**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja (*Glycine Max*, (L.) Merrill.)

Ricardo Gava

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2014**

Ricardo Gava
Engenheiro Agrícola

Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja (*Glycine Max*, (L.) Merrill.)
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ ANTONIO FRIZZONE**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba
2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Gava, Ricardo

Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja (*Glycine Max*, (L.) Merrill.) / Ricardo Gava. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2014.
123 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. Estresse hídrico 2. Manejo de irrigação 3. Déficit de irrigação 4. Soja I. Título

CDD 633.34
G279e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte -O autor"

À Deus,

Aos meus pais,

Maria Rosa Vattos Gava

Orlando Gilberto Gava

À minha irmã,

Elizabete Gava

Aos meus tios,

Aparecida Terezinha Vattos

Mario José Vattos

Rosimara Faria Flauzino Vattos

Aos meus avós,

Maria Sterli Gava

Orlando Gava

Aos meus avós,

Maria Rosa Basségio Vattos (*in memoriam*)

Mario Vattos (*in memoriam*)

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus, pois pelos seus ensinamentos cheguei até aqui, com saúde, sabedoria, paz. Ele quem me concedeu tantas vitórias e quem me concedeu outras chances sempre quando tropecei.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Esalq/USP, através do Departamento de Engenharia de Biossistemas, pela formação concedida. À todos os professores e funcionários desta instituição, que participaram direta e indiretamente desse trabalho.

Em especial ao meu orientador Prof. Dr. José Antonio Frizzone, pelos ensinamentos, conselhos, amizade e principalmente pela confiança em mim depositada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, que através do Programa Ciências sem Fronteiras – CsF, concedeu a bolsa de Doutorado Sanduíche no Exterior.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Engenharia da Irrigação –INCT-EI, pela estrutura e equipamentos cedidos para realização das pesquisas.

À Silvio Carlos Ribeiro Vieira Lima, presidente do Instituto de Pesquisa e Inovação na Agricultura Irrigada - INOVAGRI, grande representante e divulgador da pesquisa brasileira em irrigação e grande amigo, que tanto me auxiliou em decisões voltadas para minha carreira.

À Richard Leslie Snyder pela amizade, apoio, paciência e incentivo durante todo o ano em que realizei o doutorado sanduíche na University of Califonia – UCDAVIS, bem como ao professor Kyaw Paw U do qual também fui aluno.

Ao professor Paulo C. Sentelhas pelo auxílio na interpretação de dados climatológicos utilizados nesse trabalho.

Aos professores, **Marcos V. Folegatti, Tarlei A. Botrel, Rubens D. Coelho, Sergio N. Duarte** pelas aulas, contribuições à minha Tese, conhecimento compartilhado e por fazerem de nosso departamento um ambiente excelente para se trabalhar.

Meu agradecimento especial aos professores da **Universidade Estadual de Maringá - UEM**, que contribuíram para minha formação inicial e me mostraram o caminho da Pós-graduação. Principalmente aos professores **Paulo Sérgio Lourenço de Freitas e Roberto Rezende** pela força, amizade e ajuda em minhas tomadas de decisões.

Ao **Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR**, por meio do **Dr. Rogério Teixeira de Faria**, pelos ensinamentos que foram fundamentais para meu ingresso no doutorado.

À **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA/SOJA**, através do **Dr. José Renato B. Farias**, pelo auxílio ajudando nas dúvidas e sugestões principalmente na fase de planejamento do projeto.

Ao **Instituto Nacional de Meteorologia – INMET**, pelo fornecimento dos dados meteorológicos.

Aos colegas da **Congregação – Esalq/USP** da qual fiz parte, assim como do dos **Conselhos Centrais da USP, Conselho de Pós-graduação (CoPGr) e do Conselho de Pesquisa (CoP)**, nos quais representei a Esalq junto à USP por cerca de 3 anos. Obrigado a todos pela experiência compartilhada, principalmente em se tratando de gestão de pessoas.

Aos colegas da **Associação dos Pós-graduandos-APG/Esalq**, instituição da qual presidi por um ano e fui membro ativo durante toda minha pós-graduação na Esalq. Em especial ao nosso “eterno presidente” **Carlos Eduardo Oltramari (Dudu)**, exemplo de liderança, empreendedorismo e gestão de pessoas que levarei pra vida toda, e aos colegas que fizeram parte do meu mandato, **Mônica, Gian, Nelson, Daiana, Vanessa, Marilis, Layane, Berênice, Daniel**.

*À toda minha família que sempre me mostrou a importância de estudar para buscar um futuro melhor. Principalmente aos meus pais **Orlando Gilberto Gava e Maria Rosa Vattos Gava**, que tanto trabalharam para me manter economicamente na faculdade, me dar suporte para correr atrás desse sonho e me ajudar a manter a calma nos momentos de ansiedade.*

*À minha irmã **Elizabete Gava**, pelo carinho e preocupação que sempre me ajudaram a levantar e seguir em frente.*

*Aos meus tios **Aparecida T. Vattos e Mário J. Vattos**, pela confiança, conselhos e apoio em cada um dos passos que dei até chegar aqui.*

*À **Andressa Morato Freitas**, minha companheira e amiga que tanto me ajudou com bons conselhos nos momentos mais difíceis, que me ajudaram a reencontrar o caminho e manter o foco.*

*À **Elizangelo Passarelli**, pelo apoio e dedicação à família, tendo feito meu papel muitas vezes quando eu estava ausente.*

*Aos meus amigos de Cândido Mota, que mesmo com minha distância estão sempre lá para me receber. Em especial à **Ivan Camolesi e Rogério de Paula Silva** por serem um exemplo de como a vida deve ser encarada com alegria sempre. Desculpem por minha ausência, mas foi por uma boa causa.*

*Aos amigos do futebol na Atlético - AAALQ, pelos momentos de diversão nas manhãs de sábado e nos campeonatos disputados juntos. Jamais esquecerei nossa conquista do campeonato da Esalq de 2012 e de nossa vitória de 4x0 sobre o time do Tiririca. Vida longa ao **Irrigation Soccer Club**!*

*Às secretárias **Davilmar Colevatti, Beatriz Novaes e Ângela Silva** pelo profissionalismo que tanto ajudou nesses quase quatro anos.*

Aos funcionários, Antônio, Gilmar, Hélio, Luiz, Afonso, Agnaldo, Áureo, Chicão, Zé Geraldo, Antonio Pires, Marinaldo e Paulinha que tanto me ajudaram na fase de construção da estufa, dos lisímetros, na automação e nas análises química e física do solo e da água.

A todos meus amigos da Esalq, pela amizade que construímos nesses quase 4 anos e que levarei para sempre. Em especial aos amigos da Casa do Estudante Universitário Professor “José Benedicto de Camargo”- CEU, e aos amigos da República Boi Babão.

A todos meus amigos dos Estados Unidos e de outros países, que pude conhecer, com quem tive o prazer de conviver durante um ano no meu Doutorado Sanduíche.

Enfim, à todos os meus amigos da pós-graduação, pelo carinho, amizade e apoio ao longo de todos esses anos de estudo juntos, os quais são tantos que ficaria difícil citá-los todos aqui. Em especial à, Acácio Perboni, Adriano Diotto, Alessandro Almeida, Ana L. Ferreira, Ana Paula Damasceno, André Herman, Bruno M. de Almeida, Bruno Patias Lena, César A. da Silva, Cícero Renê Jr., Conan A. Salvador, Cornélio Alberto Zolin, Danilton Flumignan, Daniel V. Leal, Daniel S. Alves, Dinara G. Alves, Diego Brandão, Éder Duarte, Eusímio Fraga Jr., Everaldo M. da Silva, Everton Alves, Ezequiel Saretta, Fábio Rocha, Fabrício de Oliveira, Fernando S. Barbosa, Francisco Vilaça, Guilherme B. de Carvalho, Hermes S. da Rocha, Isaac Ponciano, Janaína Paulino, Jefferson V. José, João Tolentino, João P. Francisco, Juliano A. Martins, Jussálvia, Leonardo L. Martins, Lígia Marinho, Livia P. da Silva, Marcos Amaral, Otávio Neto, Pedro Barros, Pedro Giongo, Rafael D.M. Fernandes, Rafael Maschio, Rafaelly Santos, Renato Moreira, Roberto Marano, Robson Mauri, Rodrigo A. Muniz, Rogério Lavanholi, Sérgio Medeiros, Timóteo Barros, Vanessa Grah, Wagner Wolff.

BIOGRAFIA

Ricardo Gava, nasceu em Cândido Mota-SP em 1986. Iniciou os estudos em uma escola rural no bairro da Água da Pinguela, onde sua família tem sítio desde a Imigração Italiana. Em 1996 passou a estudar no Rachid Jabur, em Cândido Mota, onde concluiu o ensino fundamental, indo e voltando todos os dias com o transporte escolar. Em 2001 mudou-se para Assis-SP para fazer o colégio em uma escola pública de melhor qualidade, chamada Clybas Pinto Ferraz.

Ingressou em 2004 no Curso de **Engenharia Agrícola** da **Universidade Estadual de Maringá-UEM**, campus de Cidade Gaúcha-PR. Participou de muitos projetos de pesquisa desde seu primeiro ano de curso. Foi Presidente do Centro Acadêmico de Engenharia Agrícola – CAEAG, e Organizador do XXI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Agrícola - CONEEAGRI no ano de 2007.

Em 2008 realizou estágio no **Instituto Agrônômico do Paraná-IAPAR**, em Londrina, onde, mais tarde, foi convidado por **Rogério Teixeira de Faria** para desenvolver sua pesquisa de mestrado.

Em Janeiro de 2009, recebeu o título de Engenheiro Agrícola e em Março do mesmo ano iniciou seu **Mestrado em Agronomia** também pela Universidade Estadual de Maringá, orientado por **Paulo Sérgio Lourenço de Freitas**. Ainda nesse ano foi premiado como melhor apresentador de trabalho científico no VI Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar em Maringá-PR.

Em Julho de 2010 ingressou no **Doutorado em Irrigação e Drenagem**, pela **Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Esalq-USP**, orientado por **José Antonio Frizzzone**. Foi representante discente na Congregação da Esalq, Presidente da Associação dos Pós-graduandos (APG-Esalq), e representou a Esalq junto à USP nos conselhos Centrais de Pós-graduação (CoPGr) e de Pesquisa (CoP).

Em 2013 realizou **Doutorado Sanduíche** pelo período de um ano na **University of California - UC Davis**, supervisionado pelo professor **Richard L. Snyder**.

