI et al., 1994) começou a ser substituída por nova classificação em grupos de maturidade relativa desenvolvida nos Estados Unidos (POEHLMAN, 1987). Essa mudança ocorreu por que a classificação em ciclo precoce, médio e tardio conseguiu descrever de forma adequada apenas a maturidade em um local, mas não foi bem sucedida na descrição da maturidade em gama de ambientes e latitudes que ocorre em toda área de cultivo no Brasil (ALLIPRANDINI et al., 2009). Já a classificação baseada na resposta ao fotoperíodo e área geral de adaptação das cultivares de soja proposta por melhoristas nos EUA permitiu a elaboração de 13 grupos de maturidade relativa que conseguissem representar de forma mais realística os fatores que afetam a maturidade e, conseqüentemente, o número de dias entre a semeadura e a maturidade fisiológica (CAVASSIM et al., 2013). A Monsanto foi a primeira empresa a introduzir o conceito de grupo de maturidade no Brasil (PENARIOL, 2000). O primeiro trabalho científico utilizando a abordagem de grupo de maturidade relativa no Brasil, foi realizada por Alliprandini et al. (2009) num trabalho colaborativo entre obtentores em diversos locais de estudos e cultivares em todo Brasil. Neste trabalho, foi avaliado um grupo

de cultivares comerciais utilizadas pelos agricultores em vários locais no Brasil (diferentes latitudes e altitudes), visando avaliar a interação genótipo x ambiente, e, após, as cultivares foram classificadas de acordo com sua resposta (duração do ciclo de desenvolvimento) em diferentes grupos de maturidade relativa. As cultivares utilizadas nesse estudo são atualmente utilizadas como padrões de referência pelas empresas de melhoramento de soja para a classificação das novas cultivares que são anualmente lançadas no mercado brasileiro.

2.2 CICLO DE DESENVOLVIMENTO E TIPOS DE CRESCIMENTO DA SOJA

O crescimento e o desenvolvimento vegetal são processos relacionados e que geralmente, ocorrem simultaneamente. Desenvolvimento vegetal é o processo no qual células e órgãos passam por vários estádios identificáveis durante o ciclo de vida, como a emissão de uma folha ou flor. O crescimento vegetal é o aumento irreversível em alguma dimensão física da planta ou de um de seus órgãos com o tempo, como o aumento em massa seca ou altura (WILHELM; McMASTER, 1995).

O sistema de descrição dos estádios de desenvolvimento da soja proposto por Fehr et al. (1971) é o mais utilizado no mundo, por ser simples, de fácil entendimento e capaz de descrever um indivíduo ou lavoura, de qualquer cultivar. Este sistema divide o ciclo de desenvolvimento da soja em duas fases, a vegetativa e a reprodutiva, e dentro de cada fase existem os estádios, que são representados pelas letras V e R, respectivamente.

Os estádios vegetativos (V1 a Vn) são determinados pela contagem do número de nós (NN), iniciando pelo par de folhas unifoliadas. O NN é usado para caracterizar a fase vegetativa, definida como o período entre a emergência e o aparecimento do último nó (SETIYONO et al., 2007). Excluindo o nó cotiledonar (VC), por não ser considerada folha verdadeira, os estádios vegetativos são numerados seguindo a sequência V1, V2, V3,... Vn. Utiliza-se o critério da contagem do número de nós para a determinação dos estádios vegetativos porque estes são permanentes, enquanto que as folhas são temporárias. Um nó é contado quando sua folha está completamente desenvolvida. O critério para definir uma folha completamente desenvolvida é quando a folha acima desta não estiver com os bordos dos folíolos se tocando (FEHR et al., 1971).

Os estádios reprodutivos são representados pela letra R e descrevem detalhadamente o início do florescimento até a maturação, sendo descritos em oito estádios (R1 ao R8). O estágio R1 ocorre quando a o aparecimento da primeira flor na haste principal, considerado início do florescimento. O R2 é descrito como florescimento pleno, ou seja, a presença de

uma flor aberta em um dos dois últimos nós da haste principal. Os estádios R3 (início de formação do legume), R4 (legumes completamente desenvolvidos), R5 (início do enchimento de grão) e R6 (legume cheio) são determinados nos últimos quatro nós da haste principal. A maturidade fisiológica é o R7 (um legume na cor madura) e a maturação plena é o R8 (95% dos legumes na cor madura) (FEHR et al., 1971).

Um período importante no ciclo de desenvolvimento da soja é a sobreposição das fases vegetativa e a reprodutiva, determinada pelo período entre o início do florescimento até a emissão do último nó na haste principal (SETIYONO et al., 2007). Bernard (1972) definiu tipo de crescimento em soja de acordo com o momento que cessa o crescimento da haste principal após o início do florescimento. As cultivares com tipo determinado caracterizam-se pelo nulo ou pequeno crescimento em estatura após o início do florescimento. Plantas com tipo indeterminado continuam emitindo nós e alongando o caule após o R1, o que leva a um crescimento significativo em estatura e aumento do número de nós até o início do enchimento de grãos (BASTIDAS et al., 2008). As cultivares semi-determinadas possuem características intermediárias dos dois tipos de crescimento.

Acessos no banco de germoplasma de soja do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos classificou as cultivares fenotipicamente de acordo com o período que essas param de crescer vegetativamente após R1, de “1” (muito determinado) a “5” (muito indeterminado) (BERNARD et al., 1998). As cultivares que apresentaram valores $< 2,0$ e $\geq 2,5$ foram classificadas como determinada e indeterminada, respectivamente. Já as cultivares com valores entre 2,0 e 2,5 foram classificadas como semi-determinada, porém esses valores podem variar de acordo com o ambiente em que as plantas crescem (HEATHERLY; SMITH, 2004). Em condições de fotoperíodo curto ou sob condições adversas de crescimento, pode ser difícil distinguir os tipos de crescimento (BERNARD, 1972).

2.4 ÉPOCA DE SEMEADURA EM SOJA

Experimentos realizados em diferentes condições ambientais demonstram que 80% da variação na produtividade de soja são causadas, pelo ambiente, enquanto apenas 20% da variação ocorrem em virtude dos efeitos de genótipo e da interação genótipo x ambiente (YAN, 2001; ASFAW et al., 2009). Assim, estudos realizados em épocas de semeadura e locais são importantes, pois resultam em alterações das relações hídricas, temperatura, fotoperíodo e radiação solar durante o ciclo de desenvolvimento das plantas, permitindo identificar o papel de cada elemento meteorológico no crescimento, desenvolvimento e na

produtividade das culturas agrícolas. No Rio Grande do Sul, apesar do Zoneamento Agrícola da Soja recomendar semeaduras entre outubro e dezembro, um número significativo de agricultores estão semeando soja desde o final de agosto até o início de fevereiro, reforçando assim a necessidade de realizar estudos básicos de caracterização do crescimento, desenvolvimento e do potencial de rendimento das novas cultivares de soja nesse novo cenário das lavouras de soja no Rio Grande do Sul.

A água está presente em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos, constituindo aproximadamente 90% do peso da planta de soja e atuando como regulador térmico, solvente e transportador de minerais e gases (FARIAS et al., 2009). A deficiência hídrica é o principal fator que limita a obtenção de elevadas produtividades de soja, sendo que a intensidade de redução do rendimento depende da fase do desenvolvimento da cultura em que ocorre o estresse e da duração do estresse hídrico (CUNHA et al., 2001). Na cultura da soja, os períodos mais sensíveis à deficiência hídrica são: germinação-emergência, florescimento e enchimento de grãos (MARCHEZAN, 1982; FARIAS et al., 2009). Sendo assim, a distribuição uniforme das chuvas durante as fases de maior demanda de água (floração) e mais críticas à ocorrência de déficits hídricos (enchimento de grãos) determinam a variabilidade no rendimento de grãos (FARIAS et al., 2009).

Os diferentes graus de sensibilidade à temperatura, fotoperíodo e radiação solar que as cultivares de soja apresentam variam com o genótipo e estágio de desenvolvimento da cultura (SETIYONO et al. 2007; BASTIDAS et al., 2008). Quando se analisa a adaptação dos genótipos de soja às condições de cultivo, a premissa de maior importância é otimizar a produtividade da cultura, fazendo coincidir seus estádios fenológicos críticos com as condições ambientais mais favoráveis, minimizando a ocorrência de períodos de estresse nos estádios mais vulneráveis (KANTOLIC, 2008). O fotoperíodo e a temperatura influenciam diretamente na taxa de desenvolvimento e no número de primórdios reprodutivos formados durante o ciclo da soja, com reflexos sobre a estatura das plantas, duração do ciclo de desenvolvimento e produtividade de grãos (JIANG et al., 2011). A soja é considerada planta de dia curto, ou seja, dias curtos induzem a transformação dos meristemas vegetativos (hastes e folhas) em reprodutivos (primórdios florais) (SINCLAIR et al., 2005). A resposta das plantas de soja a temperatura e ao fotoperíodo não são lineares durante o ciclo de desenvolvimento, sendo este um fator determinante para a adaptação aos diferentes locais e épocas de cultivo (BASTIDAS et al., 2008). A cultura da soja adapta-se melhor às regiões onde as temperaturas do ar oscilam entre 20 e 30°C (FARIAS et al., 2009), e as temperaturas cardinais da soja variam de acordo com a fase de desenvolvimento da cultura (SETIYONO

et al., 2007). A capacidade das plantas interceptarem radiação solar através da área foliar e converterem esta radiação em matéria seca pelo processo fotossintético determinará o máximo rendimento das culturas agrícolas (TAIZ; ZEIGER, 2008). Na cultura da soja, a radiação solar está diretamente relacionada com os processos de fotossíntese, alongação da haste principal e ramificações, expansão foliar, abscisão de legumes e grãos e, fixação biológica de nitrogênio.

2.5 POTENCIAL DE RENDIMENTO EM SOJA

Potencial de rendimento (R_p) é o rendimento de uma cultivar que cresce sem limitações de água, nutrientes e estresses bióticos (plantas daninhas, insetos e doenças) (EVANS, 1993; VAN ITTERSUM et al., 1997), ou seja, a taxa de crescimento é determinada apenas pela radiação solar, temperatura, CO_2 atmosférico e características genéticas. Em culturas de sequeiro, a taxa de crescimento também é limitada por água. Conseqüentemente, o conceito de potencial de rendimento limitado por água (R_a) é semelhante ao R_p , porém influenciado pelo tipo de solo (capacidade de retenção de água e profundidade de enraizamento) e topografia da lavoura, que limitam o fornecimento de água para a cultura (VAN ITTERSUM et al., 2013).

Ambos R_p e R_a são definidos por cultivares, clima, tipo de solo (R_a), e abastecimento de água (R_a), e, assim, tanto R_p e R_a são altamente variáveis entre e dentro das regiões agroclimáticas. Somente é possível ter uma boa estimativa de R_p e R_a quando esses são determinados a partir de estudos em épocas de semeadura, densidade de semeadura e cultivar (grupo de maturidade relativa) recomendados e utilizados pelos agricultores (GRASSINI et al., 2015). Porém, a maioria dos estudos realizados com objetivo de avaliar o potencial de rendimento até a presente data no Rio Grande do Sul são antigos e, na quase totalidade, conduzidos em apenas um local e ano agrícola (THOMAS et al., 1998, RAMBO et al., 2004). Os trabalhos mais recentes para determinar o potencial de rendimento em soja no RS (BATTISTI et al., 2013; SENTELHAS et al., 2015) foram realizados através de estudos

numéricos (KASSAM, 1977), com muitas generalizações, por exemplo assumindo valores padrões de área foliar e de comprimento de ciclo, independente da cultivar, local ou época de semeadura (BATTISTI et al., 2013), ou realizando a estimativa do potencial de rendimento para todo o RS através de modelo agroclimatológico calibrado com dados de apenas um local no RS (SENTELHAS et al., 2015). Portanto, há lacuna de informações em soja no Rio Grande do Sul quando se refere à interação entre época de semeadura, locais, grupo de maturidade relativa e disponibilidade de água ao longo da estação de crescimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 CAPÍTULO 1 – ESTIMATIVA DO GRUPO DE MATURIDADE RELATIVA EM CULTIVARES ANTIGAS E MODERNAS DE SOJA

(Nota técnica submetida à publicação).

Estimativa do grupo de maturidade relativa em cultivares antigas e modernas de soja

Estimating the relative maturity group in old and modern soybean cultivars

Resumo

O objetivo deste estudo foi estimar o grupo de maturidade relativa (GMR) de cultivares antigas e modernas de soja usadas no Sul do Brasil. Experimentos de campo foram realizados durante três anos agrícolas em Santa Maria, Capão do Leão, Júlio de Castilhos, Restinga Sêca e Água Santa no Rio Grande do Sul. Foram estimadas regressões lineares entre o GMR das cultivares padrão e a duração do ciclo de desenvolvimento destas. Essas regressões foram utilizadas para estimar o GMR das cultivares antigas e modernas. O GMR das cultivares que ainda não tinham sido classificadas variou de 4.8 a 7.3. A partir dessa nova metodologia de GMR verifica-se maior precisão na estimativa da duração do ciclo de desenvolvimento das cultivares de soja quando semeadas no período recomendado.

Palavras-chave: *Glycine max*, grupo de maturação, ciclo de desenvolvimento

Abstract

The objective of this study was to estimate the relative maturity group (RMG) of some old and modern soybean cultivars used in Southern Brazil. Field experiments were conducted during three growing seasons in Santa Maria, Capão do Leão, Júlio de Castilhos, Restinga Sêca and Água Santa in Rio Grande do Sul State. There were estimated linear regressions between the RMG standard cultivars and duration of their development cycle. These regressions were used to estimate the RMG of old and modern cultivars. The RMG of these cultivars that had not yet been classified ranged from 4.8 to 7.3. From this new methodology RMG there is a better estimative of the duration of the development cycle of soybean cultivars when sown at the recommended period.

Key-words: *Glycine max*, maturity group, developmental cycle

A partir da publicação da Lei de Proteção de Cultivares, em 1997, ocorreu a instalação de programas de pesquisa por empresas privadas no Brasil, que passaram a lançar grande número de cultivares de soja a cada novo ano agrícola e também propuseram nova classificação quanto ao grupo de maturação (ALLIPRANDINI et al., 2009). A partir de então, a clássica abordagem vigente no Brasil para descrever maturidade em soja (ciclos precoce, médio e tardio) (ALLIPRANDINI et al., 1994) começou a ser substituída por uma nova classificação em grupos de maturidade relativa (GMR) desenvolvida nos Estados Unidos (POEHLMAN, 1987). Essa mudança ocorreu por que a classificação em ciclos conseguiu descrever de forma adequada apenas a maturidade em um local, mas não foi bem sucedida na descrição da maturidade em uma faixa de ambientes e latitudes que ocorre na área onde se cultiva soja no Brasil (ALLIPRANDINI et al., 2009).

A nova classificação em GMR baseada na resposta ao fotoperíodo, manejo e área geral de adaptação das cultivares de soja proposta por melhoristas nos EUA permitiu representar de forma mais realística os fatores que afetam a duração do ciclo de desenvolvimento. No primeiro trabalho científico utilizando a abordagem de GMR no Brasil, ALLIPRANDINI et al. (2009) avaliaram grupo de cultivares comerciais em vários locais (diferentes latitudes e altitudes) visando quantificar a interação genótipo x ambiente, e classificá-las em GMRs de acordo com a duração do ciclo de desenvolvimento. Apesar de avanços na classificação de cultivares de soja quanto à duração do ciclo nos últimos anos, observa-se uma variação no GMR de uma mesma cultivar entre as empresas que vendem sementes de soja. Além disso, algumas cultivares antigas, usadas em vários trabalhos científicos (ZANON et al., 2015) e muito importantes no banco de germoplasma e na história da soja no Brasil não tem classificação nesse novo sistema. O objetivo deste estudo foi estimar o GMR de cultivares antigas e modernas de soja usadas no Sul do Brasil.

Experimentos de campo foram conduzidos durante três anos agrícolas em Santa Maria (2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014) (29°43'S, 53°43'W e 95m), Capão do Leão (2012/2013) (31°52'S, 52°21'W e 13m), e Júlio de Castilhos (29°13'S, 53°40'W e 513m), Restinga Sêca (29°49'S, 53°22'W e 63m), Água Santa (28°10'S, 52°02'W e 650m) em 2013/2014, no Rio Grande do Sul (RS). Estes sítios experimentais estavam localizados nas principais regiões produtoras de soja no RS, ocorrendo assim variação na latitude e altitude, que são fatores que influenciam no número de dias para a maturidade em soja.

Foram utilizadas 13 cultivares de soja, das quais sete (NS 4823 RR, NA 5909 RG, Igra RA 518 RR, Fepagro 36 RR, Bragg, TEC 5936 IPRO e TMG 7161 RR INOX) foram selecionadas por representar diferentes durações do ciclo de desenvolvimento (Figura 1), tipo de crescimento determinado e indeterminado, convencionais e geneticamente modificadas, presença ou ausência de período juvenil longo e ano de lançamento variando de 1967 a 2013. As outras seis cultivares: BMX Energia RR (GMR = 5.5), BMX Turbo RR (GMR = 6.0), IAS 5 (GMR = 6.4), BMX Potencia RR (GMR = 6.7), BRS 246 RR (GMR = 7.2) e CD 219 RR (GMR = 8.2) foram selecionados por serem cultivares padrão, ou seja, cultivares que já tiveram seu GMR estimado em trabalhos anteriores (ALLIPRANDINI et al., 2009, CAVASSIM et al., 2013). Seguindo a metodologia descrita por ALLIPRANDINI et al. (2009) para estimativa do GMR, todas as sementeiras foram realizadas próximas à primeira quinzena de novembro, buscando minimizar o efeito do fotoperíodo na duração do ciclo de desenvolvimento. Além disso, todas as práticas de manejo durante a condução dos experimentos foram realizadas visando minimizar estresses que poderiam interferir na duração do ciclo de desenvolvimento.

Os experimentos de Santa Maria e Capão do Leão foram semeados no delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada bloco continha 17 linhas, sendo duas linhas de bordadura de cada lado. Cada linha continha uma cultivar e teve 3 m de

comprimento. Em Júlio de Castilhos, o experimento tinha três repetições e as parcelas tinham quatro linhas de cada cultivar com 5 m de comprimento. Em Restinga Sêca, Tupanciretã e Água Santa, os experimentos foram conduzidos em lavouras comerciais de soja na forma de parcelas demonstrativas (sem repetição), sendo cada parcela formada por quatro linhas de cada cultivar com 3 m de comprimento. Em todos os experimentos e locais o espaçamento foi de 0,45 m entre fileiras e a densidade de 30 plantas.m⁻². Foi determinado o número de dias da sementeira até a maturação (R8) (FEHR et al., 1971) de todas as cultivares. Após, estimou-se regressões lineares entre o GMR das cultivares padrão e a duração do ciclo de desenvolvimento (semeadura até R8), para cada cultivar, época de sementeira e local, totalizando sete regressões. Essas regressões foram utilizadas para estimar o GMR das outras cultivares em cada época de sementeira e local, conforme preconiza a metodologia para determinação do GMR (ALLIPRANDINI et al., 2009). O GMR de cada cultivar foi considerado como a média dos GMRs em cada ano, época de sementeira e local.

Na Figura 2, estão representadas duas regressões lineares obtidas entre o GMR das cultivares padrão (GMR estimado em estudos anteriores) e a duração em dias do período entre a sementeira e o R8. Na maioria das épocas e locais de sementeira, os coeficientes de determinação foram próximos a 0,90, o que indica confiabilidade na estimativa dos GMR das outras cultivares. O GMR das cultivares antigas e modernas que ainda não tinham sido classificadas nesse novo sistema variou de 4.8 a 7.3 (Tabela 1). Destaque para a cultivar Bragg, antiga e muito utilizada no RS durante as décadas de 1970 e 80 (ZANON et al., 2015), que até o momento não tinha sido classificada. Entre os experimentos, o GMR variou em até ± 0.6 em relação ao GMR médio, indicando pequena variação do GMR em função de local e ano para uma mesma cultivar.

A partir dessa nova metodologia de GMR, verifica-se maior precisão na estimativa da duração do ciclo de desenvolvimento das cultivares de soja quando semeadas próximas à

primeira quinzena de novembro. Porém, apesar dos avanços verificados no novo sistema de classificação das cultivares de soja quanto ao grupo de maturação, o GMR não tem boa precisão em representar a duração do ciclo de desenvolvimento quando as semeaduras são realizadas entre o final de setembro e início de outubro ou após a segunda quinzena de dezembro, ou seja, quando as plantas de soja são expostas a diferentes fotoperíodos da primeira quinzena de novembro. Zanon et al. (2015), estudando o desenvolvimento de cultivares de soja, encontraram duração do ciclo de desenvolvimento similar em cultivares com GMR variando de 4.8 até 8.2 em semeaduras realizadas no final de janeiro e início de fevereiro no Rio Grande do Sul. Isso indica a necessidade de novos estudos que tenham como objetivo entender e classificar as cultivares atualmente semeadas pelos agricultores no Sul do Brasil quanto ao GMR quando semeadas antes ou após o período preferencial.

Referências

- ALLIPRANDINI, L.F. et al. Effects of genotype- environment interaction on soybean yield in the Paraná State. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, p.1433-1444, 1994.
- ALLIPRANDINI, L.F. et al. Understanding soybean maturity groups in brazil: environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science**, v. 49, p.801-808, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2008.07.0390>.
- CAVASSIM, J.E. et al. Stability of soybean genotypes and their classification into relative maturity groups in Brazil. **American Journal of Plant Sciences**, v.4, p.2060-2069, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2013.411258>.
- FEHR, W.R. et al. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science**, v.11, p.929-931, 1971.
- POEHLMAN, J.M. 1987. Breeding soybeans. p.421–450. In J.M. Poehlman (ed.) **Breeding field crops**. 3rd ed. Van Nostrand Reinhold, New York.

ZANON, A.J. et al. Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo de crescimento em terras altas e terras baixas. **Bragantia**, Ahead of print.

<http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0043>



Figura 1. Evolução do ciclo de desenvolvimento no tempo (22/04/2012 (a), 30/04/2012 (b) e 06/05/2012 (c)) de quatro cultivares de soja com diferente grupo de maturidade relativa (GMR) em Santa Maria, Rio Grande do Sul. A semeadura ocorreu em 28/01/2012. Fonte: Bruno Kraulich (*in memoriam*).

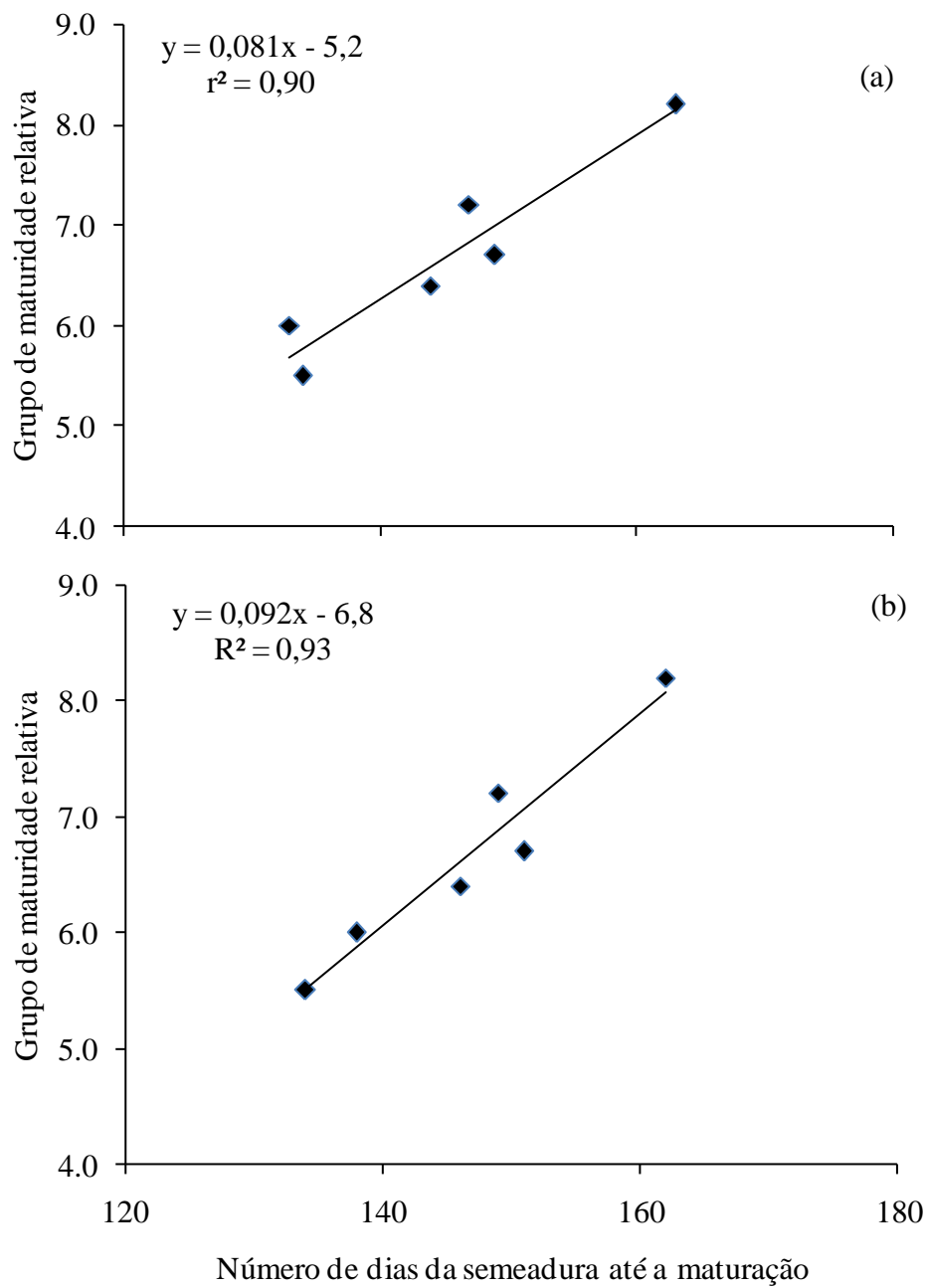


Figura 2. Relação entre grupo de maturidade relativa das cultivares padrão e duração do ciclo de desenvolvimento (semeadura até R8), em dias, nas semeaduras de 03/11/2012 em Santa Maria (a) e 09/11/2012 em Capão do Leão (b), Rio Grande do Sul.

Tabela 1. Grupo de maturidade relativa (GMR) estimado em experimentos semeados em 19/11/2011, 3/11/2012 e 15/11/2013 em Santa Maria (SM), em 9/11/2012 em Capão do Leão (CL), em 14/11/2013 em Restinga Sêca (RS), em 18/11/2013 em Júlio de Castilhos (JC) e em 18/11/2013 em Água Santa (AS) no Rio Grande do Sul.

Estimativa do GMR por experimento								
	SM	SM	CL	SM	RS	JC	AS	GMR
Genótipos	11/12	12/13	12/13	13/14	13/14	13/14	13/14	(variação)
NS 4823 RR	4.6	4.7	4.8	5.2	4.9	4.2	4.9	4.8 (4.2 - 5.2)
NA 5909 RG	6.1	6.5	6.5	6.7	6.0	6.4	6.2	6.3 (6.0 - 6.7)
Igra RA 518 RR	6.6	6.5	6.5	6.8	6.7	6.5	6.6	6.6 (6.5 - 6.8)
Fepagro 36 RR	7.2	7.3	7.4	7.0	7.1	7.1	*	7.2 (7.0 - 7.4)
Bragg	7.5	7.4	7.5	7.3	*	7.3	6.6	7.3 (6.6 - 7.5)
TEC 5936 IPRO	*	*	*	5.9	5.5	5.3	5.5	5.5 (5.3 - 5.9)
TMG 7161 RR	*	*	*	5.6	5.2	5.4	5.6	5.4 (5.2 - 5.6)

*A cultivar não foi semeada nesse local ou ano agrícola.

**3.2 CAPÍTULO 2 – CONTRIBUIÇÃO DAS RAMIFICAÇÕES NA EVOLUÇÃO
DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR EM CULTIVARES MODERNAS DE SOJA**

(Artigo publicado na Revista Bragantia).

1 **Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares**
2 **modernas de soja**

3 Alencar Junior Zanon ⁽¹⁾; Nereu Augusto Streck ^(1*); Gean Leonardo Richter ⁽¹⁾; Camila
4 Coelho Becker ⁽¹⁾; Thiago Schmitz Marques da Rocha ⁽¹⁾; Jossana Ceolin Cera ⁽¹⁾; José
5 Eduardo Minussi Winck ⁽¹⁾; Ânthonny Paz Cardoso ⁽¹⁾; Eduardo Lago Tagliapietra ⁽¹⁾;
6 Patric Scolari Weber ⁽¹⁾

7 ⁽¹⁾ Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Fitotecnia, Avenida
8 Roraima, 1.000, 97105-900 Santa Maria (RS), Brasil.

9 ^(*) Autor correspondente: nstreck2@yahoo.com.br

10 Recebido: 24/dez./2014; Aceito: 18/abr./2015

11
12 **Resumo**

13 Os objetivos neste trabalho foram quantificar a contribuição das ramificações e a
14 evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja de diferentes grupos de
15 maturação, tipos de crescimento, semeadas em diferentes épocas e regiões produtoras de
16 soja no Rio Grande do Sul. Experimentos de campo foram conduzidos durante o ano
17 agrícola 2013/2014 em Santa Maria, Júlio de Castilhos e em três lavouras comerciais de
18 soja nos municípios de Restinga Sêca, Tupanciretã e Água Santa. Avaliaram-se (data de
19 ocorrência) os estágios reprodutivos e a determinação do índice de área foliar total,
20 máximo, da haste principal e das ramificações em treze cultivares de soja. O índice de
21 área foliar das ramificações contribui com cerca de 31%, 12,3% e 11% do índice de área
22 foliar total nas cultivares determinadas, e com 20,2%, 11,8% e 9% do índice de área
23 foliar total nas cultivares indeterminadas nas semeaduras de setembro, novembro e
24 fevereiro, respectivamente, em Santa Maria. A maioria das cultivares apresentou menor
25 índice de área foliar total, máximo, da haste principal e das ramificações com o atraso
26 da época de semeadura, independentemente do grupo de maturação e tipo de
27 crescimento.

28 Palavras-chave: Glycine max, época de semeadura, tipo de crescimento.

29

30 Branches contribution and leaf area index evolution in modern cultivars of soybean

31

32 **Abstract**

33 The purposes of this study were to quantify the branches contribution and the leaf area
34 index evolution in modern cultivars of soybean with different maturity groups, stem
35 termination, sowing in different dates and producing regions of soybean in Rio Grande
36 do Sul. Field experiments were conducted during the growing season 2013/2014 in
37 Santa Maria, Júlio de Castilhos and in three soybean crops on the municipalities of
38 Restinga Sêca, Tupanciretã and Água Santa. It were carried out analysis (occurrence
39 date) of reproductive stages and determination total, maximum, of main stem and of
40 branches of leaf area index in thirteen cultivars of soybean. The leaf area index on the
41 branches contributes with about 31%, 12.3% and 11% of the total leaf area index on the
42 determinate cultivars and with 20.2%, 11.8% and 9% of the total leaf area index on the
43 indeterminate cultivars sowing in September, November and February, respectively, in
44 Santa Maria. Most cultivars showed a reduction on total leaf area index, maximum, of
45 main stem and of branches with the delay on planting date, independently of the
46 maturity group and stem termination.

47 Key words: Glycine max, sowing date, growth type.

48

49

1 INTRODUÇÃO

50 A cultura da soja no Brasil tem tido melhoria contínua de genética e tecnologias
51 de manejo. Entre as principais mudanças no sistema produtivo na região Sul do Brasil,
52 destaca-se o aumento da utilização de cultivares de soja com tipo de crescimento

53 indeterminado e ciclo curto (grupo de maturação entre 4.5 e 7.5) (Richter et al., 2014).
54 Este novo grupo de cultivares começou a ser semeado no Rio Grande do Sul (RS) a
55 partir dos anos 2000 e representou mais de 90% da área semeada com soja no RS no
56 ano agrícola 2013/2014 (Emater, 2014), em contraste com as cultivares de tipo
57 determinado e ciclo médio e tardio, cultivadas desde os primeiros relatos da soja no RS
58 até o final da década de 1990 (Barni & Matzenauer, 2000). A mudança na adoção do
59 tipo de crescimento determinado para indeterminado e, principalmente, a redução da
60 duração do ciclo das cultivares modernas desencadearam ajustes no manejo realizado na
61 cultura da soja desde a década de 1940 no Sul do Brasil (Tian et al., 2010).

62 O máximo rendimento da soja é determinado pela capacidade de as plantas
63 interceptarem radiação solar através do índice de área foliar (IAF) e converterem esta
64 radiação em matéria seca pelo processo fotossintético. O IAF é a relação entre a área
65 foliar (AF) e a área de solo ocupada pelo cultivo (Heiffig et al., 2006). A evolução do
66 IAF ao longo do ciclo de desenvolvimento depende da época de semeadura, genótipo,
67 densidade de plantas, espaçamento entre linhas e manejo fitossanitário. A época de
68 semeadura afeta diretamente a disponibilidade dos elementos meteorológicos ao longo
69 do ciclo de desenvolvimento da soja, que, por sua vez, determinam o período de
70 crescimento vegetativo e a emissão de ramificações nas cultivares de soja (Setiyono et
71 al., 2011). Por exemplo, o atraso na data de semeadura da cultivar IAS 5 em Augusto
72 Pestana (RS), da metade de novembro para o fim de janeiro, provocou a redução do
73 índice de área foliar máximo de 7,5 para 4,3 (Toledo et al., 2010).

74 A caracterização do crescimento vegetativo de cultivares de soja em diferentes
75 condições ambientais permite entender as variações na arquitetura de plantas, visando
76 aumentar o rendimento da cultura através de melhoramento genético e manejo,

77 buscando um ideótipo de estrutura de dossel (Setiyono et al., 2011). Existem poucos
78 trabalhos na literatura com objetivo de entender qual a contribuição das ramificações no
79 IAF da soja semeada em locais e épocas de semeadura (Setiyono et al., 2011). Portanto,
80 estudos regionalizados que descrevam a evolução do crescimento foliar e a contribuição
81 das ramificações ao longo do ciclo e nos principais estágios de desenvolvimento
82 necessitam ser realizados para esse novo grupo de cultivares de soja semeadas no Sul do
83 Brasil. Essa caracterização do IAF em resposta às diferentes disponibilidades
84 meteorológicas poderá auxiliar a assistência técnica e produtores a melhorar as práticas
85 de manejo, visando explorar o potencial genético de cada cultivar. Assim, os objetivos
86 neste trabalho foram quantificar a contribuição das ramificações e a evolução do IAF
87 em cultivares modernas de soja de diferentes grupos de maturação, tipos de
88 crescimento, semeadas em diferentes épocas e regiões produtoras de soja no RS.

89

90

2 MATERIAL E MÉTODOS

91 Experimentos de campo foram conduzidos durante o ano agrícola 2013/2014 na
92 Universidade Federal de Santa Maria, em Santa Maria (29°43'S, 53°43'W e 95m), na
93 Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária – FEPAGRO, em Júlio de Castilhos
94 (29°13'S, 53°40'W e 513m), e em três lavouras comerciais de soja nos municípios de
95 Restinga Sêca (29°49'S, 53°22'W e 63m), Tupanciretã (29°4'S, 53°50'W e 456m) e
96 Água Santa (28°10'S, 52°02'W e 650m) no RS (Figura 1). O clima desses locais,
97 segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical úmido com verões
98 quentes e sem estação seca definida (Kuinchtner & Buriol, 2001).

99

100 Foram utilizadas treze cultivares de soja em cada local, selecionadas por
representarem grupos de maturação (GM) e tipo de crescimento determinado (IAS 5

101 (GM 6.4), FEPAGRO 36 RR (GM 7.1), BRS 246 RR (GM 7.2), Bragg (GM 7.3) e CD
102 219 RR (GM 8.2)) e indeterminado (NS 4823 RR (GM 4.8), TMG 7161 RR Inox (5.4),
103 TEC 5936 IPRO (5.5), BMX Energia RR (5.5), Igra RA 518 RR (6.6), BMX Turbo
104 (GM 6.0), NA 5909 RG (6.3) e BMX Potência RR (6.7)). Das treze cultivares, duas
105 (Bragg e IAS 5) foram cultivadas nas décadas de 1970, 80 e 90 no RS, e as outras onze
106 cultivares vêm sendo cultivadas no RS desde 2005. Em Santa Maria, foram realizadas
107 três datas de semeadura, antes, durante e após o período indicado pelo zoneamento
108 agroclimático para a semeadura da soja enquanto as semeaduras nos outros locais
109 ocorreram dentro do período indicado. A adubação de base, a inoculação e o tratamento
110 de sementes com fungicida e inseticida, e o controle de plantas daninhas, pragas e
111 doenças, foram realizados de acordo com as indicações técnicas da cultura. Em Santa
112 Maria, os experimentos foram conduzidos com irrigação suplementar, de modo que o
113 crescimento e o desenvolvimento das plantas ocorressem sem deficiência hídrica, e nos
114 demais locais não houve irrigação suplementar, para representar as condições das
115 lavouras de soja em cada um dos locais.

116 O delineamento experimental nos experimentos conduzidos em Santa Maria foi
117 blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada bloco continha 17 linhas, sendo duas
118 linhas de bordadura de cada lado. Cada linha continha uma cultivar e teve 3 m de
119 comprimento. Em Júlio de Castilhos, o experimento também foi conduzido em blocos
120 ao acaso, com três repetições, sendo cada parcela formada por quatro linhas de cada
121 cultivar com 5 m de comprimento. Já em Restinga Sêca, Tupanciretã e Água Santa, os
122 experimentos foram conduzidos na forma de parcelas demonstrativas (sem repetição),
123 sendo cada parcela formada por quatro linhas de cada cultivar com 3 m de
124 comprimento. Em todos os locais, o espaçamento foi de 0,45 m entre fileiras e a

125 densidade de 30 plantas m⁻², usado na maioria das lavouras de soja no Rio Grande do
126 Sul (Emater, 2014).

127 A data de emergência foi considerada quando 50% do total de plantas estavam
128 com os cotilédones acima do solo. Logo após a emissão do primeiro par de folhas
129 unifoliadas, foram marcadas com arame colorido as plantas usadas para avaliações de
130 fenologia e área foliar (Tabela 1). Realizaram-se avaliações (data de ocorrência) dos
131 estágios reprodutivos R1, R5 e R8, segundo a escala de Fehr & Caviness (1977). As
132 avaliações de área foliar foram realizadas medindo-se o comprimento e a largura do
133 folíolo central de todas as folhas da haste principal e das ramificações de cada planta.
134 Em Júlio de Castilhos, Tupanciretã, Restinga Sêca e Água Santa fizeram-se apenas duas
135 avaliações de área foliar, com o objetivo identificar o IAF próximo ao início do
136 florescimento (R1) e do início do enchimento de grãos (R5). A área foliar foi calculada
137 a partir das equações genético-específicas, estimadas para cada cultivar por Richter et
138 al. (2014). O IAF verde foi estimado somando-se as áreas individuais de folhas e
139 dividindo-se pela área de solo ocupada por uma planta, em mesma unidade de área.
140 Contou-se o número de ramificações com mais de 0,05 m de 20 plantas de cada cultivar,
141 quando estas encontravam-se no estágio R8. Mais informações sobre o protocolo
142 experimental estão na Tabela 1.

143 Os dados meteorológicos durante o período experimental foram coletados em
144 duas estações meteorológicas automáticas (EMAs) pertencentes ao 8º Distrito de
145 Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (DISME/INMET), localizadas nos
146 municípios de Santa Maria e Passo Fundo, e na estação meteorológica semiautomática
147 pertencente à Fepagro, em Júlio de Castilhos. A EMA de Santa Maria estava localizada
148 a aproximadamente 100 metros da área experimental em Santa Maria e a 30 quilômetros

149 da área experimental de Restinga Sêca. A EMA de Passo Fundo estava localizada a
150 aproximadamente 35 quilômetros da área experimental de Água Santa, e a EMA de
151 Júlio de Castilhos estava localizada a aproximadamente 300 metros da área
152 experimental na Fepagro e a 30 quilômetros da área experimental de Tupanciretã.