“Tua vida o passado escreveu. Tua glória o futuro dirá. Teu presente assinala o apogeu, do grandioso amanhã que virá”.

- Trecho de “Ode à Escalq” –

Prof. Salvador de Toledo Piza Júnior

“Depois de escalar uma grande montanha se descobre que existem muitas outras montanhas para escalar”.

Nelson Mandela

*“Destino não é questão de Sorte,
Destino é questão de Escolha”.*

William Jennings Bryan

SUMÁRIO

RESUMO	15
ABSTRACT	17
LISTA DE FIGURAS	19
LISTA DE TABELAS	21
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	23
LISTA DE SÍMBOLOS	27
1 INTRODUÇÃO.....	29
2 DESENVOLVIMENTO.....	33
2.1 Revisão bibliográfica.....	33
2.1.1 A cultura da Soja	33
2.1.1.1 Folhas	34
2.1.1.2 Caule.....	34
2.1.1.3 Flor	34
2.1.1.4 Raiz.....	34
2.1.1.5 Vagem.....	35
2.1.1.6 Semente	35
2.1.2 Histórico, situação atual e perspectivas futuras.....	36
2.1.3 Exigência Hídrica da Soja	40
2.1.4 O déficit hídrico.....	42
2.1.5 Zoneamento Agrícola	48
2.1.6 Fotoperíodo.....	51
2.2 Material e Métodos	56
2.2.1 Aplicação dos tratamentos.....	57
2.2.1.1 Safra 2011/2012.....	58
2.2.1.2 Safra 2012/2013.....	58
2.2.2 Montagem da área experimental.....	60
2.2.3 Delineamento estatístico.....	62
2.2.4 Manejo da irrigação	63
2.2.4.1 Cálculo da lâmina de irrigação	63
2.2.4.2 Sistema de irrigação.....	67
2.2.4.3 Monitoramento semanal da umidade do solo	69
2.2.5 Variáveis resposta.....	70
2.2.5.1 Altura das plantas	71
2.2.5.2 Altura de inserção do primeiro legume	71
2.2.5.3 Número de plantas	71

2.2.5.4 Número de legumes por planta	72
2.2.5.5 Número de grãos por planta	72
2.2.5.6 Determinação do abortamento de grãos e vagens	73
2.2.5.7 Peso de 100 grãos.....	73
2.2.5.8 Diâmetro médio.....	73
2.2.5.9 Produtividade	74
2.3 Resultados e discussão	75
2.3.1 Safra 2011/2012	75
2.3.2 Safra 2012/2013	84
2.3.3 Variação Climática entre as duas safras.....	92
3 CONCLUSÕES	99
REFERÊNCIAS	101
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	107
APÊNDICES.....	109
ANEXOS	119

RESUMO

Os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja (*Glycine Max*, (L.) Merrill.)

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de Soja e as áreas de plantio se localizam em regiões com os mais diversos regimes pluviais. Esse trabalho estudou os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja, causados pela falta de água e pelo excesso, ocorrendo tanto no ciclo total como individualmente nas fases mais importantes. O experimento foi conduzido no Departamento de Engenharia de Biosistemas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, em Piracicaba - SP, no período de Dezembro de 2011 à Março de 2013, tendo sido realizadas duas safras de soja (Safrá 2011/2012 e Safrá 2012/2013). Foi utilizada a cobertura de uma casa de vegetação, equipada com 48 caixas com controle de drenagem, de 1,1 m de largura por 1,3 m de comprimento e 0,75 m de profundidade. A Evapotranspiração de Referência (ET_o) foi calculada pelo método de Penman Montheith - FAO. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com 4 repetições. Para aplicação dos tratamentos o ciclo da cultura foi dividido em 4 subperíodos: S1(Desenvolvimento Vegetativo); S2 (Floração à Início da Frutificação); S3 (Completa Formação de Vagens à Formação da Produção); S4 (Maturação). Na Safrá 2011/2012, a cultivar utilizada foi a EMBRAPA BRS 316-RR (V1). O plantio foi realizado em 12 Dezembro de 2011 e a colheita em 10 de Abril de 2012. Os tratamentos constaram de 3 lâminas de irrigação: Déficit (50% da ET_c); Excesso (150% da ET_c) e Irrigação Plena (100% da ET_c) variando em 12 diferentes formas de ocorrência: Déficit no ciclo total, Déficit no S1, Déficit no S2, Déficit no S3, Déficit no S4, Excesso no ciclo total, Excesso no S1, Excesso no S2, Excesso no S3, Excesso no S4 e Irrigação Plena (IP). Quando não estavam passando pelo subperíodo de aplicação do tratamento, a parcela era irrigação com irrigação plena. O excesso não foi prejudicial para nenhuma das variáveis analisadas. Já o déficit aplicado na fase de enchimento de grãos resultou em perdas significativas de produtividade. Já na safrá 2012/2013, a cultivar de soja utilizada foi a BMX POTÊNCIA RR (V2). O plantio foi realizado em 06 de novembro de 2012 e a colheita em 08 de março de 2013. Nesse caso os tratamentos constaram de 4 lâminas de irrigação (30, 50, 100 e 150% da ET_c) aplicadas em cada um dos 4 subperíodos da cultura. O déficit de 50% (moderado) foi chamado de D1 e o déficit de 70% (Severo) foi chamado de D2. Assim, os tratamentos com 50% de déficit ocorrendo nos 4 subperíodos e no Ciclo Total (CT) foram: D1S1V2, D1S2V2, D1S3V2, D1S4V2, D1CTV2. Da mesma forma os tratamentos com déficit de 70% foram chamados de: D2S1V2, D2S2V2, D2S3V2, D2S4V2 e D2CTV2. Houve ainda um tratamento com excesso (150% da ET_c) chamado de E1CTV2 e o tratamento testemunha com irrigação plena (IPCTV2). Os resultados mostraram que as lâminas de déficit reduziram a produtividade quando aplicadas no ciclo todo. Porém, quando aplicadas somente em subperíodos, não apresentaram diferenças significativas em relação à irrigação plena.

Palavras-chave: Estresse hídrico; Manejo de irrigação; Déficit de irrigação; Soja

ABSTRACT

The effects of water stress in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill.)

Brazil is the second largest producer of soybean and its plantation areas are located in regions with very different rainfall patterns. Thus, this study aimed to study the effects of water stress in soybean, caused by lack of water and excess, occurring both in the total cycle as individually in the most important stages of the culture. The experiment was conducted in the Biosystems Engineering Department, "Luiz de Queiroz" College of Agriculture - ESALQ / USP, in Piracicaba - SP, in the period of December 2011 to March 2013, two crops of soybeans have been harvested (2011/2012 harvest and 2012/2013 harvest). Covering a greenhouse equipped with 48 boxes with controlled drainage, 1.1 m wide by 1.3 m long and 0.75 m deep was used. The reference evapotranspiration (ET_o) was calculated by Penman Montheith - FAO. The experiment was done in randomized blocks design with 4 replications. For the application of the treatments, the crop cycle was divided into four sub-periods: S1 (All of Vegetative Stage); S2 (Beginning Bloom until Full Pod); S3 (Beginning Seed until Full Seed); S4 (Beginning Maturity until Full Maturity). In 2011/2012 harvest, the cultivar was BRS 316 EMBRAPA – RR (V1). The planting was done on December 12, 2011, and harvested in April 10, 2012. The treatments consisted of three irrigation levels, Deficit (50% ET_c); Excess (150% ET_c) and Full irrigation (100% ET_c) ranging in 12 different forms of occurrence: Deficit in total cycle; Deficit only in S1; Deficit only in S2; Deficit only in S3; Deficit only in S4; Excess in total cycle; Excess only in S1; Excess only in S2, Excess only in S3; Excess only in S4 and Full Irrigation. When they were not passing through the sub period of application of the treatment, the plot was irrigation with full irrigation. Excess was not detrimental to any of the variant. However the deficit applied during grain filling resulted in significant productivity losses. As for the 2012/2013 harvest, the soybean variety used was BMX POTEMCIA RR (V2). The planting was done in November 6, 2012, and the harvest in March, 8, 2013. In this case the treatments consisted of four irrigation levels (30, 50, 100 and 150% of ET_c) applied in each one of the four sub-periods of culture. The deficit of 50% (moderate) was called D1 and the deficit of 70% (Severe) was called D2. Thus, treatments with 50% deficit occurring in 4 subperiods and Full Cycle (CT) were: D1S1V2, D1S2V2, D1S3V2, D1S4V2, D1CTV2. Likewise, the treatments with 70% deficit were called: D2S1V2, D2S2V2, D2S3V2, D2S4V2 and D2CTV2. There was also a treatment with excess (150% ET_c) called E1CTV2 and control treatment with Full irrigation (IPCTV2). The results showed that the water depths of Deficit reduced productivity when applied in full cycle. However, when applied only in subperiods showed no significant differences compared to full irrigation.

Keywords: Water stress, Irrigation management; Deficit irrigation, Soybean

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área de plantio de soja nos EUA	36
Figura 2 – Evolução da produtividade de soja norte americana.....	37
Figura 3 – Área de plantio de soja no Brasil	38
Figura 4 – Evolução da produtividade de soja do Brasil, EUA e mundial.....	40
Figura 5 – Excesso e Déficit Hídrico na Safra Agrícola 2011/2012	48
Figura 6 - Excesso e Déficit Hídrico na Safra Agrícola 2012/2013	49
Figura 7 - Excesso e Déficit Hídrico na Safra Agrícola 2013/2014.....	50
Figura 8 – Grupos de maturação em função da latitude e distribuição de áreas de plantio no Brasil.....	55
Figura 9 – Localização da área experimental	57
Figura 10 - Planta baixa da casa de vegetação	60
Figura 11 - Corte A-B.....	61
Figura 12 - Corte C-D.....	61
Figura 13 - Reacomodação do Solo.....	62
Figura 14 - Estação meteorológica no centro da área experimental.....	63
Figura 15 – Curva de retenção de água no solo.....	66
Figura 16 – Válvulas solenoides individuais	67
Figura 17 – Faixa molhada	68
Figura 18 – Sistema de Bombeamento (A) e automação (B)	68
Figura 19 – Sondas de TDR (A) e leitura semanal de umidade (B).....	69
Figura 20 - Curva de calibração do TDR	70
Figura 21 – Tensiômetro à 0,15m (A) e à 0,05m (B) de profundidade.....	70
Figura 22 – Parâmetros Biométricos	71
Figura 23 – Análise qualitativa para determinação de abortamento de grãos	72
Figura 24 – Colheita da linha do meio e as respectivas bordaduras.....	74
Figura 25 - Gráficos da análise quantitativa e qualitativa da Safra 1 (Continua).....	79
Figura 26 - Gráficos da análise quantitativa e qualitativa da Safra 1 (Conclusão)	80
Figura 27 – Produtividade da Água na Safra 1.....	82
Figura 28 – Função de produção Safra 1 (Variedade 1).....	83
Figura 29 - Gráficos da análise quantitativa e qualitativa da Safra 2 (Continua).....	87
Figura 30 - Gráficos da análise quantitativa e qualitativa da Safra 2 (Conclusão)	88
Figura 31 – Produtividade da Água na Safra 2.....	90