153

154

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

Nas duas primeiras datas de semeadura em Santa Maria, as plantas foram expostas às condições de temperatura média (T_{med}) e fotoperíodo crescente no início do ciclo de desenvolvimento e decrescente no restante do ciclo. Na terceira data de semeadura, a T_{med} e o fotoperíodo foram decrescentes durante todo o ciclo. O fotoperíodo a que as plantas de soja foram expostas em Santa Maria variou de 11,1 horas (21/6/2014) a 14,9 horas (21/12/2013). Em virtude de as datas de semeaduras terem sido relativamente próximas em Restinga Sêca (14/11/2013), Tupanciretã (17/11/2013), Júlio de Castilhos (18/11/2013) e Água Santa (3/12/2013), as plantas foram expostas a T_{med} e fotoperíodo crescente no início do ciclo de desenvolvimento e decrescente no restante do ciclo. Considerando a T_{med} durante o ciclo da soja nos experimentos semeados em novembro e dezembro (época recomendada), verificou-se que as plantas foram expostas a maior T_{med} em Santa Maria ($24,3^{\circ}\text{C}$) e Júlio de Castilhos ($24,1^{\circ}\text{C}$), e menor T_{med} em Água Santa ($22,5^{\circ}\text{C}$). Os valores de fotoperíodo variaram de 12,4 horas (8/4/2014) até 14,9 horas (21/12/2013) em Júlio de Castilhos e de 12,4 horas (11/4/2013) a 14,8 horas (21/12/2013) em Passo Fundo. Essa variação na disponibilidade dos elementos meteorológicos promoveu uma variação na evolução do índice de área foliar total (IAF_{total}), no índice de área foliar máximo

172 (IAFmax) e na contribuição do IAF da haste principal (IAFhp) e das ramificações
173 (IAFram) nas datas e locais de semeadura nas 13 cultivares de soja.

174 Nas figuras 2, 3 e 4 (cultivares determinadas) e nas figuras 5, 6 e 7 (cultivares
175 indeterminadas) está representada a evolução do IAFtotal, o IAFhp e o IAFram em três
176 épocas de semeadura (27/9/2013, 15/11/2013 e 6/2/2014) em Santa Maria. A maioria
177 das cultivares apresentou menor IAFmax com o atraso da época de semeadura,
178 independentemente do grupo de maturação e tipo de crescimento. O IAFmax médio das
179 13 cultivares na época 1 foi de 8,9, na época 2 de 7,2 e na época 3 de 3,0. Essa redução
180 do IAFmax ocorreu em virtude do encurtamento do ciclo de desenvolvimento com o
181 atraso da semeadura, que pode ser explicado pelo fato de a soja ser uma planta de dia
182 curto (Sinclair et al., 2005), ou seja, com o atraso da semeadura ocorreu a diminuição do
183 comprimento do dia, e as cultivares foram induzidas mais cedo a florescerem, o que
184 provocou a redução do ciclo de desenvolvimento (Setiyono et al., 2007). As únicas
185 exceções foram as cultivares TEC5936 IPRO e Bragg, que aumentaram o IAFmax da
186 primeira para segunda época de semeadura de 8,2 para 8,4 e 8,6 para 9,8,
187 respectivamente. Os menores IAFmax nessas cultivares na primeira época de semeadura
188 podem ser explicados pela maior sensibilidade ao fotoperíodo. Apesar de a TEC5936
189 IPRO ser cultivar moderna, possivelmente o fotoperíodo a que as plantas foram
190 expostas durante o período crítico de indução floral (V0-R0) (Setiyono et al., 2007)
191 antecipou o início do florescimento na época 1 (Figura 5h), quando comparado com a
192 época 2 (Figura 6h), que por sua vez reduziu o crescimento vegetativo na semeadura de
193 setembro. Já a ausência do gene da juvenilidade (maior sensibilidade ao fotoperíodo) na
194 cultivar Bragg antecipou o florescimento para a semeadura de setembro, e por ser

195 cultivar de tipo de crescimento determinado, teve O crescimento vegetativo cessado
196 rapidamente após o R1 (Bonato et al., 1998).

197 O IAFmax médio das oito cultivares indeterminadas e das cinco cultivares
198 determinadas foi de 8,9 e 10,4 na época 1, de 6,7 e 8,0 na época 2, e de 2,6 e 3,7 na
199 época 3, respectivamente. A hipótese que explica o maior IAFmax médio nas cultivares
200 de tipo determinado deve-se ao fato de essas pertencerem a grupos de maturação
201 maiores, quando comparado às cultivares indeterminadas. Como a maioria das
202 cultivares atualmente semeadas no Sul do Brasil apresentam grupos de maturação baixo
203 (Richter et al., 2014), e conseqüentemente menor IAFmax quando comparado às
204 cultivares antigas (grupos de maturação alto), os assistentes técnicos e os produtores de
205 soja devem ter maior atenção no manejo de insetos desfolhadores. As cultivares
206 determinadas e indeterminadas que apresentaram os maiores e menores valores de
207 IAFmax na semeadura de setembro foram a IAS 5 (12,5), Bragg (8,6) e BMX Potência
208 RR (12,6), NS 4823 RR (4,6), respectivamente. Na época recomendada (novembro), os
209 valores de IAFmax variaram de 9,8 (Bragg) a 7,2 (Fepagro 36 RR) nas determinadas e
210 de 8,4 (TEC 5936 IPRO) a 5,6 (NA 5909 RR) nas indeterminadas. Já na semeadura de
211 fevereiro, os valores de IAFmax foram menores, variando de 4,4 (CD 219 RR) até 2,9
212 (Fepagro 36 RR) nas determinadas e de 3,0 (BMX Potência RR) até 2,0 (NS 4823 RR)
213 nas indeterminadas. Os valores de IAFmax encontrados para a cultivar IAS 5 na
214 semeadura de 15/11/2013 (8,2) e 6/2/2014 (3,5) estão próximos aos valores encontrados
215 com a mesma cultivar semeada em 19/11/2004 (7,6) e 31/1/2006 (4,1) no município de
216 Augusto Pestana/RS (Toledo et al., 2010).

217 Na primeira (27/9/2013) e segunda (15/11/2013) época de semeadura, as
218 cultivares de tipo determinado e indeterminado apresentaram evoluções de IAF distintas

219 ao longo das estações de crescimento. Na semeadura do final de setembro, as cultivares
220 tiveram a maior taxa de crescimento dos 25 dias após a semeadura até por volta do
221 estágio R1 (Figura 2). Já as cultivares indeterminadas apresentaram taxa de crescimento
222 mais lenta, cessando somente próximo ao início do enchimento de grãos (estágio R5) na
223 maioria das cultivares (Figura 5). Na semeadura na época recomendada (novembro), as
224 13 cultivares iniciaram mais rapidamente o desenvolvimento foliar (em torno de 10 dias
225 após a semeadura), e o IAFmax foi atingido na maioria das cultivares determinadas logo
226 após o R1 (Figura 3) e nas indeterminadas próximo ao estágio R5, exceto a BMX
227 Potência RR (Figura 6). Resultados similares foram encontrados por Toledo et al.
228 (2010), que estudando cultivar determinada (IAS 5), em semeadura nos meses de
229 novembro e dezembro no RS, verificou que a velocidade máxima de aumento do IAF
230 entre os estádios V6 e R1. Já na semeadura de 6/2/2014, a máxima taxa de crescimento
231 ocorreu dos 20 dias após a semeadura até próximo ao estágio R5 nas 13 cultivares
232 (Figuras 4 e 7).

233 Independentemente do tipo de crescimento e da época de semeadura, a
234 contribuição da área foliar das ramificações para o IAFtotal iniciou quando as plantas
235 tinham em torno de 4 a 6 folhas na haste principal, o que concorda com Thomas &
236 Mundstock (2005), que determinaram que as ramificações começam a ser emitidas na
237 planta quando esta encontra-se entre os estádios V3 e V5. O IAFhp e o IAFram foram
238 responsáveis por 84,1% e 15,9% do IAFtotal na média das 13 cultivares e três
239 semeaduras em Santa Maria (Tabela 2). De maneira geral, verificou-se que o número
240 (Figura 8) e a contribuição das ramificações no IAF foram menores com o atraso da
241 época de semeadura. Na semeadura em setembro, o IAFram contribuiu com 31% e
242 20,2% nas cultivares determinadas e indeterminadas, respectivamente. Essa

243 contribuição diminuiu para 12,3% na semeadura em novembro e 11% na de fevereiro
244 nas cultivares determinadas, e nas cultivares indeterminadas o decréscimo foi de 11,8%
245 em novembro para 9,0% em fevereiro. A menor contribuição do IAFram está associada
246 ao encurtamento do ciclo de desenvolvimento e à diminuição do número de
247 ramificações com o atraso da semeadura. Destaca-se que a contribuição do IAFram foi
248 muito pequena no IAFtotal da cultivar TMG 7161 RR Inox (Figuras 5g, 6h e 7g), o que
249 pode ser atribuída a característica genética desta cultivar. A caracterização da
250 capacidade de ramificar, e conseqüentemente da contribuição do IAFram no IAFtotal de
251 cada genótipo, é importante para definição de cruzamentos em programas de
252 melhoramento e nas recomendações de manejo (Setiyono et al., 2011), como densidade
253 de semeadura, pois aquelas cultivares que têm menor capacidade de emitir ramificações
254 podem ser semeadas em uma densidade mais elevada.

255 Na Figura 9 estão representados o IAFtotal, o IAFhp e o IAFram próximos aos
256 estágios R1 e R5 de treze cultivares de soja semeadas em Júlio de Castilhos, e em três
257 lavouras comerciais nos municípios de Restinga Sêca, Tupanciretã e Água Santa.
258 Comparando os valores de IAFmax das 13 cultivares do experimento semeado em
259 novembro em Santa Maria com irrigação (Figuras 3 e 6) com os experimentos
260 conduzidos nos outros locais sem irrigação e com datas próximas de semeadura,
261 observa-se que as cultivares semeadas em Santa Maria apresentaram os maiores valores
262 de IAFmax, exceto as cultivares NS 4823RR semeadas em Tupanciretã (Figura 9d),
263 BRS 246 RR semeada em Restinga Sêca (Figura 9c), CD 219 RR semeada em Júlio de
264 Castilhos (Figura 9b) e a cultivar TMG 7161 RR Inox semeada em Júlio de Castilhos e
265 Restinga Sêca (Figura 9b e 9c). A explicação para o maior IAFmax ter ocorrido no
266 experimento em Santa Maria é a provável deficiência hídrica nos experimentos em Júlio

267 de Castilhos e nas lavouras comerciais em Restinga Sêca, Tupanciretã e Água Santa ao
268 longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, mas principalmente na fase vegetativa da
269 soja. Em Júlio de Castilhos e Tupanciretã, choveu apenas 6 mm no período de
270 27/1/2014 até 18/02/2014. Já em Restinga Sêca, choveu 28 mm de 14/12/2013 até
271 7/1/2014, e em Água Santa registraram-se apenas 16 mm entre 10/12/2013 e 1/1/2014.
272 A perda de turgor celular é o primeiro efeito do estresse hídrico, que provocou redução
273 da área foliar devido à restrição do crescimento das folhas durante a deficiência hídrica
274 (Taiz & Zeiger, 2006). Além disso, nos experimentos em Júlio de Castilhos, Restinga
275 Sêca e Tupanciretã, o maior IAF_{max} foi registrado próximo do estágio R1 na maioria
276 das cultivares e, após, verificou-se queda no valor de IAF_{max} até o estágio R5, exceto
277 nas cultivares BMX Potência RR, BRS 246 RR, Bragg e CD 219 RR em Júlio de
278 Castilhos, e a cultivar Bragg em Tupanciretã. Essa redução no IAF_{max}, principalmente
279 nas cultivares indeterminadas, comparada com o que ocorreu no experimento com
280 irrigação (Santa Maria), também pode ser atribuída à deficiência hídrica durante o
281 desenvolvimento da soja. Além da perda de turgor das células, o estresse por falta de
282 água faz com que as raízes enviem sinais químicos promovendo o aumento da
283 concentração de ácido abscísico nas folhas (Taiz & Zeiger, 2006), que causa a queda
284 precoce destas, diminuindo assim a área foliar total.

285 O menor IAF das cultivares atualmente semeadas (indeterminada e grupos de
286 maturação baixo), quando comparado às cultivares tradicionalmente semeadas no Sul
287 do Brasil até os anos 2000 (tipo determinado e grupo de maturação maior que 6.5), em
288 condições sem deficiência hídrica, obtidas neste trabalho, comprovam a evolução
289 genética da cultura da soja. Mesmo com menor IAF, o rendimento médio da soja no Sul

290 do Brasil atualmente é maior (3,0 Mg ha⁻¹) do que antes dos anos 2000 (2,1 Mg ha⁻¹)
291 (Emater, 2014), ou seja, as cultivares modernas são mais eficientes.

292

293 **4 CONCLUSÃO**

294 O IAFram contribui com cerca de 31%, 12,3% e 11% do IAFtotal nas cultivares
295 determinadas e com 20,2%, 11,8% e 9% do IAFtotal nas cultivares indeterminadas na
296 semeaduras de setembro, novembro e fevereiro, respectivamente, em Santa Maria.

297 Há redução dos valores de IAFmax, IAFhp e IAFram com o atraso da época de
298 semeadura, independentemente do grupo de maturação e tipo de crescimento,
299 demonstrando assim, a necessidade de adequar as recomendações de manejo de pragas
300 em função da época de semeadura.

301 Nas semeaduras de setembro e novembro, as cultivares de tipo determinado
302 apresentam o IAFmax próximo de R1, enquanto as cultivares indeterminadas
303 apresentam o IAFmax próximo de R5. Já na semeadura de fevereiro, todas as cultivares
304 apresentam o IAFmax próximo de R5.

305

306 **REFERÊNCIAS**

307 <jrn>Barni, N. A., & Matznauer, R. (2000). Ampliação do calendário de semeadura da
308 soja no Rio Grande do Sul pelo uso de cultivares adaptados aos distintos
309 ambientes. Pesquisa Agropecuária Gaúcha, 6, 189-203.</jrn>

310 <jrn>Bonato, E. R., Bertagnolli, P. F., Ignaczak, J. C., Tragnago, J. L., & Rubin, S. A. L.
311 (1998). Desempenho de cultivares de soja em três épocas de semeadura, no Rio Grande
312 do Sul. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 33, 879-884.</jrn>

- 313 <eref>Emater (2014). Levantamento de área semeada com soja no Rio Grande do Sul.
314 Porto Alegre: Emater. Recuperado em 20 de dezembro de 2014, de
315 [http://www.emater.tche.br/site/servicos/informacoes-](http://www.emater.tche.br/site/servicos/informacoes-agropecuarias.php#.VYrxQpB0zIU)
316 [agropecuarias.php#.VYrxQpB0zIU.](http://www.emater.tche.br/site/servicos/informacoes-agropecuarias.php#.VYrxQpB0zIU)</eref>
- 317 <report>Fehr, W. R., & Caviness, C. E. (1977). Stages of soybean development
318 (Special Report, 80). Ames: Iowa State University of Science and Technology. 15
319 p.</report>
- 320 <jrn>Heiffig, L. S., Câmara, G. M. S., Marques, L. A., Pedroso, D. B., & Piedade, S. M.
321 S. (2006). Fechamento e índice de área foliar da cultura da soja em diferentes arranjos
322 espaciais. *Bragantia*, 65, 285-295. [http://dx.doi.org/10.1590/S0006-](http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052006000200010)
323 [87052006000200010.](http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052006000200010)</jrn>
- 324 <jrn>Kuinchner, A., & Buriol, G. A. (2001). Clima do Estado do Rio Grande do Sul
325 segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. *Disciplinarum Scientia*, 2,
326 171-182.</jrn>
- 327 <jrn>Richter, G. L., Zanon, A., Jr., Streck, N. A., Guedes, J. V. C., Kräulich, B., Rocha,
328 T. S. M., Winck, J. E. M., & Cera, J. C. (2014). Estimativa da área de folhas de
329 cultivares antigas e modernas de soja por método não destrutivo. *Bragantia*, 73, 416-
330 425. [http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0179.](http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0179)</jrn>
- 331 <jrn>Setiyono, T. D., Weiss, A., Specht, J. E., Bastidas, A. M., Cassman, K. G.,
332 & Dobermann, A. (2007). Understanding and modeling the effect of temperature and
333 daylength on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*,
334 100, 257-271. [http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.011.](http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.011)</jrn>
- 335 <jrn>Setiyono, T. D., Bastidas, A. M., Cassman, K. G., Weiss, A., Dobermann, A., &
336 Specht, J. E. (2011). Nodal leaf area distribution in soybean plants grown in high yield

337 environments. *Agronomy Journal*, 103, 1198-1205.

338 <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2011.0051>.</jrn>

339 <jrn>Sinclair, T. R., Neumaier, N., Farias, J. R. B., & Nepomuceno, A. L. (2005).

340 Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low latitude

341 environments. *Field Crops Research*, 92, 53-59.

342 <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2004.08.008>.</jrn>

343 <bok>Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Plant physiology* (4th ed.). Sunderland: Sinauer

344 Associates. 764 p.</bok>

345 <jrn>Thomas, A. L., & Mundstock, C. M. (2005). *Soja: fatores que afetam o*

346 *crescimento e o rendimento de grãos*. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio

347 Grande do Sul, Evangraf. 31 p.</jrn>

348 <jrn>Tian, Z., Wang, X., Lee, R., Li, Y., Specht, J. E., Nelson, R. L., McClean, P. E.,

349 Qiu, L., & Ma, J. (2010). Artificial selection for determinate growth habit in

350 soybean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of*

351 *America*, 107, 8563-8568. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1000088107>.

352 [PMid:20421496](http://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20421496/).</jrn>

353 <jrn>Toledo, N. T., Muller, A. G., Berto, J. L., & Mallmann, C. E. S. (2010). Ajuste do

354 modelo fototérmico de estimativa do desenvolvimento e do índice de área foliar de soja.

355 *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14, 288-295.</jrn>

356

357

358

359

360

361

362 Tabela 1. Local de condução, data de semeadura, textura do solo, número de plantas e
 363 frequência de avaliação de fenologia e área foliar dos experimentos conduzidos no Rio
 364 Grande do Sul no ano agrícola 2013/2014.

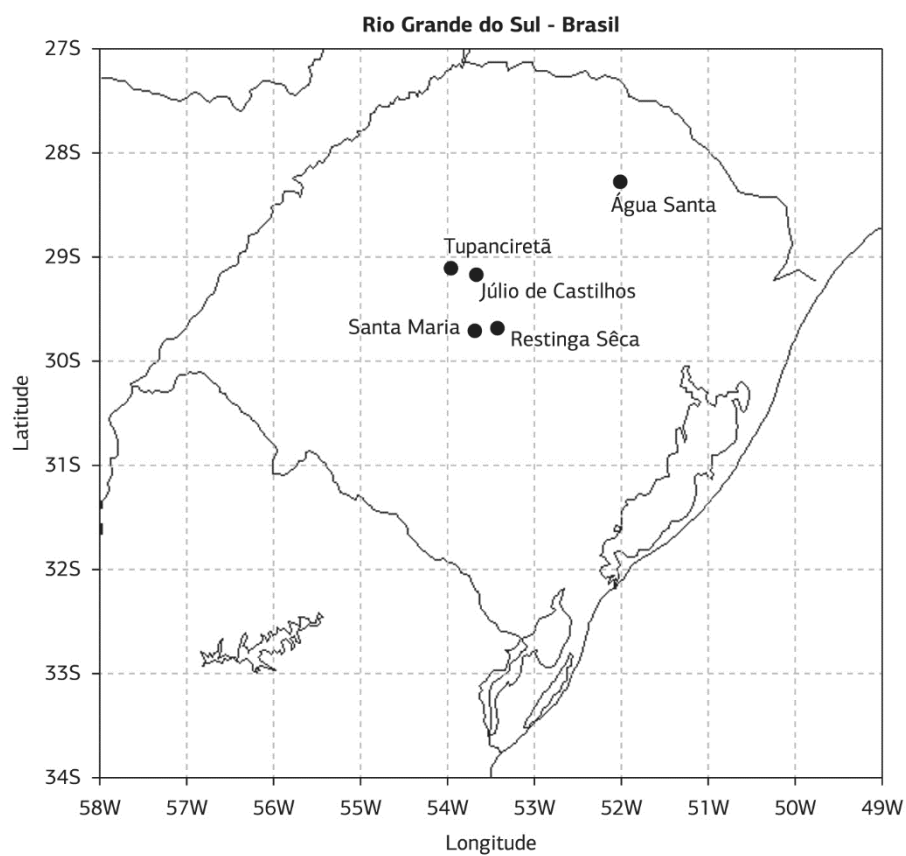
Local	Data de semeadura	Textura do solo	Plantas avaliadas		Frequência das avaliações	
			Fenologia	Área foliar	Fenologia	Área foliar
Santa Maria	27/09/2013	Franco	20	4	Diária	Quinzenal
	15/11/2013		20	4	Diária	Quinzenal
	19/02/2014		20	4	Diária	Quinzenal
Júlio de Castilhos	18/11/2013	Argila arenosa	30	3	3-4 dias	Estádios R1 e R5
Restinga Sêca	14/11/2013	Franco	10	3	2-3 dias	Estádios R1 e R5
Tupanciretã	17/11/2013	Argila	10	3	10 dias	Estádios R1 e R5
Água Santa	03/12/2013	Muito argiloso	10	3	15 dias	Estádios R1 e R5

365

366 Tabela 2. Porcentagem do índice de área foliar total que está na haste principal e nas
 367 ramificações nas 13 cultivares de soja, nas três datas de semeadura em Santa Maria, RS,
 368 no ano agrícola 2013/2014.

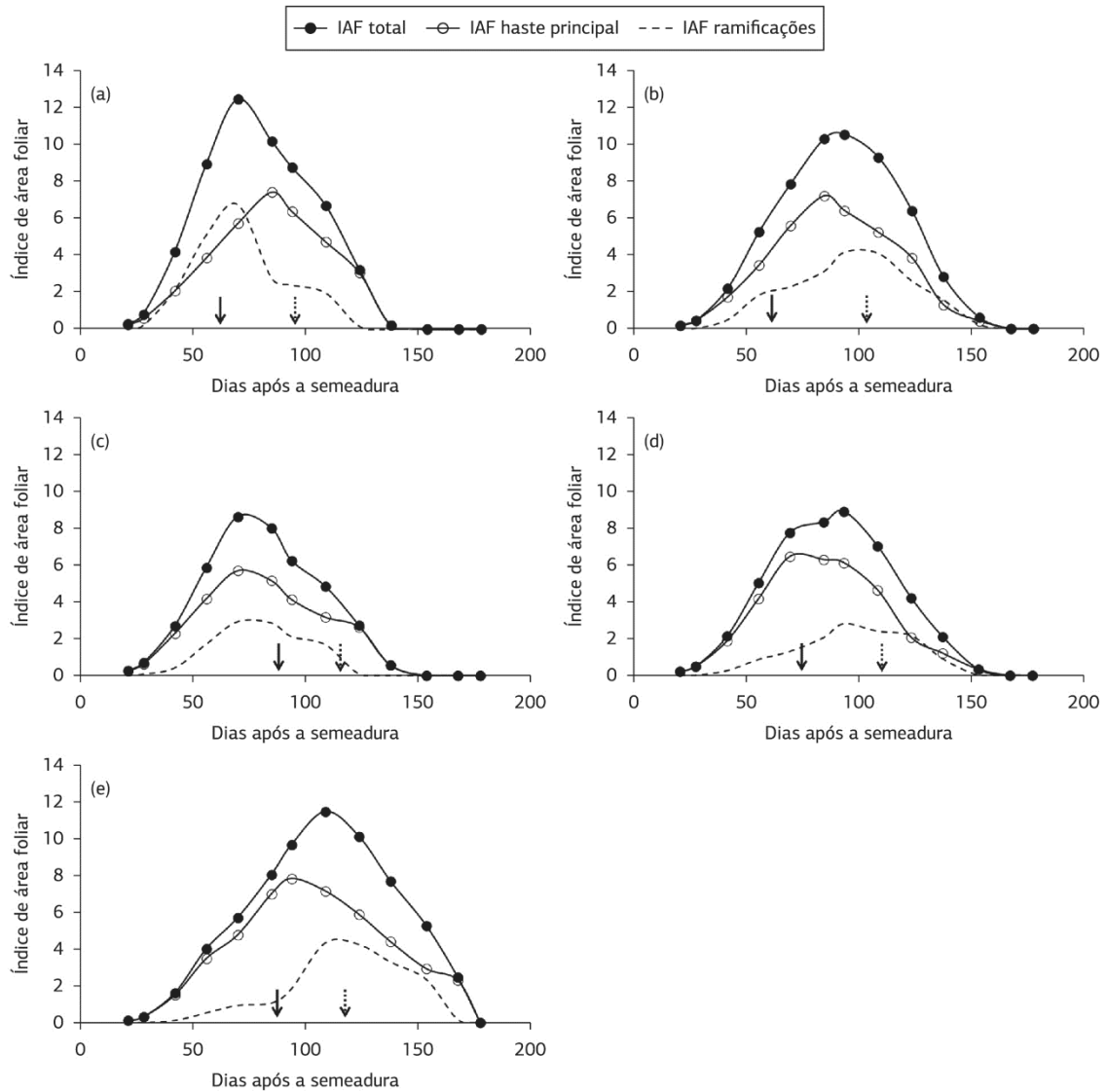
Cultivar	27/09/2013		15/11/2013		19/02/2014	
	HP	RAM	HP	RAM	HP	RAM
NS 4823 RR	77,9	22,1	89,8	10,3	90,6	9,4
BMX Energia RR	89,5	10,5	88,2	11,8	92,0	8,0
Igra RA 518 RR	81,4	18,6	86,3	13,7	92,3	7,7
BMX Turbo RR	84,0	16,0	91,5	8,5	87,4	12,6
NA 5909 RG	68,8	31,2	82,1	17,9	84,0	16,0
TMG 7161 RR Inox	97,1	2,9	100,0	0,0	95,0	5,0
TEC 5936 IPRO	85,9	14,1	80,1	20,0	94,3	5,7
BMX Potência RR	53,9	46,1	87,9	12,1	92,6	7,4
Média Indeterminada	79,8	20,2	88,2	11,8	91,0	9,0
IAS 5	62,8	37,2	82,9	17,1	88,2	11,8
Fepagro 36 RR	64,0	36,0	91,8	8,2	94,4	5,6
BRS 246 RR	76,1	23,9	91,3	8,7	86,4	13,6
Bragg	70,8	29,2	77,0	23,0	76,5	23,5
CD 219 RR	71,4	28,6	95,6	4,4	99,6	0,4
Média Determinada	69,0	31,0	87,7	12,3	89,0	11,0
Média total	74,4	25,6	88,0	12,0	90,0	10,0

369 HP: Área foliar da haste principal. RAM: Área foliar das ramificações.



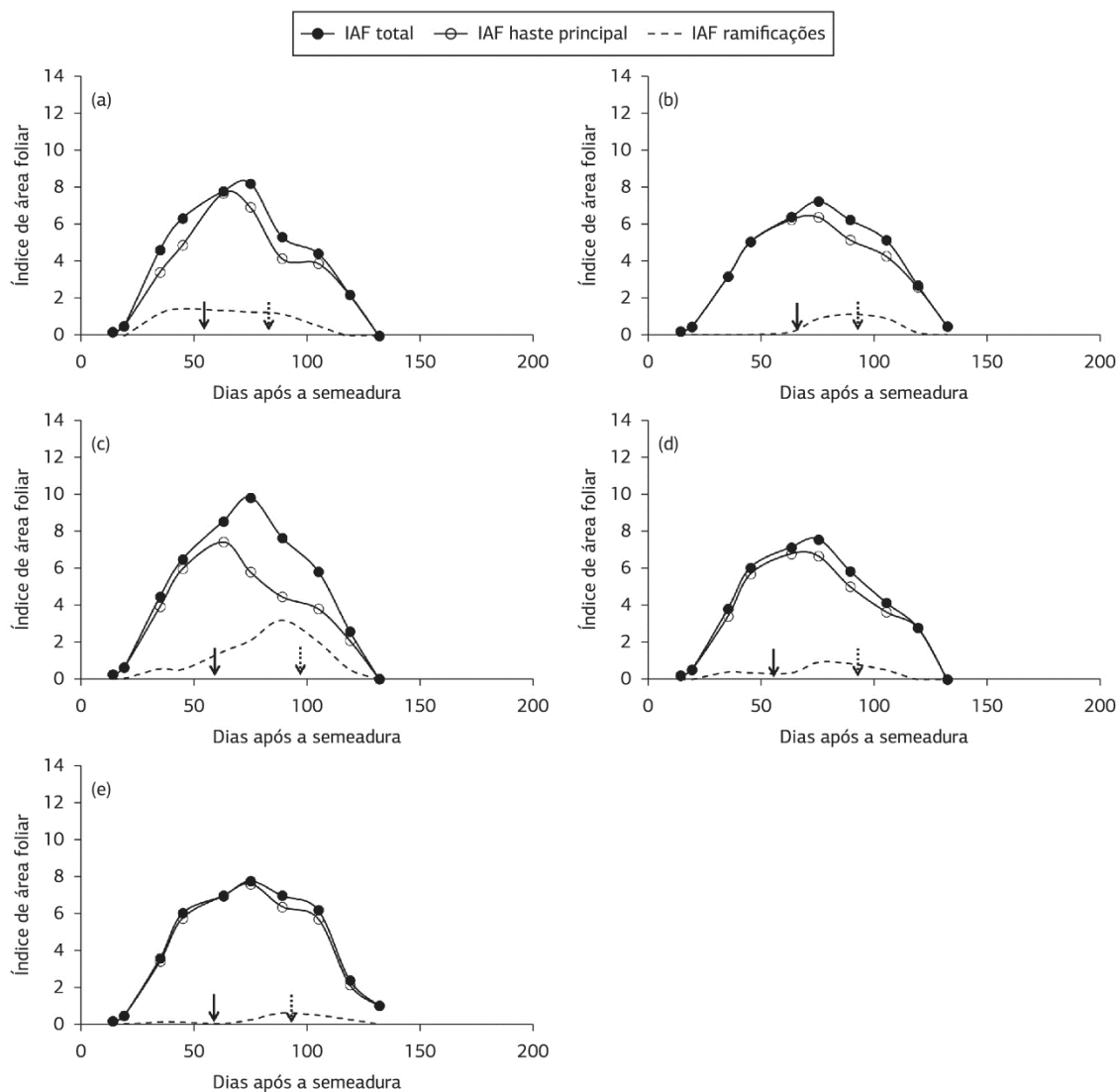
370

371 Figura 1. Mapa do Rio Grande do Sul com os locais onde foram conduzidos
372 experimentos com a cultura da soja no ano agrícola 2013/2014, RS, 2014.



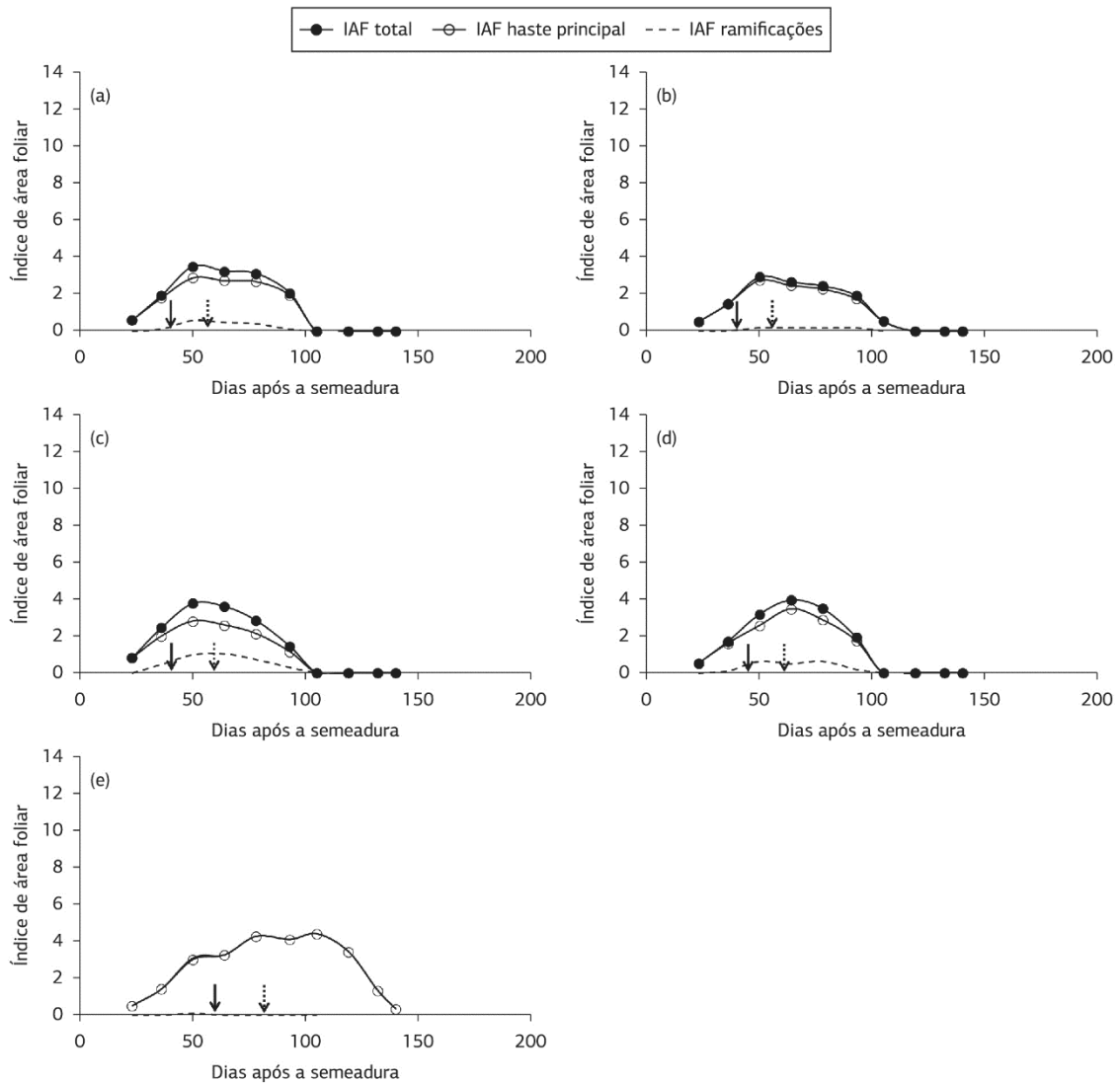
373

374 Figura 2. Evolução do índice de área foliar total (IAFtotal), na haste principal (IAF
 375 haste principal) e nas ramificações (IAF ramificações) das cultivares de soja de tipo de
 376 crescimento determinado (a) IAS 5, (b) Fepagro 36 RR, (c) Bragg, (d) BRS 246 RR e
 377 (e) CD 219 semeadas em 27/09/2013. A seta contínua indica o estágio R1 e a seta
 378 tracejada indica o estágio R5. Santa Maria, 2013-2014.



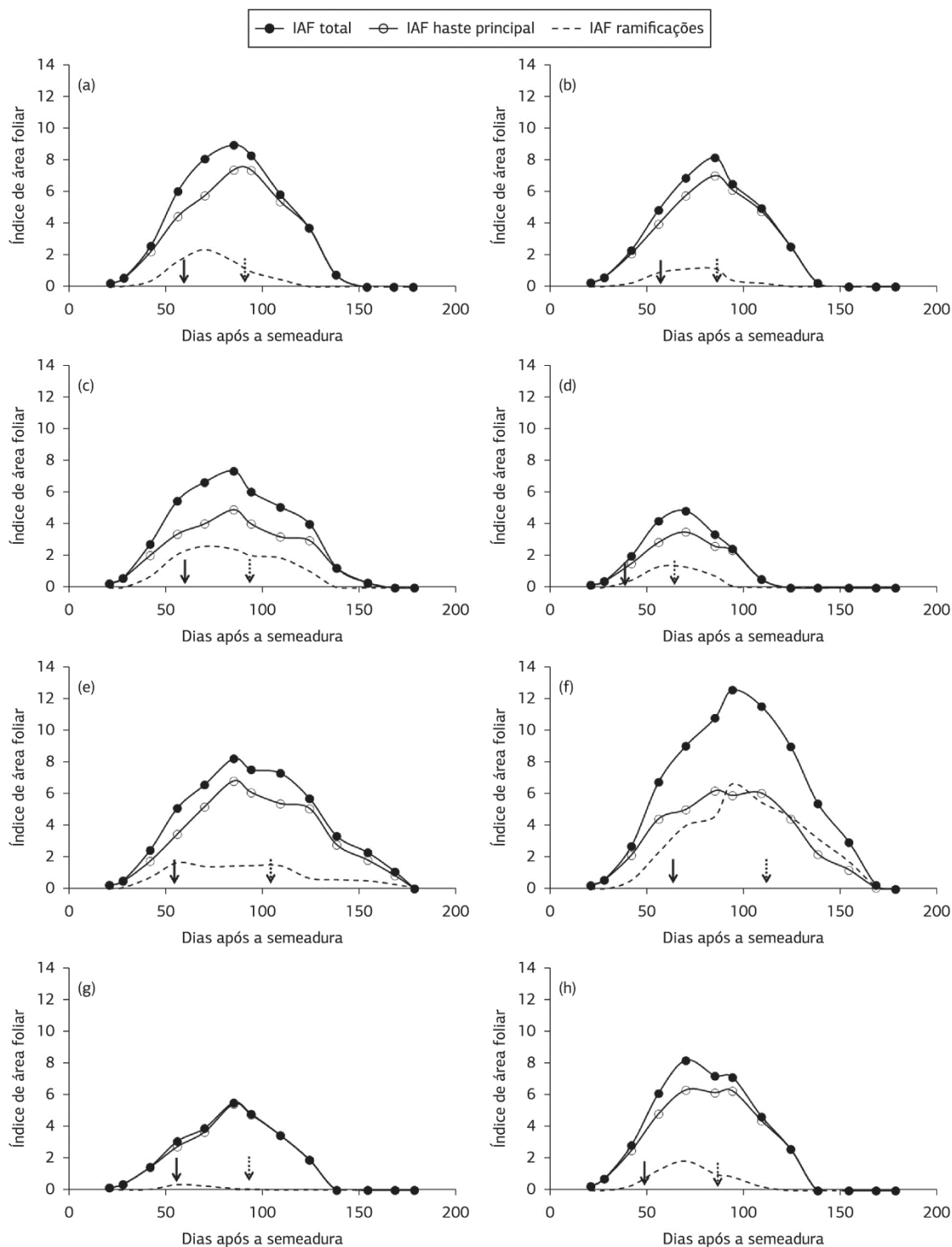
379

380 Figura 3. Evolução do índice de área foliar total (IAFtotal), na haste principal (IAF
 381 haste principal) e nas ramificações (IAF ramificações) das cultivares de soja de tipo de
 382 crescimento determinado (a) IAS 5, (b) Fepagro 36 RR, (c) Bragg, (d) BRS 246 RR e
 383 (e) CD 219 semeadas em 15/11/2013. A seta contínua indica o estágio R1 e a seta
 384 tracejada indica o estágio R5. Santa Maria, 2013-2014.