Figura 32 - Função de produção da Safra 2 (Variedade 2)	91
Figura 33 – Temperatura Média e Radiação Acumuladas nos ciclos da V1 e V2.....	93
Figura 34 – Variação da temperatura e radiação para as duas safras.....	93
Figura 35 – ETo acumulada no ciclo das duas variedades comparadas	94
Figura 36 - ETo no ciclo das duas variedades comparadas	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do ciclo da soja em dias em para diferentes regiões do Brasil	33
Tabela 2 - Composição química da semente de soja	35
Tabela 3 – Área de plantio de soja nos EUA nos últimos 6 anos.....	37
Tabela 4 - Área e produção de soja no Brasil (CONAB, 2014)	39
Tabela 5 – Comparação entre a área plantada das principais regiões produtoras do Brasil.....	51
Tabela 6 – Duração do ciclo total em dias, em função do grupo de maturação e macrorregião produtora, associada aos grupos de ciclo utilizados no zoneamento agrícola	56
Tabela 7 – Descrição detalhada dos tratamentos na Safra 1	58
Tabela 8 – Descrição detalhada dos tratamentos na Safra 2.....	59
Tabela 9 - Coeficientes de cultivo e profundidade efetiva do sistema radicular (Pe)	64
Tabela 10 – Análise físico-hídrica do solo	64
Tabela 11 – Dados obtidos em laboratório para a curva de retenção de água no solo	65
Tabela 12 – Parâmetros da equação de Van Genuchten ajustados para o solo utilizado	66
Tabela 13 – Análise de variância da Safra 1	76
Tabela 14 - Lâminas de Irrigação Acumuladas por subperíodo e no ciclo total para Safra 1 ..	82
Tabela 15 – Porcentagem de redução de produtividade em função da ocorrência de déficit hídrico na safra 1	83
Tabela 16 - Resultados da análise de variância Safra 2.....	85
Tabela 17 - Lâminas de Irrigação Acumuladas por tratamento Safra 2	89
Tabela 18 - Porcentagem de redução de produtividade em função da ocorrência de déficit hídrico Safra 2.....	91
Tabela 19 – Duração dos subperíodos e consumo hídrico das duas variedades estudadas	96
Tabela 20 – Duração em dias dos principais subperíodos para soja de ciclo precoce, médio e tardio	96
Tabela 21 – Duração dos estádios fenológicos das cultivares de soja com diferentes ciclos e respectivos coeficientes de cultura (Kc)	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
Abort	Quantidade de grãos que sofreram abortamento
ABOIVE	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
adm	Adimensional
APG	Associação dos pós-graduandos da Esalq
CAD	Capacidade de água disponível
CC	Capacidade de campo
cm	Centímetros
cm ³ cm ⁻³	Centímetro cúbico por centímetro cúbico
cm.c.a	Centímetros de coluna de Água
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CoPGr	Conselho de Pós-graduação da Universidade de São Paulo
CoP	Conselho de Pesquisa da Universidade de São Paulo
CV	Coeficiente de Variação
Cwa	Clima subtropical úmido (classificação de Köppen)
D	Diâmetro dos grãos
DAP	Dias após a semeadura
Dp	Densidade de partículas do solo
Ds	Densidade do solo
Dsr	Densidade relativa do solo
Ec	Eficiência de uso de água pela cultura
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Ep	Espaçamento entre linhas
ESALQ	Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
ETo	Evapotranspiração de referência
ETc	Evapotranspiração da cultura
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FAMASUL	Federação da Agricultura e Pecuária de Mato Grosso do Sul
g cm ⁻³	Grama por centímetro cúbico
IAF	Índice de área foliar
IAPAR	Instituto Agrônomo do Paraná
Kc	Coeficiente de cultivo

Kcs	Coeficientes de Cultivo
Kg	Quilogramas
Kg ha ⁻¹	Quilogramas por hectare
kPa	Kilopascal
kPa °C ⁻¹	Kilopascal por grau celsius
LCO	Bactéria Rhizobial Lipo-Chitooligosaccharides
L h ⁻¹	Litros por hora
LL	Comprimento da linha amostrada
LVd	Latossolo Vermelho textura média
LVef	Latossolo Vermelho textura argilosa
m	Metro
Ma	Massa da amostra
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MJ m ⁻² d ⁻¹	Megajoule por metro quadrado por dia
mL	Mililitros
mm	Milímetros
mm cm ⁻¹	Milímetro por centímetro
mm d ⁻¹	Milímetros por dia
MPa	Megapascal
m s ⁻¹	Metros por segundo
Na	Número total de grãos considerados não abortados
Nc	Número total de cavidades dos legumes, adm.
Ng	Número total de grãos da amostra.
P	Produtividade
PA	Produtividade da Água
Pe	Profundidade efetiva do sistema radicular
PIB	Produto Interno Bruto
PT	Porosidade total do solo
RFA	Radiação solar fotossinteticamente ativa
PMP	Ponto de murcha permatente
R1	Estádio fenológico – Início da Floração
R3	Estádio fenológico – Início da Frutificação
R4	Estádio fenológico - Completa Formação de Vagens
R6	Estádio fenológico - Formação da Produção

R7	Estádio fenológico – Início da Maturação
R8	Estádio fenológico – Maturação Completa
SAS	Statistical Analysis System
TDR	Time-Domain Reflectrometer
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
UEM	Universidade Estadual de Maringá
USP	Universidade de São Paulo
V _g	Volume de grãos
V _i	Volume inicial de água da proveta
V _f	Volume final lido na proveta após inserir os grãos da amostra
V _g	Volume de grãos
VE	Estádio fenológico - Emergência
V2	Estádio fenológico – 2º nó, primeiro trifólio aberto
V12	Estádio fenológico – 12º nó (Final da fase vegetativa para ciclos determinados)

LISTA DE SÍMBOLOS

R_n	Saldo de radiação à superfície
G	Fluxo de calor sensível no solo
T	Temperatura média do ar
U_2	Velocidade do vento
E_s	Pressão de saturação de vapor
E_a	Pressão atual de vapor
Δ	Declividade da curva de pressão de saturação
γ	Constante psicrométrica
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
*	Significativo a 0,05% de probabilidade pelo teste F
**	Significativo a 0,01% de probabilidade pelo teste F
ns	Não significativo
Ψ_m	Potencial Mátrico do Solo
Θ	Umidade com base em volume

1 INTRODUÇÃO

Há muitos anos o agronegócio vem sustentando a economia brasileira, representando cerca de um terço do Produto Interno Bruto (PIB) e dando grande contribuição às exportações.

Segundo o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), no ano de 2006 somente a soja gerou 9,3 bilhões de dólares, equivalendo à 6,77% da participação nas exportações brasileiras, e, em 2009 chegou a 11% nessa participação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS - ABOIVE, 2012).

A produção mundial de soja na safra 2013/2014, segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), foi de 236,03 milhões de toneladas, com uma área plantada de 96,3 milhões de hectares. Os EUA se mantêm como maior produtor mundial do grão com 89,5 milhões de toneladas, seguido do Brasil com 85,4 milhões de toneladas.

O Brasil somente não ultrapassou a produção dos EUA na safra 2013/2014, devido à seca que ocorreu na maioria dos estados produtores, inclusive no Estado do Mato Grosso que é maior estado produtor, com uma área plantada de 8,5 milhões de hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2014).

A Soja pode sofrer tanto com a falta de chuvas como com o excesso destas. Isso porque ela é cultivada nas mais diversas regiões, com os mais diversos regimes pluviais. O excesso de chuvas prejudica a aeração do solo, favorece o ataque de pragas, diminui a incidência de radiação devido aos dias nublados e ainda pode dificultar a colheita. Porém, mesmo em regiões com boa incidência de chuvas na época de cultivo da soja, podem ocorrer déficits hídricos em fases específicas que comprometem a produção. No caso da Soja, um curto período de déficit hídrico de 15 dias, já pode comprometer a produção, dependendo da fase em que a cultura está. Sendo assim, a irrigação pode ser importante até mesmo em regiões consideradas chuvosas, podendo salvar a produção da soja em situações de pequeno ou grande período de estiagem dentro do ciclo de cultivo.

A área agrícola mundial que hoje é de 1,4 bilhão de hectares, segundo estudo da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), é representada por apenas 12% de áreas irrigadas. Sendo essa pequena área, responsável pela produção de cerca de 40% de todo alimento do mundo. A área irrigada do Brasil é de apenas 7,4% de nossa área agrícola total, ficando bem abaixo da média mundial (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2006).

Com a crescente demanda mundial por alimentos e o potencial de expansão das áreas agrícolas chegando ao fim, é necessário o investimento em tecnologias que contribuam para o

“aumento vertical” da agricultura, ou seja, o aumento da produtividade das áreas agrícolas já existentes.

Segundo dados divulgados pela FAO (2010), o Brasil utiliza 63% de seus recursos hídricos em irrigação, 18% para uso humano, 14% para uso animal e 5% para uso industrial. O crescimento populacional, que até 2025 deverá ser maior que nove bilhões de pessoas, vai exigir um aumento em 50% na produção de alimentos, sendo a maior parte produzida em área irrigada. A FAO prevê que a irrigação nos países em desenvolvimento deverá crescer em até 20% até o ano 2030 e que a utilização de sistemas mais eficientes de produção, que conservem a umidade dos solos e melhorem a infiltração da água, devem ser promovidos pelos governos.