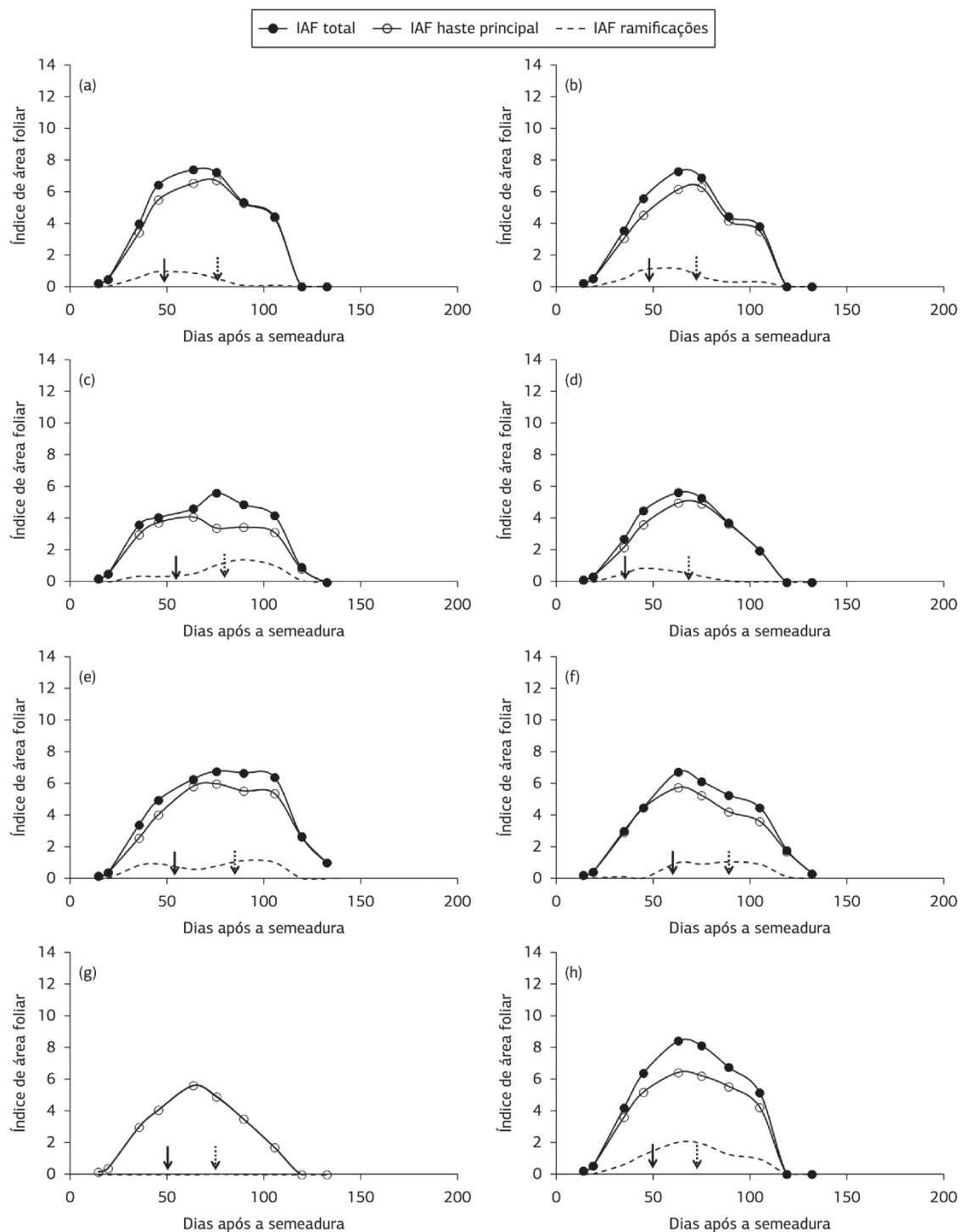
385

386 Figura 4. Evolução do índice de área foliar total (IAFtotal), na haste principal (IAF
 387 haste principal) e nas ramificações (IAF ramificações) das cultivares de soja de tipo de
 388 crescimento determinado (a) IAS 5, (b) Fepagro 36 RR, (c) Bragg, (d) BRS 246 RR e
 389 (e) CD 219 semeadas em 19/02/2014. A seta contínua indica o estágio R1 e a seta
 390 tracejada indica o estágio R5. Santa Maria, 2013-2014.



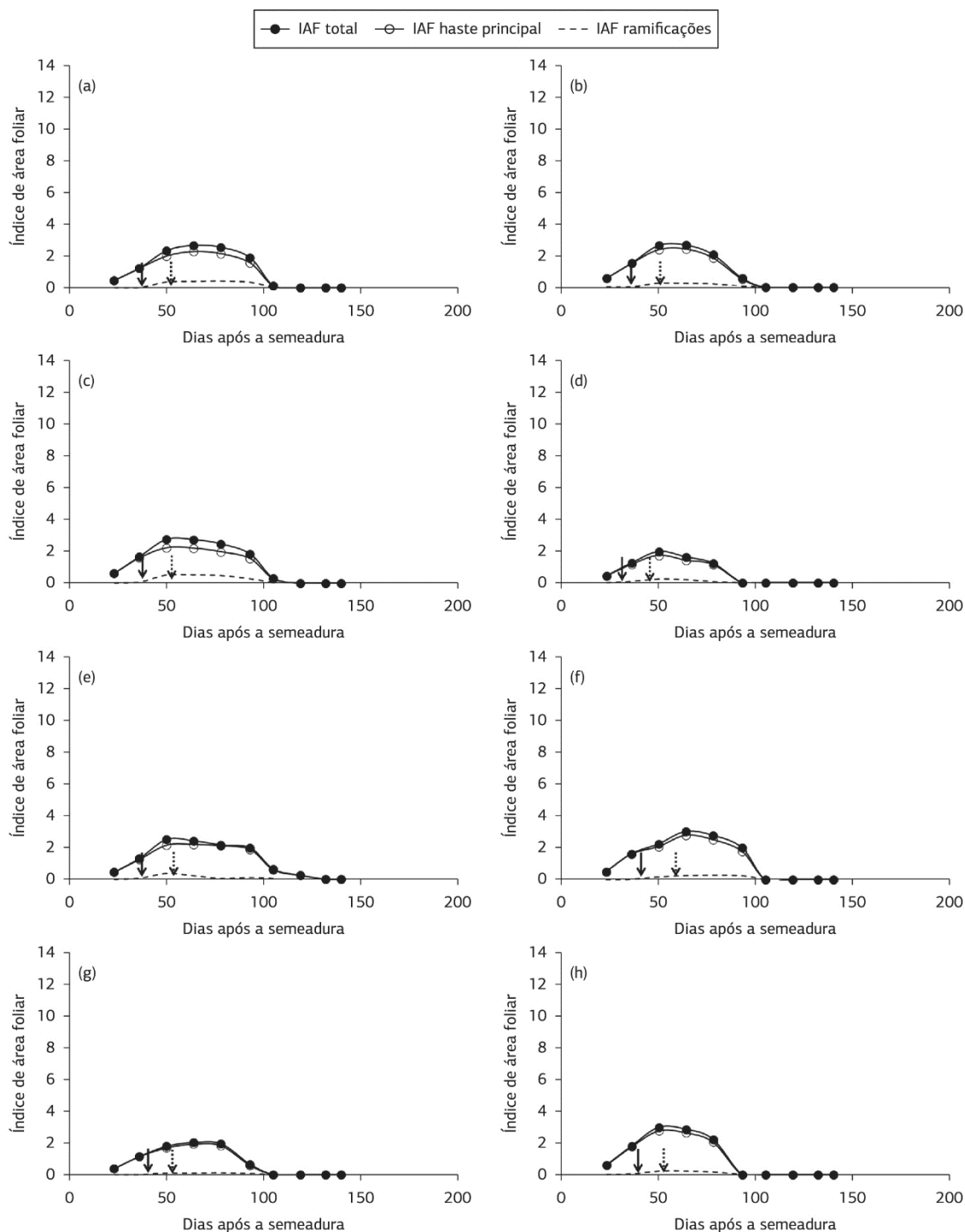
391

392 Figura 5. Evolução do índice de área foliar total (IAFtotal), na haste principal (IAF
 393 haste principal) e nas ramificações (IAF ramificações) das cultivares de soja de tipo de
 394 crescimento indeterminado (a) BMX Turbo RR, (b) BMX Energia RR, (c) NA 5909
 395 RR, (d) NS 4823 RR, (e) Igra 518 RR, (f) BMX Potência RR, (g) TMG 7161 RR Inox e
 396 (h) TEC 5936 IPRO semeadas em 27/09/2013. A seta contínua indica o estágio R1 e a
 397 seta tracejada indica o estágio R5. Santa Maria, 2013-2014.



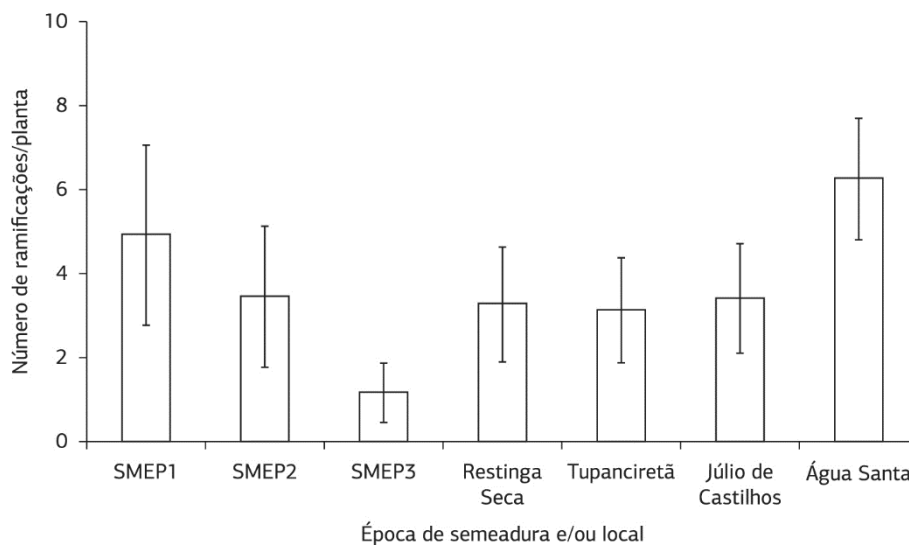
398

399 Figura 6. Evolução do índice de área foliar total (IAFtotal), na haste principal (IAF
 400 haste principal) e nas ramificações (IAF ramificações) das cultivares de soja de tipo de
 401 crescimento indeterminado (a) BMX Turbo RR, (b) BMX Energia RR, (c) NA 5909
 402 RR, (d) NS 4823 RR, (e) Igra 518 RR, (f) BMX Potência RR, (g) TMG 7161 RR Inox e
 403 (h) TEC 5936 IPRO semeadas em 15/11/2013. A seta contínua indica o estágio R1 e a
 404 seta tracejada indica o estágio R5. Santa Maria, 2013-2014.



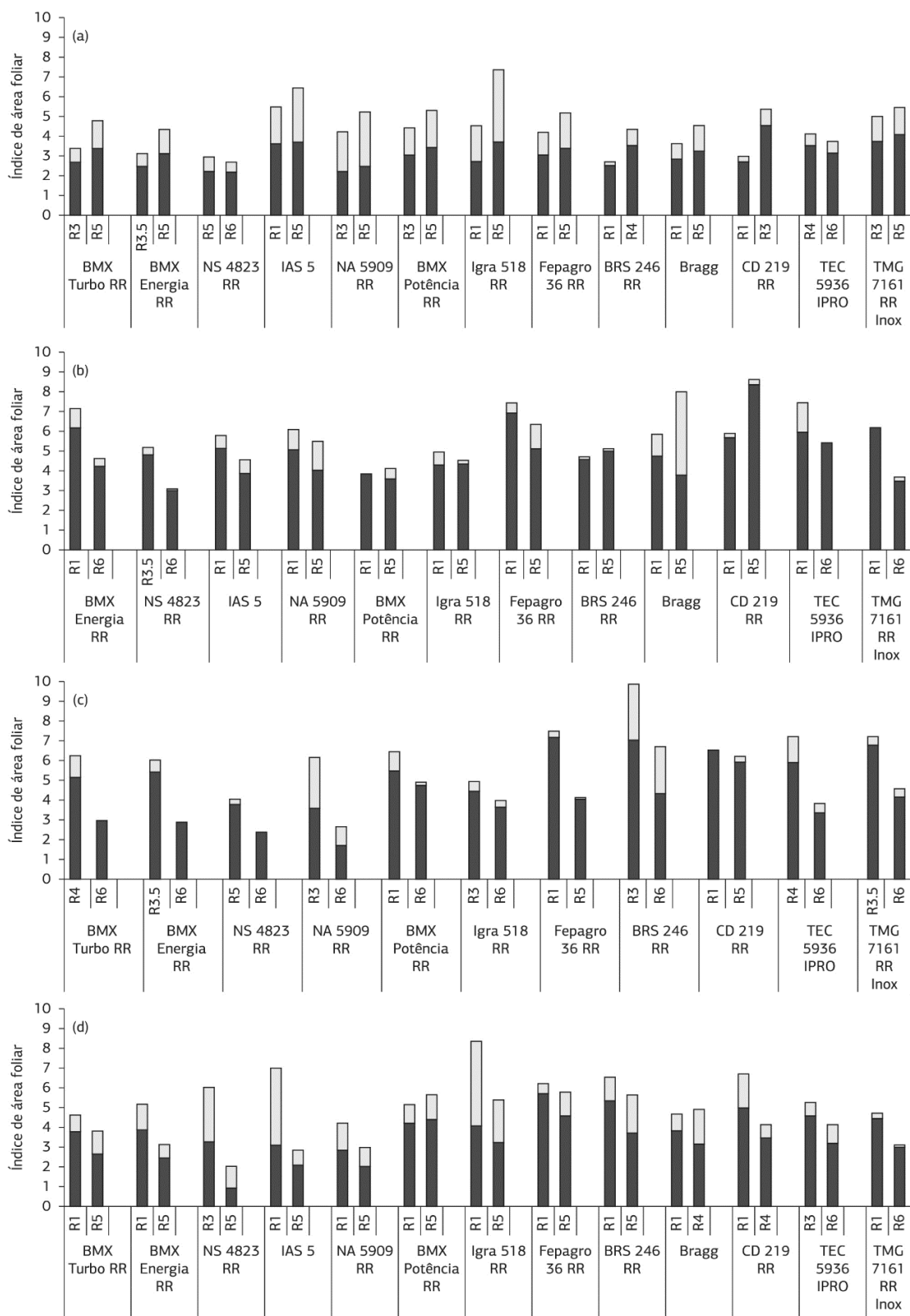
405

406 Figura 7. Evolução do índice de área foliar total (IAFtotal), na haste principal (IAF
 407 haste principal) e nas ramificações (IAF ramificações) das cultivares de soja de tipo de
 408 crescimento indeterminado (a) BMX Turbo RR, (b) BMX Energia RR, (c) NA 5909
 409 RR, (d) NS 4823 RR, (e) Igra 518 RR, (f) BMX Potência RR, (g) TMG 7161 RR Inox e
 410 (h) TEC 5936 IPRO semeadas em 19/02/2014. A seta contínua indica o estágio R1 e a
 411 seta tracejada indica o estágio R5. Santa Maria, 2013-2014.



412

413 Figura 8. Número de ramificações médio de treze cultivares de soja (BMX Turbo RR,
 414 BMX Energia RR, NA 5909 RR, NS 4823 RR, Igra 518 RR, BMX Potência RR, TMG
 415 7161 RR Inox, TEC 5936 IPRO, IAS 5, Fepagro 36 RR, Bragg, BRS 246 RR e CD 219
 416 RR) semeadas em 27/09/2013 (SMEP1), 15/11/2013 (SMEP2) e 19/02/2014 (SMEP3)
 417 em Santa Maria, 14/11/2013 em Restinga Sêca, 17/11/2013 em Tupanciretã, 18/11/2013
 418 em Júlio de Castilhos e 03/12/2013 em Água Santa no ano agrícola 2013-2014, RS.



419

420 Figura 9. Índice de área foliar na haste principal (barra sólida) e nas ramificações (barra
 421 vazada) de treze cultivares de soja semeadas em Água Santa (a), Júlio de Castilhos (b),
 422 Restinga Sêca (c) e Tupanciretã (d), RS, 2013-2014. * No experimento em Júlio de
 423 Castilhos e Restinga Sêca não foram realizadas avaliações nas cultivares BMX Turbo
 424 RR e Bragg, IAS 5, respectivamente.

**3.3 CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO EM CULTIVARES DE SOJA EM
FUNÇÃO DO GRUPO DE MATURAÇÃO E TIPO DE CRESCIMENTO EM
TERRAS ALTAS E TERRAS BAIXAS**

(Artigo publicado na Revista Bragantia)

1 **Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo de**
2 **crescimento em terras altas e terras baixas**

3
4 Alencar Junior Zanon ⁽¹⁾; José Eduardo Minussi Winck ⁽¹⁾; Nereu Augusto Streck ^(1*);
5 Thiago Schmitz Marques da Rocha ⁽¹⁾; Jossana Ceolin Cera ⁽¹⁾; Gean Leonardo Richter
6 ⁽¹⁾; Isabel Lago ⁽¹⁾; Patrícia Marques dos Santos ⁽²⁾; Leandro da Rosa Maciel ⁽²⁾; Jerson
7 Vanderlei Carús Guedes ⁽³⁾; Enio Marchesan ⁽¹⁾

8 ⁽¹⁾ Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Fitotecnia, Avenida
9 Roraima, 1.000, 97105-900 Santa Maria (RS), Brasil.

10 ⁽²⁾ Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
11 (FAEM), Departamento de Fitotecnia, Campus Universitário s/n, 96010-610 Capão do
12 Leão (RS), Brasil.

13 ⁽³⁾ UFSM, Departamento de Defesa Fitossanitária, 97105-900 Santa Maria (RS), Brasil.

14 (*) Autor correspondente: nstreck2@yahoo.com.br

15 Recebido: 31/jan./2015; Aceito: 8/maio/2015
16

17 **Resumo**

18 O objetivo deste trabalho foi caracterizar o desenvolvimento de cultivares de soja com
19 diferentes grupos de maturação e tipos de crescimento em terras altas e terras baixas no
20 Rio Grande do Sul. Foram conduzidas nove épocas de semeadura em Santa Maria
21 (ambiente de terras altas) e uma época de semeadura em Capão do Leão (ambiente de
22 terras baixas) durante os anos agrícolas 2010/2011, 2011/2012 e 2012/2013, com 11
23 cultivares de soja. O delineamento experimental em todos os experimentos foi blocos ao
24 acaso, em parcelas subdivididas. Foi quantificada a duração, em °C dia, do ciclo de
25 desenvolvimento, da fase vegetativa e reprodutiva, e do período entre a data que ocorreu
26 o início do florescimento e o número final de nós para todas as épocas e locais de
27 semeadura. Houve redução da duração da fase reprodutiva, do ciclo total de
28 desenvolvimento (exceto algumas cultivares semeadas em setembro), com o atraso da
29 data de semeadura independentemente do grupo de maturação e tipo de crescimento. As
30 semeaduras de setembro, janeiro e fevereiro promovem redução da fase vegetativa na
31 maioria das cultivares quando comparadas com a época recomendada (novembro e

32 dezembro). Cultivares indeterminadas apresentam maior período de sobreposição das
33 fases vegetativa e reprodutiva do que as cultivares determinadas em todas as épocas e
34 locais de cultivo. O desenvolvimento da soja é similar quando cultivada em terras altas
35 e terras baixas.

36 Palavras-chave: *Glycine max*, época de semeadura, fenologia.

37

38 Development of soybean cultivars as a function of maturity group and growth type in
39 high lands and in lowlands

40 **Abstract**

41 The objective of this study was to characterize the development of soybean cultivars
42 with different maturity group, and growth types grown in highlands and in lowlands in
43 Rio Grande do Sul State. Field experiments were conducted in Santa Maria (highland)
44 and Capão do Leão (lowland) during the 2010/2011, 2011/2012 and 2012/2013 growing
45 seasons, with 11 treatments (soybean cultivars). Nine sowing dates were conducted in
46 Santa Maria and one in Capão do Leão. The experimental design in all experiments was
47 a randomized block design with split plots. The duration of the development cycle,
48 vegetative and reproductive phases, and the period between the date that was the final
49 number of nodes and early flowering was measured in ° C day, for all sites and sowing
50 dates. There was reduction in the duration of the reproductive phase, total development
51 cycle (except some cultivars sown in september), with delay on sowing date regardless
52 of the maturity group and type of growth with delayed sowing. Sowings of September,
53 January and February promote a reduction in vegetative stage in most cultivars when
54 compared with the recommended period (November and December). Cultivars
55 Indeterminate have a longer period of overlap between the vegetative and reproductive

56 phases than certain cultivars in all sites and sowing dates. The soybean development is
57 similar when grown in highlands and lowlands.

58 Key words: *Glycine max*, sowing date, phenology.

59

60

1 INTRODUÇÃO

61 A cultura da soja é a principal commodity agrícola do Brasil, que é o segundo
62 maior produtor mundial do grão (CONAB, 2014). Houve crescimento de 741% na
63 produção e de 175% na produtividade da soja brasileira entre as safras de 1976/1977 e
64 2013/2014 (CONAB, 2014). No Rio Grande do Sul (RS), também houve essa tendência
65 de aumento na área e na produtividade média da cultura da soja. Destaca-se o ano
66 agrícola 2013/2014, quando foram cultivados aproximadamente 4,9 milhões de hectares
67 e produzidas 13,2 milhões de toneladas, sendo a maior safra de soja na história desse
68 Estado (CONAB, 2014). Dessa área cultivada, aproximadamente 302.000 hectares
69 foram cultivados em áreas de terras baixas em rotação com a cultura do arroz (IRGA,
70 2014).

71 O aumento da área cultivada e da produtividade da soja no Brasil e, mais
72 especificamente no Rio Grande do Sul deve-se à incorporação de novas tecnologias de
73 produção nos últimos anos. Por exemplo, a utilização de cultivares precoces (grupo de
74 maturação menor que 6.4) e com tipo de crescimento indeterminado, em substituição às
75 cultivares semeadas até os anos 2000, que apresentavam quase na sua totalidade ciclo
76 médio ou longo e tipo de crescimento determinado (Barni & Matzenauer, 2000).
77 Destaca-se que o aumento da área cultivada com soja no RS deve-se ao fato de
78 agricultores estarem realizando semeaduras precoces (final de setembro e início de
79 outubro) e tardias (final de dezembro e janeiro), permitindo, assim, dois cultivos no

80 mesmo ano agrícola (Meotti et al., 2012). Verifica-se, também, o aumento do cultivo de
81 soja em áreas de terras baixas, onde tradicionalmente vem sendo cultivado arroz
82 irrigado por inundação (IRGA, 2014).

83 No Rio Grande do Sul, durante a estação de cultivo da soja, a intensidade de
84 radiação solar, o fotoperíodo e a temperatura média do ar aumentam nos meses de
85 setembro a dezembro, e diminuem nos meses de janeiro a abril. A duração das fases e
86 do ciclo de desenvolvimento da soja é regulada pela temperatura e fotoperíodo
87 (Kantolic, 2008), e varia com o genótipo e com o estágio de desenvolvimento da cultura
88 (Setiyono et al., 2007). Por exemplo, o desenvolvimento das cultivares com grupos de
89 maturação baixos é mais dependente da temperatura do ar que do fotoperíodo até o
90 início do enchimento de grãos (Sinclair et al., 2005). A partir desse estágio, o
91 desenvolvimento passa a ser mais afetado pelo fotoperíodo do que pela temperatura do
92 ar (Grimm et al., 1994).

93 Esforços científicos com o objetivo de conhecer os estágios de desenvolvimento
94 mais críticos para a determinação dos componentes de rendimento, sob diferentes
95 condições ambientais, tem sido tema de vários autores (Kantolic & Slafer, 2005; Meotti
96 et al., 2012). Assim, estudos básicos que descrevem de forma detalhada o
97 desenvolvimento das novas cultivares de soja em resposta às diferentes disponibilidades
98 edafoclimáticas necessitam ser realizados no Rio Grande do Sul e no Brasil. A
99 caracterização da duração das fases e do ciclo de desenvolvimento, em função do grupo
100 de maturação e do tipo de crescimento, poderá auxiliar a assistência técnica e os
101 produtores de soja a definirem práticas de manejo para alcançar o potencial genético de
102 cada cultivar. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi caracterizar o
103 desenvolvimento de cultivares de soja com diferentes grupos de maturação e tipos de

104 crescimento, em um local de terras altas e em um local de terras baixas, ambos no
105 estado do Rio Grande do Sul. A hipótese deste estudo é que quanto menor o grupo de
106 maturação, menor será a duração do ciclo e das fases de desenvolvimento,
107 independentemente do tipo de crescimento.

108

109

2 MATERIAIS E MÉTODOS

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

Experimentos de campo foram conduzidos em Santa Maria, na Universidade Federal de Santa Maria (29°43'S, 53°43'W e altitude de 95m), localizada na região da Depressão Central do Rio Grande do Sul, e em Capão do Leão, na Universidade Federal de Pelotas (31°52'S, 52°21'W e altitude de 13m), localizada na região Sul do Rio Grande do Sul. O clima dos locais, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical úmido com verões quentes e sem estação seca definida (Kuinchner & Buriol, 2001). O solo da área experimental em Santa Maria é uma transição entre a Unidade de Mapeamento São Pedro (Argissolo Vermelho distrófico arênico) e a Unidade de Mapeamento Santa Maria (Argissolo Bruno Acinzentado Alítico úmbrico), e é típico de terras altas no Rio Grande do Sul (solos bem drenados e que tradicionalmente cultivam-se culturas de sequeiro, como soja, milho, feijão etc.). O solo da área experimental de Capão do Leão pertence à Unidade de Mapeamento Pelotas (Planossolo Háplico Eutrófico solódico) e é típico de terras baixas no Rio Grande do Sul (solos com deficiência de drenagem e que são utilizados para o cultivo de arroz irrigado) (Streck et al., 2008).

125

126

127

Foram utilizadas 11 cultivares de soja (Tabela 1), as quais foram selecionadas por representarem diferentes grupos de maturação (GM) e tipos de crescimento. Desde cultivares antigas, como IAS 5 e BRAGG, que foram cultivadas entre as décadas de 60

128 e 90 no Rio Grande do Sul, até cultivares modernas transgênicas. As cultivares de soja
129 foram semeadas em épocas, antes, durante e após o período recomendado pelo
130 Zoneamento Agroclimático da Soja para o Rio Grande do Sul. Foram realizadas nove
131 datas de semeadura nos anos agrícolas de 2010/2011 (10/12/2010 e 8/1/2011),
132 2011/2012 (24/9/2011, 19/11/2011 e 28/1/2012) e 2012/2013 (22/9/2012, 03/11/2012,
133 2/12/2012 e 6/2/2013), em Santa Maria, e uma data de semeadura no ano agrícola de
134 2012/2013 (9/11/2012), em Capão do Leão. A adubação de base, a inoculação das
135 sementes com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum*, o tratamento das sementes com
136 fungicida e inseticida, e o controle de pragas e doenças foram realizados de acordo com
137 as recomendações técnicas da cultura. O controle de plantas daninhas foi realizado
138 através de capinas manuais. Em Santa Maria e Pelotas, os experimentos foram
139 conduzidos com irrigação suplementar de modo que o crescimento e o desenvolvimento
140 das plantas ocorressem sem deficiência hídrica.

141 O delineamento experimental foi blocos ao acaso, em parcelas subdivididas,
142 com quatro repetições. As épocas de semeadura constituíram as parcelas principais e as
143 cultivares as subparcelas. Cada repetição foi constituída de parcela com 11 fileiras de
144 plantas e duas fileiras de bordadura. Cada fileira continha uma cultivar e teve 3 m de
145 comprimento. O espaçamento foi de 0,45 m entre fileiras, na densidade de 30 plantas m⁻²
146 e profundidade de semeadura de 0,05 m. A data de emergência foi considerada quando
147 50% do total de plantas de cada fileira estavam com os cotilédones acima do solo.
148 Foram marcadas com arame colorido cinco plantas aleatoriamente, em cada fileira, logo
149 após a emissão do primeiro par de folhas unifoliadas, para serem realizadas as
150 contagens do número de nós e as avaliações de fenologia. A data do número final de nós
151 (NFN) foi considerada quando a haste principal não emitiu mais nós. Foram realizadas

152 avaliações diárias para identificar os estádios reprodutivos R1, R3, R5, R7 e R8,
153 segundo a escala de Fehr & Caviness (1977).

154 As temperaturas mínima e máxima diárias do ar, precipitação e radiação solar
155 durante o período experimental foram coletadas em estações meteorológicas
156 convencionais, pertencentes ao 8º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de
157 Meteorologia (DISME/INMET) e à Embrapa Clima Temperado, localizadas,
158 respectivamente, a aproximadamente cem metros da área experimental, tanto em Santa
159 Maria como em Capão do Leão. A temperatura média (T_{med}) diária do ar foi calculada
160 pela média aritmética das temperaturas mínima e máxima. A soma térmica diária (ST_d ,
161 °C dia) foi calculada pelo método (Arnold, 1960):

$$162 \quad ST_d = (T_{med} - T_b) * (1 \text{ dia}) \quad \left\{ \text{quando } T_b \leq T_{med} \leq T_{opt} \right. \quad (1)$$

163 e

$$164 \quad ST_d = (T_{tot} - T_b) \times \left(\frac{T_{max} - T_{med}}{T_{max} - T_{opt}} \right) \left\{ \begin{array}{l} \text{quando } T_{opt} < T_{med} \leq T_{max}, \text{ se } T_{med} < T_b \text{ então} \\ T_{med} = T_b \text{ e se } T_{med} > T_{max} \text{ então } T_{med} = T_{max} \end{array} \right.$$

165 (2)

166 em que T_b é a temperatura base, T_{opt} é a temperatura ótima e T_{max} é a temperatura
167 máxima para o desenvolvimento da soja. Foi utilizado $T_b = 7,6^\circ\text{C}$, $T_{opt} = 31^\circ\text{C}$ e T_{max}
168 $= 40^\circ\text{C}$ para o cálculo da soma térmica da fase vegetativa (Semeadura-R1), e $T_b =$
169 $0,0^\circ\text{C}$, $T_{opt} = 21,5^\circ\text{C}$ e $T_{max} = 38,7^\circ\text{C}$ para o cálculo da soma térmica da fase
170 reprodutiva (R1-R8) (Setiyono et al., 2007).

171 A soma térmica diária foi acumulada a partir da semeadura, resultando na soma térmica
172 acumulada (ST_a), ou seja:

$$173 \quad ST_a = \sum ST_d \quad (3)$$

174 Foi determinada a duração, em °C dia, das fases semeadura à emergência (SEM-
175 EM), emergência ao início do florescimento (EM-R1), início do florescimento à
176 maturação plena (R1-R8), ciclo total (EM-R8) e das subfases: R1-R3, R3-R5, R5-R7 e
177 R7-R8. Também foi determinada a data do aparecimento do último nó na haste principal

178 e com esta data foi estimada a sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva (do R1
179 até o NFN), em °C dia. A análise estatística foi realizada para as variáveis EM-R8, EM-
180 R1, R1-R8 e R1-NFN para cada ano agrícola (2010/2011, 2011/2012 e 2012/2013) nos
181 experimentos conduzidos em Santa Maria considerando um arranjo fatorial em parcelas
182 subdivididas (parcela principal = época de semeadura e subparcelas = cultivares). A
183 análise estatística realizada para os experimentos conduzidos em Santa Maria
184 (semeadura em 3/11/2012) e em Capão do Leão (semeadura em 9/11/2012) foi
185 considerando-se um bi-fatorial, com o fator A local de semeadura (dois níveis) e o fator
186 D cultivares (11 níveis). As médias dessas variáveis foram distinguidas pelo teste de
187 Duncan ($p < 0,05$). Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do pacote
188 estatístico SAS.

189

190

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

A análise de variância (ANOVA) mostrou efeito significativo dos fatores época de semeadura e cultivar para todas as variáveis nos experimentos conduzidos em Santa Maria de 2010 até 2013 (Tabela 2). O quadrado médio foi maior para o fator época de semeadura do que para o fator cultivar, exceto para as variáveis EM-R1 no ano agrícola 2010/2011 e para R1-NFN nos anos agrícolas 2010/2011 e 2012/2013, o que indica que a maioria das variáveis foram mais afetadas pelo efeito ambiental do que pela constituição genética (Tabela 2). Já quando comparado às semeaduras realizadas em Santa Maria e Pelotas, a ANOVA foi significativa para os fatores local de semeadura e cultivar somente para as variáveis EM-R1 e R1-NFN. A precisão experimental neste estudo pode ser classificada como alta, pois os coeficientes de variação para a maioria das variáveis analisadas foram inferiores ou próximos a 10% (Gomes, 1990).

202 As condições meteorológicas a que as cultivares de soja foram expostas nas
203 épocas de semeadura, nos três anos agrícolas, em Santa Maria e em Capão do Leão,
204 estão expostas na figura 1. A menor e a maior duração da fase SEM-EM foi de 89,2 °C
205 dia na cultivar BRAGG, semeada em 24/9/2011, e 175,9 °C dia na cultivar CD 219RR,
206 semeada em 8/1/2011. Nas semeaduras de setembro, novembro/dezembro e janeiro, a
207 soma térmica acumulada média na fase SEM-EM foi de 108,9 °C dia, 126,8 °C dia e
208 130,5 °C dia, respectivamente, verificando-se assim, aumento da soma térmica
209 acumulada com o atraso da semeadura. Essa resposta indica que alguns estudos
210 numéricos fazem simplificações inapropriadas, como, por exemplo, Trentin et al. (2013)
211 que generalizaram a duração desta fase como sendo de 92,5 °C dia para qualquer época
212 de semeadura, considerando uma temperatura base de 10 °C.

213 Em virtude das cultivares pertencerem a GM distintos, observou-se, de maneira
214 geral redução da duração total do ciclo, na mesma época de semeadura, com a redução
215 do GM para todas as semeaduras, nos dois locais de cultivo (Figuras 2, 3, 4 e 5). Essa
216 resposta de encurtamento da duração do ciclo de desenvolvimento conforme a redução
217 do grupo de maturação concorda com os estudos de Mercau et al. (2007) e Trentin et al.
218 (2013), que também verificaram que, para uma mesma região, quanto menor o GM,
219 menor a duração do ciclo. Há tendência de encurtamento da fase reprodutiva (R1-R8) e
220 do ciclo de desenvolvimento (EM-R8) (exceto as cultivares NA 5909 RG e NS 4823
221 RR na semeadura de 22/9/2012) com o atraso da semeadura, em todos os anos
222 agrícolas, em Santa Maria (Figuras 2, 3 e 4); concordando com os resultados
223 encontrados por Stülp et al. (2009) e Trentin et al. (2013) e que pode ser explicada pelo
224 efeito do fotoperíodo sobre o desenvolvimento da soja, a qual é uma planta de dia curto
225 (Sinclair et al., 2005).

226 Considerando todas as épocas de semeadura, a menor e a maior duração da fase
227 vegetativa ocorreram, respectivamente, nas cultivares NS 4823 RR (369,6 °C dia) e CD
228 219 RR (1402,7 °C dia), semeadas em 24/9/2011. Já para fase reprodutiva, a cultivar
229 BRAGG, semeada em 24/9/2011, apresentou a maior duração (2005,1 °C dia) e a
230 cultivar CD 219 RR, semeada em 19/11/2011, apresentou a menor duração (990,2 °C
231 dia). As cultivares com tipo de crescimento determinado apresentaram maior proporção
232 da fase vegetativa (42%) no ciclo total, quando comparadas com as cultivares
233 indeterminadas (33,4%), nas semeaduras de novembro e dezembro (época
234 recomendada). Como impactos positivos da maior duração da fase reprodutiva nas
235 cultivares de tipo de crescimento indeterminado, pode-se inferir provável aumento do
236 potencial produtivo dessas cultivares (Setiyono et al., 2010). Em experimentos de
237 campo e numéricos conduzidos por Kantolic et al. (2007) em Buenos Aires, Argentina,
238 os autores verificaram que uma estratégia para os programas de melhoramento de soja
239 aumentarem a produtividade potencial da cultura seria através da seleção de cultivares
240 com maior duração da fase reprodutiva, sem prolongar a duração do ciclo total de
241 desenvolvimento.

242 As cultivares apresentaram menor fase vegetativa (EM-R1), quando semeadas
243 antes ou após a época recomendada (setembro, janeiro e fevereiro), nos anos agrícolas
244 de 2011/2012 e 2012/2013 (Figuras 3 e 4). A antecipação do florescimento nessas datas
245 de semeadura, deve-se ao fotoperíodo curto (12-13 horas) a que as cultivares foram
246 expostas no início do ciclo de desenvolvimento (Sinclair et al., 2005) nas semeaduras de
247 setembro, janeiro e fevereiro. Kantolic (2008) verificou que semeaduras antecipadas de
248 primavera, em latitudes médias, apresentaram tendência de acelerar a iniciação floral, da
249 mesma maneira que em semeaduras tardias. Esse efeito foi mais pronunciado nas

250 cultivares antigas que não possuem o gene de juvenilidade, como a BRAGG, que,
251 semeada em 24/9/2011 e 22/9/2012, floresceu em 18/11/2011 e 14/11/2012,
252 respectivamente. Estudos com época de semeadura de soja no RS utilizando cultivares
253 determinadas verificaram que a antecipação do florescimento provocava a redução do
254 porte das plantas e da altura de inserção dos legumes inferiores, reduzindo a
255 produtividade de grãos em algumas cultivares de soja, e conseqüentemente,
256 inviabilizando o cultivo fora da época recomendada, que varia de 21/10 a 31/12 na
257 maioria dos municípios do RS (Bonato et al., 1998). Essa resposta foi um dos fatores
258 que inviabilizaram a antecipação e o atraso da data de semeadura da cultura da soja nas
259 décadas de 70, 80 e 90 no RS. Porém, com o aumento da utilização de cultivares
260 indeterminadas, esse problema foi minimizado, pois, apesar das mesmas também
261 florescerem precocemente quando semeadas fora da época preferencial, essas cultivares
262 continuam crescendo em estatura até próximo ao início do enchimento de grãos
263 (Bastidas et al., 2008), podendo, assim, serem utilizadas para viabilizar semeaduras
264 antecipadas e tardias de soja no Rio Grande do Sul.

265 Em virtude da proximidade das datas de semeadura em Santa Maria (3/11/2012)
266 e em Capão do Leão (9/11/2012), as onze cultivares apresentaram duração do ciclo de
267 desenvolvimento similar (não diferiram) (Figura 5). Em Capão do Leão, a maioria das
268 cultivares apresentaram menor duração da fase vegetativa e maior duração da fase
269 reprodutiva, quando comparado às mesmas cultivares semeadas em Santa Maria. Uma
270 das hipóteses para explicar esse resultado pode ser o número de dias que as cultivares
271 semeadas em Capão do Leão (43 dias) ficaram expostas a fotoperíodo crescente na fase
272 vegetativa, tempo esse menor do que as semeadas em Santa Maria (49 dias). Ou seja, as
273 plantas em Capão do Leão foram induzidas mais rapidamente a transformar os

274 meristemas vegetativos em reprodutivos, e conseqüentemente reduziram a duração da
275 fase vegetativa e do ciclo total (Sinclair et al., 2005).

276 Nas cultivares com tipo de crescimento indeterminado, o período de
277 sobreposição entre a fase vegetativa e reprodutiva foi maior do que nas cultivares com
278 tipo de crescimento determinado, tanto em Santa Maria como em Capão do Leão
279 (Figuras 6 e 7), concordando com os resultados encontrados por Bastidas et al. (2008),
280 Setiyono et al. (2007) e Sinclair et al. (2005). A data de semeadura influenciou na
281 duração do período de sobreposição, principalmente nas cultivares indeterminadas,
282 havendo tendência de diminuição do período de sobreposição com o atraso da época de
283 semeadura (Figuras 6b, c). O maior e o menor valor de sobreposição nas cultivares de
284 tipo indeterminado foram na Igra 518 RR (928,9 °C dia), semeada em 24/9/2011, e na
285 BMX Potência (290,5 °C dia), semeada em 6/2/2013, respectivamente. Já nas cultivares
286 de tipo determinado, o maior valor foi de 315,9°C dia na IAS 5, semeada em
287 19/11/2011, e o menor, na CD 219RR (0°C dia), semeada em 22/9/2012. A partir desses
288 resultados, verifica-se que as cultivares com tipo de crescimento determinado
289 apresentaram algum período de sobreposição em todas as épocas e locais de cultivo,
290 exceto a cultivar CD 219 RR, semeada em 22/9/2012 em Santa Maria.