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de Soja e tem potencial para aumentar suas áreas irrigadas, o que consequentemente aumenta a produção. No entanto, possui pequena área de soja irrigada. Os números da Agência Nacional de Águas (ANA), responsável pela outorga do uso da água de rios interestaduais, registram uma expansão. De acordo com o levantamento, realizado em 2010, 5,4 milhões de hectares são irrigados no país. Desse total, 2,6 milhões de hectares são usados na produção de grãos (50% das lavouras), principalmente arroz (1,13 milhão), soja (624 mil), milho (559 mil), feijão (315 mil) e trigo (58 mil). Isso mostra que nas culturas plantadas em grande escala, as áreas irrigadas são pequenas, sendo para a soja 11,6% e para o milho, 10,4%. Nessas áreas, no entanto, a produtividade ultrapassa em até 50% as médias regionais. Produtores de soja irrigada alcançam até 80 sacas de soja por hectare contra uma média de 50 sacas por hectare em áreas não irrigadas (FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DE MATO GROSSO DO SUL - FAMASUL, 2013).

A soja não é importante apenas na produção de óleo refinado. Ela produz também a lecitina, que é um agente emulsificante capaz de fazer a ligação entre a fase aquosa e oleosa dos produtos, muito usada na fabricação de salsichas, maioneses, achocolatados, entre outros produtos. Na alimentação humana, a soja entra na composição de vários produtos embutidos, chocolates, temperos para saladas, entre outros produtos. A proteína de soja é a base de ingredientes de padaria, massas, produtos de carne, cereais, misturas preparadas, bebidas, alimentação para bebês e alimentos dietéticos. Recentemente, a soja vem crescendo também como fonte alternativa de combustível. O biodiesel de soja já vem sendo testado por diversas instituições de pesquisa.

Os estudos sobre manejo de déficit hídrico na irrigação, podem reduzir a utilização de água e energia elétrica pelos sistemas, sem prejudicar a produtividade. Algumas culturas suportam déficits moderados a severos em determinadas fases fenológicas sem sofrerem estresse, ou terem quedas de produtividade consideráveis.

O objetivo deste trabalho foi estudar os efeitos do estresse hídrico na cultura da soja, causados tanto por déficit como por excesso, ocorrendo no ciclo total ou individualmente nas principais fases fenológicas da cultura.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 A cultura da Soja

A soja cultivada comercialmente hoje (*Glycine max* (L) Merrill) é uma planta herbácea, com mecanismo de fixação de carbono do tipo C3, incluída na classe Dicotyledoneae, ordem Rosales, família Leguminosae, subfamília das Papilionoideae, gênero *Glycine* L. É uma planta com grande variabilidade genética, tanto no ciclo vegetativo (período compreendido da emergência da plântula até a abertura das primeiras flores), como no reprodutivo (período do início da floração até o fim do ciclo da cultura), sendo também influenciada pelo meio ambiente (GOMES, 1990; BORÉM, 2005).

É considerada uma *Commodity* por ser plantada em larga escala e ter seus preços controlados pelo mercado mundial e portanto, comercializada em Dólares.

Há grande diversidade de ciclo. De modo geral, os cultivares brasileiros têm ciclos entre 100 e 160 dias, e podem ser classificados em grupos de maturação precoce, semiprecoce, médio, semitardio e tardio, dependendo da região. A Tabela 1 trata-se da classificação do ciclo em dias para diferentes regiões produtoras do Brasil em diferentes latitudes.

Tabela 1 – Classificação do ciclo da soja em dias em para diferentes regiões do Brasil

Ciclo	Estado		
	Paraná	Minas Gerais	Maranhão
	Lat. 25°S	Lat. 18°S	Lat. 5°S
Precoce	Até 115 dias	Até 100 dias	Até 110 dias
Semiprecoce	116 a 125 dias	101 a 110 dias	-
Médio	126 a 137 dias	111 a 125 dias	111 a 125 dias
Semitardio	138 a 150 dias	126 a 145 dias	-
Tardio	Mais de 150 dias	Mais de 145 dias	Mais de 125 dias

Fonte: EMBRAPA (2011)

A altura da planta depende da interação da região (condições ambientais) e do cultivar (genótipo). Os cultivares plantados comercialmente no país oscilam de 60 até 120 dias. Como acontece com outras leguminosas, por exemplo o feijão-comum, a soja pode apresentar três

tipos de crescimento, diretamente correlacionados com o porte da planta: indeterminado, semideterminado e determinado. A planta de soja é fortemente influenciada pelo comprimento do dia (período de iluminação). Em regiões ou épocas de fotoperíodo mais curto, durante a fase vegetativa da planta, ela tende a induzir o florescimento precoce, e apresentar consecutiva queda de produção (GOMES, 1990; BORÉM, 2005).

2.1.1.1 Folhas

Durante todo o ciclo da planta são distinguidos quatro tipos de folha: cotiledonares, folhas primárias ou simples, folhas trifolioladas ou compostas e prófilos simples. Sua cor, na maioria dos cultivares, é verde pálida e, em outras, verde escura (GOMES, 1990; BORÉM, 2005).

2.1.1.2 Caule

O caule é ramoso, híspido, com tamanho que varia entre 80 e 150 cm, dependendo da variedade e do tempo de exposição diário à luz. Sua terminação apresenta racemo, em variedades de crescimento determinado, ou sem racemo terminal, em variedades de crescimento indeterminado (GOMES, 1990; BORÉM, 2005).

2.1.1.3 Flor

A soja é essencialmente uma espécie autógama, ou seja, uma planta polinizada por ela mesma e não por outras plantas, mesmo que vizinhas a ela, com flores perfeitas e órgãos masculinos e femininos protegidos dentro da corola. Insetos, principalmente abelhas, podem transportar o pólen e realizar a polinização de flores de diferentes plantas, mas a taxa de fecundação cruzada, em geral, é menor que 1 %. As flores de soja podem apresentar coloração branca, púrpura diluída ou roxa, de 3 até 8mm de diâmetro. O início da floração dá-se quando a planta apresenta de 10 até 12 folhas trifolioladas, onde os botões axilares mostram racemos com 2 até 35 flores cada um (GOMES, 1990; BORÉM, 2005).

2.1.1.4 Raiz

O sistema radicular da soja é constituído de um eixo principal e grande número de raízes secundárias, sendo classificado com um sistema difuso. O comprimento das raízes pode chegar

a até 1,80 m. A maior parte delas encontra-se a 15 cm de profundidade (GOMES, 1990; BORÉM, 2005).

2.1.1.5 Vagem

O legume da soja é levemente arqueado, peludo, formado por duas valvas de um carpelo simples, medindo de 2 até 7cm, onde aloja de 1 até 5 sementes. A cor da vagem da soja varia entre amarela-palha, cinza e preta, dependendo do estágio de desenvolvimento da planta (GOMES, 1990; BORÉM, 2005).

2.1.1.6 Semente

As sementes de soja são lisas, ovais, globosas ou elípticas. Podem também ser encontradas nas cores amarela, preta ou verde. O hilo é geralmente marrom, preto ou cinza (GOMES, 1990; BORÉM, 2005). A composição química da semente de soja é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química da semente de soja

Componente	Percentuais
Água	9,5 %
Caseína Solúvel	30 %
Caseína Insolúvel	7,5 %
Albumina	0,5 %
Óleo	18,5 %
Lecitina	1,5 %
Colasterina, Resina e Cera	0,5 %
Dextrina	10 %
Amido	4 %
Celulose	6 %
Cinzas	5 %

Fonte: Gomes (1990)

2.1.2 Histórico, situação atual e perspectivas futuras

O cultivo iniciou-se no norte da China, a partir do cruzamento de duas espécies de soja selvagem, as quais foram melhoradas e domesticadas, chegando ao ocidente apenas a partir do século XX e em 1940 os EUA obtiveram o auge da área com cultivo de soja para finalidade forrageira, a qual foi ultrapassada posteriormente pela área com finalidade de produção de grãos (DALL'AGNOL et al., 2007).

Com o intenso trabalho da pesquisa, hoje existem cultivares adaptadas para uma ampla gama de regiões. A Figura 1 mostra as regiões produtoras de soja nos EUA, maior produtor mundial do grão.

Figura 1 – Área de plantio de soja nos EUA

Fonte: USDA (2012)

Na Tabela 3 está apresentado os valores de área de plantio de soja nos EUA nos últimos anos. É possível perceber que em 2011 e 2013 a área de soja teve uma ligeira queda, devido a utilização de áreas de soja para plantio de milho (USDA, 2014). Os dados foram adaptados fazendo a conversão para Hectares, considerando 1 Acre igual à 0,40469 Hectares.

Tabela 3 – Área de plantio de soja nos EUA nos últimos 6 anos

2009	2010	2011	2012	2013	2014
Em mil Acres					
77451,0	77404,0	75046,0	77198,0	76533,0	81493,0
Em mil Hectares					
31343,3	31324,3	30370,0	31240,9	30971,8	32979,1

Na Figura 2 pode-se observar a evolução da produtividade de soja norte americana. Vale lembrar que o *Bushel* de soja equivale à 27,2155 kg. Então fazendo-se as devidas conversões vemos que a produtividade saiu de cerca de 30 bushels/acre (2017,5 kg.ha⁻¹) em 1983, chegando a cerca de 43 bushels/acre (2891,8 kg.ha⁻¹) em 2013.

Figura 2 – Evolução da produtividade de soja norte americana
Fonte: USDA (2014)

No Brasil, o cultivo iniciou-se na Bahia, passando pelo Estado de São Paulo mas encontrando melhor adaptação no Rio Grande do Sul, principalmente pelo fato de que as cultivares utilizadas, oriundas dos EUA, eram adaptadas às condições de alta latitude, semelhantes às desse estado.

Hoje o Brasil vem se aproximando muito da produção norte americana, com potencial para se tornar o maior produtor mundial. Segundo dados da CONAB, a safra brasileira só não ultrapassou a norte americana no ano de 2014 devido a ocorrência de seca em quase todas as regiões produtoras. O clima do Brasil favorece o plantio em várias regiões do país como é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Área de plantio de soja no Brasil
Fonte: CONAB/IBGE

Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a produção mundial de soja na safra 2013/2014 foi de 236,03 milhões de toneladas, com uma área plantada de 96,3 milhões de hectares. Os EUA se mantêm como maior produtor mundial do grão com 89,5 milhões de toneladas, seguido do Brasil com 85,4 milhões de toneladas. No Brasil o maior produtor é o Estado do Mato Grosso, com uma área plantada de 8,5 milhões de hectares, seguido do Paraná com 5 milhões de ha (CONAB, 2014).

Na Tabela 4 são apresentados os valores de área plantada e produção das últimas safras, bem como o percentual que representa cada estado produtor.

Tabela 4 - Área e produção de soja no Brasil (CONAB, 2014)

REGIÃO/UF	ÁREA				PRODUÇÃO			
	Safr 12/13		Safr 13/14		Safr 12/13		Safr 13/14	
	(Em mil ha)	(%)	(Em mil ha)	(%)	(Em mil ton.)	(%)	(Em mil ton.)	(%)
NORTE	901,5	3,25	1058,0	3,55	2661,5	3,27	3249,9	3,80
RR	12,0	0,04	12,0	0,04	33,6	0,04	33,6	0,04
RO	167,7	0,60	192,1	0,64	539,3	0,66	610,3	0,71
PA	172,2	0,62	197,7	0,66	552,2	0,68	605,2	0,71
TO	549,6	1,98	656,2	2,20	1536,4	1,89	2000,8	2,34
NORDESTE	2414,3	8,70	2494,2	8,37	5294,8	6,50	7041,1	8,24
MA	586,0	2,11	589,5	1,98	1685,9	2,07	1756,7	2,06
PI	546,4	1,97	630,5	2,12	916,9	1,13	1742,1	2,04
BA	1281,9	4,62	1274,2	4,28	2692,0	3,30	3542,3	4,15
CENTRO-OESTE	12778,2	46,07	13811,9	46,35	38091,4	46,74	41286,1	48,32
MT	7818,2	28,19	8529,7	28,63	23532,8	28,87	26356,8	30,85
MS	2017,0	7,27	2120,0	7,11	5809,0	7,13	6042,0	7,07
GO	2888,0	10,41	3090,2	10,37	8562,9	10,51	8649,5	10,12
DF	55,0	0,20	72,0	0,24	186,7	0,23	237,8	0,28
SUDESTE	1758,2	6,34	1993,7	6,69	5425,9	6,66	5204,2	6,09
MG	1121,2	4,04	1259,2	4,23	3374,8	4,14	3309,2	3,87
SP	637,0	2,30	734,5	2,46	2051,1	2,52	1895,0	2,22
SUL	9883,9	35,64	10439,8	35,04	30025,8	36,84	28661,2	33,54
PR	4752,8	17,14	5010,6	16,82	15912,4	19,52	14681,1	17,18
SC	512,5	1,85	542,7	1,82	1578,5	1,94	1666,1	1,95
RS	4618,6	16,65	4886,5	16,40	12534,9	15,38	12314,0	14,41
TOTAL	27736,1	100	29797,6	100	81499,4	100	85442,5	100

Segundo dados divulgados pela FAO (2010), o Brasil usa 63% de seus recursos em irrigação, 18% para uso humano, 14% para uso animal e 5% para uso industrial. O crescimento populacional, que até 2025 deverá ser de mais nove bilhões de pessoas, vai exigir, um aumento em 50% na produção de alimentos, sendo a maior parte produzida em área irrigada. A FAO prevê que a irrigação nos países em desenvolvimento deverá crescer em até 20% até o ano 2030 e que a utilização de sistemas mais eficientes de produção, que conservem a umidade dos solos e melhorem a infiltração da água, devem ser promovidos pelos governos.

2.1.3 Exigência Hídrica da Soja

A soja atinge a máxima exigência hídrica na floração e enchimento dos grãos (7 a 8 mm.dia⁻¹). O estresse hídrico neste período pode ocasionar problemas fisiológicos graves que ocasionam queda prematura de folhas e consequente redução de produtividade. A necessidade de água durante todo o ciclo para um rendimento máximo varia de 450 a 800 mm dependendo, principalmente do clima, manejo da cultura e da variedade empregada.

No manejo da irrigação via solo é importante conhecer a profundidade do sistema radicular para definir a camada de solo a ser considerada. No caso da soja, as raízes funcionais chegam a profundidades que variam de 10 a 15 cm (HERNANDEZ, 2002).

O Brasil e os EUA juntos produzem cerca de 75% da soja mundial, o que mostra que condições adversas de clima nesses países podem afetar significativamente as cotações mundiais para esta *commodity* como ocorrido no ano de 2012, já que se observaram perdas na produtividade desses países devido a ocorrência de déficit hídrico fazendo com que a soja atingisse preços recordes (CONAB, 2012).

Na Figura 4 é possível observar a evolução da produtividade de soja no mundo, destacando o Brasil e os EUA. O aumento na produtividade é devido a melhoria dos materiais genéticos, através de avanço das pesquisas e melhoria nas técnicas de manejo.

Figura 4 – Evolução da produtividade de soja do Brasil, EUA e mundial

Fonte: FAO (2011)

É importante observar a queda de produtividade ocorrida no ano de 2005, tendo sido o ano de menor produtividade depois do ano 2000, que foi reflexo do fenômeno Lã Ninha, que foi responsável por uma redução drástica na produção de soja dos estados do sul. Assim, é cada vez mais importante a busca de alternativas para que os efeitos das condições climáticas na produtividade das culturas sejam minimizadas.

A irrigação permite que a soja seja cultivada também na safrinha, como é feito em áreas com pivô central de muitos estados, seja para produção de sementes ou como rotação de culturas. Porém, esta prática está sendo proibida pelos governos devido à ferrugem asiática. É o chamado vazio sanitário, período de 90 dias sem o cultivo de soja durante a entressafra, implantado em 2006, em Mato Grosso e em Goiás. A partir de 2010, foi estendido para Mato Grosso do Sul, Tocantins, São Paulo, Minas Gerais e Maranhão, seguindo instruções normativas estaduais. Segundo os pesquisadores da Embrapa Soja, o vazio sanitário é uma estratégia de manejo que visa reduzir o inóculo do fungo *Phakopsora pachyrhizi* nos primeiros plantios. Desta forma, é possível diminuir a possibilidade de incidência da doença no período vegetativo e, conseqüentemente, reduzir o número de aplicações de fungicida para controle (EMBRAPA SOJA, 2011).

Uma das vantagens de áreas irrigadas é não haver competição entre as plantas pelo suprimento de água. Com isso, Kuss (2006) pesquisando sobre populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja, relatou que o aumento da população de plantas aumenta o rendimento de grãos tanto para plantas irrigadas todo ciclo como para plantas não irrigadas. Para as plantas irrigadas somente nos períodos críticos, o rendimento de grãos não diferiu entre as populações testadas. Desta forma ele considera que o aumento da população de plantas pode ser uma alternativa para reduzir as perdas de rendimento por estresse hídrico da soja semeada após a época recomendada.

Kuss et al. (2008), objetivando verificar o efeito do manejo da irrigação e da população de plantas sobre o rendimento de grãos em soja semeada após a época recomenda, não encontraram diferenças significativas de rendimento entre os tratamentos não irrigado (2627 kg.ha^{-1}), irrigado somente em fases críticas (2814 kg.ha^{-1}) e irrigação plena (3307 kg.ha^{-1}).

Pesquisando o tamanho ótimo de parcela e número de repetições em soja, Martin et al. (2005) com objetivo de verificar se diferentes cultivares de soja alteraram a estimativa do tamanho ótimo de parcela e do número de repetições. Eles definiram que para as condições de campo estudadas, o número de repetições que confere uma precisão adequada é igual a sete e o tamanho ótimo de parcela é de $3,96\text{m}^2$. Porém, estas mesmas condições não se aplicam à ambientes protegidos.

2.1.4 O déficit hídrico

A utilização da irrigação é uma das práticas mais eficazes na melhoria da produtividade e da qualidade dos produtos agrícolas.

A ocorrência de déficit hídrico em áreas não irrigadas, é uma das principais causas de perdas agrícolas na região do Mato Grosso do Sul, pois na safra de verão ocorrem, com frequência, veranicos e estiagens, devido à grande demanda evapotranspirativa e pela distribuição irregular das chuvas (FIETZ; URCHEI, 2002).

No sistema produtivo de sequeiro, a ocorrência de déficit hídrico é mais uma regra do que exceção, por isso estratégias de manejo que visem diminuir os riscos climáticos são fundamentais para manter a produtividade em níveis satisfatórios (NOGUEIRA; NAGAI, 1988).

O déficit hídrico causa perda de produtividade em qualquer fase da cultura em que ele ocorra (NOGUEIRA; NAGAI, 1988). Para um menor peso de grãos, esse componente de rendimento é mais afetado quando o déficit ocorre na fase de enchimento de grãos (NEUMAIER et al., 2000). Esses autores destacam ainda que, a soja pode apresentar efeito compensatório quando há redução no número de legumes por planta, dependendo do potencial genético da cultivar, quando se tem condições climáticas favoráveis nas fase posteriores.

Os dois períodos mais sensíveis da soja à falta de água no solo são germinação e enchimento de grãos porque envolvem diretamente a formação dos componentes do rendimento (CASAGRANDE, 2001; EMBRAPA, 2002).

A necessidade de se produzir com qualidade e em maior quantidade e a diminuição dos impactos ambientais negativos sobre o recurso natural 'água' exigem, da comunidade científica, novos conhecimentos sobre as reais necessidades hídricas das culturas (REIS et al., 2007; MORAIS et al., 2008; SANTANA et al., 2009).

A utilização de estratégias de irrigação como o déficit hídrico controlado, pode reduzir a utilização de água e energia elétrica sem prejudicar a produtividade. Como mostram Mundstock e Thomas (2005), a deficiência hídrica no início do ciclo da soja, causa forte redução na emissão de novos ramos reduzindo de forma potencial o número de nós que iriam produzir legumes, porém a planta pode se recuperar parcialmente caso haja melhor disponibilidade de água após o florescimento, pois, pode emitir e fixar maior número de flores nos nós para produzir legumes, mas sofre falta de novas folhas para sustentar o enchimento de grãos. Com boa disponibilidade de água no período vegetativo, mas com falta no florescimento e início da formação dos legumes caracteriza-se uma situação dramática para a lavoura, sendo esse o período mais

sensível da planta ao déficit, pois os efeitos se darão sobre o abortamento de flores, óvulos e legumes e, posteriormente, sobre o tamanho dos grãos.

A soja pode ser considerada uma cultura tolerante à deficiência hídrica, por possuir período de florescimento longo, permitindo que escape de secas de curta duração, compensando a perda de flores ou legumes com o aparecimento de flores tardias por ocasião de condições mais adequadas de umidade no solo (MOTA, 1983). No entanto, a deficiência hídrica submete a planta de soja a estresse que se manifesta na forma de baixa estatura, folhas pequenas e murchas, entrenós curtos, redução na taxa de crescimento da cultura, menor índice de área foliar, menor taxa de expansão foliar, atividade fotossintética menos intensa, prejuízos à fixação de nitrogênio e, por influir no metabolismo geral da planta, acaba afetando negativamente o rendimento de grãos (CONFALONE et al., 1998; DESCLAUX et al., 2000; NEUMAIER et al., 2000).