291 O maior período de sobreposição entre a fase vegetativa e reprodutiva nas
292 cultivares de tipo indeterminado pode conferir a elas maior capacidade de se adaptarem
293 a diferentes épocas de semeadura, e apresentando também maior capacidade de se
294 recuperar de períodos curtos de estresse, como a ausência de chuvas, excesso hídrico no
295 solo ou temperaturas elevadas. Esta é uma das possíveis explicações para os produtores
296 de soja no RS atualmente semearem, principalmente, cultivares de soja com tipo de
297 crescimento indeterminado, diferentemente do que aconteceu desde a introdução da

298 cultura da soja nesse Estado (1914) até o ano 2000, quando eram cultivadas, quase em
299 sua totalidade, cultivares de tipo determinado (Barni & Matzenauer, 2000).

300 A similaridade na duração do ciclo de desenvolvimento das cultivares de soja,
301 em Santa Maria (terras altas) e em Capão do Leão (terras baixas) (Figura 5), indica que
302 o ambiente edáfico de cultivo não afeta o padrão de desenvolvimento em soja. Esta é
303 uma importante informação para o Rio Grande do Sul, onde a área de cultivo de soja em
304 terras baixas aumentou de 64 mil ha no ano agrícola 2010/2011 para 302 mil ha no ano
305 agrícola 2013/2014 (IRGA, 2014), e pode continuar aumentando nos próximos anos em
306 rotação com o arroz irrigado. Esses resultados indicam aos produtores e à assistência
307 técnica que as práticas de manejo associadas ao desenvolvimento da soja em terras altas
308 podem ser realizadas de forma muito similar em terras baixas, em virtude de não haver
309 diferença na duração das fases e do ciclo total de desenvolvimento da soja.

310

311

4 CONCLUSÃO

312 Há redução da duração da fase reprodutiva, do ciclo total de desenvolvimento
313 (exceto algumas cultivares semeadas em setembro), com o atraso da data de semeadura
314 independentemente do grupo de maturação e tipo de crescimento. As semeaduras de
315 setembro, janeiro e fevereiro promovem redução da fase vegetativa na maioria das
316 cultivares quando comparadas com a época recomendada (novembro e dezembro).

317 Cultivares indeterminadas apresentam período de sobreposição das fases
318 vegetativa e reprodutiva maior do que as cultivares determinadas.

319 O desenvolvimento da soja é similar quando cultivada em terras altas e em terras
320 baixas.

321

REFERÊNCIAS

- 322
- 323 <jrn>Arnold, C. Y. (1960). Maximum-minimum temperature as a basis for computing
324 heat units. Proceedings of the American Society for Horticultural Science, 76, 682-
325 692.</jrn>
- 326 <jrn>Barni, N. A., & Matznauer, R. (2000). Ampliação do calendário de semeadura da
327 soja no Rio Grande do Sul pelo uso de cultivares adaptados aos distintos
328 ambientes. Pesquisa Agropecuária Gaúcha, 6, 189-203.</jrn>
- 329 <jrn>Bastidas, A. M., Setiyono, T. D., Dorbemann, A., Cassman, K. G., Elmore, R. W.,
330 Graef, G. L., & Specht, J. E. (2008). Soybean sowing date: the vegetative, reproductive,
331 and agronomic impacts. Crop Science, 48, 727-740.
332 <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2006.05.0292>.</jrn>
- 333 <jrn>Bonato, E. R., Bertagnolli, P. F., Ignaczak, J. C., Tragnago, J. L., & Rubin, S. A.
334 L. (1998). Desempenho de cultivares de soja em três épocas de semeadura, no Rio
335 Grande do Sul. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 33, 879-884.</jrn>
- 336 <eref>Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. (2014). Acompanhamento de
337 safra brasileira: grãos (Quinto levantamento, fev/2014, p. 1-7). Brasília, DF: CONAB.
338 Recuperado em 22 de abril de 2014, de www.conab.gov.br</eref>
- 339 <bok>Fehr, W. R., & Caviness, C. E. (1977). Stages of soybean development (Special
340 Report, 80, p. 1-15). Ames: Iowa State University of Science and Technology.</bok>
- 341 <bok>Gomes, F. P. (1990). Curso de estatística experimental (13 ed.). Piracicaba:
342 Nobel. 468 p.</bok>
- 343 <jrn>Grimm, S. S., Jones, J. W., Boote, K. J., & Herzog, D. C. (1994). Modeling the
344 occurrence of reproductive stages after flowering for four soybean cultivars. Agronomy

- 345 Journal, 86, 31-38.
346 <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600010007x>.
- 347 <eref>Instituto Rio Grandense do Arroz – IRGA. (2014). Levantamento de área
348 semeada com soja em terras baixas no Rio Grande do Sul, 2014. Porto Alegre: IRGA.
349 Recuperado em 20 de junho de 2014, de <http://www.irga.rs.gov.br></eref>
- 350 <jrn>Kantolic, A. G., Mercau, J. L., Slafer, G. A., & Sadras, V. O. (2007). Simulated
351 yield advantages of extending post-flowering development at the expense of a shorter
352 pre-flowering development in soybean. *Field Crops Research*, 101, 321-330.
353 <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2006.12.008>.
- 354 <jrn>Kantolic, A. G., & Slafer, G. A. (2005). Reproductive development and yield
355 components in indeterminate soybean as affected by post-flowering photoperiod. *Field*
356 *Crops Research*, 93, 212-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2004.10.001>.
- 357 <jrn>Kantolic, A. G. (2008). Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de
358 soja: impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genótipos. *Revista da Facultad de*
359 *Agronomía UBA*, 28, 63-88.
- 360 <jrn>Kuinchtner, A., & Buriol, G. A. (2001). Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a
361 classificação climática de Köppen e Thornthwaite. *Disciplinarum Scientia*, 2, 171-182.
- 362 <jrn>Meotti, G. V., Benin, G., Silva, R. R., Beche, E., & Munaro, L. B. (2012). Épocas
363 de semeadura e desempenho agrônômico de cultivares de soja. *Pesquisa Agropecuaria*
364 *Brasileira*, 47, 14-21. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000100003>.
- 365 <jrn>Mercau, J. L., Dardanelli, J. L., Collino, D. J., Andriani, J. M., Irigoyen, A., &
366 Satorre, E. H. (2007). Predicting on-farm soybean yields in the pampas using
367 CROPGRO-soybean. *Field Crops Research*, 100, 200-209.
368 <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.006>.

- 369 <jrn>Setiyono, T. D., Cassman, K. G., Specht, J. E., Dobermann, A., Weiss, A., Yang,
370 H., Conley, S. P., Robinson, A. P., Pedersen, P., & De Bruin, J. L. (2010). Simulation of
371 soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. *Field Crops Research*,
372 119, 161-174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.007>.</jrn>
- 373 <jrn>Setiyono, T. D., Weiss, A., Specht, J. E., Bastidas, A. M., Cassman, K. G., &
374 Dobermann, A. (2007). Understanding and modeling the effect of temperature and
375 daylength on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research*,
376 100, 257-271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.011>.</jrn>
- 377 <jrn>Sinclair, T. R., Neumaier, N., Farias, J. R. B., & Nepomuceno, A. L. (2005).
378 Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low latitude
379 environments. *Field Crops Research*, 92, 53-59.
380 <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2004.08.008>.</jrn>
- 381 <bok>Streck, E. V., Kampf, N., Dalmolin, R. S. D., Klamt, E., Nascimento, P. C.,
382 Schneider, P., Giasson, E., & Pinto, L. F. S. (2008). *Solos do Rio Grande do Sul*. Porto
383 Alegre: EMATER. 126 p.</bok>
- 384 <jrn>Stülp, M., Brancchini, A. L., Albrecht, L. P., Ávila, M. R., Scapim, C. A., &
385 Schuster, I. (2009). Desempenho agrônômico de três cultivares de soja em diferentes
386 épocas de semeadura em duas safras. *Ciência e Agrotecnologia*, 33, 1240-1248.
387 <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542009000500006>.</jrn>
- 388 <jrn>Trentin, R., Heldwein, A. B., Streck, N. A., Trentin, G., & Silva, J. C. (2013).
389 Subperíodos fenológicos e ciclo da soja conforme grupos de maturidade e datas de
390 semeadura. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48, 703-713.
391 <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2013000700002>.</jrn>

392 Tabela 1. Cultivares de soja, grupo de maturação (GM) e tipo de crescimento utilizados
393 nos experimentos de campo em Santa Maria e em Capão do Leão (RS)

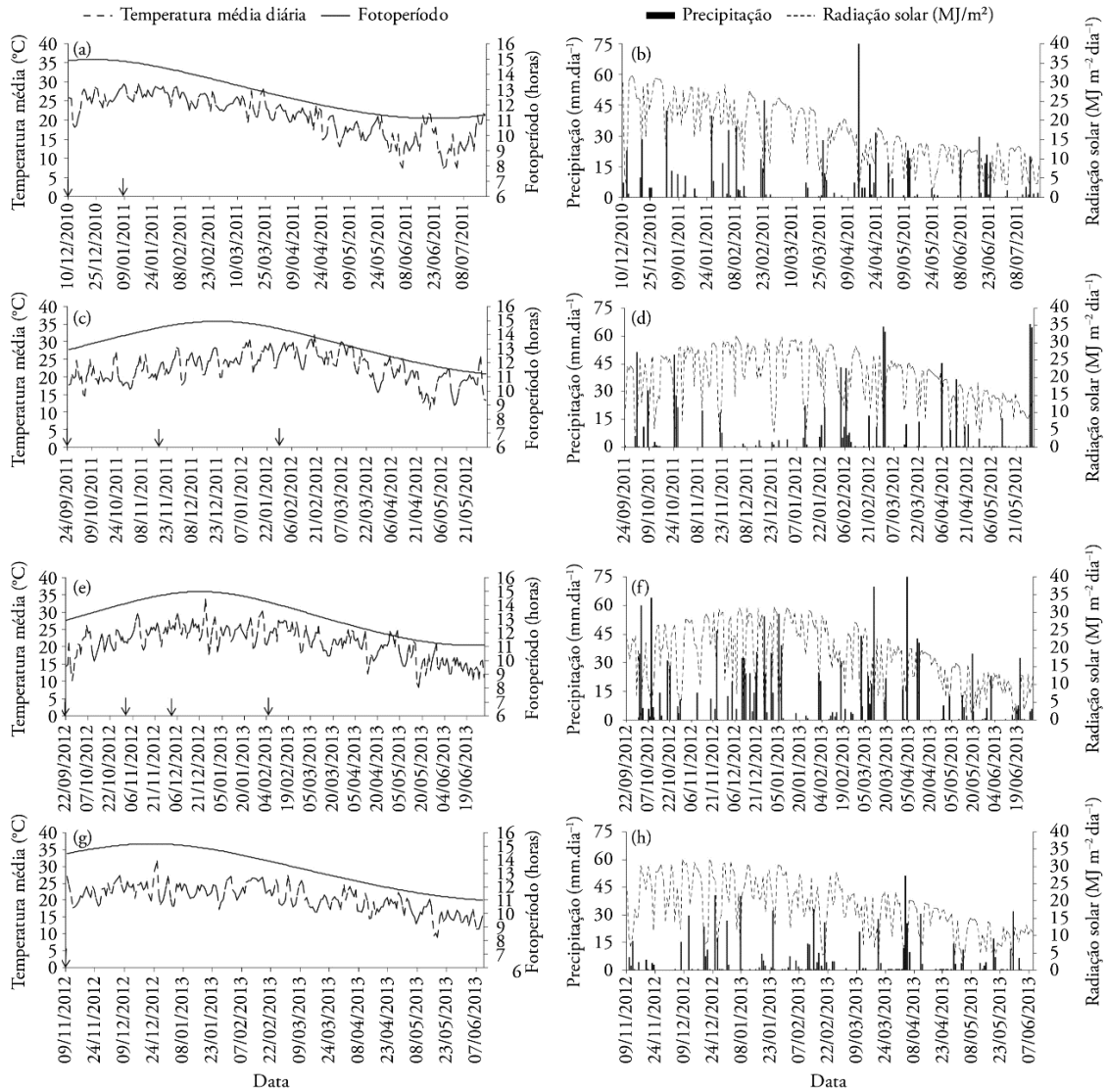
Cultivares	GM	Tipo de Crescimento
NS 4823 RR	4.8	Indeterminado
BMX ENERGIA RR	5.5	Indeterminado
BMX TURBO RR	6.0	Indeterminado
NA 5909 RG	6.3	Indeterminado
IAS 5	6.4	Determinado
IGRA RA 518 RR	6.6	Semi-determinado
BMX POTÊNCIA RR	6.7	Indeterminado
FEPAGRO 36 RR	7.2	Determinado
BRS 246 RR	7.2	Determinado
BRAGG	7.3	Determinado
CD 219 RR	8.2	Determinado

394

395 Tabela 2. Valores do quadrado médio da ANOVA para as variáveis duração do ciclo de
 396 desenvolvimento (EM-R8), duração da fase vegetativa (EM-R1), duração da fase
 397 reprodutiva (R1-R8), duração da sobreposição da fase vegetativa e reprodutiva (R1-
 398 NFN), para onze cultivares de soja em duas datas de semeadura no ano agrícola
 399 2010/2011, três datas de semeadura no ano agrícola 2011/2012, quatro datas de
 400 semeadura no ano agrícola 2012/2013 em Santa Maria, e os valores do quadrado médio
 401 da ANOVA para as mesmas variáveis (EM-R8, EM-R1, R1-R8 e R1-NFN) para onze
 402 cultivares de soja e dois locais de semeadura (Santa Maria e Capão do Leão), RS, Brasil

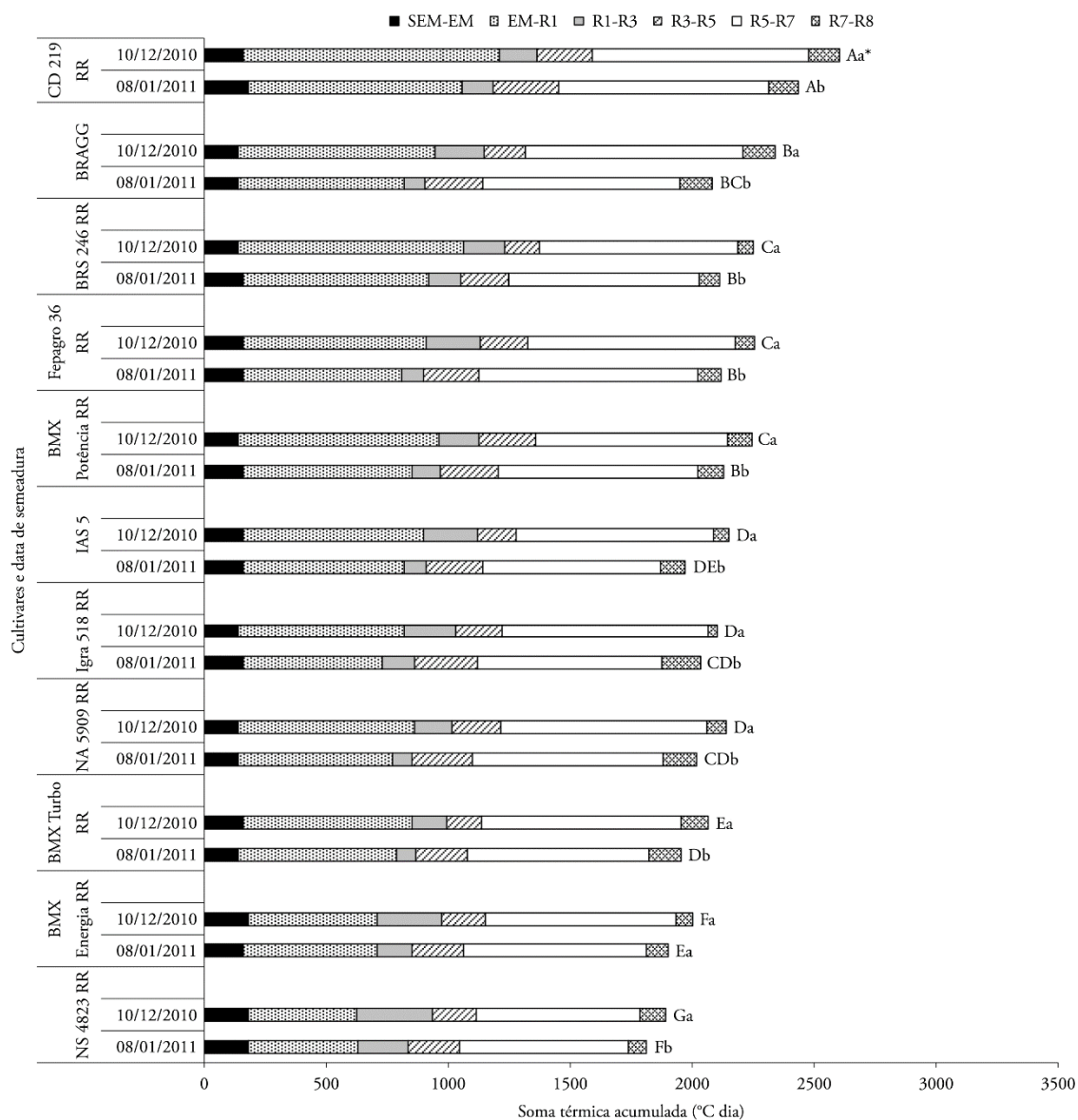
Causas de variação	Quadrado Médio							
	SM 2010-2011				SM 2011-2012			
	EM-R8	EM-R1	R1-R8	NFN- R1	EM-R8	EM-R1	R1-R8	NFN- R1
Bloco (B)	10572,6*	2289,8*	4834,2*	3058,2	15467,0	754,6	6848,3	4437,3
Época de Semeadura (A)	298941,3*	135947,4*	31691,9*	68480,7*	4330197,4*	612086,6*	3964394,8*	824118,9*
A x B	10211,6*	8926,7*	2448,8	4989,2	14313,4	1303,1	3614,7	6962,6*
Cultivar (D)	222726,4*	139222,4*	29576,1*	124710,7*	369428,5*	263103,6*	64172,4*	316161,4*
A x D	5330,7*	6191,4*	3959,1*	5157,6*	104988,9*	28052*	72122,2*	62003,9*
Coefficiente de Variação (%)	1,62	3,77	2,4	21,17	6,11	3,53	4,78	13,29
	SM 2012-2013				SM/PEL 2012-2013			
	EM-R8	EM-R1	R1-R8	NFN- R1	EM-R8	EM-R1	R1-R8	NFN- R1
Bloco (B)	6850,5	3295*	760,8	662,4	2576,1	1788,7*	2969,5	35,0
Época ou Local de Semeadura (A)	3851405,6*	806874,5*	1788123,8*	60328,2*	1119,4	138699,2*	137477,3*	302176,2*
A x B	5081,2	683,8	3923,3	1409,5	3432,2	304,3	4781,7	367,8
Cultivar (D)	517200,1*	480177,2*	92158,9*	511590,5*	251017,6*	223616,2*	75615*	355908,6*
A x D	37798,4*	26030,2*	19433,2*	31703,5*	3298,1	4698*	3244,2	13173,0*
Coefficiente de Variação (%)	2,4	3,61	3,51	14,00	2,27	2,43	3,7	14,88

403 *Significativo a 5%.



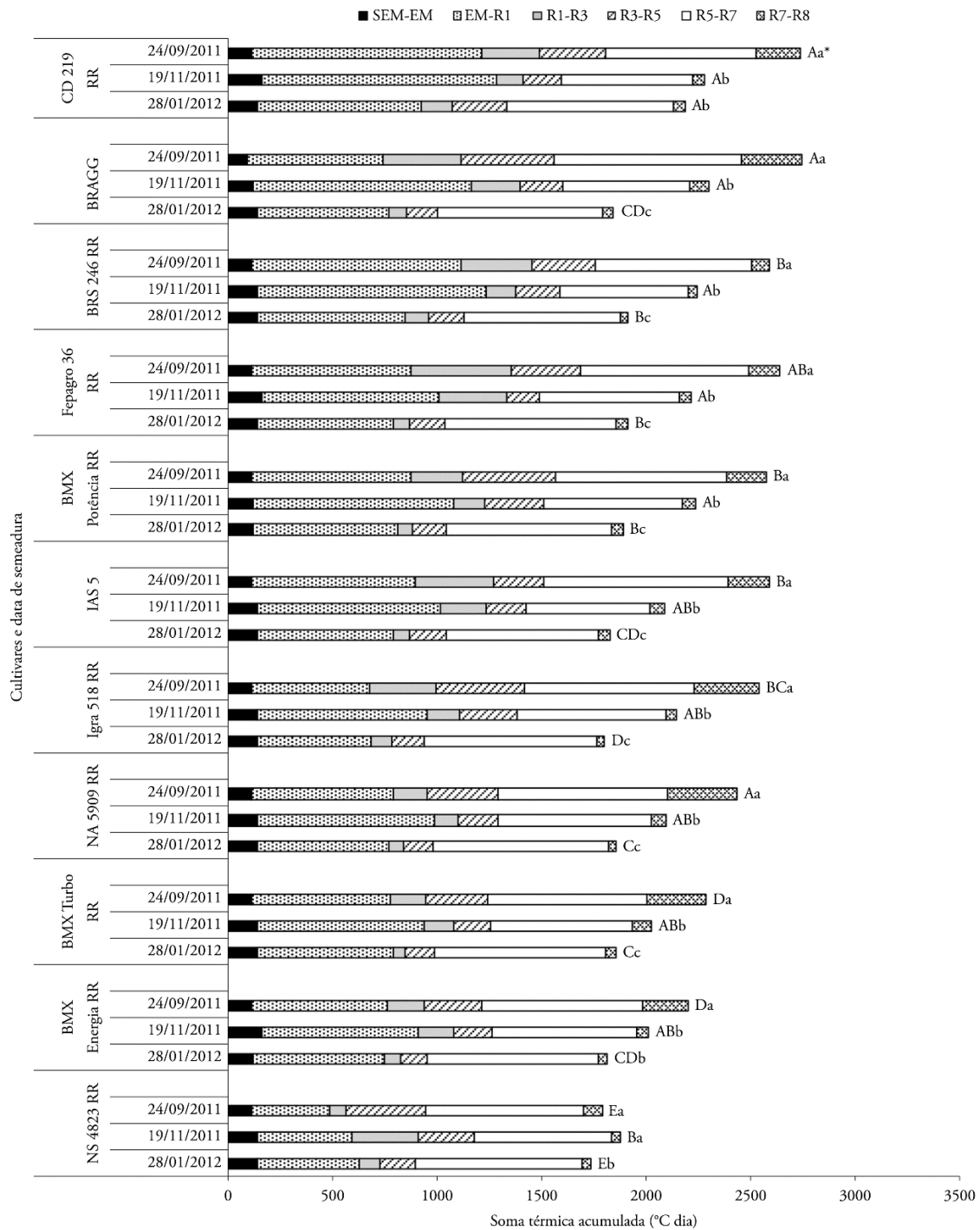
404

405 Figura 1. Temperatura média do ar (°C) e fotoperíodo diários (horas) ((a), (c), (e) e (g)),
 406 e precipitação (mm dia⁻¹) e densidade de fluxo de radiação solar global incidente (MJ
 407 m⁻² dia⁻¹) ((b), (d), (f) e (h)), durante os experimentos em Santa Maria nos anos
 408 agrícolas 2010/2011, 2011/2012 e 2012/2013, e em Capão do Leão, no ano agrícola
 409 2012/2013. As setas indicam as datas de semeadura.



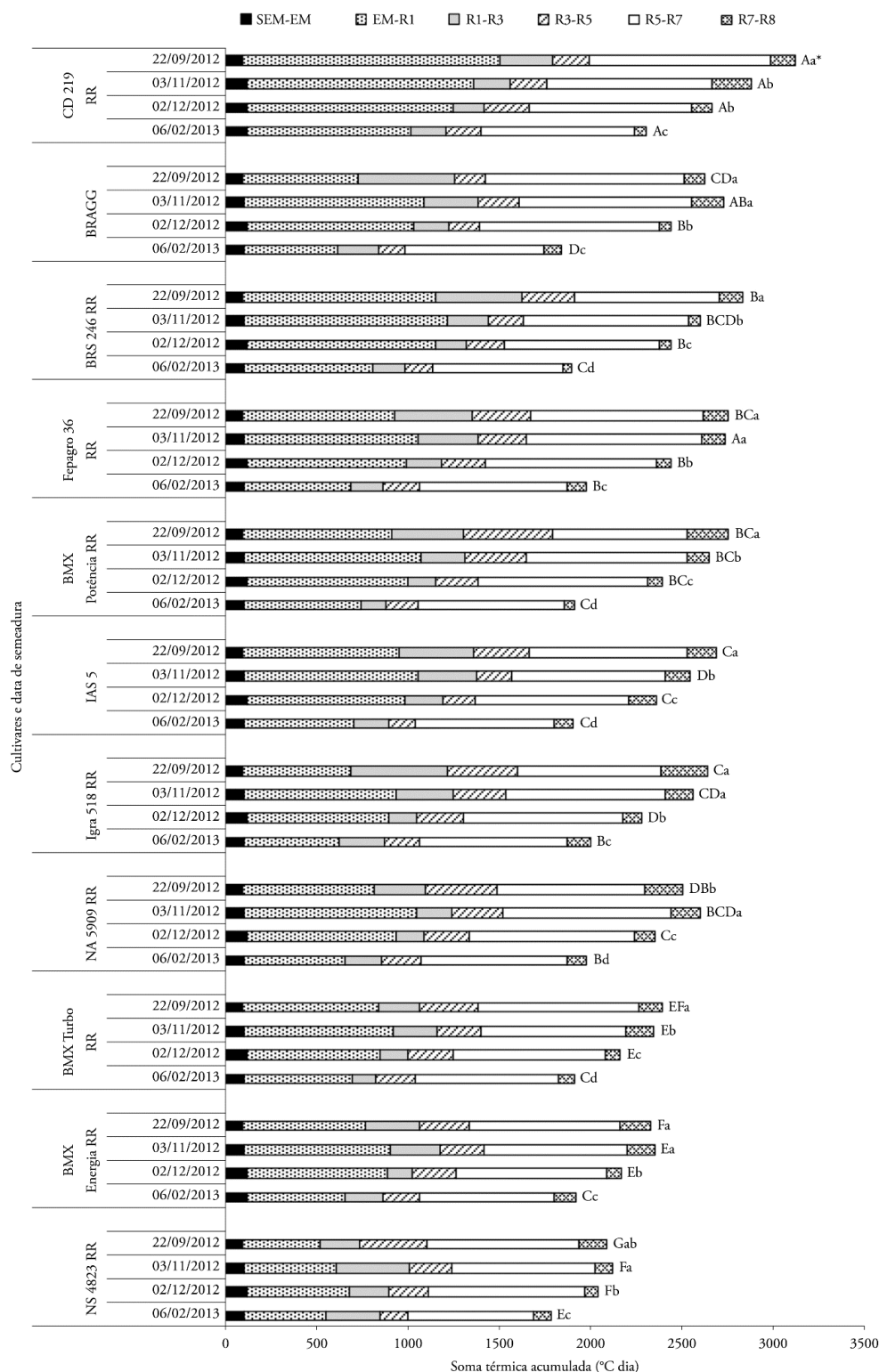
410

411 Figura 2. Duração, em °C dia, das fases semeadura-emergência (SEM-EM),
 412 emergência-R1 (EM-R1) e das subfases R1-R3, R3-R5, R5-R7 e R7-R8 de onze
 413 cultivares de soja, em duas datas de semeadura (10/12/2010 e 8/1/2011), no ano agrícola
 414 2010-2011 em Santa Maria, RS. *Médias da duração do ciclo de desenvolvimento (EM-
 415 R8) seguidas pelas mesmas letras maiúsculas (comparação entre cultivares na mesma
 416 data de semeadura) e minúsculas (comparação de uma cultivar em diferentes datas de
 417 semeadura) não diferem entre si pelo Teste Duncan, a 5% de probabilidade de erro.



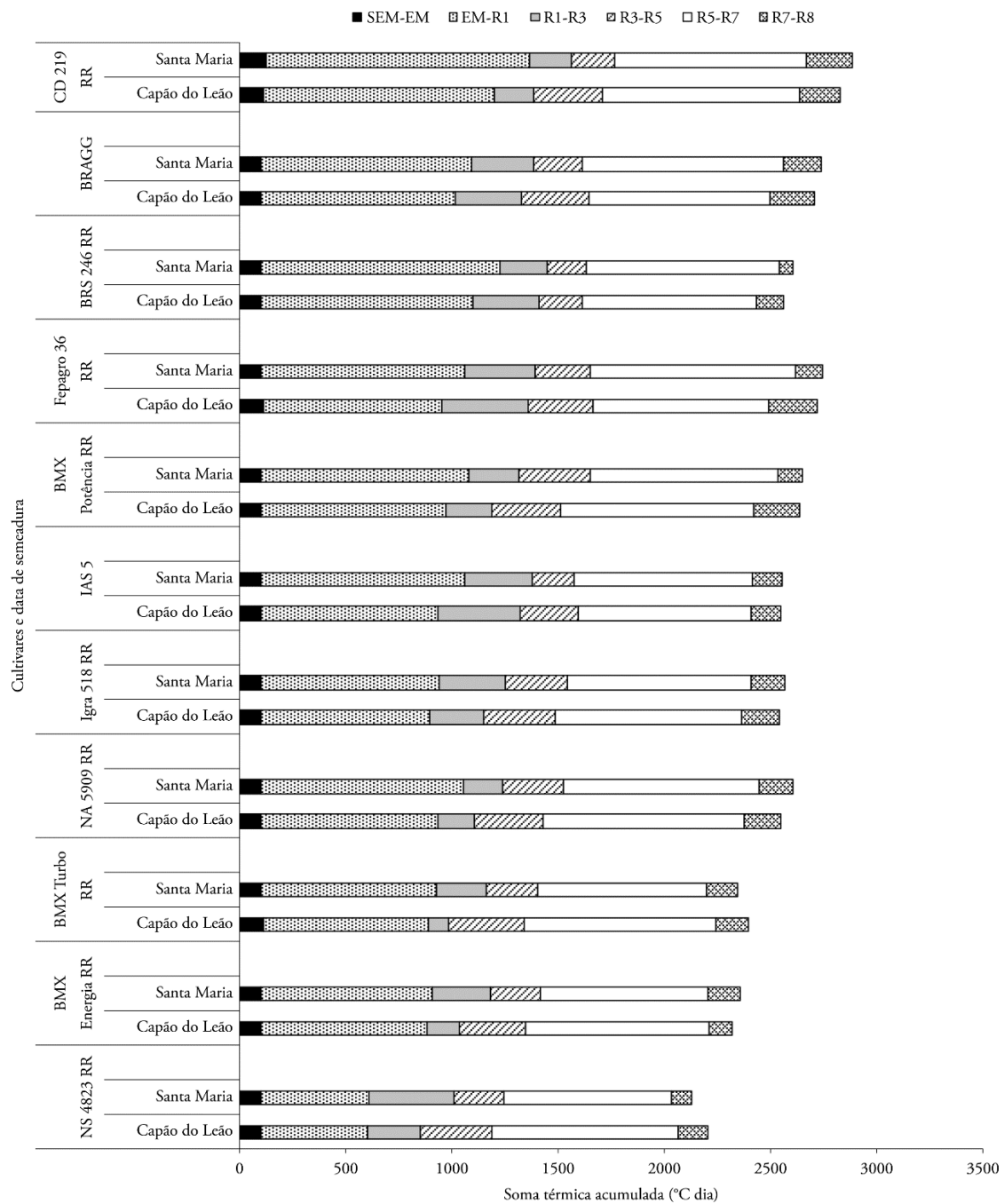
418

419 Figura 3. Duração, em °C dia, das fases semeadura-emergência (SEM-EM),
 420 emergência-R1 (EM-R1) e das subfases R1-R3, R3-R5, R5-R7 e R7-R8 de onze
 421 cultivares de soja, em três épocas de semeadura (24/9/2011, 19/11/2011 e 28/1/2012),
 422 no ano agrícola 2011-2012 em Santa Maria, RS. *Médias da duração do ciclo de
 423 desenvolvimento (EM-R8) seguidas pelas mesmas letras maiúsculas (comparação entre
 424 cultivares na mesma data de semeadura) e minúsculas (comparação de uma cultivar em
 425 diferentes datas de semeadura) não diferem entre si pelo Teste Duncan, a 5% de
 426 probabilidade de erro.



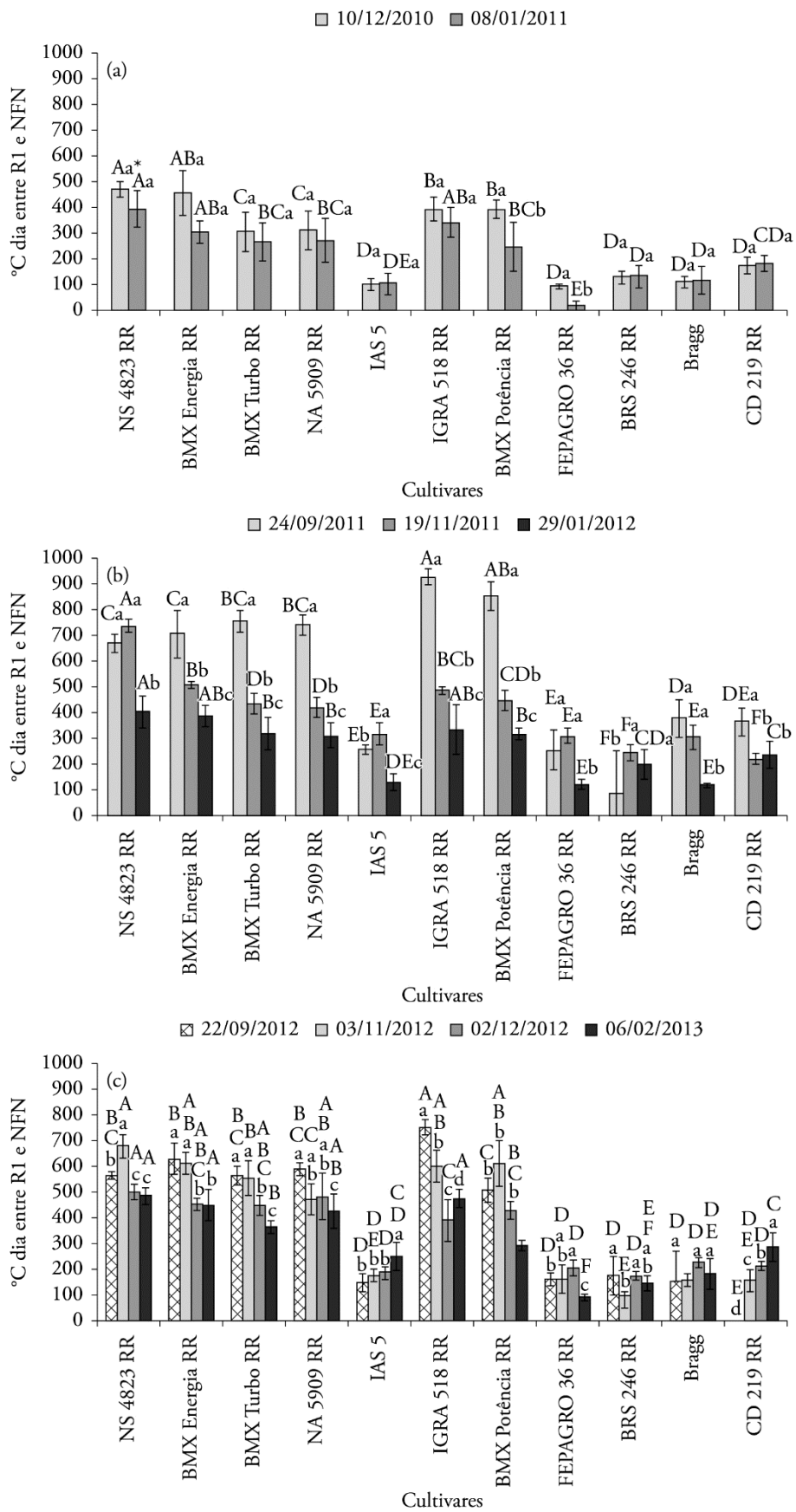
427
428
429
430
431
432
433
434

Figura 4. Duração, em °C dia, das fases semeadura-emergência (SEM-EM), emergência-R1 (EM-R1) e das subfases R1-R3, R3-R5, R5-R7 e R7-R8 de onze cultivares de soja, em quatro épocas de semeadura (22/9/2012, 3/11/2012, 2/12/2012 e 6/2/2013), no ano agrícola 2012-2013 em Santa Maria, RS. *Médias da duração do ciclo de desenvolvimento (EM-R8) seguidas pelas mesmas letras maiúsculas (comparação entre cultivares na mesma data de semeadura) e minúsculas (comparação de uma cultivar em diferentes datas de semeadura) não diferem entre si pelo Teste Duncan, a 5% de probabilidade de erro.



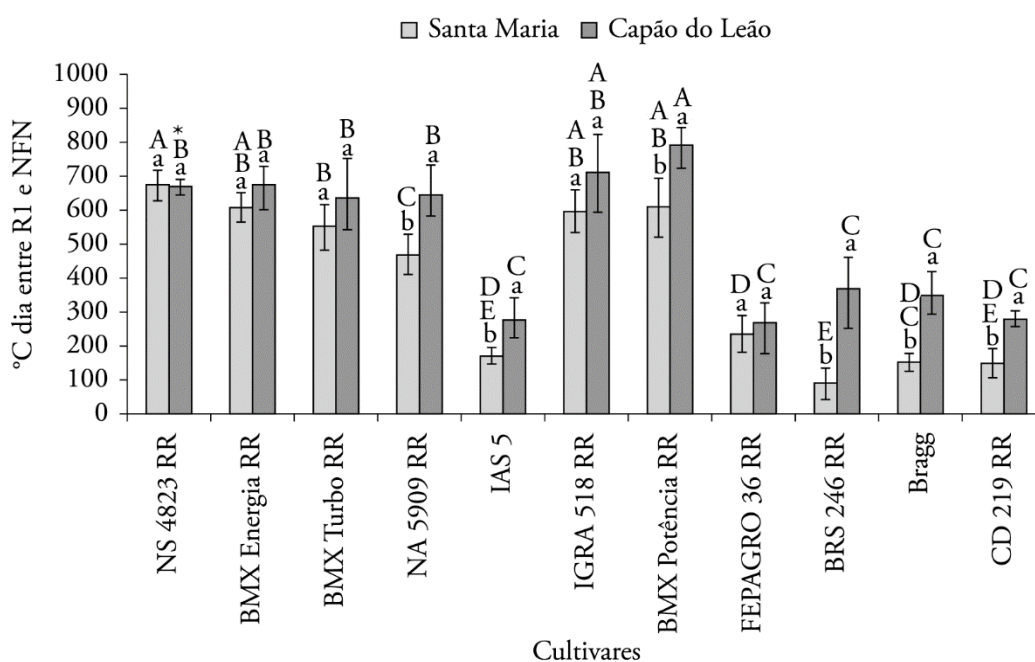
435
436
437
438
439

Figura 5. Duração, em °C dia, das fases semeadura-emergência (SEM-EM), emergência-R1 (EM-R1) e das subfases R1-R3, R3-R5, R5-R7 e R7-R8 de onze cultivares de soja, semeadas em Santa Maria (3/11/2012) e em Capão do Leão (9/11/2012), no ano agrícola 2012-2013 (RS).



441 Figura 6. Sobreposição, em °C dia, entre o início do florescimento (R1) e o número
 442 final de nós (NFN) de onze cultivares de soja com tipo de crescimento determinado e
 443 indeterminado, em duas datas de semeadura (10/12/2010 e 8/01/2011) no ano agrícola
 444 2010-2011 (a), três datas de semeadura (24/9/2011, 19/11/2011 e 28/1/2012) no ano
 445 agrícola 2011-2012 (b), e quatro datas de semeadura (22/9/2012, 3/11/2012, 2/12/2012
 446 e 06/02/2013) no ano agrícola 2012-2013 (c) nos experimentos em Santa Maria, RS.
 447 *Médias da sobreposição entre o início do florescimento e o número final de nós
 448 seguida pelas mesmas letras maiúsculas (comparação entre cultivares na mesma data de
 449 semeadura) e minúsculas (comparação de cultivar dentro das datas de semeadura) não
 450 diferem pelo Teste Duncan, a 5% de probabilidade de erro.

451



452

453 Figura 7. Sobreposição, em °C dia, entre o início do florescimento (R1) e o número
 454 final de nós (NFN) de onze cultivares de soja com tipo de crescimento determinado e
 455 indeterminado, semeadas em Santa Maria (3/11/2012) e em Capão do Leão (9/11/2012),
 456 no ano agrícola 2012-2013 (RS). *Médias da sobreposição entre o início do
 457 florescimento e o número final de nós seguida pelas mesmas letras maiúsculas
 458 (comparação entre cultivares no mesmo local de semeadura) e minúsculas (comparação
 459 de uma cultivar em diferentes locais de semeadura) não diferem entre si pelo Teste
 460 Duncan, a 5% de probabilidade de erro.

461

**3.4 CAPÍTULO 4 – EFEITO DO TIPO DE CRESCIMENTO NO
DESENVOLVIMENTO DE CULTIVARES MODERNAS DE SOJA APÓS O
INÍCIO DO FLORESCIMENTO NO RIO GRANDE DO SUL**

(Artigo recomendado para publicação em *Bragantia*)

1 Efeito do tipo de crescimento no desenvolvimento de cultivares modernas de soja após
2 o início do florescimento no Rio Grande do Sul

3 **Resumo**

4 Houve mudança na genética da soja cultivada na região Sul do Brasil a partir dos anos
5 2000, o que demanda investimento em estudos básicos e detalhados do crescimento e
6 desenvolvimento. O objetivo deste estudo foi caracterizar a duração do período de
7 sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva, o crescimento em estatura e a emissão
8 de nós após o início do florescimento em cultivares de tipo de crescimento determinado
9 e indeterminado semeadas em épocas e regiões produtoras de soja no Rio Grande do
10 Sul. Experimentos de campo foram conduzidos durante o ano agrícola 2012/2013 e
11 2013/2014, em Santa Maria, Itaqui, Frederico Westphalen, Capão do Leão, Júlio de
12 Castilhos e em três lavouras comerciais de soja em Restinga Sêca, Tupanciretã e Água
13 Santa. Foram estimadas a sobreposição (em dias) das fases vegetativa e reprodutiva,
14 diferença do número de nós e da estatura em R8 e R1. As cultivares com tipo de
15 crescimento indeterminado apresentaram maior período de sobreposição das fases
16 vegetativa e reprodutiva, crescimento em estatura e emissão de nós após o início do
17 florescimento do que as cultivares determinadas. A magnitude dos valores de
18 sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva, e do aumento em estatura e número de
19 nós após o R1, variou com o tipo de crescimento, grupo de maturidade relativa, local e
20 época de semeadura.

21 Palavras-chave: *Glycine max*, determinado, indeterminado, grupo de maturidade relativa

22

23 Growth habit effect on growth and development of soybean cultivars after the onset of
24 flowering in Rio Grande do Sul

25 Abstract

26 There was a change in the genetics of soybeans grown in southern Brazil from the
27 2000s, which requires investment in basic and detailed studies about the growth and
28 development. The purposes in this paper were to characterize the overlap period of
29 vegetative and reproductive phases, growth in stature and the emission of nodes after
30 the beginning of flowering in determinate and indeterminate cultivars in different
31 sowing dates and soybean regions in Rio Grande do Sul. Field experiments were
32 conducted during the growing season 2012/2013 and 2013/2014, in Santa Maria, Itaqui,
33 Frederico Westphalen, Capão do Leão, Júlio de Castilhos and in three soybean crops on
34 Restinga Sêca, Tupanciretã and Água Santa. Were carried out overlapping
35 determinations (in days) of vegetative and reproductive phases, number of nodes in R8
36 less number of nodes in R1 and stature in R8 less stature in R1. The cultivars with
37 indeterminate growth had a higher overlap period of vegetative and reproductive phases,
38 growing in stature and emission nodes after the beginning of flowering bigger than
39 determinate cultivars. The magnitude of the overlapping values of vegetative and
40 reproductive phases, and of the increase in height and number of nodes after R1, ranged
41 with the type of growth, maturity group, location and sowing date.

42 Key-words: *Glycine max*, determinate, indeterminate, maturity group.

43

44

1 INTRODUÇÃO

45 Na região Sul do Brasil ocorreu aumento da utilização de cultivares de soja com
46 tipo de crescimento indeterminado e grupo de maturidade relativa (GMR) entre 4.5 e
47 6.5 a partir dos anos 2000 (Zanon et al., 2015a). No Rio Grande do Sul (RS), esse novo
48 grupo de cultivares representou mais de 90% da área semeada com soja nos últimos

49 cinco anos agrícolas e permitiu que muitos agricultores antecipassem (setembro e início
50 de outubro) ou atrasassem (janeiro e início de fevereiro) a semeadura (Emater, 2015).
51 Esta mudança na genética e na época de semeadura da soja demanda investimento em
52 estudos básicos e detalhados do crescimento e desenvolvimento, visando adaptar as
53 práticas de manejo para esse novo grupo de cultivares.

54 Em soja a duração do período de sobreposição do desenvolvimento vegetativo e
55 reprodutivo tem destaque na medida em que uma maior sobreposição implica em mais
56 competição por fotoassimilados entre o crescimento das estruturas vegetativas (folhas e
57 ramos) e das reprodutivas (legumes e grãos) (Setiyono et al., 2011). O período de
58 sobreposição é influenciado pela temperatura e o fotoperíodo e está associado ao tipo de
59 crescimento, definido em soja de acordo com o momento que cessa o crescimento da
60 haste principal após o início do florescimento (R1) (Bernard, 1972).

61 Utilizando acessos do banco de germoplasma de soja do Departamento de
62 Agricultura dos Estados Unidos, Bernard et al. (1998) classificaram as cultivares de “1”
63 (muito determinado) a 5 (muito indeterminado) de acordo com o período que essas
64 param de crescer vegetativamente após R1. As cultivares que apresentaram valores <
65 2.0 foram classificadas como determinada, ou seja, são caracterizadas pelo nulo ou
66 pequeno crescimento em estatura após o início do florescimento. As cultivares
67 indeterminadas receberam notas ≥ 2.5 , pois continuaram emitindo nós e alongando o
68 caule até próximo o enchimento de grãos, e as com valores entre 2.0 e 2.5 foram
69 classificadas como semi-determinada. Porém, quando as cultivares de soja são semeadas
70 antes ou após o período recomendado, a duração do período de sobreposição da fase
71 vegetativa e reprodutiva varia com as condições meteorológicas durante o ciclo de

72 desenvolvimento, o que pode confundir os tipos de crescimento (Bernard, 1972;
73 Heatherly & Smith, 2004).

74 Um número limitado de ambientes e genótipos foram estudados comparando
75 diferentes tipos de crescimento e a maioria das observações foi em experimentos
76 conduzidos fora do Brasil durante as décadas de 1970, 1980 e 1990 (Fehr et al., 1971;
77 Bernard, 1972; Bernard et al., 1998; Ashlock & Purcell, 2000). Como novas cultivares
78 de soja são lançadas anualmente e as atualmente utilizadas pelos agricultores da região
79 Sul do Brasil são do tipo indeterminado e GMR menor que 6.5 e em diferentes sistemas
80 de produção, é pertinente retomar os estudos para caracterizar a duração do período de
81 sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva e o crescimento em estatura após R1.
82 Estas informações podem auxiliar a assistência técnica e os agricultores na escolha da
83 época de semeadura, das cultivares (GMR), do espaçamento entre linhas, da densidade
84 de semeadura e de outras práticas de manejo visando explorar o potencial genético de
85 cada cultivar.

86 O objetivo deste estudo foi caracterizar a duração do período de sobreposição
87 das fases vegetativa e reprodutiva, o crescimento em estatura e a emissão de nós após o
88 início do florescimento em cultivares de tipo de crescimento determinado e
89 indeterminado semeadas em épocas e regiões produtoras de soja no Rio Grande do Sul.

90

91

2 MATERIAL E MÉTODOS

92 Experimentos de campo foram conduzidos durante dois anos agrícolas
93 (2012/2013 e 2013/2014) em oito locais de regiões onde predominantemente é cultivado
94 soja no RS (Figura 1). Os sítios experimentais estavam localizados na Universidade
95 Federal de Santa Maria (Santa Maria e Frederico Westphalen), na Universidade Federal

96 de Pelotas (Capão do Leão), na Universidade Federal do Pampa (Itaqui), na Fundação
97 Estadual de Pesquisa Agropecuária do RS – FEPAGRO Sementes (Júlio de Castilhos) e
98 em três lavouras comerciais de soja localizadas nos municípios de Restinga Sêca,
99 Tupanciretã e Água Santa. O clima predominante no RS é subtropical úmido com
100 verões quentes e sem estação seca definida (Kuinchtner & Buriol, 2001). Cinco tipos de
101 solo foram observados nos sítios experimentais, desde solos muito profundos, mais de
102 2,50 m, até solos pouco profundos, menos que 1,0 m. Na região Sul e Oeste do RS, os
103 experimentos foram conduzidos em áreas tradicionalmente cultivadas com arroz (terras
104 baixas), onde a maioria dos solos apresentam pequena capacidade de armazenamento de
105 água e baixa condutividade hidráulica, comparados com os solos de terras altas na
106 região Norte do RS (Streck et al., 2008).

107 As cultivares de soja utilizadas nos experimentos foram selecionadas por
108 representarem diferentes tipos de crescimento e uma faixa de grupos maturidade relativa
109 que representa a totalidade dos GMR atualmente semeados no RS (Tabela 1). Em Santa
110 Maria foram realizadas semeaduras, antes (setembro), durante (novembro) e após
111 (fevereiro) a época recomendada no Zoneamento de Risco Climático da Soja no RS, em
112 Itaqui antes (outubro e novembro) e durante (dezembro) e nos demais locais as
113 semeaduras foram durante o período recomendado, totalizando 12 datas de semeadura
114 (Tabela 2). A adubação de base, a inoculação das sementes com estirpes de
115 *Bradyrhizobium japonicum*, o tratamento das sementes com fungicida e inseticida, e o
116 controle de plantas daninhas, pragas e doenças foram realizados de acordo com as
117 recomendações técnicas da cultura. Em Santa Maria, os experimentos foram conduzidos
118 com irrigação suplementar de modo que o crescimento e o desenvolvimento das plantas

119 ocorressem sem deficiência hídrica. Nos demais locais não houve irrigação suplementar,
120 representando as condições da maioria das lavouras de soja do RS.

121 Os experimentos em Santa Maria, Itaqui, Capão do Leão e Frederico
122 Westphalen foram no delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro
123 repetições. Cada bloco continha 17 linhas, sendo duas linhas de bordadura de cada lado.
124 Cada linha continha uma cultivar e teve 3 m de comprimento. Em Júlio de Castilhos, o
125 experimento tinha três repetições e as parcelas tinham quatro linhas de cada cultivar
126 com 5 m de comprimento. Nas lavouras comerciais (Restinga Sêca, Tupanciretã e Água
127 Santa) os experimentos foram conduzidos na forma de parcelas demonstrativas (sem
128 repetição), sendo cada parcela formada por quatro linhas de cada cultivar com 3 m de
129 comprimento. Em todos os experimentos e locais o espaçamento foi de 0,45 m entre
130 fileiras e a densidade de 30 plantas.m⁻², que são o espaçamento e densidade de plantas
131 utilizados na maioria das lavouras de soja no RS (Emater, 2015).

132 A data de emergência foi considerada quando 50% das plantas estavam com os
133 cotilédones acima do solo. Logo após a emissão do primeiro par de folhas unifoliadas
134 foram marcadas com arame colorido as plantas nas quais foram realizadas as avaliações
135 da contagem do número de nós (NN), fenologia e estatura de planta. A data do número
136 final de nós foi considerada quando a haste principal não emitiu mais nós. As avaliações
137 para identificar os estágios reprodutivos R1, R3, R4, R5, R6, R7 e R8, seguiram a escala
138 de Fehr et al. (1971). Mais informações sobre o protocolo experimental estão na Tabela
139 2.

140 Foi determinada a duração, em dias, das fases emergência ao início do
141 florescimento (R1), emergência ao número final de nós, início do florescimento à
142 maturação plena (R8) e o ciclo total. A estatura de planta (distância do solo até o ápice

143 de crescimento no caule principal, em cm) foi medida nos estágios R1 e R8. A análise
144 estatística foi realizada para as variáveis sobreposição (em dias) das fases vegetativa e
145 reprodutiva, NN em R8 menos NN em R1 e estatura em R8 menos estatura em R1.

146 A análise dos dados foi realizada para cada época de semeadura em todos os
147 locais, como realizado por Heatherly & Smith (2004). As médias dessas variáveis foram
148 distinguidas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Foi realizada a análise de contraste para
149 comparar cultivares com tipo de crescimento determinado versus as cultivares com tipo
150 de crescimento indeterminado. Como nas lavouras comerciais não houve repetições, a
151 análise constou apenas do cálculo da média das variáveis para cada cultivar. Todas as
152 análises estatísticas foram realizadas com auxílio do pacote estatístico SAS.

153

154 **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

155 3.1 Caracterização meteorológica

156 A variação dos elementos meteorológicos ao longo do ciclo de desenvolvimento
157 das cultivares de soja, nos oito locais e 12 épocas de semeadura, representa quase a
158 totalidade das situações que podem ocorrer em lavouras comerciais de soja no RS
159 (Figura 2). Na maioria dos locais e épocas de semeadura o desenvolvimento das plantas
160 de soja ocorreu com temperatura média, fotoperíodo e radiação solar crescentes no
161 início e decrescente no restante do ciclo, representando semeaduras antes e durante a
162 época recomendada no Zoneamento Agroclimático da Soja no RS. Nas semeaduras de
163 23/12/2013 em Itaqui e 6/2/2014 em Santa Maria, essas variáveis meteorológicas foram
164 decrescentes durante toda a estação de crescimento, representando semeaduras após a
165 época recomendada. A variação na disponibilidade dos elementos meteorológicos em
166 função das épocas e locais de semeadura promoveu mudanças no período de

167 sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva, no crescimento em estatura e emissão
168 de nós após o R1 entre os tipos de crescimento e GMR (Figuras 3, 4, 5 e 6).

169 3.2 Experimentos com irrigação suplementar

170 A estatura de planta e o NN em R1 foi maior nas cultivares determinadas
171 (Tabela 3). Essa resposta concorda com estudos de Heatherly & Smith (2004) e Zanon
172 et al. (2015b) que verificaram que as cultivares determinadas apresentam maior taxa de
173 crescimento até o estágio R1, enquanto as cultivares indeterminadas apresentam
174 crescimento inicial mais lento, porém cessando somente no início do enchimento de
175 grãos. Não ocorreu diferença na estatura em R8 entre tipos de crescimento, exceto na
176 semeadura de novembro onde as cultivares determinadas foram maiores. Esse resultado
177 comprova a modificação genética da cultura da soja nos últimos quinze anos, pois o tipo
178 de crescimento indeterminado, que atualmente representa a maioria das cultivares
179 semeadas no Sul do Brasil, ocupou um espaço inexpressivo nas lavouras de soja até os
180 anos 2000, pois as plantas apresentavam elevado crescimento em estatura, o que
181 provocava acamamento e conseqüente redução da produtividade (Mundstock &
182 Thomas, 2005). O menor NN em R8 nas cultivares determinadas na semeadura de
183 setembro esta associado ao tipo de crescimento, ou seja, como essas foram expostas a
184 fotoperíodo curto no final de setembro e início de outubro, foram induzidas a florescer
185 precocemente e cessaram a emissão de nós alguns dias após o R1. Enquanto as
186 cultivares indeterminadas, apesar de também terem sido induzidas a florescer,
187 continuaram emitindo nós até o início do enchimento de grãos (Zanon et al., 2015a).

188 O período de sobreposição entre as fases vegetativa e reprodutiva, o crescimento
189 em estatura e a emissão de nós de R1 até R8, em média foi maior para as cultivares com
190 tipo de crescimento indeterminado comparando com as de tipo determinado, e a

191 magnitude desses valores diminuiu com o atraso na época de semeadura nas cultivares
192 indeterminadas e praticamente não variou nas cultivares determinadas (Figura 3). O
193 crescimento em estatura, emissão de nós e sobreposição das fases vegetativa e
194 reprodutiva na maioria das cultivares determinadas nas épocas, diferiu dos primeiros
195 estudos de tipo de crescimento em soja (Egli & Leggett, 1973), quando essas cessavam
196 o crescimento vegetativo logo após o R1. Sendo assim, verifica-se a necessidade de
197 novos estudos que tenham como objetivo entender e reclassificar as cultivares
198 atualmente semeadas pelos agricultores do Sul do Brasil quanto ao tipo de crescimento.
199 Além disso, sugere-se que as cultivares atualmente classificadas como de tipo de
200 crescimento determinado devam ser denominadas como tipo de crescimento semi-
201 determinado.

202 O crescimento em estatura após R1 nas cultivares indeterminadas e
203 determinadas, variou, em média, de 122% até 481% e de 4% até 40% na semeadura em
204 setembro, de 58% até 370% e de 18% até 33% na semeadura em novembro e de 57%
205 até 129% e de 34% até 49% na semeadura em fevereiro, respectivamente. Já o aumento
206 do NN após R1 nas semeaduras em setembro, novembro e fevereiro variou de 8% a
207 26%, 19% a 31% e 17% a 21% nas cultivares determinadas e de 79% a 163%, 43% a
208 170% e 23% a 52% nas cultivares indeterminadas, respectivamente. Essa ampla
209 variação no crescimento e desenvolvimento após o R1 até a emissão do último nó na
210 haste principal está associada à faixa de GMR (4.7 até 8.2), datas de semeadura
211 (setembro a fevereiro) e tipos de crescimento. A partir desses resultados torna-se
212 evidente a necessidade de adequar as práticas de manejo, como escolha do tipo de
213 crescimento e GMR dessas novas cultivares de soja em função da época de semeadura.

214 Além disso, verifica-se que resultados encontrados em latitudes maiores (38° N)
215 (Egli & Leggett, 1973), ou próximas (33° N) (Heatherly & Smith, 2004) onde cultivares
216 determinadas apresentaram mais de 70% da estatura final e haviam emitido mais de
217 80% do total de nós da haste principal em R1, e as cultivares indeterminadas
218 apresentaram menos de 50% da estatura final e menos que 60% do número final de nós
219 em R1, foram diferentes dos encontrados nas condições de cultivo do RS, indicando a
220 complexa interação genótipo x ambiente para a cultura da soja e o cuidado que os
221 consultores técnicos e agricultores devem ter quando for extrapolar resultados de
222 estudos conduzidos em outros locais para tomar decisões de manejo em suas lavouras.

223 3.3 Experimentos sem irrigação suplementar

224 A estatura e o NN médio em R1 foram maiores nas cultivares determinadas,
225 seguindo a mesma tendência dos resultados em Santa Maria (experimentos irrigados). O
226 NN em R8 foi maior nas cultivares indeterminadas, exceto Frederico Westphalen. A
227 estatura em R8 não diferiu entre os tipos de crescimento, exceto em Itaquí na semeadura
228 de outubro, onde as cultivares indeterminadas foram maiores (Tabela 3).

229 As cultivares indeterminadas apresentaram, na média, maior período de
230 sobreposição, maior crescimento em estatura nas semeaduras de outubro e novembro, e
231 maior emissão de nós na semeadura de outubro em Itaquí (Figura 4). O período de
232 sobreposição entre as fases vegetativa e reprodutiva variou de 18% a 24% e 40% a 49%
233 na semeadura de outubro, de 21% a 25% e 32% a 44% na semeadura de novembro nas
234 cultivares determinadas e indeterminadas, respectivamente. A diferença entre a estatura
235 em R8 e R1 variou de 11% a 22% e 49% a 109% na semeadura de outubro, de 3% a
236 20% e 29% a 114% na semeadura de novembro e de 9% a 28% e 19% a 68% na
237 semeadura de dezembro nas cultivares determinadas e indeterminadas, respectivamente.

238 Já a diferença entre o NN em R8 e R1, nas cultivares determinadas e indeterminadas,
239 variaram de 23% a 49% e 82% a 212% na semeadura de outubro e de 25% a 39% e
240 48% a 151% na semeadura de novembro nas cultivares determinadas e indeterminadas,
241 respectivamente. Não ocorreram diferenças entre as cultivares indeterminadas e entre as
242 cultivares determinadas, dentro da mesma data de semeadura no período de
243 sobreposição, estatura e emissão de nós após o R1 em Itaqui.

244 Apesar de ter ocorrido precipitação de 753 mm, 726 mm e 741 mm, entre a
245 semeadura e o R7 nas semeaduras de outubro, novembro e dezembro em Itaqui,
246 respectivamente, as hipóteses que explicam a menor diferença das variáveis estudadas
247 em valores absolutos entre tipos de crescimento, comparado com os experimentos em
248 Santa Maria, e a ausência de diferença entre cultivares com o mesmo tipo de
249 crescimento são os períodos de deficiência hídrica que ocorreram durante o ciclo de
250 desenvolvimento em virtude da baixa capacidade de armazenamento de água no solo e o
251 pequeno volume de solo explorado pelas raízes (<0,5 m). Além da baixa condutividade
252 hidráulica do solo, que associada ao elevado volume de chuvas no início de novembro e
253 na metade de março (Figura 2d) provocaram estresses nas plantas pelo excesso hídrico
254 no solo. Nos locais onde foi realizada uma data de semeadura na época recomendada, as
255 cultivares indeterminadas apresentaram maior sobreposição das fases vegetativa e
256 reprodutiva, maior emissão de nós após R1 em Capão do Leão e Júlio de Castilhos e
257 maior crescimento em estatura após R1 em Júlio de Castilhos (Figura 5). A cultivar NS
258 4823 RR, pertencente ao GMR 4.8, apresentou maior sobreposição, aumento do NN e
259 estatura após o R1, quando comparado com as outras cultivares indeterminadas e
260 determinadas.

261 3.4 Experimentos em lavouras comerciais

262 Nos experimentos conduzidos nas lavouras comerciais, os valores de aumento
263 em estatura e NN após o R1, e a sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva
264 apresentaram a mesma tendência dos outros locais (Figura 6). Em Restinga Sêca, a
265 diferença entre as cultivares determinadas e indeterminadas foi maior, provavelmente
266 porque não foram verificados sintomas morfológicos de deficiência hídrica nessa
267 lavoura, ou seja, não ocorreu restrição hídrica para os processos de crescimento e
268 desenvolvimento. Em Água Santa, as menores diferenças entre tipos de crescimento
269 está associada ao atraso na data de semeadura (dezembro), o que provocou a redução do
270 crescimento e do ciclo de desenvolvimento, devido a soja ser uma planta de dia curto e
271 ter sido induzida a florescer mais rapidamente do que as plantas que foram semeadas em
272 novembro em Restinga Sêca e Tupanciretã, que foram expostas a fotoperíodo crescente
273 por um período de tempo maior (Sinclair et al., 2005, Zanon et al., 2015a). Assim, à
274 medida que ocorre atraso na data de semeadura, as diferenças no crescimento e
275 desenvolvimento entre cultivares de soja com diferentes tipos de crescimento tendem a
276 ser menores.

277 3.5 Análise conjunta dos experimentos

278 A partir das diferenças no período de sobreposição das fases vegetativa e
279 reprodutiva, e da estatura e NN entre R1 e R8 nas cultivares determinadas e
280 indeterminadas em função das épocas e locais de cultivo, observa-se que existe
281 variabilidade genotípica e padrões de crescimento e desenvolvimento após R1, entre
282 cultivares independente do tipo de crescimento. Essa resposta indica que os melhoristas
283 podem selecionar populações com diferentes períodos de sobreposição, crescimento em
284 estatura e emissão de nós após R1, baseado nas características desejadas em função da
285 época de semeadura. O conhecimento da variabilidade entre tipos de crescimento é

286 determinante para alcançar máximos rendimentos quando são realizadas semeaduras
287 precoces ou tardias, pois as características estatura e número de nós são fatores
288 determinantes para adaptação das cultivares, operações de manejo e expressão do
289 potencial de rendimento (Wilcox & Sediya, 1981). Além disso, esses resultados
290 indicam a necessidade de estudos ecofisiológicos (particionamento de fotoassimilados)
291 e fisiológicos (taxa fotossintética e condutância estomática), visando elucidar as
292 diferenças entre cultivares com o mesmo e/ou diferentes tipos de crescimento, GMR,
293 época e local de cultivo.

294 A partir desse estudo, os consultores técnicos e agricultores poderão tomar
295 decisões de manejo baseado em informações técnicas atualizadas e disponíveis no
296 catálogo de apresentação quando do lançamento da cultivar. Como as cultivares com
297 tipo de crescimento indeterminado apresentam maior período de sobreposição e
298 aumento em estatura na maioria dos locais e épocas de semeadura, pode-se inferir
299 provável aumento da estabilidade dessas cultivares, com maior capacidade de adaptar-se
300 a condições adversas de cultivo, como antecipar ou atrasar da data de semeadura, curtos
301 períodos de estresse hídrico provocados pela ausência de chuva ou excesso hídrico no
302 solo, fenômenos que frequentemente ocorrem no RS. Essas características permitem
303 entender por que nos últimos 15 anos ocorreu uma inversão na adoção do tipo de
304 crescimento das cultivares de soja semeadas no Sul do Brasil.

305

306

4 CONCLUSÕES

307 O período de sobreposição entre as fases vegetativa e reprodutiva, o crescimento
308 em estatura e a emissão de nós de R1 até R8, foi maior para as cultivares com tipo de
309 crescimento indeterminado comparando com as de tipo determinado, e a magnitude

310 desses valores diminuiu com o atraso na época de semeadura nas cultivares
311 indeterminadas e praticamente não variou nas cultivares determinadas.

312 A necessidade de novos estudos que tenham como objetivo entender e
313 reclassificar as cultivares atualmente semeadas pelos agricultores do Sul do Brasil
314 quanto ao tipo de crescimento.

315

316

REFERÊNCIAS

317 Ashlock, L., & Purcell, L. (2000). Growth and development. In L. Ashlock (ed.)
318 Arkansas soybean handbook (p. 7-12). University Arkansas Cooperation Extension
319 Service: Little Rock.

320 Bernard, R. L. (1972). Two genes affecting stem termination in soybeans. *Crop Science*,
321 12, 235–239.

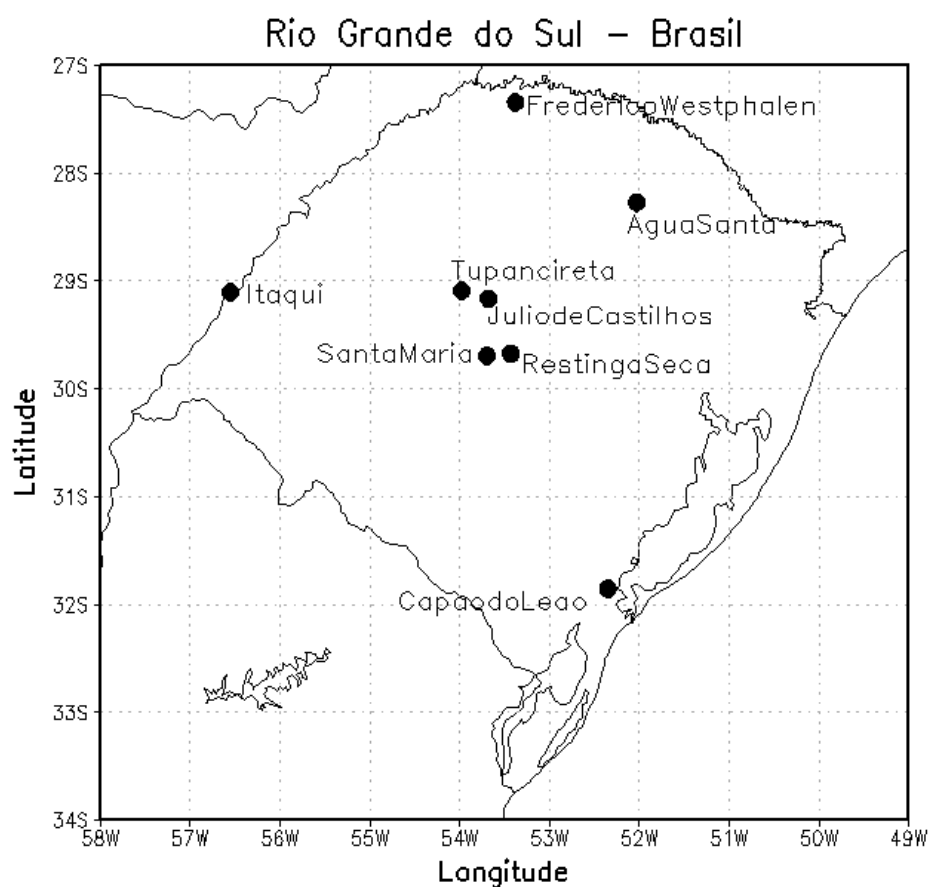
322 Bernard, R. L., C. R., Cremeens, R. L., Cooper, F. I., Collins, O. A., Krober, K. L.,
323 Athow, F. A., Laviolette, C. J., & Nelson, R.L. (1998). Evaluation of the USDA
324 soybean Germplasm Collection: Maturity groups 000–IV. USDA-ARS Tech. Bull.
325 1844. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

326 Egli, D. B., & Leggett, J. E. (1973). Dry matter accumulation patterns in determinate
327 and indeterminate soybeans. *Crop Science*, 13, 220–222.

328 Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural - EMATER (2015). Levantamento de
329 área semeada com soja no Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Emater. Recuperado em 20
330 de setembro de 2015, de [http:// www.emater.tche.br/site/servicos/informacoes-](http://www.emater.tche.br/site/servicos/informacoes-agropecuarias.php#)
331 [agropecuarias.php#](http://www.emater.tche.br/site/servicos/informacoes-agropecuarias.php#).

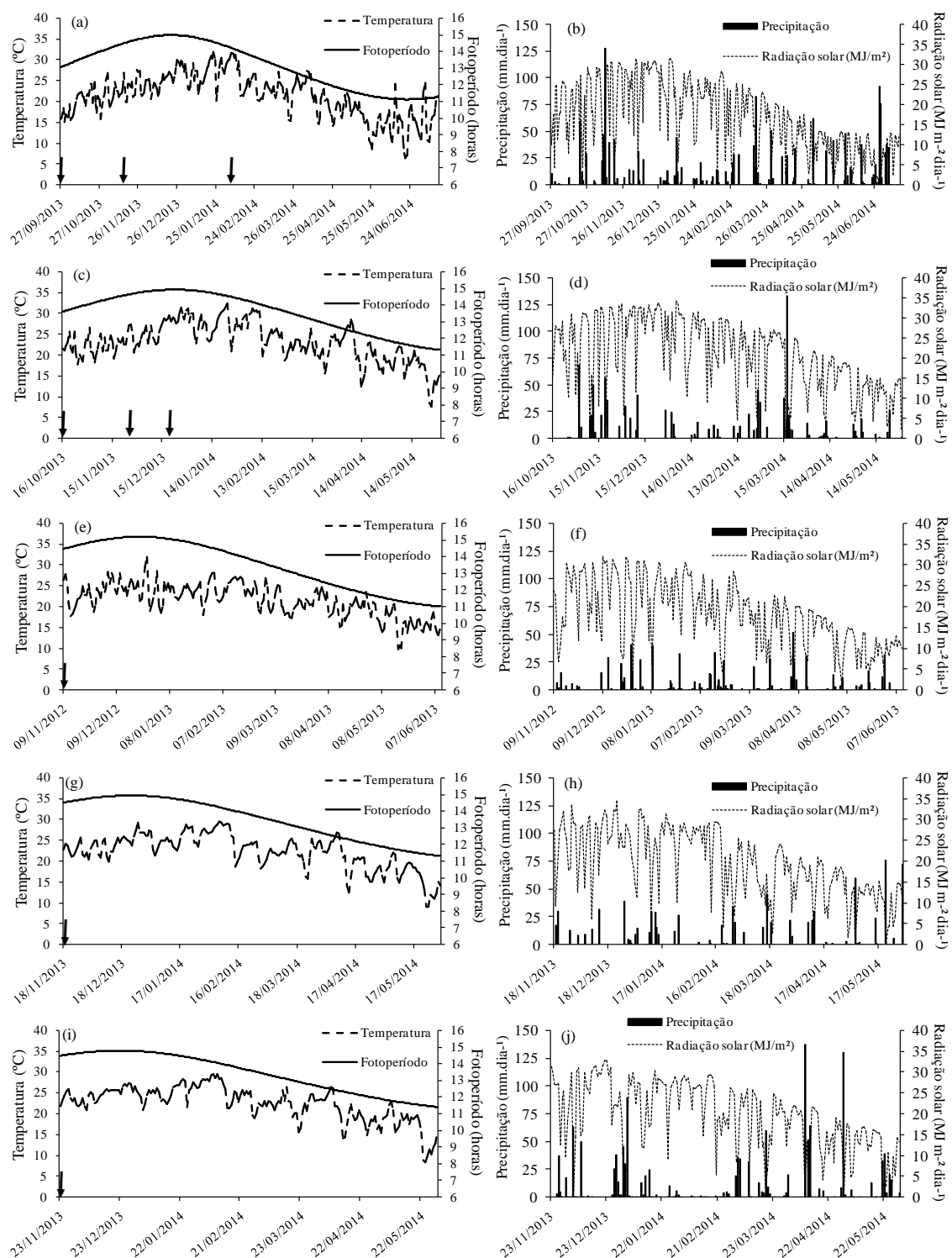
- 332 Fehr, W.R., C.E. Caviness, D.T. Burmood, and J.S. Pennington, 1971. Stage of
333 development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Sci.* 11:929–
334 931.
- 335 Heatherly, L.G., & Smith, J.R. (2004). Effect of soybean stem growth habit on height
336 and node number after beginning bloom in the midsouthern USA. *Crop Science*, 44,
337 1855-1859.
- 338 Mundstock, C.M.; Thomas, A.L. Soja: Fatores que afetam o crescimento e o rendimento
339 de grãos. Porto Alegre: Evangraf, 2005. v. 1. 31p.
- 340 Setiyono, T. D., Bastidas, A. M., Cassman, K. G., Weiss, A., Dobermann, A., & Specht,
341 J.E. (2011). Nodal leaf area distribution in soybean plants grown in high yield
342 environments. *Agronomy Journal*, 103, 1198-1205, 2011.
343 <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2011.0051>.
- 344 Streck, E.V., Kampf, N., Dalmolin, R. S. D., Klamt, E., Nascimento, P.C., Schneider,
345 P., Giasson, E. & Pinto, L.F.S. (2008). Solos do Rio Grande do Sul. EMATER/RS,
346 UFRGS.
- 347 Sinclair, T.R., Neumaier, N., Farias, J. R. B., & Nepomuceno, A. L. (2005).
348 Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low latitude
349 environments. *Field Crops Research*, 92, 53-59. [http://dx.doi.org/](http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2004.08.008)
350 [10.1016/j.fcr.2004.08.008](http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2004.08.008)
- 351 Zanon, A.J., Winck, J.E.M., Streck, N.A., Richter, G.L., Rocha, T.S.M. & Cera, J.C.
352 (2015a). Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo
353 de crescimento em terras altas e terras baixas. *Bragantia*, Ahead of print.
354 <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0043>

355 Zanon, A.J., Streck, N.A., Richter, G.L., Becker, C.C., Rocha, T.S.M., Cera, J.C.,
356 Winck, J.E.M., Cardoso, A.P., Tagliapietra, E.L. & Weber, P.S. (2015b). Contribuição
357 das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja.
358 *Bragantia*, Ahead of print. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0463>
359 Wilcox, J.R., Sedyama, T. (1981). Interrelationships among height, lodging and yield
360 in determinate and indeterminate soybeans. *Euphytica*, 30, 323-326.
361



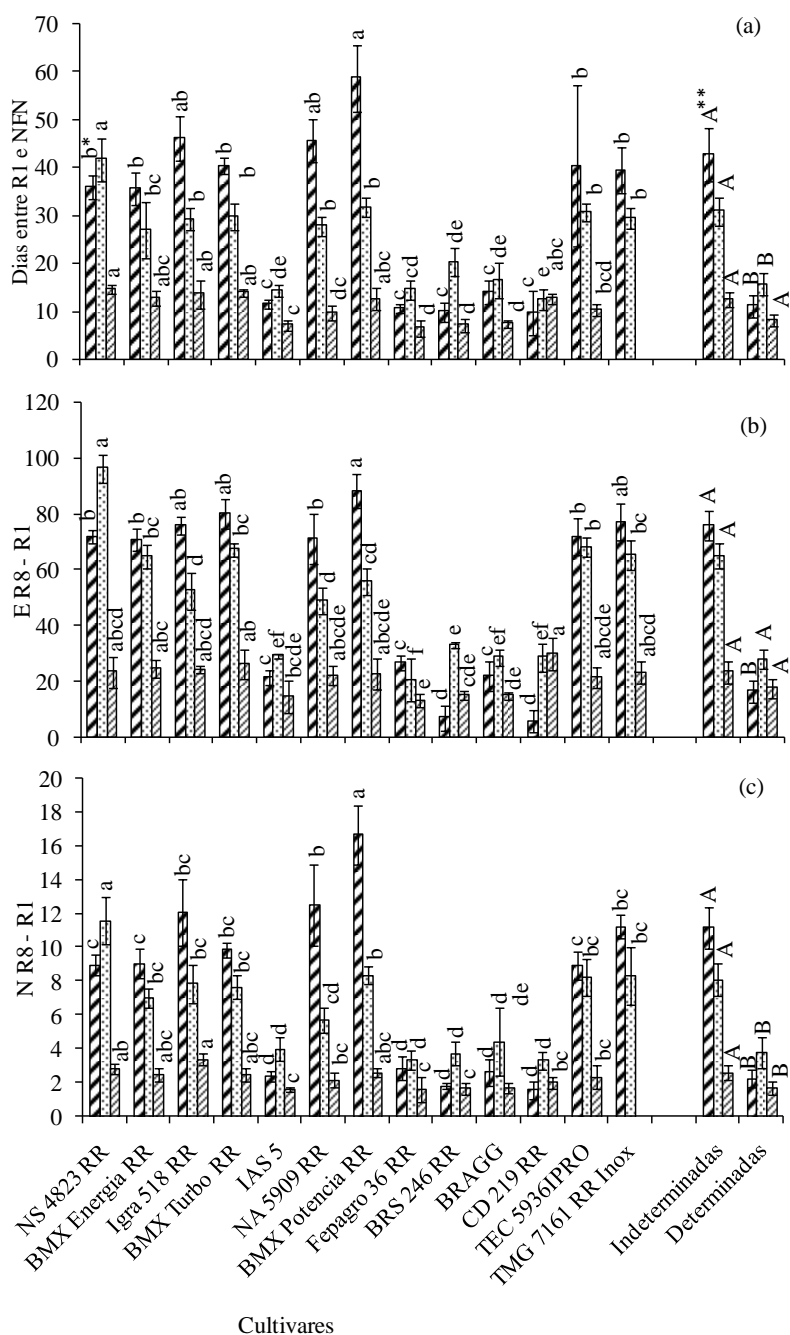
362

363 Figura 1. Locais onde foram conduzidos experimentos com a cultura da soja durante os
364 anos agrícolas 2012/2013 e 2013/2014 no Rio Grande do Sul.