Secas durante o período reprodutivo (pós-florescimento) causam reduções drásticas no rendimento de grãos, devido ao maior abortamento de flores e de legumes, menor período de florescimento, menor número de grãos por legume, menor período de enchimento de grãos, diminuição da qualidade de grãos e aceleração da senescência foliar. Estas perdas, em algumas ocasiões, acabam não sendo compensadas pelo número de grãos por legume e pelo peso do grão, pois esses componentes do rendimento possuem limites máximos determinados geneticamente (SIONIT; KRAMER, 1977; DE SOUZA et al., 1997; CONFALONE; DUJMOVICH, 1999; DESCLAUX et al., 2000; NEUMAIER et al., 2000).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja e tem potencial para aumentar sua produção e suas áreas. Porém, com a prática da irrigação é possível aumentar a produção sem necessidade de aumentar as áreas de plantio. Isso pode contribuir inclusive para frear desmatamentos, como é o caso da Floresta Amazônica, onde as principais causas de desmatamento são a abertura de novas áreas de produção de soja.

A irrigação permite que a soja seja cultivada também na safrinha, como é feito em áreas com pivô central de muitos estados, tanto para produção de sementes como rotação de culturas. Porém, esta prática está sendo proibida pelos governos devido à ferrugem asiática. É o chamado vazio sanitário, período de 90 dias sem o cultivo de soja durante a entressafra, implantado em 2006, em Mato Grosso e em Goiás. A partir de 2010, foi estendido para Mato Grosso do Sul, Tocantins, São Paulo, Minas Gerais e Maranhão, seguindo instruções normativas estaduais. Segundo os pesquisadores da Embrapa Soja, o vazio sanitário é uma estratégia de manejo que visa reduzir o inóculo do fungo *Phakopsora pachyrhizi* nos primeiros plantios. Desta forma, é possível diminuir a possibilidade de incidência da doença no período vegetativo e

consequentemente, reduzir o número de aplicações de fungicida para controle (EMBRAPA SOJA, 2011).

Estudando o déficit de irrigação como estratégia de manejo da água em feijoeiro, Saad (1996) definiu que o déficit pode aumentar a receita líquida do produtor desde que não seja aplicado nos estádios fenológicos da floração e enchimento de grãos. O custo do déficit de irrigação depende do estágio fenológico, do preço do produto e do custo da água e foi maior para os estádios fenológicos relacionados ao período reprodutivo e de formação da produção do feijoeiro.

Fietz e Urchei (2002), ao estudar a deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados, MS, constataram que de maneira geral, a soja semeada em novembro apresentou maior deficiência hídrica que a semeada em dezembro. Na semeadura em novembro, os maiores déficits hídricos na soja ocorreram no estágio do segundo nó ao início do florescimento, enquanto na semeadura de dezembro as maiores deficiências de água ocorreram no início do florescimento ao início do enchimento de grãos. Houve deficiência hídrica em todos os subperíodos da cultura da soja, em todas as safras e em ambas as épocas de semeadura. Segundo eles, a ocorrência de déficit hídrico é uma das principais causas de perdas agrícolas na região, pois na safra de verão ocorrem, com frequência, veranicos e estiagens, devido à grande demanda evapotranspirativa e pela distribuição irregular das chuvas.

Se por um lado a falta de água traz prejuízos à cultura, o excesso também é prejudicial. Segundo Doorenbos e Kassam (1994) o teor de água no solo, durante a germinação, não deve exceder 85% nem ficar abaixo de 50% da água disponível. Segundo os autores, esse seria o nível de esgotamento permissível para o manejo da irrigação em condições médias de evapotranspiração (5 a 6 mm d⁻¹).

Trabalhando com a distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos, Bergamaschi et al. (2004) concluíram que irrigações durante o período que vai do pendoamento ao início de enchimento de grãos permitem elevada produtividade de grãos de milho, mesmo que a umidade do solo seja mantida abaixo da capacidade de campo.

Estudando práticas de manejo de irrigação para produção de sementes de feijão, maximizando a eficiência do uso da água no sul de Alberta, Canadá, Efetha, Harms e Bandara (2011) concluíram que o maior rendimento de sementes de feijão foi alcançado com os tratamentos irrigados com mais frequência. O uso de alta frequência de aplicações com pequenos volumes de água (lâminas menores que 25 mm), mantendo a água disponível no solo acima de 60% em uma camada da zona radicular de 0,60 m, garante que a água estará disponível para as raízes de feijão em todas as fases de crescimento. A irrigação deve ser feita de modo a

manter o solo acima de 60% da água disponível em uma zona radicular de 0,30 m durante as fases de crescimento inicial e numa zona radicular de 0,60 m durante as fases de crescimento mais tardias.

Atti et al. (2005) pesquisando a resposta da soja sob déficit hídrico crônico com aplicação de Bactéria Rhizobial Lipo-Chitooligosaccharides (LCO) no florescimento e enchimento das vagens, constataram que, o tratamento com LCO constitui uma tecnologia potencial para reduzir os efeitos de déficit hídrico. Isto abre a possibilidade de aproveitamento destas moléculas de sinal para melhorar a produção agrícola em condições de escassez de água e em última análise, aumentar a produção mundial de alimentos. O déficit hídrico do solo afetou negativamente o crescimento e a produtividade da soja em ambos os níveis de estresse hídrico testados W1 e W2 (25 e 50%, de reposição da Etc, respectivamente), em comparação com o W3 controle (100% da Etc). No entanto, LCO alterou a fisiologia geral da planta. Isso mostra que LCO tende a aumentar a capacidade de fotossíntese da cultura e produção de biomassa, indicando que influenciou positivamente na saúde da cultura da soja sob estresse hídrico. Para os tratamentos W3, LCO afetou o número de folhas, mas não afetou outras variáveis vegetativas, tais como o teor de clorofila. Teve influência positiva sobre os números de flores e vagens. No entanto, não teve efeito sob os tratamentos, W3 e W1. Os dados indicam que o tratamento de LCO que mais influenciou no padrão de crescimento da soja foi no médio nível de estresse W2 (50%, de reposição da ETc).

Figueiredo et al. (2008) estudando uma lâmina ótima de irrigação para o feijoeiro, com restrição de água, em função do nível de aversão ao risco do produtor, propuseram um método para determinar a quantidade ótima de irrigação, considerando diferentes combinações entre receita líquida esperada para a cultura do feijoeiro e nível de risco, obtendo uma relação entre a receita líquida esperada, associada a um certo grau de risco econômico, e as lâminas de irrigação, quando o único fator limitante à produção é a disponibilidade hídrica. Segundo os autores na condição de água restrita a lâmina ótima de irrigação depende do preço do produto e dos custos fixos e a estratégia de irrigação é maximizar a receita líquida por unidade de volume de água aplicada, o que não corresponde à maximização da receita líquida por unidade de área. Analisando estas estratégias verificaram que quanto maior o preço do produto, maior é o déficit econômico de água em relação à irrigação plena. É importante também observar que a redução no uso de água proporciona o cultivo de uma quantidade adicional de terra, com um aumento na produção total. A incerteza adiciona uma nova dimensão ao problema de otimização. Devido aos efeitos imprevisíveis do clima, às doenças, aos solos e a vários outros fatores, a

produtividade da cultura em função da quantidade de irrigação é incerta, conforme se pode observar pelas funções de produção água-cultura obtidas em cada ano de experimentação.

O clima como um suporte físico para o desenvolvimento biológico da agricultura, sobretudo a atuação do processo de precipitação pluviométrica sobre os valores de produtividade agrícola dos cultivos de soja, milho e trigo no município de Apucarana-PR, oferece, através dos dados demonstrados que as chuvas, ora criando excedentes hídricos, ora tornando os solos deficientes em água, influem diretamente sobre a dinâmica do rendimento anual das safras agrícolas, inclusive podendo representar uma perda de 47% em relação à produtividade média da soja, 59% do milho e 50% do trigo. No contexto da série histórica dos dados interpretados (1968 a 2002), devemos considerar que para o produto agrícola soja as relações mais diretas e confiáveis realizadas referem-se a momentos de deficiência hídrica ocorridos durante o desenvolvimento da planta ou momentos de excedentes hídricos nos estágios de colheita do produto (MANOSSO, 2005).

Ao estudar a captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas, Santos et al. (2003) definiram que a soja apresentou a maior taxa de produção de biomassa seca total ao longo do seu ciclo e também o maior índice de área foliar evidenciando sua maior capacidade em captar luz e em sombrear plantas competidoras. O feijão, sobretudo após o florescimento, foi a planta mais eficaz em drenar seus fotoassimilados para a formação de folhas. A soja apresentou maior eficiência em converter a radiação interceptada em biomassa.

Trabalhando com o crescimento e produtividade de soja em diferentes épocas de semeadura no oeste da Bahia, Cruz, Peixoto e Martins (2010) determinaram que o desempenho vegetativo e produtivo dos cultivares de soja são influenciados pela época de semeadura. O atraso na época de semeadura promove redução no ciclo de maturação dos cultivares de soja. Ecofisiologicamente, as semeaduras tardias (28/12/2006) e (12/01/2007) não são favoráveis à obtenção de produtividades superiores para a soja no Oeste da Bahia.

Procópio et al. (2003) pesquisando o desenvolvimento foliar das culturas da soja e do feijão e de plantas daninhas observaram que a taxa de emissão foliar da soja foi, em média, 0,933 folíolos por dia durante todo o ciclo. Para o feijão, essa taxa foi de 0,591.

Ao pesquisar a influência do “déficit” hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja, Confalone e Navaro (1999) concluíram que deficiência hídrica provoca a diminuição do índice de área foliar (IAF) dos tratamentos sem irrigação, com relação ao irrigado, o que afetou a captura de radiação em condições de deficiências hídricas. Quando é exposta a estresse hídrico leve, a soja tende a maximizar a eficiência de utilização da radiação e a diminuir a eficiência de

interceptação da radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA). O déficit hídrico severo reduz a eficiência de utilização da radiação. O "déficit" hídrico produz um efeito diferencial sobre o crescimento e produção de biomassa na cultura da soja, segundo o momento e a severidade do estresse.