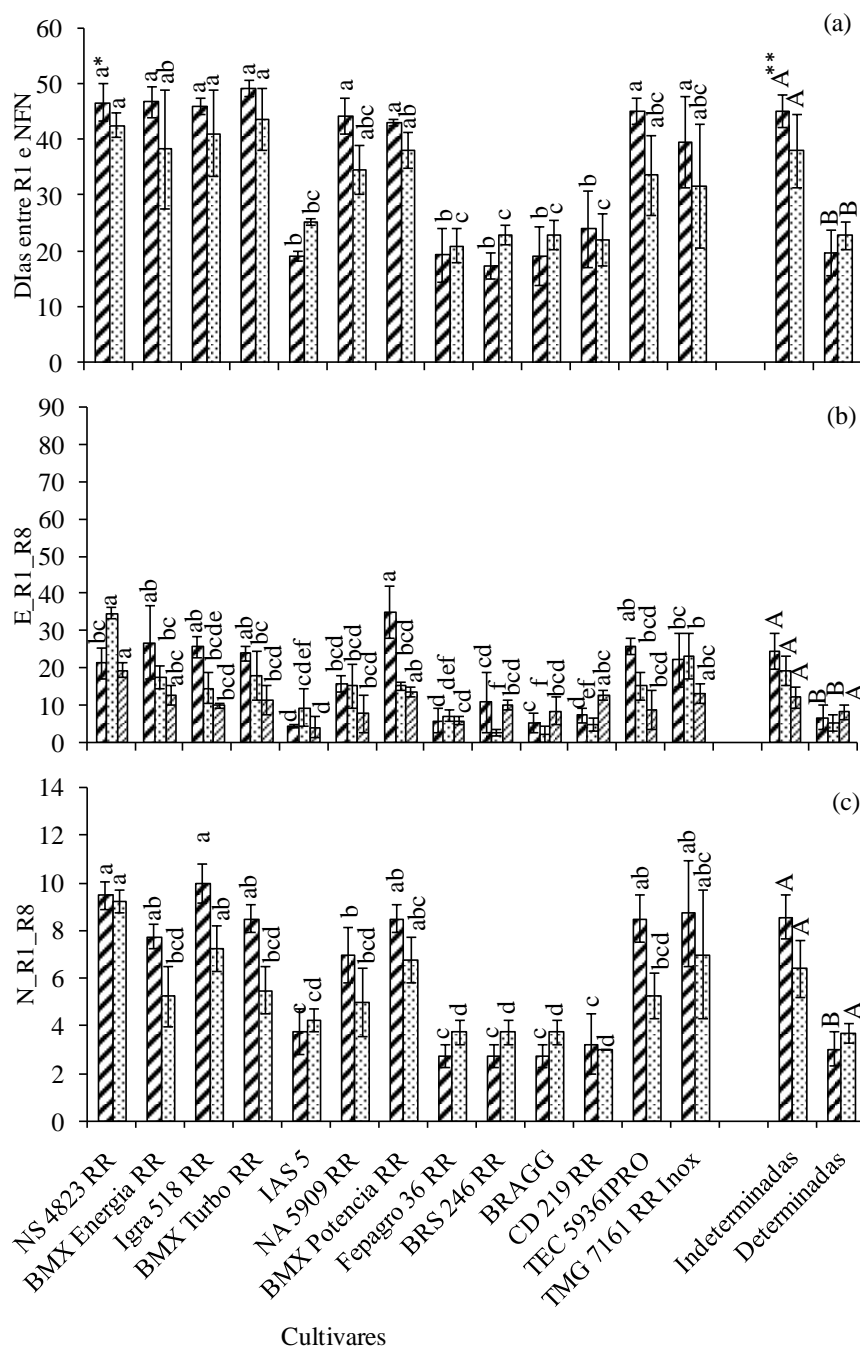
365

366 Figura 2. Temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), fotoperíodo (horas dia^{-1}), precipitação (mm
 367 dia^{-1}) e Radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) durante os experimentos em Santa Maria (a,b),
 368 Itaqui (c,d), Capão do Leão (e,f), Júlio de Castilhos (g,h) e Frederico Westphalen (i,j).
 369 As setas indicam as datas de semeadura.



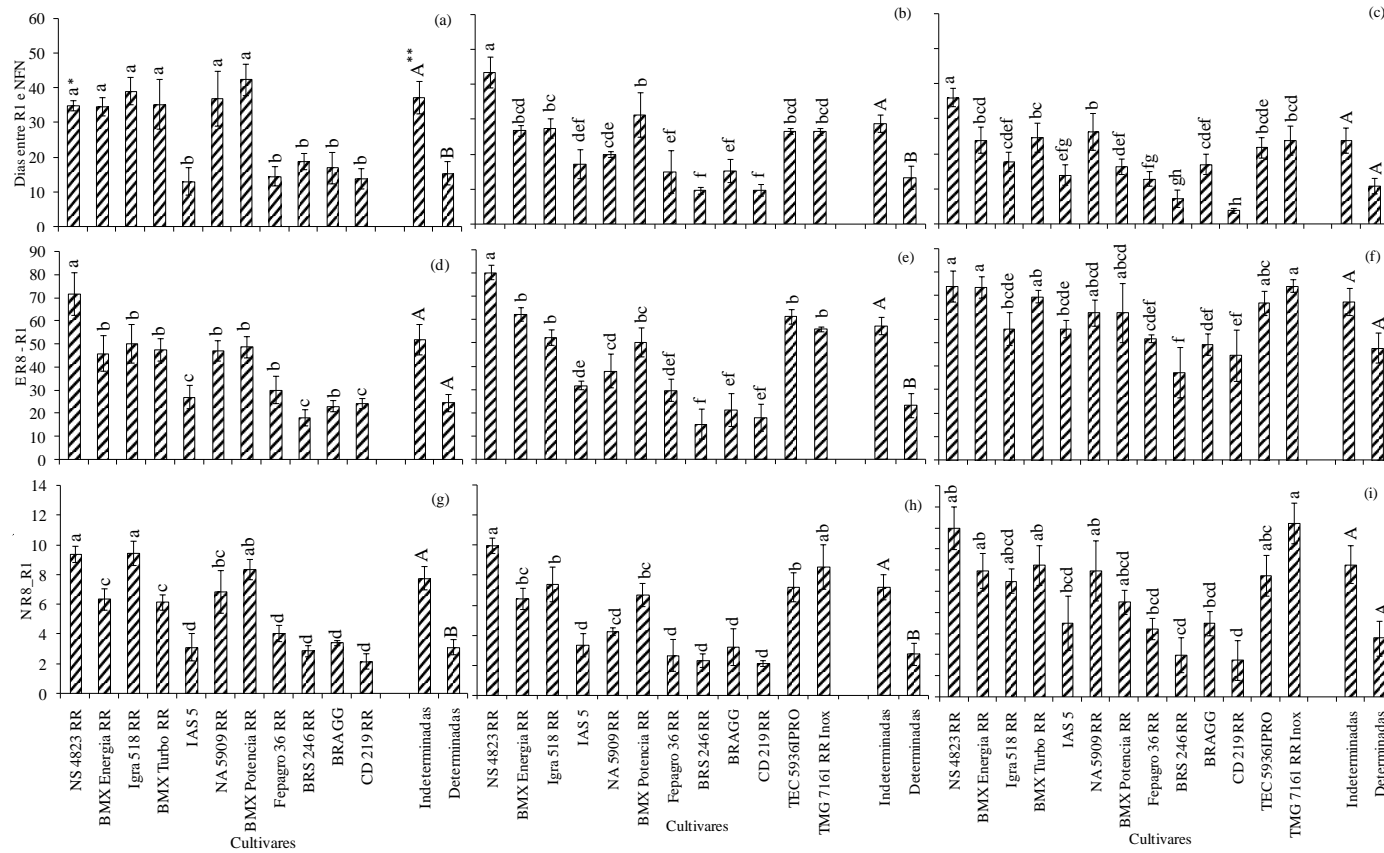
370

371 Figura 3. Sobreposição, em dias, entre o início do florescimento (R1) e o número final
 372 de nós (NFN) (a), diferença, em cm, em estatura no R8 e no R1 (ER8 - R1) (b) e a
 373 diferença no número de nós no R8 e no R1 (NR8 - R1) (c) em cultivares de soja
 374 semeadas em 27/09/2013, 15/11/2013 e 6/2/2014 em Santa Maria, RS. *Médias
 375 seguidas pelas mesmas letras minúsculas (comparação entre cultivares na mesmas data
 376 de semeadura) não diferem entre si pelo Teste Tukey. **Médias seguidas pelas mesmas
 377 letras maiúsculas não diferiram entre si pela análise de contraste a 5% de probabilidade
 378 de erro.



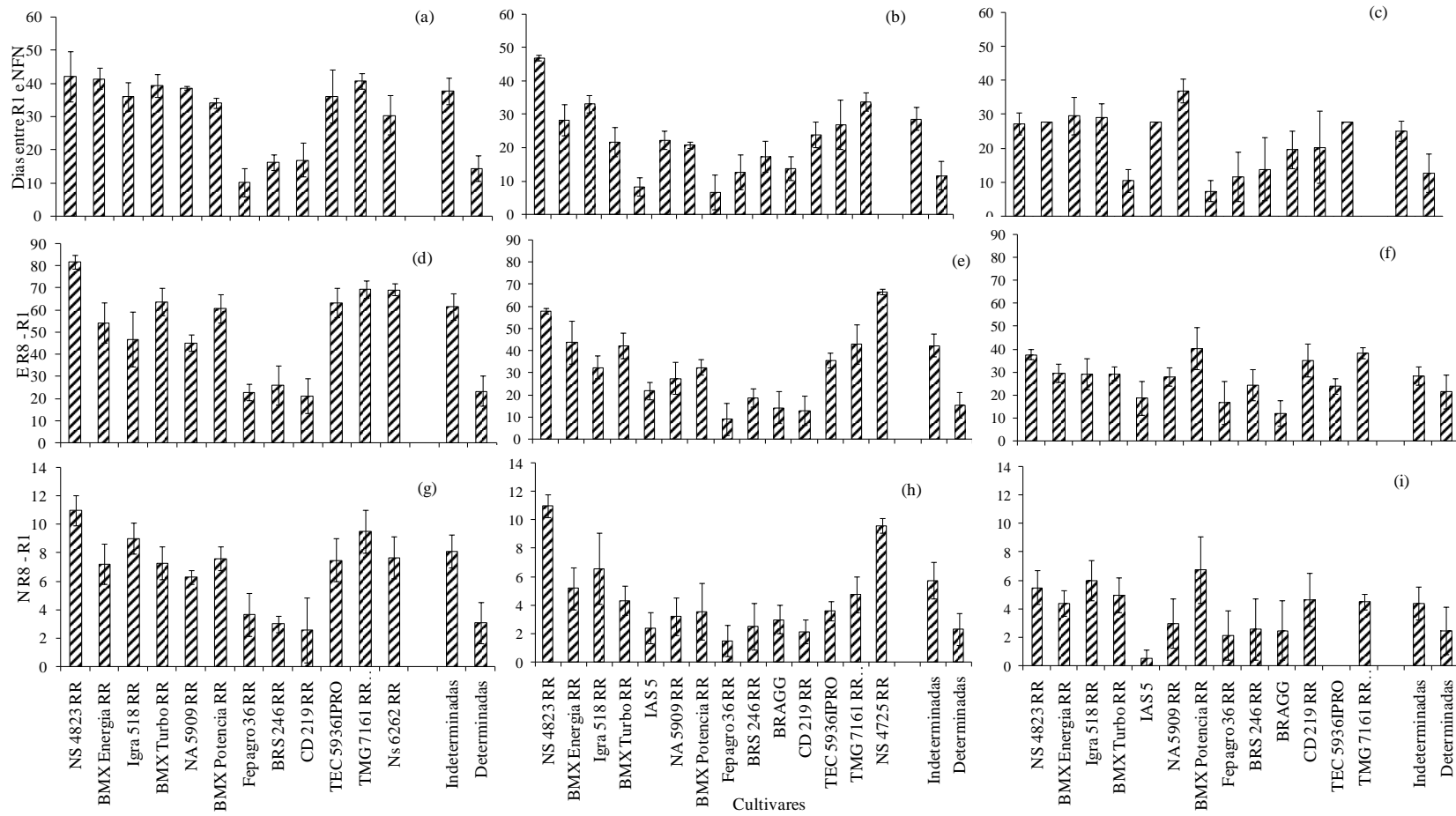
379

380 Figura 4. Sobreposição, em dias, entre o início do florescimento (R1) e o número final
 381 de nós (NFN) (a), diferença, em cm, em estatura no R8 e no R1 (E R8 - R1) (b) e a
 382 diferença no número de nós no R8 e no R1 (N R8 - R1) (c) em cultivares de soja
 383 semeadas em 16/10/2013, 25/11/2013 e 23/12/2014 em Itaqui, RS. *Médias seguidas
 384 pelas mesmas letras minúsculas (comparação entre cultivares na mesma data de
 385 semeadura) não diferem entre si pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade de erro.
 386 **Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas não diferiram entre si pela análise
 387 de contraste a 5% de probabilidade de erro.



388

389 Figura 5. Sobreposição, em dias, entre o início do florescimento (R1) e o número final de nós (NFN) ((a), (b) e (c)), diferença, em cm, em
 390 estatura no R8 e no R1 (E R8 - R1) ((d), (e) e (f)) e a diferença no número de nós no R8 e no R1 (N R8 - R1) ((g), (h) e (i)) em cultivares de
 391 soja semeadas em Capão do Leão ((a), (d) e (g)), Júlio de Castilhos ((b), (e) e (h)) e Frederico Westphalen ((c), (f) e (i)), RS, durante o ano
 392 agrícola 2013/2014.. *Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas (comparação entre cultivares no mesmo local de semeadura) não
 393 diferem entre si pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade de erro. **Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas não diferiram entre si
 394 pela análise de contraste a 5% de probabilidade de erro.



395

396 Figura 6. Sobreposição, em dias, entre o início do florescimento (R1) e o número final de nós (NFN) ((a), (b) e (c)),
 397 diferença, em cm, em estatura no R8 e no R1 (E R8 - R1) ((d), (e) e (f)) e a diferença no número de nós no R8 e no R1 (N R8 - R1) ((g), (h) e (i)) em cultivares de
 398 soja cultivadas em lavouras comerciais em Restinga Sêca ((a), (d) e (g)), Tupanciretã ((b), (e) e (h)) e Água Santa ((c), (f) e (i)), RS durante
 399 o ano agrícola 2013/2014.

400 Tabela 1. Cultivares de soja, grupos de maturidade relativa (GMR) e tipos de
 401 crescimento que foram utilizadas nos experimentos de campo em Santa Maria, Itaqui,
 402 Frederico Westphalen, Capão do Leão, Júlio de Castilhos, Restinga Sêca, Tupanciretã e
 403 Água Santa, Rio Grande do Sul.

Cultivar	GMR	Tipo de Crescimento
NS 4725 RR*	4.7	Indeterminado
NS 4823 RR	4.8	Indeterminado
TMG 7161 RR Inox	5.4	Indeterminado
BMX Energia RR	5.5	Indeterminado
TEC 5936IPRO	5.5	Indeterminado
BMX Turbo RR	6.0	Indeterminado
NS 6262 RR**	6.2	Indeterminado
NA 5909 RR	6.3	Indeterminado
IAS 5	6.4	Determinado
Igra RA 518 RR	6.6	Indeterminado
BMX Potência RR	6.7	Indeterminado
Fepagro 36 RR	7.2	Determinado
BRS 246 RR	7.2	Determinado
Bragg	7.3	Determinado
CD 219 RR	8.2	Determinado

404 *NS 4725 RR foi semeada apenas em Tupanciretã. **NS 6262 RR foi semeada apenas em Restinga Sêca.

405 Tabela 2. Local do experimento, altitude, textura do solo, data de sementeira, número de plantas por cultivar e frequência de avaliação de
 406 fenologia e número de nós (NN) nos experimentos conduzidos em Santa Maria, Itaqui, Frederico Westphalen, Capão do Leão, Júlio de
 407 Castilhos, Restinga Sêca, Tupanciretã e Água Santa, Rio Grande do Sul.

Local	Altitude (m)	Textura do solo	Data de sementeira	Plantas avaliadas por cultivar	Frequência das avaliações (dias)	
				Fenologia e NN	Fenologia	NN
Santa Maria	95	Franco	27/9/2013	20	2	2-4
			15/11/2013	20	2	2-4
			6/2/2014	20	2	2-4
Itaqui	74	Média	16/10/2013	20	5-7	5-7
			25/11/2013	20	5-7	5-7
			23/12/2013	20	5-7	5-7
Frederico Westphalen	566	Argiloso	23/11/2013	20	3-5	3-5
Capão do Leão	13	Mediano argiloso	9/11/2012	20	2-3	2-4
Júlio de Castilhos	513	Argila arenosa	18/11/2013	30	2-7	5-9
Restinga Sêca	63	Franco	14/11/2013	10	2-6	4-6
Tupanciretã	456	Argiloso	17/11/2013	10	4-6	6-8
Água Santa	650	Muito argiloso	18/11/2013	10	12-14	12-14
Total			12	2840		

408

409 Tabela 3. Estimativa dos contrastes entre cultivares com tipo de crescimento determinado
 410 (IAS 5, Fepagro 36 RR, BRS 246 RR, Bragg e CD 219 RR) x cultivares com tipo de
 411 crescimento indeterminado (NS 4725 RR, NS 4823 RR, TMG 7161 RR Inox, BMX Energia
 412 RR, TEC 5936 IPRO, BMX Turbo RR, NS 6262 RR, NA 5909 RG, Igra RA 518 RR e BMX
 413 Potência RR) para as variáveis estatuta em R1 (Estatura R1), estatura em R8 (Estatura R8),
 414 número de nós em R1 (NN R1) e número de nós em R8 (NN R8) em experimentos
 415 conduzidos Santa Maria, Itaqui, Capão do Leão, Júlio de Castilhos e Frederico Westphalen,
 416 Rio Grande do Sul.

	Estatura R1 (Det x Ind)	Estatura R8 (Det x Ind)	NN R1 (Det x Ind)	NN R8 (Det x Ind)
Santa Maria (27/9/2013)	83 x 43*	100 x 110 ^{ns}	14,8 x 9,3 ^{ns}	17,0 x 19,3*
Santa Maria (15/11/2013)	110 x 61*	138 x 119*	15,9 x 10,7 ^{ns}	19,7 x 17,9*
Santa Maria (6/2/2014)	45 x 25 ^{ns}	62 x 46 ^{ns}	9,5 x 6,1*	11,2 x 8,4*
Itaqui (16/10/2013)	41 x 33 ^{ns}	48 x 57*	10,3 x 7,8 ^{ns}	13,4 x 16,3*
Itaqui (25/11/2013)	57 x 46 ^{ns}	63 x 66 ^{ns}	11,0 x 9,1*	14,6 x 15,5*
Itaqui (23/12/2013)	47 x 40 ^{ns}	55 x 53 ^{ns}	-	-
Capão do Leão	83 x 48 ^{ns}	108 x 100 ^{ns}	15,3 x 11,3*	18,4 x 19,1*
Júlio de Castilhos	91 x 56*	114 x 113 ^{ns}	16,0 x 11,9 ^{ns}	18,7 x 19,1*
Frederico Westphalen	54 x 35*	102 x 102 ^{ns}	14,2 x 10,4 ^{ns}	16,9 x 16,6 ^{ns}

417 - Não foram realizadas avaliações do NN em R1 e R8 na semeadura de 23/12/2013 em Itaqui.

**3.5 CAPÍTULO 5 – CLIMATE AND MANAGEMENT FACTORS INFLUENCE
SOYBEAN YIELD POTENTIAL IN A SUBTROPICAL ENVIRONMENT**

(Artigo aceito para publicação em Agronomy Journal)

1 **Climate and management factors influencesoybean yield potential in a subtropical**
2 **environment**

3

4 Alencar Junior Zanon^{a,*}, Nereu Augusto Streck^a, Patricio Grassini^b

5

6 ^aUniversidade Federal de Santa Maria, Departamento de Fitotecnia, Av. Roraima,

7 Prédio 77, CEP 97105-900, Camobi, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil. Phone:

8 (55) 3220 8179.

9 ^b University of Nebraska-Lincoln, P.O. Box 830915, Lincoln, NE 68583-0915, USA

10

11 * Corresponding author. Tel.: + 55 5596025107. E-mail address:

12 alencarzanon@hotmail.com

13

14 **Abstract**

15 The interactive influence of climate and management factors on soybean yield potential

16 has not been investigated in subtropical production environments. Such information can

17 help fine tune current soybean management practices in order to increase yield and

18 resource-use efficiency and minimize risk. The objective of this study was to identify

19 key biophysical and management factors governing variation in soybean yield

20 potentialin southern Brazil.To accomplish that objective,we used a large databaselon

21 soybean yield and phenology collectedfrom a combination of on-farm and research-

22 station experimentsconducted during 4 cropgrowing seasons (2011-2015) in Rio Grande

23 do Sul (southern Brazil). The database portrayed a wide range of weather conditions,

24 soil types, water regimes, sowing dates, and cultivar maturity groups (MG).Water

25 supply and photothermal quotient explained most of yield variation across site-years. A
26 boundary function was derived for the relationship between soybean yield and water
27 supply and an attainable water productivity of $9.1 \text{ kg grain ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ was derived. A
28 seasonal water supply of *ca.* 800 mm appeared sufficient to maximize seed yield and
29 most late-sown crops fell short of this value. Late-sown crops were also exposed to
30 lower photothermal quotient during reproductive stages and this explained the yield
31 penalty of 26 kg ha^{-1} per day of sowing delay after November 4 observed for non-water
32 limited crops. Sowing date, accompanied by proper selection of cultivar MG and
33 determination of soil water status at sowing time, appear to be the most cost-effective
34 management practices to ensure a high photothermal quotient and low risk of water
35 deficit during reproductive stages and, therefore, a high yield potential in the subtropical
36 environment of southern Brazil.

37

38 Keywords: *Glycine max* L., soybean, yield potential, water productivity, photothermal
39 quotient, subtropical environment

40

41 **1 Introduction**

42

43 Brazil accounts for 28% of global soybean (*Glycine max* L.) production, producing 70 Mt
44 of this crop annually (FAOSTAT, 2015). Average soybean yield in Brazil has increased
45 over time, from 1.5 Mgha^{-1} (1976-1981) to 2.9 Mgha^{-1} (2010-2014) (IBGE, 2015). Rio
46 Grande do Sul (RS) is located in southern Brazil and ranks third among soybean
47 producing states, producing 17% of total soybean production in Brazil, with an
48 average yield of 2.5 Mgha^{-1} (IBGE, 2015). Recent expansion of soybean area in

49 RS during recent years was due to: i) a shift towards early sowing dates, which allows
50 growing two summer crops per year, and ii) introduction of soybean in lowlands areas
51 typically used for growing irrigated rice (Zanon et al., 2015a). Despite continuous
52 increase on average on-farm soybean yield during recent years, there is still a large gap
53 between yields measured in research station experiments or yield-contest winning
54 fields ($5.5\text{--}6.9\text{Mgha}^{-1}$) and current average farm yield (2.5Mgha^{-1}) (Battisti et al., 2013).

55

56 Yield potential (Y_p) is the yield attained by a crop grown without limitation from water,
57 nutrients, and biotic stresses (weed, insect, and disease) (Evans, 1993; van Ittersum and
58 Rabbinge, 1997). Therefore, the crop growth rate depends on solar radiation,
59 temperature, atmospheric CO_2 , and genetic traits that determine light capture and
60 conversion into biomass and partitioning into the harvestable organ. In rainfed crops,
61 crop growth rate is also limited by water availability, hence, water-limited yield
62 potential (Y_w) is also determined by water supply amount and distribution and soil and
63 terrain characteristics that influence crop water availability such as soil texture, soil
64 depth, and field slope (van Ittersum et al., 2013). Previous studies assessing biophysical
65 and management factors governing geospatial and temporal variation in soybean Y_p and
66 Y_w have mostly focused on temperate agro-ecosystems (Calviño & Sadras, 1999;
67 Sinclair et al., 2007). In contrast, there is lack of information on the drivers of soybean
68 Y_p and Y_w in subtropical environments, where a wide range of cultivar maturity
69 groups¹ (MG) can be sown across a wide sowing window, as it is the case of soybean
70 crop systems in southern Brazil. While previous studies on soybean in Brazil have

¹ Cultivar MG: denotes a given maturity group zonal latitude region, where a given cultivar is most likely to be best adapted.

71 highlighted the role of water supply as the major yield-limiting factor (Battisti et al.,
72 2013; Sentelhas et al., 2015), little is known about the influence of other climatic
73 factors, and their interaction with management practices (e.g., sowing date and MG), at
74 determining soybean yield potential.

75

76 To fill the lack of information about soybean yield potential in subtropical environments,
77 we used a large dataset that included experiments conducted during 4 growing seasons
78 (2011-2015) at research stations and on-farm sites in the state of Rio Grande do Sul
79 (RS), which portrayed a wide range of weather conditions and management practices in
80 southern Brazil. The objective of this study was to identify key biophysical and
81 management factors governing variation in soybean Y_p and Y_w .

82

83 **2 Materials and methods**

84 2.1 Biophysical context in southern Brazil

85

86 Climate of the region is subtropical humid. Annual patterns of solar radiation, minimum
87 and maximum temperature (T_{\min} and T_{\max} , respectively), rainfall, and total grass-based
88 reference evapotranspiration (ET_o) for three locations in RS (Passo Fundo, Santa Maria,
89 and Pelotas) are shown in Fig. 1. These three locations portray well the spatial variation
90 in climate across the soybean production region in RS. Despite the relatively high
91 rainfall amount, erratic temporal distribution of rainfall, together with a high ET_o during
92 the summer months, causes temporary water stress episodes that affect crop yield in an
93 important number of years (Ferreira and Rao, 2011). Water stress is more frequent and
94 more intense in the south and west regions of RS state. Beginning of pod setting (R3)

95 typically occurs during end of December-early January and seed filling (R5-R7) occurs
96 during late-January and February (Figure 1). Reproductive stages, hence, coincide with
97 the peak in solar radiation, temperature, and maximum crop water requirements, though
98 this can be highly variable depending upon field-specific sowing date and cultivar
99 MG. Probability of cropwater deficit also depends upon soil type: fine-textured soils are
100 dominant insouthern RS(only ca. 6% clay) while heavy-textured soils prevailed in the
101 central and north regions of RS (ca. 70% clay).

102

103 2.2 Database description

104

105 We used a large database collected from a total of 45 experiments conducted in research
106 stations and producer fields during four crop growing seasons (2011/2012, 2012/2013,
107 2013/2014, and 2014/2015) in 12 locations in RS, Brazil (Fig. 2, Table 1). Soil types were
108 diverse across experimental sites, ranging from deep (> 2 m) to shallow soils (< 1 m),
109 and a wide range of textural classes. The database included both irrigated and rainfed
110 experiments. Soybean was grown as a single crop (i.e., one crop per year) in
111 monoculture or in a 2-y rotation with oat (*Avena sativa* L.). The experimental design at
112 each site-year was a randomized block design with three or four replicates and average
113 plot size was 6 m². Experimental factors were sowing date and MG. Experiments in
114 Cachoerinha, Cachoeira do Sul, Uruguaiana, Santa Vitória do Palmar, Itaqui, and
115 Pelotas were located in lowlands, where irrigated rice is the dominant crop. The rest of
116 the experiments (in Água Santa, Restinga Seca, Santa Maria, Júlio de
117 Castilhos, Frederico Westphalen, and Tupanciretã) were conducted in the highlands,
118 where rainfed soybean-based crop systems are dominant. Experiments varied relative to

119 the range of sowing dates (Table 1) but range of MGs was identical across experiments
120 (from MG4.7 to MG8.2), including indeterminate and semi-determinate varieties, which
121 portrays well the range of MG sown by producers in southern Brazil. In all cases, row
122 spacing was 0.45m and plant density was 30 plants m⁻².

123

124 Crops were managed following recommended practices for soybean in southern Brazil.
125 Briefly, seeds were inoculated, nutrients were applied according to soil tests for
126 maximum yields, and weeds, pathogens, and insect pests were prophylactically applied
127 to keep crops free of biotic stresses. Phenology was tracked in all treatments following
128 Fehr & Caviness (1971)². Yield samples were collected at R8 from a 4-m² area located in
129 the center of the blocks. Data on soybean seed yield were reported on a 13% seed
130 moisture basis. More details about the experiments can be found in prior
131 publications (Richter et al., 2014; Zanon et al., 2015a, 2015b). Daily weather data,
132 including solar radiation, T_{min}, T_{max}, relative humidity, and precipitation were collected
133 on-site or from nearby weather stations. ETo was calculated using the Penman-Monteith
134 method. Photothermal quotient (Q, MJ m⁻²d⁻¹ °C⁻¹) was calculated as the ratio between
135 incident solar radiation and average temperature (after subtracting base temperature,
136 Tb). Briefly, Q integrates the effects of solar radiation and temperature on crop growth
137 and development during critical stages for yield determination (Fischer, 1985). For the
138 calculation of Q, Tb was assumed 7.6°C and 0°C of the vegetative and reproductive

² VE: Emergence. R1: Blooming. One open flower at any node on the main stem. R3: Beginning pod. Pod 5 mm long at one of the four uppermost nodes on the main stem with a fully developed leaf. R5: Beginning seed. Seed 3 mm long in a pod at one of the four uppermost nodes on the main stem with a fully developed leaf. R7: Physiological maturity. One normal pod on the main stem that has reached its mature pod color. R8: Ninety-five percent of the pods that have reached their mature pod color.

139 stages, respectively (Setiyono et al., 2007). Table 2 shows means for weather variables
140 during the 2-month period (Jan-Feb) that coincides roughly with reproductive stages in
141 soybean grown in RS. The four years included in the database portrayed well year-to-
142 year variation in weather in RS. Temperature was below normal in 2012/2013 season,
143 near normal in 2011/2012 and 2014/2015 season, and above normal in 2013/2014
144 (Table 2). Solar radiation was above normal in 2011/2012 and 2012/2013. Humidity and
145 precipitation were below normal in 2011/2012, causing severe reduction in soybean
146 yield due to severe water stress during reproductive stages (Table 2).

147

148 2.3 Derivation of a boundary function for the relationship between soybean yield and
149 water availability

150

151 Different approaches can be used to estimate Y_p and Y_w , including crop simulation
152 models and boundary functions relating crop yields with resource availability (Van
153 Ittersum et al., 2013). In the present study, a boundary function was fitted for the
154 relationship between soybean yield and seasonal water supply (WS). WS was calculated
155 for each experiment as the sum of (i) available soil water at sowing (ASWs) in the upper
156 1.5 m soil profile for soils without physical or chemical constraints to root growth, and
157 (ii) in-season precipitation plus irrigation (i.e., from sowing to R7). Soil depth was
158 reduced at locations exhibiting constraints to root growth (e.g., bedrock, acidity).
159 ASW was assumed to be equal to ~75% of the plant available water holding capacity,
160 the latter estimated based on soil texture and depth and water balance during the non-
161 growing season (Reichert et al., 2009). An exponential-type function was fitted to the
162 maximum yields across the range of WS as follows:

163

$$164 \quad Y_w = a + b(1 - \exp(-c \cdot x)) \quad (1)$$

165

166 where x is the seasonal water supply (mm) and a , b , and c parameters of the equation
 167 model. This equation can be used to derive parameters that have a biological meaning.

168 For example, the x -intercept represents the minimum value of WS (ca. 180 mm)
 169 required to produce a minimum amount of grain biomass as well as unavoidable water

170 losses through soil evaporation. Likewise, when the function levels off (*i.e.*, yield does
 171 not respond to increasing WS), yield can be considered to be non-water limited. The level

172 of WS at which the boundary functions leveled off (ca. 800 mm) was used in the
 173 present study to group site-years in two categories: water-limited (WL) and non-water

174 limited (NWL). The derivative of the boundary function for a given WS value represents
 175 the attainable water productivity (WP; kg grain ha⁻¹ mm⁻¹). An average value of WP

176 was estimated based on the maximum and minimum yield values predicted by the
 177 boundary function (0 and 6.0 Mg ha⁻¹, respectively) along the range of WS in which

178 Y_w was responsive to increasing water availability (180-800 mm). A similar boundary-
 179 function approach was followed to investigate the relationship between Y_p and sowing

180 date, but a linear-plateau was fitted to the maximum yields along the range of sowing
 181 dates:

182

$$183 \quad Y_p = Y_o \quad \text{if } x \leq X_o$$

$$184 \quad Y_p = Y_o - x \cdot b \quad \text{if } x > X_o \quad (2)$$

185 where x is the number of days after Sept 20 (which coincides roughly with the earliest
 186 sowings in the region), Y_o is the yield (Mg ha⁻¹) before the breakpoint date (X_o , in

187 days), and b is the yield penalty related to sowing delay after the breakpoint date (Mg
188 $\text{ha}^{-1} \text{d}^{-1}$).

189

190 2.4 Explanatory factors for variation in yield potential and water-limited yield potential

191

192 Several approaches were followed to identify explanatory causes for variation in Y_w and
193 Y_p across site-years. Correlation analysis was used as a first step to identify
194 relationships between yield and climate and management factors (WS, sowing date,
195 MG, Q, ASWs, and precipitation). Residuals from the boundary functions (*i.e.*,
196 difference between a given field yield relative to the value estimated from the boundary
197 function) were calculated to assess impact of MG and other management factors on Y_w
198 and Y_p . In the case of the boundary function for the relationship between yield and
199 water supply, site-years were first classified as WL (WS < 800 mm) and NWL (WS \geq
200 800 mm). Subsequently, the fields contained in each of these two categories were
201 classified as ‘small residuals’ and ‘large residuals’ based on the upper and lower terciles
202 of the residuals distribution for the NWL and WL categories. This classification resulted
203 in four categories: (1) WL, small-residuals, (2) WL, large-residuals, (3) NWL, small-
204 residuals, and (4) NWL, large-residuals. Means differences for the different parameters
205 (e.g., sowing date, MG, Q, precipitation, etc.) between large-versus small-residual
206 yields were evaluated for significance using t -tests, separately for the WL and NWL
207 categories (Table 3). Finally, linear regression was used to investigate the relationship
208 between yield and Q during different crop stages (VE-R7, VE-R1, R1-R7, R3-R7, R3-
209 R5, and R5-R7).

210

211 3 Results & Discussion

212

213 3.1 Boundary function for water productivity and variation in soybean water-limited
214 yields

215

216 Measured soybean yields ranged from 0.3 to 6.0 Mg ha⁻¹ across cultivars, years, sowing
217 dates, and locations. Distribution of yield-WS data values in Figure 3 suggested that
218 maximum yields were not responsive to WS \geq 800 mm, hence this value of WS was
219 used to distinguish between WL and NWL crops. Estimated Y_p of ca. 6.0 Mg ha⁻¹
220 ¹compares well with the range of Y_p reported by Battisti et al. (2013) and Sentelhas et al.
221 (2015) for soybean in southern Brazil (4.9 to 6.9 Mg ha⁻¹) calculated based on the FAO
222 Agroecological Zone crop yield model (Kassam, 1977).

223

224 A boundary function with *x*-intercept = 183 mm was derived from the relationship
225 between yields and WS (Fig. 3). The *x*-intercept value represents unavoidable water
226 losses through soil evaporation, but might also include the crop transpiration needed to
227 generate an amount of vegetative biomass that can support the growth of reproductive
228 organs. The value of *x*-intercept derived in the present study is higher relative to the
229 value reported in previous studies for maize, wheat, and sunflower (Sadras and Angus,
230 2006, Grassini et al., 2007, 2009) and also soybean in the US Corn Belt (Grassini et al.,
231 2015). One reason that can explain such difference is the high evaporative demand
232 during early vegetative stages when canopy cover is still incomplete for soybean grown
233 in southern Brazil which, together with the high rainfall amounts during the same
234 period, lead to high soil evaporation rates (Fig. 1). Likewise, intensity of rainfall events

235 is tropical environments is typically higher than in temperate climates, leading to
236 unavoidable losses through surface runoff and deep percolation. Estimated WP_A was
237 $9.1 \text{ kg ha mm}^{-1}$, with the latter value calculated from the first derivative of the boundary
238 function over the range of WS range in which yield was responsive to increasing water
239 availability (180-800mm). Estimated soybean WP_A was within the range of reported
240 values for other legume and oilseed crops ranging from 7 to 13 kg ha mm^{-1} (Connor *et*
241 *al.*, 2011) and remarkably similar to WP_A of $9.9 \text{ kg ha mm}^{-1}$ derived for field-grown
242 soybean in the temperate western US Corn Belt by Grassini *et al.* (2015).

243

244 Based on the 800-mm threshold, it can be inferred that about 75% of the cultivar-site-
245 year cases were water-limited. This finding indicated that, in most locations-years, WS
246 was not sufficient to fully satisfy crop water requirement to achieve Y_p . Similarly,
247 Calviño & Sadras (1999) indicated that water availability was limiting on-farm yield in
248 54% of the years in the Argentinean Pampas. It was remarkable, however, that most of
249 the WL and NWL crops in the present study were well below the boundary line, despite
250 experiments received near-optimal management relative to nutrient supply and control
251 of biotic stresses. Purcell and Specht (2004) indicated that not only total amount but also
252 distribution of water supply during the growing season could explain differences in
253 water-limited soybean yields. In the present study, we found that WL crops near the
254 boundary functions exhibited (i) a higher ASWs and (ii) a higher proportion of total in-
255 season precipitation occurring during reproductive stages relative to WL crops far from
256 the boundary functions (Table 3). Besides the influence of soil water content and erratic
257 distribution of rainfall during the growing season, sowing date seems to play a key role
258 at explaining 'gaps' in the WL field category relative to the boundary function (Table

259 3). Fields approaching the boundary function were sown, on average, 24 days earlier
260 than fields departing substantially from the boundary. Benefit of early sowing on
261 soybean Yw seems to be associated with a better distribution of WS during the growing
262 season, with a higher proportion of the total precipitation occurring during key stages
263 for yield determination. In the case of NWL crops, sowing date and Q played an
264 important part at explaining yield variation, but ASWs was also remarkably higher in
265 crops approaching the boundary function (Table 3). In short, early sowings and soil water
266 status at sowing were strong predictors of soybean yields and these two parameters can
267 be used to inform and reduce risk associated with crop management decisions, such as
268 nutrient fertilizer applications.

269

270 3.2 Influence of sowing date and maturity group on soybean yield potential

271

272 Besides water availability, sowing date was the most important management
273 factor determining soybean yield potential. Taking the maximum yields along the range
274 of sowing dates as a proxy to Y_p , we observed a penalty of 26 kg ha^{-1} per day of delay in
275 sowing after Nov 4, which is equivalent to $0.5\% \text{ day}^{-1}$ (Fig. 4). In southern Pampas of
276 Argentina, the average rate of yield decline with delayed sowing was about $2\% \text{ d}^{-1}$ from
277 mid December until early January (Calviño et al., 2003). The yield penalty was greater
278 in Argentina likely because of the shorter growing season.

279

280 While sowing date delay negatively impacted both rainfed and irrigated yields (Fig. 4,
281 Table 3), the biophysical factors governing the yield response to sowing date were
282 different for each water regime. Yield penalty associated with late sowings in rainfed

283 soybean inRS was related to a high probability of yield loss due to water deficit during
284 the reproductive soybean stage: 86% of the late sown crops (*i.e.*, after Nov 4) exhibited
285 WS < 800 mm, while 45% of the early sown crops were limited by WS. However, the
286 yield penalty was also evident for irrigated soybean crops, where water was not
287 limiting, and this penalty was associated with differences in Q during critical stages for
288 yield determination (Fig. 5). Q during R3-R7 had higher explanatory power
289 ($r^2=0.64$) relative to other development stages: VE-R7 ($r^2=0.61$), VE-R1 ($r^2=0.42$), R1-
290 R7 ($r^2=0.63$), and R3-R5 ($r^2=0.55$). Q decreased linearly with sowing date delay and Q
291 was higher in early- versus late- cultivar MGs in early sowing dates, while there was no
292 difference in late sowings (Fig. 5, Table 4). Remarkably, the relationship was highly
293 significant for irrigated crops ($r^2=0.64$, $P<0.001$) but not for rainfed crops ($P=0.96$),
294 highlight the crucial role of water supply in rainfed crop yields. Similar relationships
295 between non-water limited yields and Q during key crop stages for yield determination
296 have been reported for wheat (Fischer, 1985; Magrín et al., 1993; Abbate et al., 1997;
297 Caviglia et al., 2011), rice (Islam and Morison, 1992), pea (Poggio et al., 2005), and
298 chickpea (Sadras et al., 2015). To our knowledge, this is the first study reporting a
299 relationship between yield and Q for soybean. Interestingly, for early-sown NWL crops,
300 short (MG 4.8–5.4) and intermediate (MG 5.5–6.9) cultivar MGs yielded more than the
301 traditional long MGs (MG 7.0–8.2) sown in RS ($P<0.04$) and this difference was
302 explained by differences in Q during key reproductive stages for yield determination
303 (Fig. 5, Table 4).

304

305 The boundary functions derived from the relationships between soybean yield and
306 seasonal water supply and sowing date can be used by producers in southern Brazil to

307 benchmark their current productivity. By comparing the actual yield, for a given WS or
308 sowing date, against the predicted yield by the boundary function, for the same WS or
309 sowing date, farmers can get a robust measure of the current yield gap (van Ittersum et
310 al., 2013). Likewise, the information reported here can be used to fine-tune current
311 management of soybean crops in southern Brazil. With proper characterization of
312 phenology of soybean cultivars currently used by farmers (Zanon et al., 2015a),
313 measurement of water status at sowing, and the aid of crop simulation models (Setiyono
314 et al., 2010), it would be possible to develop decision-aid tools to recommend sowing
315 date and MGs to match reproductive stages with highest Q and, hence, maximize the
316 odds of reaching yield potential while minimizing the probability of water deficit.
317 Results from this study indicate that a combination of short and intermediate MG with
318 early sowing dates seems to increase soybean Y_p and Y_w in the subtropical environment
319 of southern Brazil. Indeed, among the many recent changes occurring in soybean
320 production systems in this region, one of the most important is the gradual shift towards
321 early sowing dates and shorter cultivar MGs (Zanon et al., 2015a). With an earlier
322 sowing date and shorter MG, it may be possible to increase cropping intensity and grow
323 two summer crops, in the same piece of land, within a 12-month period.

324

325 **4 Conclusions**

326 Soybean yield potential ranged from 2.8 to 6.0 Mg ha⁻¹ in the subtropical environment of
327 southern Brazil, depending upon seasonal water supply and photothermal quotient
328 during reproductive stages. Water supply amount and distribution imposed an upper
329 limit to productivity and the attainable water productivity was 9.1 kg seed ha⁻¹ mm⁻¹.
330 There was a yield penalty associated with late sowing dates in both rainfed and irrigated

331 crops but underpinning biophysical factors explaining such penalty were different
332 between the two water regimes. Sowing date and cultivarmaturity groupgoverned
333 variation in non-water limited yield potential through changes in the
334 photothermalquotient during reproductive stages,while, in the case of rainfed crops,
335 yield penalty with late sowings is due to an increasing risk of water deficit.

336

337 **Acknowledgements**

338 We would like to especially thank all colleagues from the Research Group in
339 Agrometeorology at the Universidade Federal de Santa Maria and the Instituto Rio
340 Grandense do Arroz (IRGA) in Brazil for helping to collect, organize, and input the data
341 used for this study. We would like to thank Nicolás Cafaro La Menza for the significant
342 suggestions in drafting the manuscript. We also thank the Coordination for the
343 Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) project of the Ministry of
344 Education of Brazilfor providing a fellowship tothe first author. Data collection for this
345 project was funded by the Brazilian Research Council (CNPq) of the Ministry of
346 Science and Technology (project # 471860/2012-3) and IRGA.

347

348 **References**

349 Abbate, P.E., F.H. Andrade, J.P. Culot and P.S. Binraban. 1997. Grain yield in wheat:
350 Effects of radiation during spike growth period. *Field Crop Res.* 54:245-257.

351 Battisti, R., P.C.Sentelhas, F.G. Pilau, and C.A.Wollmann.2013. Climatic efficiency for
352 soybean and wheat crops in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, in different sowing
353 date. (In Portuguese, with English abstract.) *Ciência Rural.* 43:390-396. doi:
354 10.1590/S0103-84782013000300003

- 355 Bhatia, V.S., P. Singh, S.P. Wani, G.S. Chauhan, A.V.R. Rao, A.K. Mishra, and K. Srinivas.
356 2008. Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using
357 CROPGRO-Soybean model. *Agric. For. Meteorol.* 148:1252–
358 1565. doi:10.1016/j.agrformet.2008.03.004
- 359 Calviño, P.A., and V.O. Sadras. 1999. Interannual variation in soybean yield:
360 interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Res.* 63:237–
361 246.
- 362 Calviño, P.A., V.O. Sadras, F.H. Andrade, 2003. Development, growth and yield of
363 late-sown soybean in the southern Pampas. *Field Crops Res.* 19:265–275.
- 364 Caviglia, O.P., V.O. Sadras, and F.H. Andrade., 2011. Yield and quality of wheat and
365 soybean in sole and double-cropping. *Agron. J.* 103:1081–
366 1089. doi:10.2134/agronj2011.0019
- 367 Connor, D.J., R.S. Loomis, and K.G. Cassman, 2011. *Crop Ecology. Productivity and*
368 *Management in Agricultural Systems.* Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- 369 Evans, L.T., 1993. *Crop Evolution, Adaptation, and Yield.* Cambridge University Press,
370 Cambridge, UK.
- 371 FAOSTAT Database–Agricultural Production (FAO) Online <http://faostat.fao.org/>
372 (accessed September 10, 2015).
- 373 Fehr, W.R., C.E. Caviness, D.T. Burmood, and J.S. Pennington, 1971. Stage of
374 development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. *Crop Sci.* 11:929–
375 931.
- 376 Ferreira, D.B. and V.B. Rao. 2011. Recent climate variability and its impacts on
377 soybean yields in Southern Brazil. *Theoretical and Applied Climatology.* doi:
378 10.1007/s00704-010-0358-8

- 379 Fischer, R.A. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar
380 radiation and temperature. *J. Agric. Sci.* 105: 447–461.
- 381 Grassini, P., J.A. Torrión, H.S. Yang, J. Rees, D. Andersen, K.G. Cassman, and J.E.
382 Specht, 2015. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt.
383 *Field Crops Res.* 179:150–163. doi:10.1016/j.fcr.2015.04.015
- 384 Grassini, P., J.A. Torrión, K.G. Cassman, H.S. Yang, and J.E. Specht. 2014.
385 Drivers of spatial and temporal variation in soybean yield and irrigation
386 requirements. *Field Crops Res.* 163:32–46. doi:10.1016/j.fcr.2014.04.005
- 387 Grassini, P., A.J. Hall and J.L. Mercau, 2009. Benchmarking sunflower water
388 productivity in semiarid environments. *Field Crops Res.* 110, 251–262.
- 389 Kassam, A. H. 1977. *Net Biomass Production and Yield of Crops*. Rome: FAO.
- 390 Kemanian, A.R., C.O. Stockle, and D.R. Huggins. 2004. Variability of barley radiation-
391 use efficiency. *Crop Sci.* 44:1662–1672.
- 392 IBGE. 2015. *Agricultural Production*. Instituto Brasileiro de Geografia e
393 Estatística. <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=18&i=P> (acce-
394 ssed 10 August 2015). (In Portuguese).
- 395 Islam, M.S., and J.I.L. Morison. 1992. Influence of solar radiation and temperature on
396 irrigated and grain rice in Bangladesh. *Field Crops Res.* 30:13-18.
- 397 Magrín, G.O., A.J. Hall, C. Baldy, and M.O. Grondona. 1993. Spatial and interannual
398 variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of
399 wheat crops in Argentina. *Agric. Forest Meteorol.* 67:29–41.
- 400 Melges, E., N.F. Lopes, and M.A. Oliva. 1989. Growth and solar energy conversion in
401 soybeans grown under four solar radiation levels. (In Portuguese, with English abstract)
402 *Pesq. Agrop. Bras.* 72:1067-1072.

- 403 Passioura, J.B. 1977. Grain yield, harvest index and water use of wheat. *J. Aust. Inst.*
404 *Agric. Sci.* 43:117–120.
- 405 Poggio S.L., E.H. Satorre, S. Dethiou, and G.M. Gonzalo. 2005. Pod and seed numbers
406 as a function of photothermal quotient during the seed set period of field pea
407 (*Pisum sativum*) crops. *European J. of Agron.* 22:55–69. doi:10.1016/j.eja.2003.12.003
- 408 Purcell, L.C. and J.E. Specht, 2004. Physiological traits for ameliorating drought stress.
409 In: Boerma, H.R. and J.E. Specht, (Eds.), *Soybeans: Improvement, Production, and*
410 *Uses.* Am. Soc. Agronomy, Madison, WI, pp. 569–620.
- 411 Reichert, J.M., J.A. Albuquerque, D.R. Kaiser, D.J. Reinert, F.L. Urach and R.
412 Carlesso. 2009. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do
413 Sul. *Rev. Bras. de Ciência do Solo.* 33:1547-1560. doi:10.1590/S0100-
414 06832009000600004
- 415 Richter, G.L., A.J. Zanon, N.A. Streck, J.V.C. Guedes, B. Kräulich, T.S.M. Rocha,
416 J.E.M. Winck, and J.C. Cera. 2014. Estimating leaf area of modern soybean cultivars by
417 a non-destructive method. (In Portuguese, with English abstract.) *Bragantia.* 73:416-
418 425. doi:10.1590/1678-4499.0179
- 419 Sadras, V.O., V. Vadez, R. Purushothaman, L. Lakea, and H. Marrou. 2015.
420 Unscrambling confounded effects of sowing date trials to screen for crop adaptation to
421 high temperature. *Field Crops Res.* 177:1-8. doi:10.1016/j.fcr.2015.02.024
- 422 Sadras, V.O., Angus, J.F., 2006. Benchmarking water-use efficiency of rainfed wheat in
423 dry environments. *Aust. J. Agric. Res.* 57, 847–856.
- 424 Sentelhas, P.C., R. Battisti, G.M.S. Câmara, J.R.B. Farias, A.C. Hampf, and C. Nendel.
425 2015. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for
426 sustainable production. *J. Agr. Science.* 1:1-18. doi:10.1017/S0021859615000313

- 427 Setiyono, T.D., K.G. Cassman, J.E. Specht, A. Dobermann, A. Weiss, H. Yang, S.P.
428 Conley, A.P. Robinson, P. Pedersen, and J.L. De Bruin. 2010. Simulation of soybean
429 growth and yield in near-optimal growth conditions. *Field Crops Res.* 119:161–174.
430 doi:10.1016/j.fcr.2010.07.007
- 431 Setiyono, T.D.; A. Weiss, J.E. Specht, A.M. Bastidas, and K.G. Cassman, 2007.
432 Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean
433 phenology under high-yield conditions. *Field Crops Res.* 100:257-
434 27.doi:10.1016/j.fcr.2006.07.011
- 435 Sinclair, T.R., L.R. Salado-Navarro, G. Salas, and L.C. Purcell. 2007. Soybean yields
436 and soil water status in Argentina: Simulation analysis. *Agricultural Systems.* 94:471–
437 477.doi:10.1016/j.agsy.2006.11.016
- 438 Van Ittersum, M.K., K.G. Cassman, P. Grassini, J. Wolf, P. Tittonell, and Z. Hochman.
439 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Res.*
440 143:4–17.doi:10.1016/j.fcr.2012.09.009
- 441 Van Ittersum, M.K., and R. Rabbinge, 1997. Concepts in production ecology for
442 analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Res.*
443 52:197–208.
- 444 Zanon, A.J., J.E.M. Winck, N.A. Streck, G.L. Richter, T.S.M. Rocha and J.C. Cera.
445 2015a. Development of soybean cultivars as a function of maturation group and growth
446 type in high lands and in lowlands. (In Portuguese, with English abstract.) *Bragantia.*
447 doi:10.1590/1678-4499.0043
- 448 Zanon, A.J., N.A. Streck, G.L. Richter, C.C. Becker, T.S.M. Rocha, J.C. Cera, J.E.M.
449 Winck, A.P. Cardoso, E.L. Tagliapietra, and P.S. Weber. 2015b. Branches contribution

450 and leaf area index evolution in modern cultivars of soybean. (In Portuguese, with
451 English abstract.) *Bragantia*. doi:10.1590/1678-4499.0463

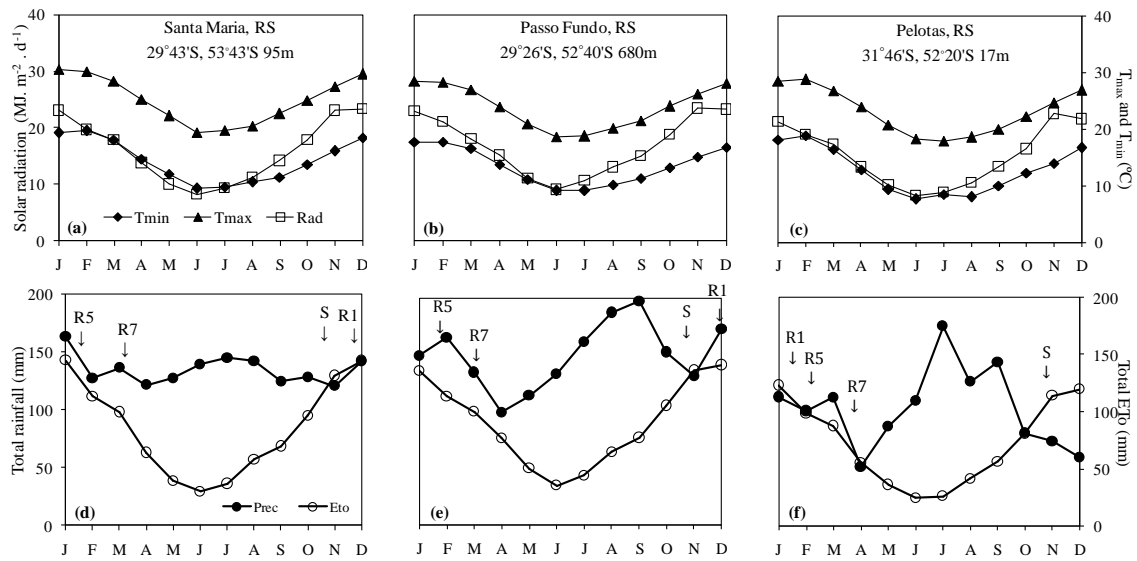


Figure 1. Monthly average incoming solar radiation and maximum (Tmax) and minimum temperatures (Tmin) ((a), (b) and (c)), total grass-based reference evapotranspiration (ETo), and total rainfall ((d), (e) and (f)) based on 5-year (solar radiation and ETo) and 30-year (Tmax, Tmin, and rainfall) weather data collected at three locations in Rio Grande do Sul (RS) State, Brazil: Santa Maria (central RS), Passo Fundo (north RS), and Pelotas (south RS). Arrows inside panels indicate average dates of sowing (S), flowering (R1), beginning of seed filling (R5), and physiological maturity (R7) of soybean.

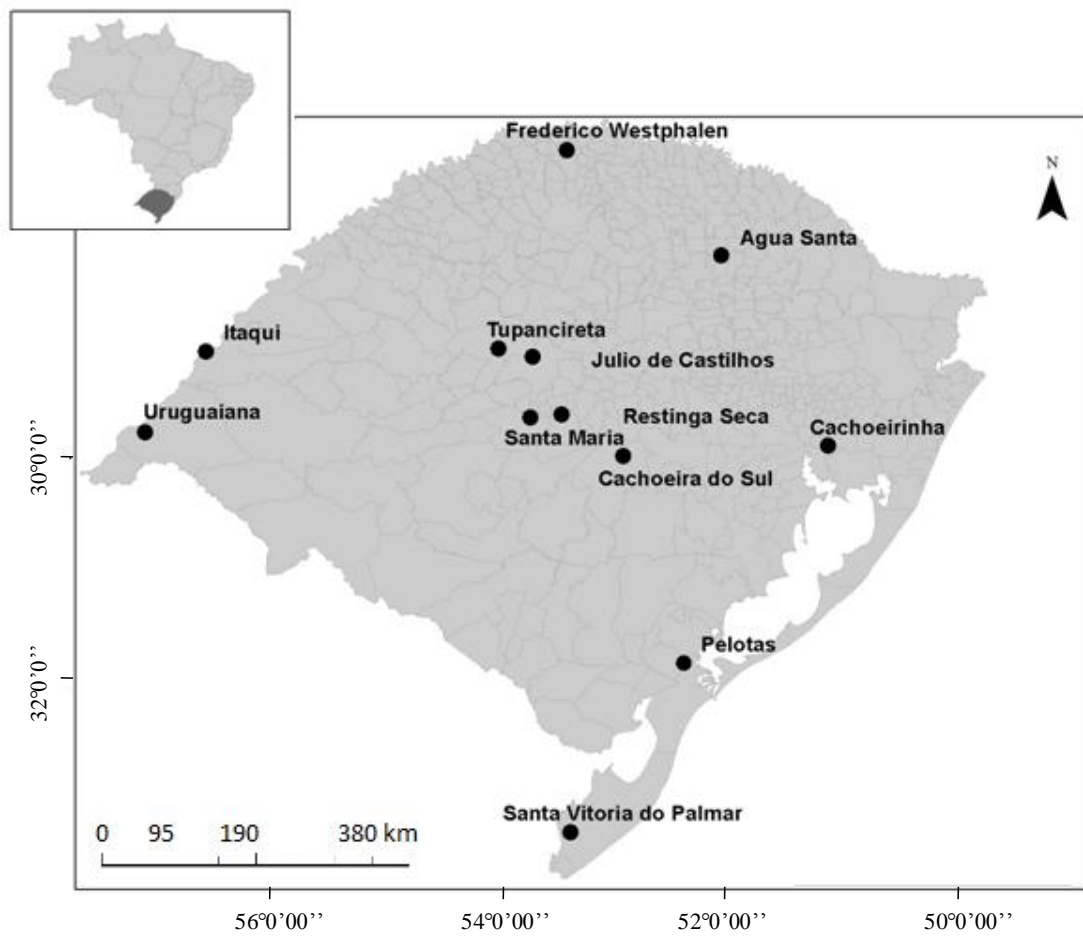


Figure 2. Map of the state of Rio Grande do Sul (RS), Brazil. Solid circles indicate location of experimental sites. Inset indicates location of RS within Brazil.

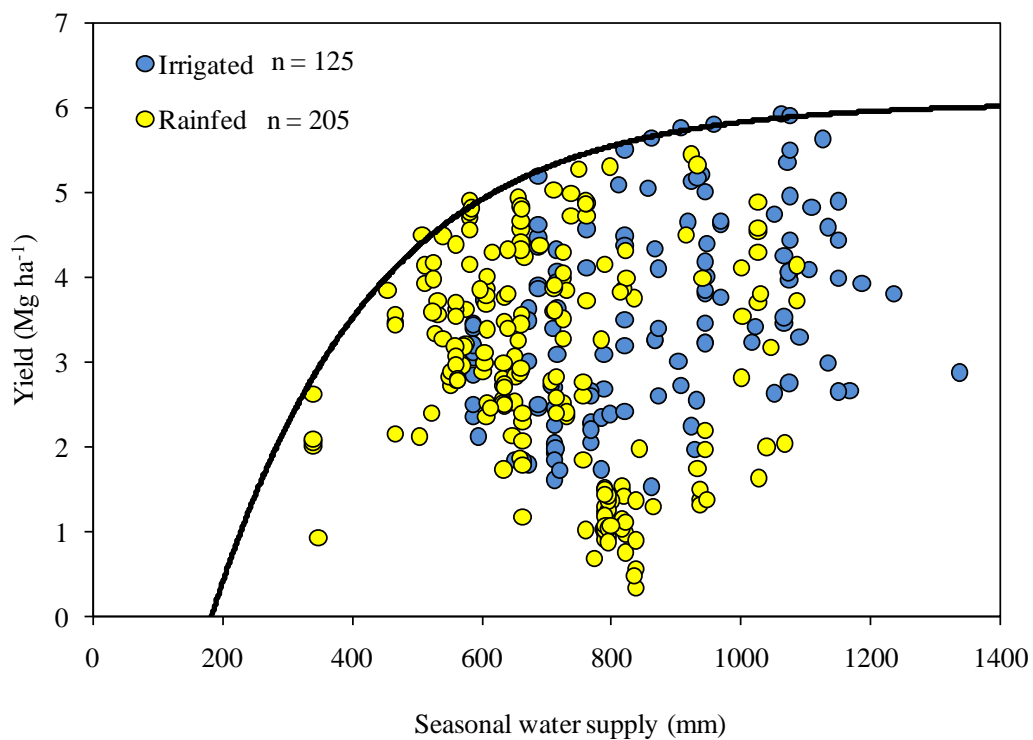


Figure 3. Relationship between yield and seasonal water supply in rainfed (yellow circles) and irrigated (blue circles) soybean crops grown during four growing seasons in southern Brazil. Seasonal water supply was estimated as the sum of available soil water at sowing and in season precipitation plus irrigation. Solid line shows the fitted boundary function ($y = -6528 + 12588(1 - \exp(-0.004x))$).

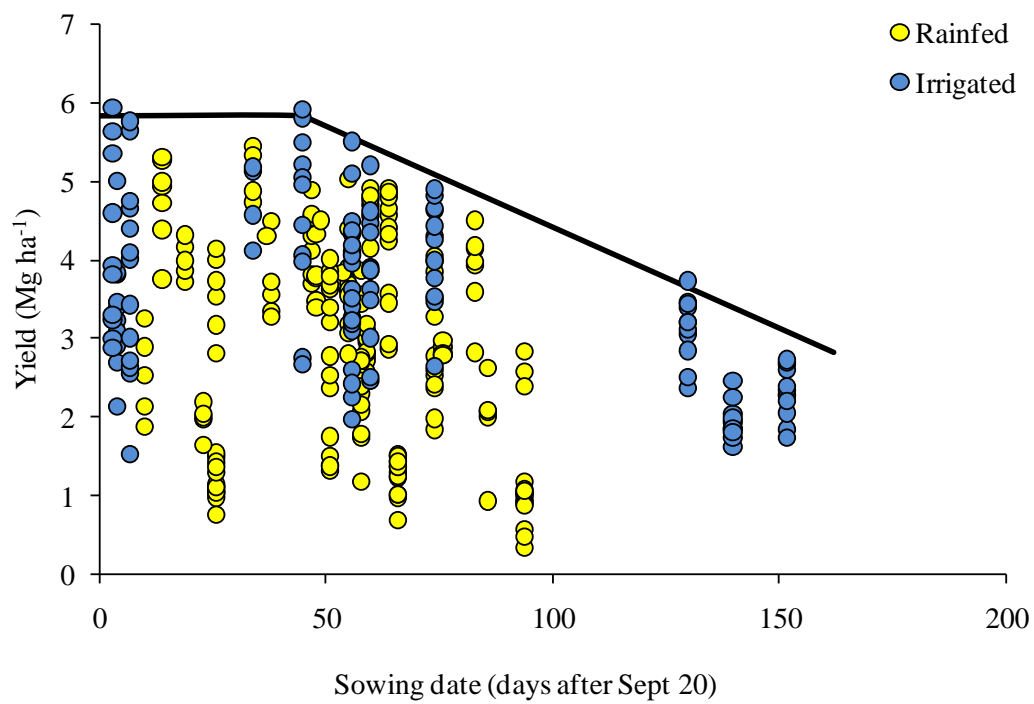


Figure 4. Relationship between yield and sowing date (expressed as days after Sept 20) for rainfed (yellow circles) and irrigated (blue circles) soybean crops grown in southern Brazil during four growing seasons. Solid line shows the fitted boundary function ($y = 5842$ before Nov 4; $y = 5842 - 0.026x$, after Nov 4)

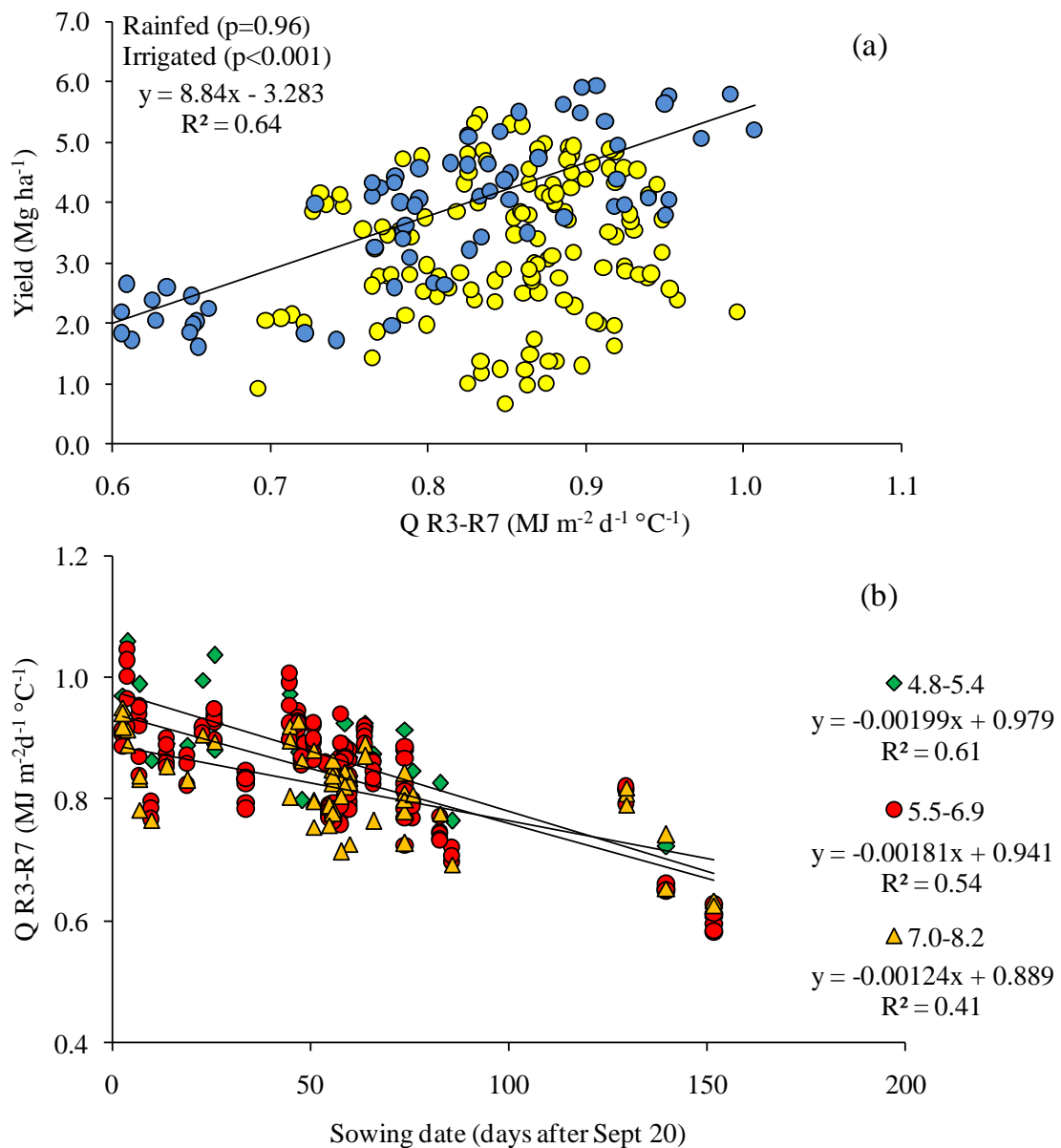


Figure 5. Upper panel: relationship between soybean yield and photothermal quotient (Q) between R3 and R7 stages in rainfed (yellow circles) and irrigated crops (blue circles). Lower panel: photothermal quotient between R3 and R7 as a function of sowing date in short (MG 4.7-5.4, diamonds), intermediate (MG 5.5-6.9, circles) and long (MG 7.0-8.2, triangle) cultivars. Data were collected during four growing seasons. Fitted regression lines are shown only when significant.

Table 1. Experiments with soybean conducted during four growing seasons (2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, and 2014/2015) at 12 locations in the Rio Grande do Sul State, Brazil, used in the study.

Experiments– site	Cropping System	Soiltype (clay %)	n*** Sowing date (range)	Water regime	n*** Cultivars (MG range)	Seedyield (range) (Mg ha ⁻¹)
<u>Onfarm</u>						
Restinga Sêca	No Till - H _L *	TypicHapludalf (18%)	2 (Nov 13 – Nov14)	Rainfed	12 (4.8 - 8.2)	3.7 (2.8-5.0)
Tupanciretã	No Till - H _L	RhodicHapludox (31%)	2 (Oct 27 – Nov19)	Rainfed	14 (4.7 - 8.2)	2.4 (1.2-4.3)
Água Santa	No Till - H _L	RhodicHapludox (76%)	2 (Nov 8 – Nov20)	Rainfed	14 (4.8 - 8.2)	3.1 (1.8-4.5)
<u>ResearchInstitution</u>						
Santa Maria	Disk - H _L	TypicHapludalf (43%)	12 (Sep22 –Feb19)	Irrigated&Rainfed	15 (4.8 - 8.2)	3.5 (1.5-6.0)
Pelotas	Disk - L _L **	TypicAlbaqualf (27%)	1 (Nov9)	Rainfed	11 (4.8 - 8.2)	3.3 (2.3-4.0)
Itaqui	Disk - L _L	TypicPlinthaqualf (32%)	5 (Oct 13 – Dec23)	Rainfed	16 (4.8 - 8.2)	1.2 (0.3-2.2)
Frederico Westphalen	Disk - H _L	RhodicHapludox (71%)	1 (Nov23)	Rainfed	13 (4.8 - 8.2)	4.2 (2.9-4.9)
Júlio de Castilhos	No Till - H _L	TypicHaplohumult (28%)	1 (Nov18)	Rainfed	12 (4.8 - 8.2)	2.9 (2.5-3.2)
Cachoeirinha	Disk - L _L	TypicAlbaqualf (6%)	4 (Oct4 – Dec12)	Irrigated&Rainfed	7 (4.8 - 8.2)	4.4 (2.8-5.3)
Uruguaiana	Disk - L _L	LithicUdorthent (39%)	3 (Oct 4 – Dec12)	Rainfed	7 (4.8 - 8.2)	3.6 (2.4-4.9)
Cachoeira do Sul	Disk - L _L	TypicAlbaqualf (6%)	3 (Oct 9 – Dec5)	Rainfed	5 (4.8 - 8.2)	3.5 (2.8-4.3)
Santa Vit. do Palmar	Disk - L _L	TypicAlbaqualf(21%)	4 (Sep 30 – Dec17)	Rainfed	5 (4.8 - 8.2)	2.9 (0.9-4.5)

H_L*: Highland, L_L** : Lowland, n***: number

Table 2 – Mean incident solar radiation, maximum (Tmax) and minimum air temperature (Tmin), photothermal quotient (Q), relative humidity (RH), total precipitation, and total grass-based Penman-Monteith reference evapotranspiration (ETo) during the 2-month period (January-February) that coincides roughly with the reproductive phase of soybean crops grown in Rio State of Rio Grande do Sul (RS), Brazil. Values are shown for four crop growing seasons (2011/2012, 2012/2013, 2013/2014, and 2014/2015) at three locations: Pelotas (south RS), Santa Maria (central RS), and Passo Fundo (north RS).

Region- cropseason	Solar radiation (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Q (MJ m ⁻² d ⁻¹ °C ⁻¹)	RH (%)	Precipitation (mm)	ETo (mm)
North							
2011/2012	23.8	29.3	17.5	1.02	73	194	270
2012/2013	23.1	27.3	16.4	1.06	77	262	241
2013/2014	22.5	29.6	18.0	0.95	76	320	257
2014/2015	21.1	27.6	17.6	0.93	82	393	212
Historic (1961-1991)							
	21.9	28.2	17.5	0.96	73	316	253
Central							
2011/2012	22.3	32.6	19.8	0.85	69	281	287
2012/2013	22.5	29.6	18.3	0.94	77	219	244
2013/2014	20.6	32.0	20.6	0.78	77	263	253
2014/2015	20.7	29.5	19.8	0.84	83	281	230
Historic (1961-1991)							
	20.9	30.2	19.3	0.84	74	290	251
South							
2011/2012	21.2	29.9	19.3	0.86	76	251	231
2012/2013	21.8	29.0	18.4	0.92	80	228	223
2013/2014	19.6	30.5	20.8	0.76	80	424	223
2014/2015	20.8	28.6	19.9	0.86	83	276	227
Historic (1961-1991)							
	22.8	28.7	18.5	0.96	77	214	257

Table 3. Means of several crop, management, and climatic factors in water-limited (water supply < 800 mm) and non-water limited (water supply \geq 800 mm) field classes with low-residuals and high-residuals (i.e., difference between actual yield and the yield derived from the boundary function for the relationship between yield and water supply). Significance of difference (dif) between means of variables (dif.), in the small-versus large-residual field classes was tested, separately for the WL and NWL categories, using *t*-tests.

Variable	Water-limited fields			Non-water limited fields		
	small residuals	large residuals	Dif	small residuals	large residuals	dif
	Average			Average		
Yield (Mg ha ⁻¹)	4.0	1.2	2.8**	4.6	1.2	3.4**
Sowing date (day of year)	321	345	-24**	300	308	-8*
Maturity group	6.3	6.4	-0.1	6.4	6.6	-0.2
Q _{R3-R7} (MJ m ⁻² d ⁻¹ °C ⁻¹)	0.81	0.82	-0.01	0.90	0.87	0.03*
Rain _{R3-R7} /Rain _{VE-R7}	0.55	0.38	0.17*	0.53	0.48	0.05
Available soil water at sowing (mm)	98	76	22**	109	68	41**

Asterisks indicate significance at *t*-test P-value * <0.01, and ** <0.001.

Table 4. Predicted yield and photothermal quotient (Q) between R3 and R7 for short (MG 4.7-5.4), intermediate (MG 5.5-6.9), and long (MG 7.0-8.2) cultivars sown at four different dates. Values were estimated based on the fitted regression models shown in Figure 5.

Sowing date (days after Sept 20)	Short		Intermediate		Long	
	Q (MJ m ⁻² d ⁻¹ °C ⁻¹)	Yield (Mg ha ⁻¹)	Q (MJ m ⁻² d ⁻¹ °C ⁻¹)	Yield (Mg ha ⁻¹)	Q (MJ m ⁻² d ⁻¹ °C ⁻¹)	Yield (Mg ha ⁻¹)
0	0.979	5.4	0.941	5.0	0.889	4.6
50	0.880	4.5	0.851	4.2	0.827	4.1
100	0.780	3.6	0.760	3.4	0.765	3.5
150	0.681	2.7	0.670	2.6	0.703	2.9

4 DISCUSSÃO

Uma nova classificação das cultivares de soja em grupos de maturidade relativa (GMR) baseada na resposta ao fotoperíodo, manejo e área geral de adaptação das cultivares de soja começou a ser utilizada no Brasil no início dos anos 2000 e permitiu representar de forma mais realística os fatores que afetam a duração, em dias, da sementeira até a colheita (ALLIPRANDINI et al., 2009). Seguindo a metodologia descrita por Alliprandini et al. (2009) para estimativa do GMR, todas as práticas de manejo durante a condução dos experimentos foram realizadas visando minimizar estresses que poderiam interferir na duração do ciclo de desenvolvimento, sendo selecionados apenas os experimentos com sementeiras realizadas próximas a primeira quinzena de novembro e que não apresentaram deficiência hídrica.

Foram estimadas regressões lineares entre o GMR das cultivares padrão e a duração do ciclo de desenvolvimento (semeadura até R8), em dias, para cada cultivar em cada época de sementeira e local. Essas regressões foram utilizadas para estimar o GMR das cultivares que ainda não havia sido estimado o GMR, em cada época de sementeira e local. O GMR de cada cultivar foi considerado como a média dos GMRs em cada ano, época de sementeira e local. Na maioria das épocas e locais de sementeira, os coeficientes de regressão foram próximos a 0,90, o que indica confiabilidade na estimativa dos GMR. O GMR das cultivares antigas e modernas que ainda não tinham sido classificadas nesse novo sistema variou de 4.8 a 7.3. Entre os experimentos, o GMR variou em até ± 0.6 em relação ao GMR médio, indicando pequena variação do GMR em função de local e ano para mesma cultivar. A partir dessa nova metodologia de GMR pode-se obter maior precisão na estimativa da duração do ciclo de desenvolvimento das cultivares de soja quando semeadas próximas à primeira quinzena de novembro. Porém, esse novo sistema não conseguiu ter boa precisão em representar a duração do ciclo de desenvolvimento quando as sementeiras foram realizadas no final de setembro e início de outubro ou em janeiro e fevereiro, indicando assim, a necessidade de novos estudos que tenham como objetivo entender e classificar as cultivares atualmente semeadas pelos agricultores no Sul do Brasil quanto ao GMR quando semeadas antes ou após o período preferencial.

Além da mudança no sistema de classificação das cultivares de soja quanto ao grupo de maturação, na primeira década do século XXI ocorreu incremento da utilização de cultivares com tipo de crescimento indeterminado e grupo de maturidade relativa menor que 7.0. A partir desse novo cenário, foram conduzidos 47 experimentos utilizando 23 cultivares

de soja, durante cinco estações de crescimento (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015) em 12 locais no Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 2 do capítulo 5), com o objetivo de descrever de forma detalhada o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade dessas cultivares de soja em resposta as diferentes disponibilidades edafoclimáticas no Rio Grande do Sul.

Em virtude de alguns experimentos nesta Tese terem sido conduzidos com parcelas formadas apenas por uma linha, ou seja, não seguindo a metodologia tradicionalmente utilizada de quatro linhas por parcela para a cultura da soja. Optou-se por conduzir experimentos paralelos com o intuito de comparar se o tamanho da parcela afetava as variáveis de crescimento, desenvolvimento e a produtividade das cultivares de soja utilizadas neste estudo. Para tal, foram escolhidas cultivares que representassem toda a faixa de grupo de maturidade relativa utilizadas nos experimentos e essas foram semeadas em três épocas de semeadura (28/2/2012, 22/9/2012 e 15/11/2013). As cultivares NS 4823 RR, BMX Turbo RR, IAS 5 e CD 219 RR estavam nos experimentos com parcelas formadas por uma linha de cada cultivar, e também, as mesmas cultivares foram semeadas em parcelas com quatro linhas de cada cultivar. A data de semeadura e todos os tratos culturais foram os mesmos, ou seja, o único fator que variou foi o tamanho de parcela (uma linha x quatro linhas).

A comparação da duração, em dias, dos estádios, das fases e do ciclo de desenvolvimento, dos experimentos conduzidos com uma e quatro linhas de cada cultivar esta representada na Figura 1. Na semeadura em 28/01/2012, as maiores diferenças na duração do ciclo foram de dois dias, ora para mais (CD 219 RR e BMX Turbo RR) ora para menos (IAS 5 e NS 4823) nas cultivares semeadas na parcela (quatro linhas) (Figura 1A). Já na semeadura em 22/09/2012, a maior diferença na duração do ciclo ocorreu na cultivar IAS 5 e foi de três dias (maior na parcela com quatro linhas). A cultivar NS 4823 RR teve menor duração do ciclo (três dias) quando semeada na parcela de quatro linhas comparado com a semeada em uma linha (Figura 1B). Na semeadura realizada na época recomendada pelo Zoneamento Agroclimático da Soja, 15/11/2013, a variação no ciclo foi de 2 dias, sendo maior na parcela formada por uma linha na cultivar IAS 5 (Figura 1C).

Na maioria das cultivares e épocas não ocorreu diferença na evolução do índice de área foliar e no índice de área foliar máximo (IAFmax) quando essa variável foi determinada no experimento conduzido em uma linha de cada cultivar ou em quatro linhas de cada cultivar (Figuras 2, 3 e 4). A maior diferença entre os dois protocolos experimentais no IAFmax ocorreu na cultivar CD 219RR e foi próximo de 2 (Figura 2). Porém, destaca-se que nos anos agrícolas 2011/2012 e 2012/2013, as determinações de área foliar foram apenas na haste

principal, sendo que isso pode ser um fator que tenha contribuído para a variação da área foliar, além do fator tamanho de parcela. Em 2013/2014 foi determinado a área foliar em toda planta e pode-se observar que a diferença na evolução da área foliar e no IAFmax foi menor entre os diferentes protocolos experimentais (Figura 4).