Trabalhando com o efeito de épocas de deficiência hídrica na evapotranspiração atual da cultura do feijão cv. Imbabello, os pesquisadores Calvache, Reichardt e Bacchi (1998) concluíram que o método do balanço de massas permite calcular a evapotranspiração atual em diferentes regimes de irrigação da cultura com boa precisão. A drenagem profunda constitui apenas 2% das perdas totais de água, evidenciando um bom manejo da irrigação. A deficiência de água no solo, durante a fase de enchimento da vagem, afeta a produtividade do feijoeiro, sendo que a eficiência de uso de água pela cultura ($E_c = 0,46 \text{ kg/m}^3$) foi a mais baixa. A deficiência de irrigação no estágio vegetativo não reduziu a produtividade, permitindo uma economia de água de 30%.

Xavier (2005) ao estudar o comportamento da cultura da soja em função dos resíduos culturais, mobilização do solo e irrigação, em semeadura direta, concluíram que no experimento irrigado foi obtida a maior massa de grãos por planta, porém esta foi negativamente influenciada pelo aumento de doses de resíduo sobre o solo. Isto pode evidenciar o fato da existência de retenção de água pelo dossel das plantas bem como pela cobertura do solo por resíduos vegetais. Segundo Gava (2010), em sistema de plantio direto com $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ de cobertura morta constituído de restos vegetais da cultura do trigo, são retidos cerca de 0,4 mm, com 5 t ha^{-1} 0,8 mm e com 10 t ha^{-1} 1,5 mm de água, que poderão ser evaporados para a atmosfera antes de chegar a zona radicular. Se por um lado a falta de água traz prejuízos à cultura, o excesso também é prejudicial. Segundo Doorenbos e Kassam (1994) o teor de água no solo, durante a germinação, não deve exceder 85% nem ficar abaixo de 50% da água disponível. Segundo os autores, esse seria o nível de esgotamento permissível para o manejo da irrigação em condições médias de evapotranspiração ($5 \text{ a } 6 \text{ mm d}^{-1}$).

Objetivando-se avaliar a produtividade de soja (cv. Embrapa 48) em relação à densidade relativa (Dsr) de Latossolo Vermelho textura média (LVd) e argilosa (LVef), Beutler et al. (2005) constataram que a Dsr ótima para a produtividade de soja, em casa de vegetação, foi superior no Latossolo Vermelho eutroférico argiloso (0,84), comparada à do Latossolo Vermelho caulínico de textura média (0,75), na tensão de água no solo de 0,01 MPa. No campo, a Dsr ótima para soja foi de 0,80.

2.1.5 Zoneamento Agrícola

O nível de tecnologia adotado e a variabilidade climática explicam grande parte das flutuações no rendimento de grãos das culturas, que ocorrem em diferentes safras e entre diferentes locais.

Cunha et al. (2001), ao estudar o zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul, afirmam que a precipitação pluvial (deficiência hídrica) é a principal variável meteorológica determinante de oscilações no rendimento de grãos, tanto interanual quanto entre as diferentes regiões. A análise dos resultados, demonstrou que a disponibilidade hídrica é a variável que limita a expressão do potencial de rendimento da cultura de soja no Rio Grande do Sul, independentemente do ciclo da cultivar, da época de semeadura e do local. Todavia, há variabilidade entre regiões, existindo aquelas em que as magnitudes da perda do potencial de rendimento, por falta de água à cultura, são maiores.

Figura 5 – Excesso e Déficit Hídrico na Safra Agrícola 2011/2012

Fonte: INMET

A Figura 5, Figura 6 e Figura 7, mostram a distribuição do déficit e excesso hídricos no Brasil nas safras agrícolas de soja de 2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014, respectivamente. É

possível observar que mesmo com a ocorrência de excesso, sempre ocorre déficit hídrico em alguma fase específica ou região produtora.

É possível observar que mesmo o estado do Mato Grosso, maior produtor nacional de soja, famoso por sofrer com excesso de chuvas na época da colheita, também sofre com déficit nas fases iniciais de plantio da soja (Figura 5 e Figura 6).

Figura 6 - Excesso e Déficit Hídrico na Safra Agrícola 2012/2013
Fonte: INMET

Porém, é importante observar que outros estados também dão grandes contribuições à produção brasileira de soja. Como citado anteriormente e mostrado na Figura 3, a soja é plantada em todo o Brasil (CONAB, 2012), e nos últimos anos tem aumentado consideravelmente suas áreas na região central, norte e nordeste.

Nesses mapas é importante observar a ocorrência de déficit nas diferentes regiões e principalmente nos dois períodos mais sensíveis da soja à falta de água no solo, que como citado por Cunha e Bergamaschi (1992), Casagrande (2001) e EMBRAPA (2002), são germinação e enchimento de grãos porque envolvem diretamente a formação dos componentes do rendimento.

É nesse aspecto que pode-se observar que o problema foi ainda maior na última safra (Figura 7), onde a soja sofreu com a ocorrência de déficit principalmente nessas fases importantes, que ocorrem em geral, fase inicial (outubro à novembro) e fase de enchimento de grãos (janeiro à fevereiro).

Figura 7 - Excesso e Déficit Hídrico na Safra Agrícola 2013/2014
Fonte: INMET

A Tabela 5 mostra as áreas produtoras de soja do Brasil, por estado, e compara a área total dos 4 estados de maior produção, com a área total de plantio dos demais estados. Isso mostra a importância de se estudar os efeitos os déficit e possíveis estratégias de irrigação também nas áreas de menor produção, pois, se observarmos a área plantada nos estados do centro, norte e nordeste, esta chega a 30% de toda a área de soja do Brasil. Com melhoria nas técnicas de manejo e estudos dessas novas fronteiras agrícolas pode-se alcançar produtividades iguais às dos principais estados produtores.

Tabela 5 – Comparação entre a área plantada das principais regiões produtoras do Brasil

REGIÃO/UF	ÁREA			
	Safr 12/13		Safr 13/14	
	(Em mil ha)	(%)	(Em mil ha)	(%)
Estados Produtores Principais				
MT	7818	28	8530	29
MS	2017	7	2120	7
PR	4753	17	5011	17
RS	4619	17	4887	16
TOTAL	19207	69	20547	69
Estados Produtores Secundários*				
PA	172	1	198	1
TO	550	2	656	2
MA	586	2	590	2
PI	546	2	631	2
BA	1282	5	1274	4
GO	2888	10	3090	10
DF	55	0	72	0
MG	1121	4	1259	4
SP	637	2	735	2
SC	513	2	543	2
TOTAL	8350	30	9047	30

* Sem RR, RO e AC

FONTE: Adaptado de CONAB (2014)

2.1.6 Fotoperíodo

O ciclo das cultivares de soja é determinado pelo fotoperíodo, e vale ressaltar a importância da temperatura do ar como fator modulador. Sendo assim, cada cultivar apresenta um fotoperíodo “crítico” para a ocorrência do florescimento. Quando o fotoperíodo é acima desse considerado crítico, o florescimento não ocorre. Esse fotoperíodo crítico, para a maioria das cultivares brasileiras encontra-se entre 13 a 14 horas, ou seja, ele tem que estar abaixo do nível crítico para que ocorra indução à floração. O estímulo ao fotoperíodo é iniciado com a emissão da segunda folha verdadeira, e a partir deste ponto ocorre estímulos que induzem a

diferenciação dos meristemas vegetativos em reprodutivos e a velocidade este processo é função do grau de sensibilidade termofotoperiódica da cultivar (RODRIGUES et al., 2001).

Avaliando o efeito do fotoperíodo para a cultura da soja em diferentes épocas de semeadura em Dourados-MS, Fietz e Rangel (2008), verificaram que quando a semeadura é realizada em outubro, o florescimento ainda ocorre em ascensão de fotoperíodo, ou seja, antes do solstício de verão, já que o desenvolvimento vegetativo ocorre com fotoperíodo inferior ao crítico, estimado em 13 horas, que resulta em menor crescimento vegetativo. Para a semeadura de novembro o desenvolvimento vegetativo ocorre em condições de fotoperíodo superior ao crítico, possibilitando assim, o máximo crescimento da cultura, com o aumento do período entre a emergência e o início da floração, quando comparada à semeadura de outubro. Câmara et al. (1997) verificou em casa de vegetação que quando o fotoperíodo é superior ao considerado crítico à cultivar, a mesma apresenta maior altura devido a maior duração do subperíodo entre emergência e o início da floração, tendo, conseqüentemente maior acúmulo de fotoassimilados.

Farias et al. (2009) analisando a importância do fotoperíodo no desenvolvimento da soja, e se seria impossível cultivá-la em condições de baixas latitudes com produtividade satisfatória, devido principalmente ao baixo crescimento no período vegetativo. Porém não é o que ocorre no Brasil, que ganhou o título de país que tropicalizou a soja. Por meio do melhoramento genético, foram selecionadas cultivares de soja que apresentam um período juvenil longo entre a emergência e o início da floração, com isso diminui-se a sensibilidade ao fotoperíodo, e apesar das condições fotoperiódicas serem favoráveis ao florescimento, há a necessidade de acúmulo de graus dias para o término do período juvenil para que posteriormente se inicie o período reprodutivo da cultura.

A fisiologia do período juvenil longo ainda não está exatamente definida segundo Farias et al. (2007), podendo apresentar duas hipóteses. Uma é que pode ser uma fase em que a planta não está apta a florescer, e outra que a planta apresenta uma menor sensibilidade ao fotoperíodo, fazendo com que haja a necessidade de um período fototérmico maior para induzir a floração. Ao contrário da região central do Brasil, as cultivares da região sul podem apresentar maior sensibilidade ao fotoperíodo, já que nesses locais a variação do fotoperíodo e a duração da noite ao longo do ano são maiores e atendem as exigências da cultura (HAMAWAKI et al., 2007)

Rodrigues et al. (2001) avaliaram a sensibilidade de cultivares de soja à temperatura do ar e ao fotoperíodo por meio de um modelo linear múltiplo. Eles verificaram que em cultivares de período juvenil longo o modelo teve uma tendência a perder eficiência, atribuindo-se este fato à menor sensibilidade ao fotoperíodo. Outro resultado observado foi que as cultivares de ciclo média a tardio, apresentam menor valor do coeficiente referente ao fotoperíodo na

estimativa da taxa de desenvolvimento, demonstrando maior efeito inibitório do fotoperíodo longo na taxa de desenvolvimento dessas cultivares. O maior coeficiente para a temperatura do ar foi encontrado em cultivares de ciclo precoce, nas quais maior temperatura do ar resulta em maior taxa de desenvolvimento. Isso remete ao fato de que para cultivares precoces, a temperatura do ar tem maior influência na duração do ciclo de desenvolvimento do que o fotoperíodo.