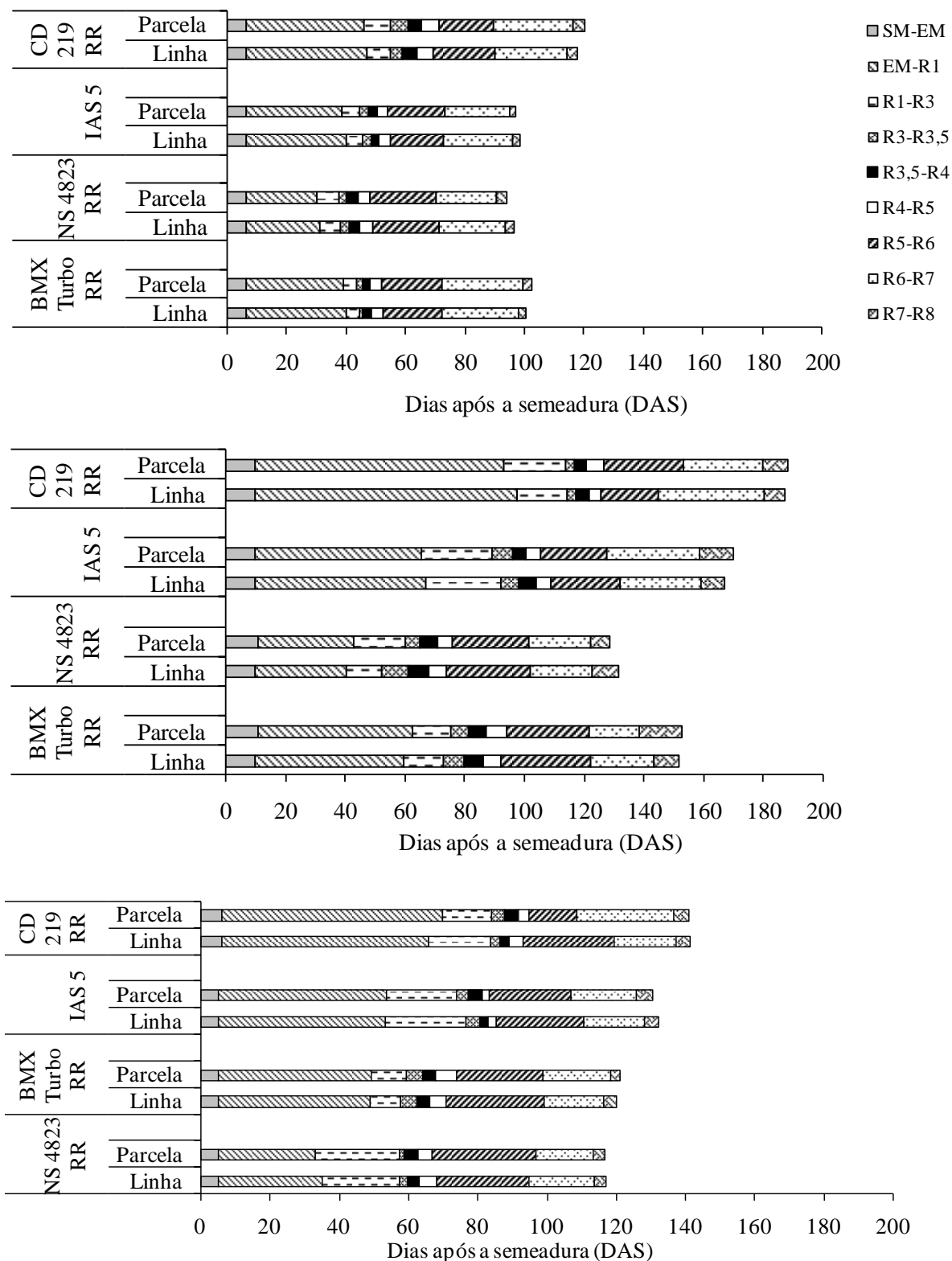


Figura 1 – Duração, em dias, das fases semeadura-emergência (SM-EM), emergência-R1 (EM-R1) e dos estádios R1-R3, R3-R3,5, R3,5-R4, R4-R5, R5-R6, R6-R7 e R7-R8 de quatro cultivares de soja, semeadas em 28/01/2012 (painel superior), 22/09/2012 (painel mediano) e 15/11/2013 (painel inferior). Santa Maria, RS, Brasil.

Além disso, destaca-se que o maior IAFmax nas diferentes cultivares e datas de sementeira, ora ocorre no experimento com 1 linha e ora ocorre no experimento com quatro linhas. Corroborando com a hipótese de que é possível determinar área foliar em experimentos conduzidos com apenas uma linha de cada cultivar sem perda de precisão.

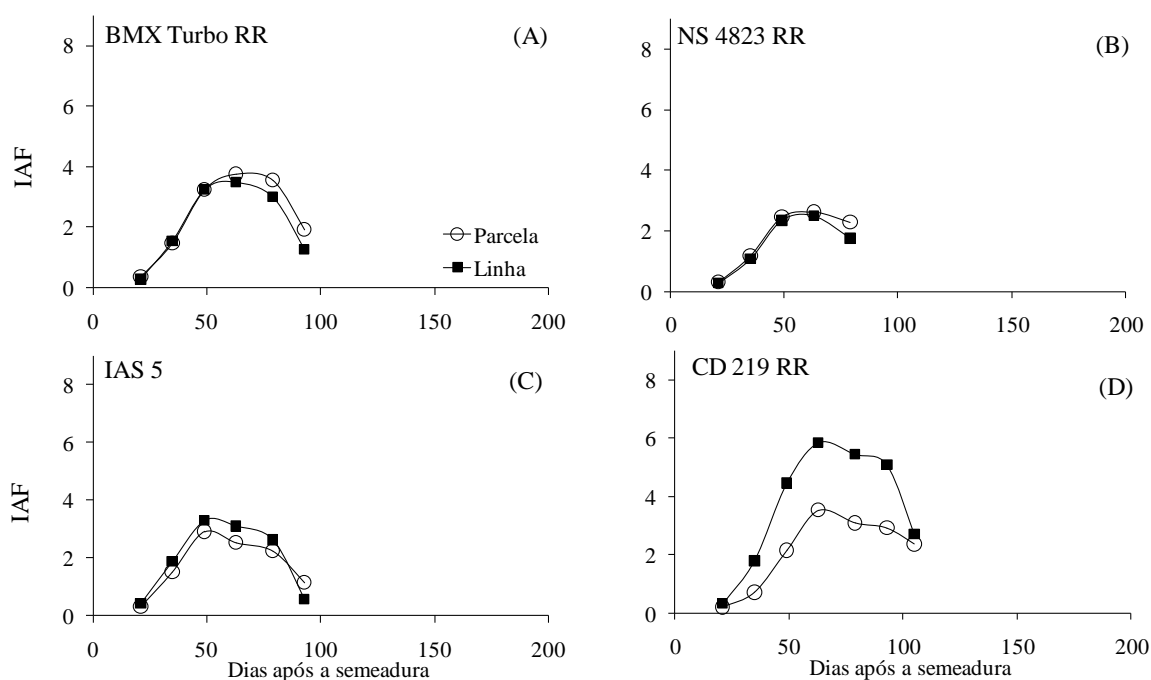


Figura 2 – Evolução do índice de área foliar das cultivares BMX Turbo RR (A), NS 4823 RR (B), IAS 5 (C) e CD 219 RR (D), semeadas em 28/01/2012. Santa Maria, RS, Brasil. Observação: Linha: a área foliar foi medida no experimento conduzido com uma linha de cada cultivar e, Parcela: a área foliar foi medida no experimento conduzido com quatro linhas de cada cultivar.

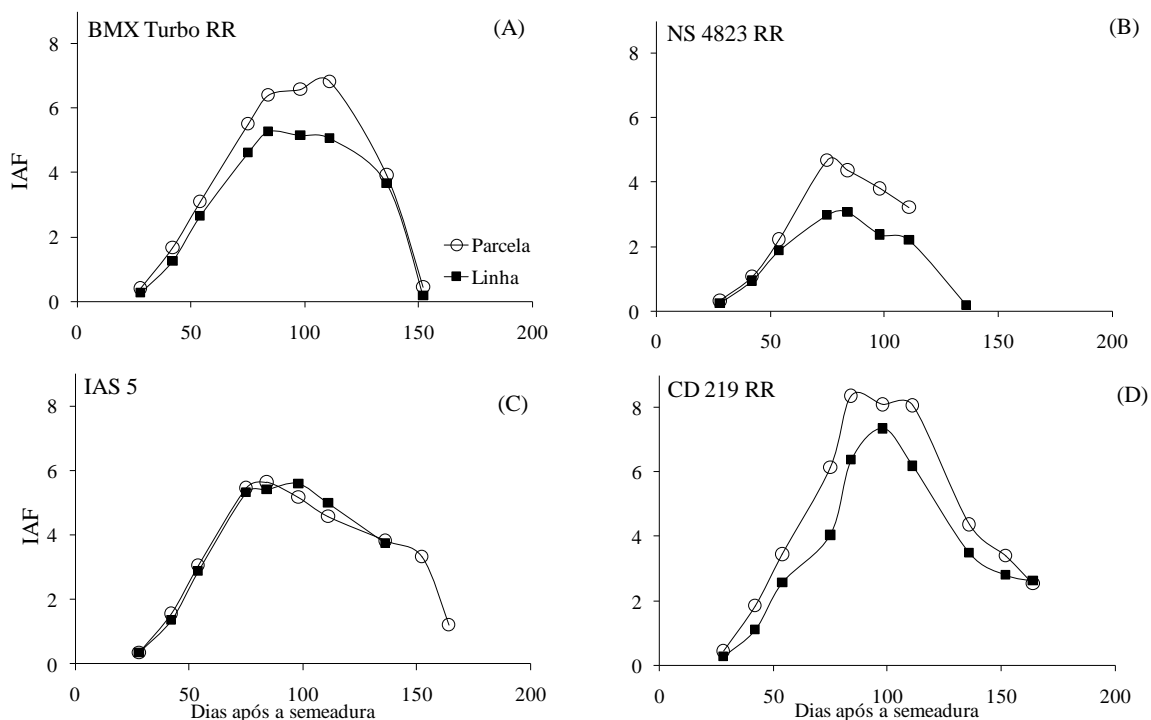


Figura 3 – Evolução do índice de área foliar das cultivares BMX Turbo RR (A), NS 4823 RR (B), IAS 5 (C) e CD 219 RR (D), semeadas em 22/09/2012. Santa Maria, RS, Brasil. Observação: Linha: a área foliar foi medida no experimento conduzido com uma linha de cada cultivar e, Parcela: a área foliar foi medida no experimento conduzido com quatro linhas de cada cultivar.

Para produtividade a resposta foi similar ao observado para as variáveis de desenvolvimento e área foliar, ou seja, as diferenças não foram significativas, e ora foi para mais na parcela e ora para mais na linha. Não foram apresentados os dados de produtividade da semeadura de 22/9/2012, pois ocorreu acamamento em duas cultivares e, portanto não foi determinada a produtividade. Nas outras duas cultivares a maior diferença foi de $0,5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ na cultivar IAS 5.

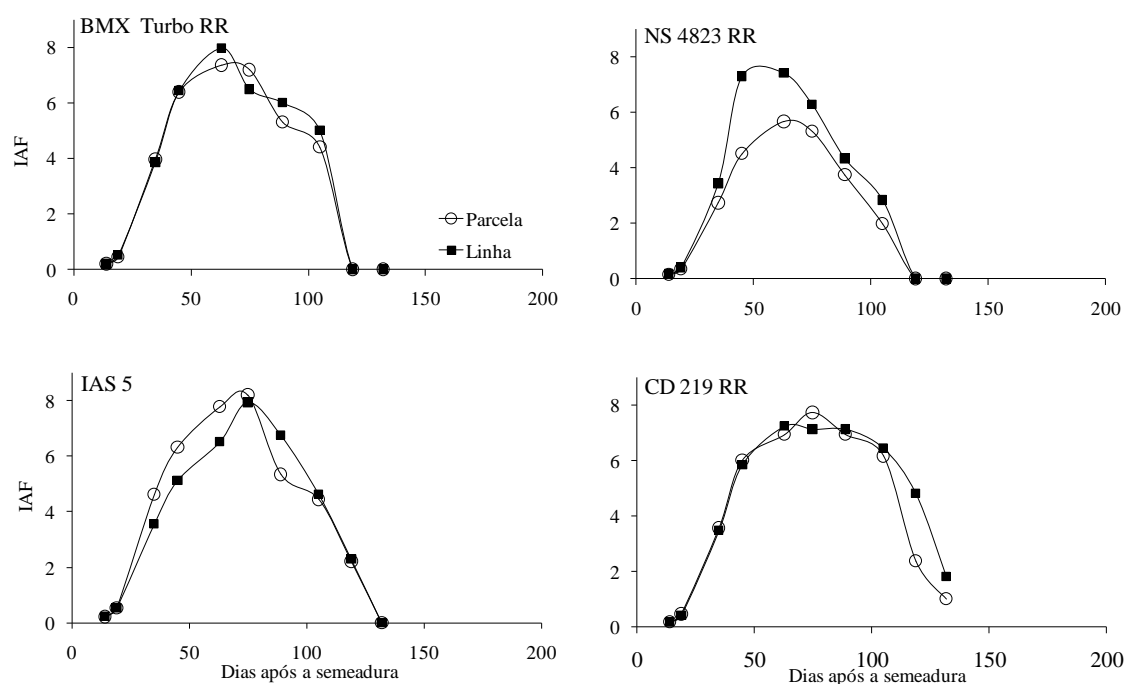


Figura 4 – Evolução do índice de área foliar das cultivares BMX Turbo RR (A), NS 4823 RR (B), IAS 5 (C) e CD 219 RR (D), semeadas em 15/11/2013. Santa Maria, RS, Brasil. Observação: Linha: a área foliar foi medida no experimento conduzido com uma linha de cada cultivar e, Parcela: a área foliar foi medida no experimento conduzido com quatro linhas de cada cultivar.

A partir desses resultados, concluí-se que a metodologia experimental utilizada para determinações das variáveis de crescimento, desenvolvimento e produtividade é apropriada, ou seja, as parcelas formadas por uma linha de cada cultivar representam as parcelas com quatro linhas.

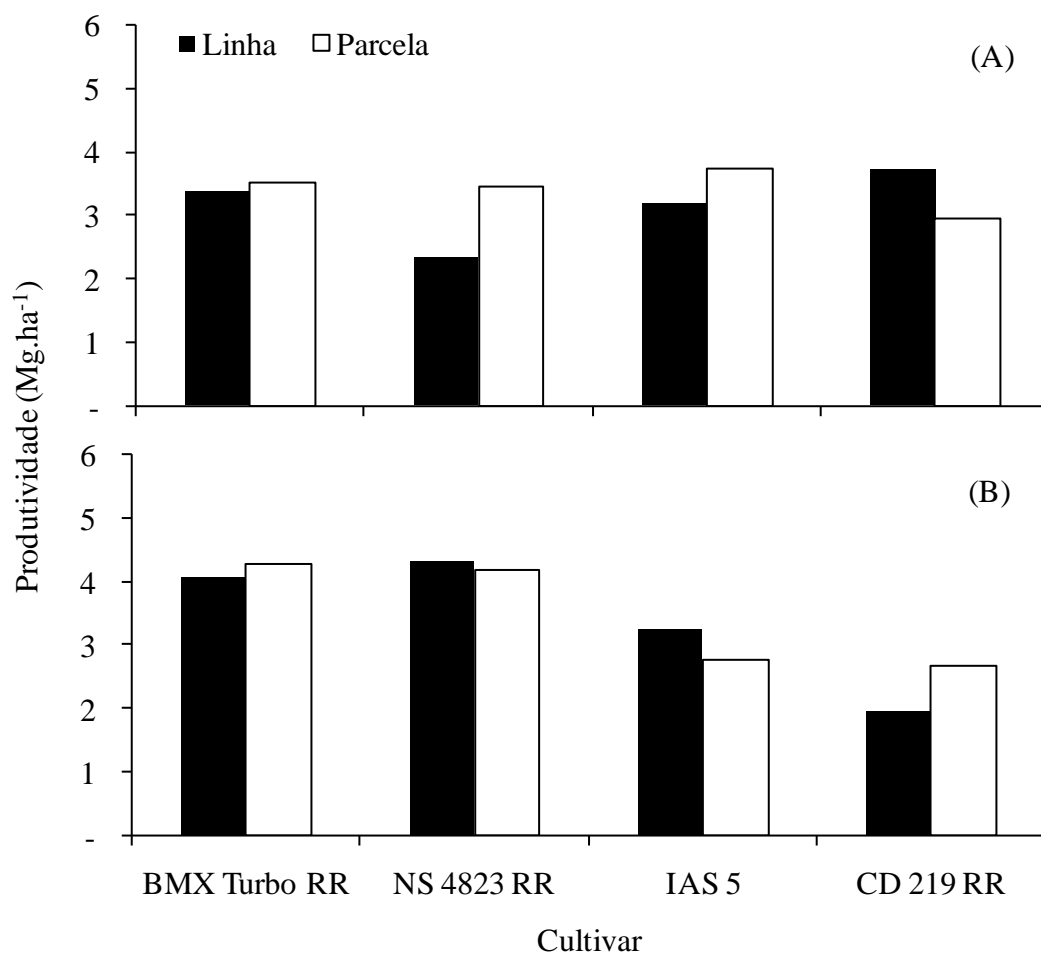


Figura 5 – Produtividade, em Mg.ha⁻¹, das cultivares BMX Turbo RR, NS 4823 RR, IAS 5 e CD 219 RR, semeadas em 28/1/2012 (A) e 15/11/2013 (B). Santa Maria, RS, Brasil. Observação: Linha: a produtividade foi medida no experimento conduzido com uma linha de cada cultivar e, Parcela: a produtividade foi medida no experimento conduzido com quatro linhas de cada cultivar.

As plantas de soja foram expostas a variações dos elementos meteorológicos durante essas cinco estações de crescimento e 12 locais, que representa quase a totalidade das situações que podem ocorrer em lavouras comerciais de soja semeadas no Rio Grande do Sul (Figura 1 do capítulo 3, Figura 3 do capítulo 4 e Figura 1 do capítulo 5). Na maioria dos locais e épocas de semeadura o desenvolvimento ocorreu com temperatura média, fotoperíodo e radiação solar crescentes no início e decrescente no restante do ciclo (representando semeaduras antes e durante a época recomendada no Zoneamento Agroclimático da Soja no RS). Nas semeaduras após 21 de dezembro, essas variáveis meteorológicas foram decrescentes durante toda a estação de crescimento (representando semeaduras após a época recomendada no Zoneamento Agroclimático da Soja no RS). Essa variação dos elementos

meteorológicos ao longo do ciclo de desenvolvimento das cultivares de soja promoveram variações na contribuição das ramificações no índice de área foliar, na duração das fases e do ciclo de desenvolvimento e no potencial de rendimento das cultivares de soja estudadas.

A maioria das cultivares apresentaram menor índice área foliar máximo (IAFmax) com o atraso da época de semeadura, independentemente do GMR e tipo de crescimento (Figuras 2 a 7 do capítulo 2). O IAFmax médio das cultivares foram 8,9; 7,2 e 3,0 nas semeaduras de setembro, novembro e fevereiro, respectivamente. Essa redução do IAFmax ocorreu em virtude do encurtamento do ciclo de desenvolvimento com o atraso da semeadura, que pode ser explicado pelo fato de a soja ser planta de dia curto (SINCLAIR et al., 2005). O IAFmax médio das cultivares indeterminadas e das cultivares determinadas foi de 8,9 e 10,4 na semeadura de setembro, de 6,7 e 8,0 na semeadura de novembro, e de 2,6 e 3,7 na semeadura de fevereiro, respectivamente. A hipótese que explica o maior IAFmax médio nas cultivares de tipo determinado deve-se ao fato de essas pertencerem a GMRs maiores, quando comparado às cultivares indeterminadas. Como a maioria das cultivares atualmente semeadas no Sul do Brasil apresentam GMRs baixo, e conseqüentemente menor IAFmax quando comparado às cultivares antigas (GMRs alto), os assistentes técnicos e os produtores de soja devem ter maior atenção no manejo de insetos desfolhadores, apesar dos valores de IAFmax das cultivares modernas estarem acima dos valores considerado ótimo para a cultura da soja (SETIYONO et al., 2008).

O índice de área foliar na haste principal (IAFhp) e nas ramificações foram responsáveis por 84% e 16% do IAFtotal na média das cultivares. De maneira geral, verificou-se que o número e a contribuição das ramificações no IAF foram menores com o atraso da época de semeadura. Na semeadura em setembro, o IAFram contribuiu com 31% e 20% nas cultivares determinadas e indeterminadas, respectivamente. Essa contribuição diminuiu para 12% na semeadura em novembro e 11% na de fevereiro nas cultivares determinadas, e nas cultivares indeterminadas o decréscimo foi de 12% em novembro para 9% em fevereiro. A menor contribuição do IAFram está associada ao encurtamento do ciclo de desenvolvimento e à diminuição do número de ramificações com o atraso da semeadura.

Em virtude das cultivares pertencerem a GMR distintos, observou-se de maneira geral redução da duração total do ciclo, na mesma época de semeadura, com a redução do GMR para todas as semeaduras (Figura 2 do capítulo 3). Essa resposta de encurtamento da duração do ciclo de desenvolvimento conforme a redução do GMR, concorda com os estudos de Mercou et al. (2007), que também verificaram que, na mesma região, quanto menor o GMR, menor a duração do ciclo. Há tendência de encurtamento da fase reprodutiva (R1-R8) e do

ciclo de desenvolvimento (EM-R8) com o atraso da semeadura (Figuras 2, 3 e 4 do capítulo 3) e que pode ser explicada pelo efeito do fotoperíodo sobre o desenvolvimento da soja, a qual é uma planta de dia curto (SINCLAIR et al., 2005). As cultivares apresentaram redução da fase vegetativa (EM-R1), somente quando semeadas antes ou após a época recomendada (setembro, janeiro e fevereiro), nos anos agrícolas de 2011/2012 e 2012/2013 (Figuras 3 e 4 do capítulo 3). A antecipação do florescimento nessas datas de semeadura, deve-se ao fotoperíodo curto (12-13 horas) a que as cultivares foram expostas no início do ciclo de desenvolvimento (SINCLAIR et al., 2005) nas semeaduras de setembro, janeiro e fevereiro. Kantolic (2008) também verificou que semeaduras antecipadas de primavera, em latitudes médias, apresentaram tendência de acelerar a iniciação floral, da mesma maneira que em semeaduras tardias. Estudos com época de semeadura de soja no RS conduzidos ainda nos anos 90, utilizando cultivares determinadas verificaram que a antecipação do florescimento provocava redução do porte das plantas e da altura de inserção dos legumes inferiores, reduzindo a produtividade de grãos em algumas cultivares de soja e, conseqüentemente, inviabilizando o cultivo fora da época recomendada, que na maioria dos municípios no RS é de 21 de outubro até 31 de dezembro (BONATO et al., 1998). Essa resposta foi um dos fatores que inviabilizaram a antecipação e o atraso da data de semeadura da cultura da soja nas décadas de 70, 80 e 90 no RS. Porém, com aumento da utilização de cultivares indeterminadas, esse problema foi minimizado, pois apesar das mesmas também florescerem precocemente quando semeadas fora da época preferencial, essas cultivares continuam crescendo em estatura até próximo ao início do enchimento de grãos (BASTIDAS et al., 2008), podendo, assim, serem utilizadas para viabilizar semeaduras antecipadas e tardias de soja no Rio Grande do Sul.

A similaridade na duração do ciclo de desenvolvimento das cultivares de soja, em terras altas e em terras baixas (Figura 5 do capítulo 3), indica que o ambiente edáfico de cultivo não afeta o padrão de desenvolvimento em soja. Esta é uma importante informação para o Rio Grande do Sul, onde a área de cultivo de soja em terras baixas aumentou de 11 mil ha no ano agrícola 2009/2010 para 280 mil ha no ano agrícola 2014/2015 (IRGA, 2015), e pode continuar aumentando nos próximos anos, em rotação com o arroz irrigado. Esses resultados indicam que as práticas de manejo associadas ao desenvolvimento da soja em terras altas podem ser realizadas de forma muito similar em terras baixas, em virtude de não haver diferença na duração das fases e do ciclo total de desenvolvimento da soja.

O período de sobreposição entre as fases vegetativa e reprodutiva, o crescimento em estatura e a emissão de nós de R1 até R8, em média foi maior para as cultivares com tipo de

crescimento indeterminado comparando com as de tipo determinado, principalmente nos experimentos conduzidos com irrigação suplementar (Figura 3 do capítulo 4). Na maioria dos experimentos verificou-se que as cultivares determinadas tem um crescimento significativo após o R1. Sendo assim, sugere-se que as cultivares atualmente classificadas como de tipo de crescimento determinado devam ser denominadas como tipo de crescimento semi-determinado.

A partir das características das cultivares indeterminadas, pode-se inferir uma capacidade de adaptar-se a condições adversas de cultivo, como antecipação ou atraso da data de semeadura, curtos períodos de estresse hídrico provocados pela ausência de chuva ou excesso hídrico no solo, fenômenos que frequentemente ocorrem no RS. Essas características permitem entender por que nos últimos 15 anos ocorreu uma inversão na adoção do tipo de crescimento das cultivares de soja semeadas no Sul do Brasil.

A faixa de rendimento de grãos variou de 0,3 até 6,0 Mg.ha⁻¹ ao longo dos anos, cultivares, datas de semeaduras e locais. Os máximos rendimentos observados estão dentro da faixa de valores estimada por modelos agromeorológicos (4.9 to 6.9 Mg.ha⁻¹) para o Sul do Brasil (BATTISTI et al., 2013; SENTELHAS et al., 2015). De acordo com a distribuição dos valores de rendimento com a quantidade de água durante o período da semeadura até o R7 (WS) (Figura 3 do capítulo 5), não há aumento nos valores de rendimento com valores de WS ≥ 800 mm. Levando em consideração que o valor de 800 mm divide os rendimentos limitados por água e não limitados, pode-se inferir que 75% dos valores de rendimento de todos os experimentos foram limitados por água. Esse resultado indica que, na maioria dos anos e locais, a WS não é suficiente para atender os requerimentos da cultura para alcançar o potencial de rendimento. Além disso, não somente a quantidade, mas também a distribuição da WS durante a estação de crescimento pode explicar diferenças no rendimento de grãos de soja na figura 3 do capítulo 5, pois a precipitação + irrigação acumulada no período da semeadura até R7 foi maior que 800 mm em muitos experimentos, porém um número significativo de valores de rendimento ficou longe da função limite, indicando assim que a irregularidade da precipitação foi um fator determinante para os baixos rendimentos. A eficiência do uso da água calculada neste estudo foi de 9,1 kg ha mm⁻¹ e esta dentro da faixa de valores reportada na literatura para outras leguminosas, que varia de 7 até 13 kg ha mm⁻¹ (CONNOR et al., 2011).

Depois de água disponível durante a estação de crescimento, a data de semeadura é o fator de manejo determinante para alcançar potencial de rendimento em soja no RS. Levando em consideração os máximos rendimentos ao longo da faixa de datas de semeadura, podemos

observar perda de 26 kg.ha^{-1} por dia com o atraso na semadura após o dia 4 de novembro (Figura 4 no capítulo 5). Nos experimentos que foram conduzidos com irrigação suplementar, verificou-se que a perda de rendimento com o atraso na data de semeadura esta associada com diferenças nos valores de coeficiente fototérmico (Q) nos estágios críticos de determinação do rendimento da soja e com o GMR. Os valores de Q decressem linearmente com o atraso na semeadura e são mais elevados em GMR menores que 6.9 em semeaduras de final de setembro e outubro (Figura 5 do capítulo 5). Relações similares entre rendimentos não limitados por água e Q durante estádios chaves para determinação do rendimento foram encontrados em trigo (FISCHER, 1985), arroz (ISLAM; MORISON, 1992), e *Cicer arietinum* (SADRAS et al., 2015).

As informações desta Tese poderão ser usadas para fazer ajuste fino das atuais práticas de manejo na cultura da soja no Sul do Brasil. A partir da caracterização da evolução do índice de área foliar, das fases e do ciclo de desenvolvimento e do potencial de rendimento das cultivares (GMR) atualmente utilizadas pelos agricultores, espera-se que consultores técnicos e agricultores possam desenvolver ferramentas de tomada de decisão visando atingir altos rendimentos na cultura da soja em ambiente subtropical.

5 CONCLUSÃO

1 – O sistema de classificação em grupo de maturidade relativa (GMR) apresenta boa precisão na estimativa da duração do ciclo de desenvolvimento das cultivares de soja quando semeadas próximas à primeira quinzena de novembro. Porém, o GMR não consegue representar de forma satisfatória a duração do ciclo de desenvolvimento quando as semeaduras são realizadas no final de setembro e início de outubro ou após a segunda quinzena de dezembro.

2 - Há redução dos valores de IAF_{max}, IAF_{hp} e IAF_{ram} com o atraso da época de semeadura, independentemente do grupo de maturação e tipo de crescimento, demonstrando assim, a necessidade de adequar as recomendações de manejo de pragas em função da época de semeadura da soja no Rio Grande do Sul. O índice de área foliar das ramificações contribui com 31%, 12% e 11% do índice de área foliar total nas cultivares determinadas e com 20%, 12% e 9% do índice de área foliar total nas cultivares indeterminadas na semeaduras de setembro, novembro e fevereiro.

3 - Há redução da duração da fase reprodutiva, do ciclo total de desenvolvimento (exceto algumas cultivares semeadas em setembro), com o atraso da data de semeadura independentemente do grupo de maturação e tipo de crescimento. As semeaduras de setembro, janeiro e fevereiro promovem redução da fase vegetativa na maioria das cultivares quando comparadas com a época recomendada (novembro e dezembro). O desenvolvimento da soja é similar quando cultivada em terras altas e em terras baixas.

4 - O período de sobreposição entre as fases vegetativa e reprodutiva, o crescimento em estatura e a emissão de nós de R1 até R8, foi maior para as cultivares com tipo de crescimento indeterminado comparando com as de tipo determinado, e a magnitude desses valores diminuiu com o atraso na época de semeadura nas cultivares indeterminadas e praticamente não variou nas cultivares determinadas. A necessidade de novos estudos que tenham como objetivo entender e reclassificar as cultivares atualmente semeadas pelos agricultores do Sul do Brasil quanto ao tipo de crescimento.

5 – O potencial de rendimento de soja variou de 2,8 até 6,0 Mg.ha⁻¹, dependendo da quantidade e distribuição da água durante a estação de crescimento e do coeficiente fototérmico durante os estágios reprodutivos da soja.

REFERÊNCIAS

- ALLIPRANDINI, L. F. et al. Effects of genotype- environment interaction on soybean yield in the Paraná state. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, p. 1433-1444, 1994.
- ALLIPRANDINI, L. F. et al. Understanding soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science**, v. 49, p. 801-808, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2008.07.0390>>.
- ALMEIDA, L. A.; KIIHL, R. A. S. Melhoramento da soja no Brasil - desafios e perspectivas. In: **Soja: Tecnologia da Produção**. Gil. M. S. Câmara (Ed.). Piracicaba, SP, USP-ESALQ, 1998. p. 40-54.
- ASFAW, A. et al. AMMI and SREG GGE biplot analysis for matching varieties onto soybean production environments in Ethiopia. **Scientific Research and Essay**, v. 4, p. 1322-1330, 2009.
- BARNI, N. A. & MATZNAUER, R. Ampliação do calendário de semeadura da soja no Rio Grande do Sul pelo uso de cultivares adaptados aos distintos ambientes. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 6, p. 189-203, 2000.
- BASTIDAS, A. M. et al. Soybean sowing date: the vegetative, reproductive, and agronomic impacts. **Crop Science**, v. 48, p. 727-740, 2008. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2006.05.0292>.
- BATTISTI, R. et al. Climatic efficiency for soybean and wheat crops in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, in different sowing date. **Ciência Rural**, v.43, p. 390-396, 2013. Doi: 10.1590/S0103-84782013000300003.
- BERNARD, R. L. Two genes affecting stem termination in soybeans. **Crop Science**, v. 12, p. 235-239, 1972.
- BERNARD, R. L. et al. Evaluation of the USDA soybean Germplasm Collection: Maturity groups 000-IV. **USDA-ARS Tech. Bull.** 1844. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC. 1998.
- BONATO, E. R. et al. Desempenho de cultivares de soja em três épocas de semeadura, no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, p. 879-884, 1998.
- BONETTI, L.P. Distribuição da Soja no Mundo. In: MIYASAKA, S.; MEDIA, J. C. **A Soja no Brasil**. L.P. Ed. Campinas: ETAL, 1981. p. 1-5.
- CAVASSIM, J. E. et al. Stability of soybean genotypes and their classification into relative maturity groups in Brazil. **American Journal of Plant Sciences**, v. 4, p. 2060-2069, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2013.411258>>.
- CONNOR, D. J. et al. **Crop Ecology, Productivity and Management in Agricultural Systems**. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. 2011.

EVANS, L. T., 1993. **Crop Evolution, Adaptation, and Yield**. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

CUNHA, G. R. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, p. 446-459, 2001.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja**: Região Central do Brasil 2004. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm>

EMATER - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural. **Levantamento de área semeada com soja no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Emater. Acesso em 20 de setembro de 2015, de <http://www.emater.tche.br/site/servicos/informacoes-agropecuarias.php#>.

Evans, L. T., **Crop Evolution, Adaptation, and Yield**. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1993.

FAOSTAT Database – **Produção agrícola (FAO)**. Disponível em: <http://faostat.fao.org/>. Acesso em: 10 de setembro de 2015.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. et al. **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2009. p. 109-130. 2009.

FEHR, W. R. et al. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science**, v. 11, p. 929-931, 1971.

FERES, J. et al. Resumo do melhoramento da soja na Secretaria de Agricultura. **IPAGRO INFORMA**, n. 25, p. 5-8, 1982.

FISCHER, R. A. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. **J. Agric. Sci.** v. 105, p. 447-461, 1985.

GRASSINI, P. et al. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. **Field Crops Res.** v. 163, p. 179-150, 2015. doi:10.1016/j.fcr.2015.04.015, 2015.

HARTWIG, E. E.; KIIHL, R. A. S. Identification and utilization of a delayed flowering character in soybean for short-day conditions. **Field Crops Research**, v. 2, p. 145-151, 1979.

HEATHERLY, L. G. & SMITH, J. R. Effect of soybean stem growth habit on height and node number after beginning bloom in the midsouthern USA. **Crop Science**, v. 44, p. 1855-1859. 2004.

HINSON, K. The use of long juvenile trait in cultivar development. In. Conferência Mundial de Investigación en Soja, 4. B. Aires, Argentina. 1989. **Actas**. A.J. Pascale (Ed.). p. 983-987.

IBGE. Produção agrícola. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp?o=18&i=P>. Acesso em: 10 de outubro de 2015.

IRGA. Instituto Rio Grandense do Arroz. **Levantamento de área semeada com soja em terras baixas no Rio Grande do Sul, 2015**. Porto Alegre: IRGA. Recuperado em: 13 de agosto de 2015, de <http://www.irga.rs.gov.br>.

ISLAM, M. S.; MORISON, J. I. L. Influence of solar radiation and temperature on irrigated and grain rice in Bangladesh. **Field Crops Res.** v. 30, p. 13-18, 1992.

JIANG, Y. et al. Long-day effects on the terminal inflorescence development of a photoperiod-sensitive soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) variety. **Plant Science**, v. 180, p. 504-510, 2011.

KASSAM, A. H. 1977. **Net Biomass Production and Yield of Crops**. Rome: FAO.

KANTOLIC, A. Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genótipos. **Revista da Facultad de Agronomía UBA**, v. 28, n. 1, p. 63-88, 2008.

KIIHL, R. A. S., ALMEIDA, L. A. & DALL'AGNOL, A. Strategies for cultivar development in the tropics. In: World Soybean Research Conference III. **Proceedings**. Ames, IL, USA. 1985. p. 301-304.

MARCHESAN, E. **Produção e fixação de flores e legumes, pornó do caule e dos ramos, emtrêscultivares de soja**. 1982. 105 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PortoAlegre, 1982.

MEDINA, J. C. Introdução e evolução da soja no Brasil. In: MIYASAKA, S.; MEDIA, J. C. **A Soja no Brasil**. L.P. Ed. Campinas: ETAL, 1981. p. 18-25.

MERCAU, J. L. et al. Predicting on farm soybean yields in the pampas using CROPGRO soybean. **Field Crops Research**, v. 100, p. 200-209, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.006>.

PENARIOL, A. **Soja: Cultivares no lugar certo**. Informações Agronômicas, n. 90. jun./2000.

POEHLMAN, J. M. Breeding soybeans. In: POEHLMAN, J. M. (Ed.) **Breeding field crops**. 3rd ed. Van Nostrand Reinhold, New York. 1987. p. 421-450.

PURCELL, L. C., SPECHT, J. E., Physiological traits for ameliorating drought stress. In: BOERMA, H. R.; SPECHT, J. E. (Eds.), Soybeans: Improvement, Production, and Uses. **Am. Soc. Agronomy**, Madison, WI, p. 569-620, 2004.

RAMBO, L. et al. Rendimento de grãos da soja em função do arranjo de plantas. **Ciência Rural**, v. 33, p. 405-411, 2004.

RICHTER, G. L. et al. Estimating leaf area of modern soybean cultivars by a non-destructive method. **Bragantia**. v. 73 p. 416-425, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0179>.

RUBIN, S. A. L. **Progresso do melhoramento genético da soja no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Agronomia/UFSM. 1995. 73p.

RUBIN, S. A. L.; SANTOS, O. S. Progresso do melhoramento genético da soja no estado do Rio Grande do Sul: i. Rendimento de grãos. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 2, n. 2, p. 139-147, 1996.

SADRAS, V. O. et al. Unscrambling confounded effects of sowing date trials to screen for crop adaptation to high temperature. **Field Crops Res.** v. 177, p. 1-8, 2015.
doi:10.1016/j.fcr.2015.02.024

SANTOS, O. S. **Comportamento de dez variedades de soja em diferentes ambientes do Estado do Rio Grande do Sul**. 1975, 71p. (Tese de Mestrado). Viçosa-MG: UFV, 1975.

SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **J. Agr. Science.** v. 1, p.1-18, 2015.
Doi:10.1017/S0021859615000313

SETIYONO, T. D. et al. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, v. 100, p. 257-271, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.011>

SETIYONO, T. D. et al. Leaf area index simulation in soybean grown under near-optimal conditions. **Field Crops Research**, v. 108, p. 82-92, 2008.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.005>

SETIYONO, T. D. et al. Nodal leaf area distribution in soybean plants grown in high yield environments. **Agronomy Journal**, v. 103, p. 1198-1205, 2011.
<http://dx.doi.org/10.2134/agronj2011.0051>

SINCLAIR, T. R., et al. Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low latitude environments. **Field Crops Research**, v. 92, p. 53-59, 2005.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2004.08.008>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre:Artemed, 2008. 820p.

TIAN, Z. et al. Artificial selection for determinate growth habit in soybean. **Proceedings of the National Academy Sciences**. v. 107, p. 8563-8568, 2010.

THOMAS, A. L. et al. Rendimento de grão de soja afetado pelo espaçamento entre linhas e fertilidade do solo. **Ciência Rural**. v. 28 p. 543-546, 1998.

THOMAS, A. L.; MUNDSTOCK, C. M. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Evangraf. v. 31 p. 2005.

Van ITTERSUM, M. K. et al. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field Crops Research**. v. 52, p. 197-208. 1997.

Van Ittersum, M. K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance - A review. **Field Crops Research**. v. 143, p. 4-17. 2013.

WILHELM, W. W.; McMASTER, G. S. Importance of the phyllochron in studying development and growth in grasses. **Crop Science**, Madison, v. 35, p. 1-3, 1995.

YAN, W. GGE biplot – a Windows application for graphical analysis of multienvironment trial data and other types of two-way data. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 1111-1118, 2001.