Além de fator modulador da duração do ciclo, a temperatura do ar também afeta o crescimento da planta, apresentando algumas restrições em fase específicas do desenvolvimento. Farias et al. (2009) destacam que para a semeadura, a temperatura do solo não deve ser inferior a 20°C pois, compromete a germinação e a emergência das plântulas. Neumaier et al. (2000) destacam que se a temperatura do solo estiver muito elevada (>55°C), plantas em fase cotiledonar podem sofrer desestruturação da membrana celular e desidratação, resultando em tombamento. Esse dano já foi observado nos estados de Mato Grosso, Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Regiões com temperatura do ar menor que 10°C ou maior que 40°C são impróprias, pois sob baixas temperaturas do ar o crescimento vegetativo é insignificante e sob alta temperatura a floração é prejudicada, favorecendo o abortamento de legumes. A temperatura basal da cultura, responsável pelo seu crescimento está entre 13°C (FARIAS et al., 2009) e 14°C (CAMARGO et al., 1987), havendo a necessidade de que a temperatura do ar esteja acima da temperatura basal para que ocorra indução à floração.

A faixa ideal de temperatura da soja está associada ao máximo acúmulo de CO₂, obtida pela relação entre a fotossíntese bruta realizada pela planta em certa disponibilidade de energia (radiação solar) e a taxa de manutenção respiratória em função da temperatura do ar, balanço que resulta na fotossíntese líquida e no real acúmulo de CO₂ pela planta (PEREIRA et al., 2002). A condição ótima de temperatura para o crescimento e desenvolvimento da soja se encontra entre 20 e 30 °C (EMBRAPA, 2011). Como a fotossíntese bruta aumenta até certo ponto em função da temperatura do ar, e a taxa respiratória aumenta proporcionalmente ao aumento da temperatura do ar, o ponto em que as retas da fotossíntese bruta e da taxa respiratória se cruzam, representam as temperaturas basais inferior e superior. O intervalo entre essas linhas é o total de fotossíntese líquida, ou seja, o que realmente poderá ser utilizado pela planta em seu crescimento, princípio base para os modelos de estimativa de produtividade.

A temperatura do ar tem efeito sobre a duração do ciclo da cultura da soja, principalmente em cultivares menos sensíveis ao fotoperíodo. Há uma diminuição do período entre a emergência e início da floração sob temperaturas elevadas, o que pode acarretar em

redução da estatura da planta, efeito mais pronunciado quando as maiores temperaturas ocorrem sob condição de déficit hídrico e insuficiência fotoperiódica durante a fase de crescimento, resultando em diferentes ciclos em mesma época de semeadura (FARIAS et al., 2009). Para a diferença da duração do ciclo entre cultivares em mesma época de semeadura, os autores atribuem a resposta diferenciada de cada cultivar ao fotoperíodo e a temperatura do ar.

Estudo do tempo para o início da floração da soja, sob diferentes condições de fotoperíodo e temperatura do ar, são de suma importância para o manejo da cultura e o uso de modelos de crescimento e desenvolvimento (RODRIGUES et al., 2001). Em função da latitude e das cultivares utilizadas, a duração do ciclo pode variar e para um melhor entendimento entre pesquisadores e produtores rurais utiliza-se a classificação de ciclo em precoce, semi-precoce, médio, semi-tardio e tardio. Porém, uma nova classificação vem sendo adotada para definir a duração total do ciclo das cultivares no Brasil, denominando-as em função do grupo de maturação. Essa classificação é utilizada nos Estados Unidos e engloba a interação dos fatores fotoperíodo, temperatura do ar e a adaptação da cultivar ao local de cultivo (ALLIPRANDINI et al., 2009).

As cultivares estão divididas em 13 grupos, iniciando com o grupo 000, considerado como o mais precoce e englobando cultivares adaptadas às condições de dias longos, comuns nas áreas de cultivo do sul do Canadá e norte dos EUA. O grupo X, último dessa classificação, inclui cultivares tardias adaptadas a dias curtos e utilizadas em regiões de cultivo tropicais, como norte do Brasil, próximo a linha do Equador. Nas regiões produtoras do Brasil são utilizadas cultivares que variam dos grupos de maturação 5 (V) a 9 (IX). Uma visão detalhada dos grupos de maturação para as cultivares do Brasil pode ser tida através da Figura 8.

Figura 8 – Grupos de maturação em função da latitude e distribuição de áreas de plantio no Brasil
Fonte: EMBRAPA (2011)

A grande vantagem em se utilizar os grupos de maturação é a relatividade da duração do ciclo pois, uma cultivar do grupo 7 apresenta um ciclo maior que uma cultivar do grupo 6,5 em um mesmo local de cultivo, sendo atribuído para cada ponto de diferença entre grupos em torno de 1,5 a 2 dias na duração total do ciclo, que para o exemplo resultaria em uma diferença de 7 a 10 dias a mais no ciclo total da cultivar do grupo 7.

Com base na região de cultivo e nos grupos de maturação utilizados no Brasil, Kaster e Farias (2011) apresentaram a duração total do ciclo em dias, definição a qual é apresentada na Tabela 6. Observe que uma cultivar classificada como grupo de maturação 7,5 apresenta um ciclo maior que 146 dias na região sul, enquanto que este mesmo grupo apresenta duração total de ciclo de 120 dias quando cultivada no sudeste. Dessa mesma forma, a classificação das cultivares em função do grupo de maturação auxilia no planejamento do cultivo no que diz respeito à escolha de cultivar mais adaptada para a região e a duração do ciclo.

Tabela 6 – Duração do ciclo total em dias, em função do grupo de maturação e macrorregião produtora, associada aos grupos de ciclo utilizados no zoneamento agrícola

Macrorregião	Ciclo Curto		Ciclo Médio		Ciclo Longo	
	GMR ¹	NDM ²	GMR ¹	NDM ²	GMR ¹	NDM ²
SUL	≤ 6,3	≤ 130	6,4 a 7,4	131 a 145	≥ 7,5	≥ 146
CENTRO-SUL	≤ 6,7	≤ 125	6,8 a 7,6	126 a 135	≥ 7,7	≥ 136
SUDESTE	≤ 7,5	≤ 120	7,6 a 8,2	121 a 130	≥ 8,3	≥ 131
CENTRO-OESTE	≤ 7,8	≤ 115	7,9 a 8,5	116 a 125	≥ 8,6	≥ 126
NORTE/NORDESTE	≤ 8,6	≤ 112	8,7 a 9,3	113 a 125	≥ 9,4	≥ 126

¹Grupo de Maturação Relativa (ALLIPRANDINI et al., 2009); ²Número de dias para maturação

Outro fator importante é conhecer a duração das diferentes fases de desenvolvimento. Isso se torna fundamental para estudar a relação entre as condições meteorológicas e a resposta produtiva da cultura, pois dependendo da fase de desenvolvimento as condições climáticas podem afetar de forma diferenciada a cultura. Dogan et al. (2007) verificaram que quando o déficit hídrico ocorre no início da formação do legume (R3), no início do enchimento de grãos (R5) e na fase de grãos cheiro (R6) as perdas produtivas foram maiores do que quando o déficit hídrico ocorreu nas demais fases reprodutivas e durante o período vegetativo.

Além dos efeitos do fotoperíodo e da temperatura do ar sobre o crescimento e desenvolvimento da soja, outros fatores de ordem meteorológica poderiam ser inclusos, como disponibilidade hídrica no solo, radiação solar e outras de ocorrência isolada. Dentre as condições climáticas que afetam significativamente a produtividade da cultura da soja, destaca-se no Brasil a ocorrência de déficit hídrico, como umas das principais causas principalmente nos estados do centro-sul.

2.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido no Departamento de Engenharia de Biossistemas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, no município de Piracicaba - SP, com as coordenadas geográficas de latitude 22°44’64” Sul, longitude 47°37’76” Oeste e altitude 548 m (Figura 9). O clima da região é subtropical úmido (Cwa) de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado por verão chuvoso e inverno seco (PEEL et al., 2007).

Figura 9 – Localização da área experimental

Foram estudadas duas safras de soja no período de Dezembro de 2011 à Março de 2013 (Safr 2011/2012 e Safr 2012/2013), tendo sido utilizado milho como rotação de cultura entre as safras.

Foi feita uma análise química composta do solo no início do experimento para correção do solo (ANEXO A) e uma análise por tratamento no intervalo entre as duas safras, devido aos tratamentos com diferentes lâminas de irrigação. As lâminas de excesso e déficit poderiam influenciar na fertilidade do solo, causando diferentes ocorrências de lixiviações (ANEXO B).

2.2.1 Aplicação dos tratamentos

Foram definidos quatro subperíodos da cultura, adaptados da metodologia apresentada por Fehr e Caviness (1977), sendo que a aplicação dos tratamentos iniciou-se no estágio V2 para garantir o estabelecimento inicial das plantas em todas as parcelas: Subperíodo 1 ou S1 – Desenvolvimento Vegetativo (V2 a V12); Subperíodo 2 ou S2 – Floração ao Início da Frutificação (R1 a R3); Subperíodo 3 ou S3 – Completa Formação de Vagens à Formação da Produção (R4 a R6) e Subperíodo 4 ou S4 – Maturação (R7 a R8).

2.2.1.1 Safra 2011/2012

Na Safra 2011/2012, a cultivar utilizada foi a EMBRAPA BRS 316-RR, de crescimento determinado e indicada para os estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Mato Grosso do Sul, por convenção chamada de variedade 1 (V1). O plantio foi realizado em 12 Dezembro de 2011 e a colheita em 10 de Abril de 2012. Os tratamentos constaram de 3 lâminas de irrigação: Déficit (50% da ETc); Excesso (150% da ETc) e Irrigação Plena (100% da ETc) variando em 11 diferentes formas de ocorrência (Tabela 7).

Tabela 7 – Descrição detalhada dos tratamentos na Safra 1

Descrição	Nº	Código	Significado
Testemunha	1	IPCTV1	Irrigação plena, no Ciclo Total, para Variedade 1
Déficit	2	D1S1V1	Déficit de 50%, apenas no subperíodo 1, Variedade 1
Déficit	3	D1S2V1	Déficit de 50%, apenas no subperíodo 2, Variedade 1
Déficit	4	D1S3V1	Déficit de 50%, apenas no subperíodo 3, Variedade 1
Déficit	5	D1S4V1	Déficit de 50%, apenas no subperíodo 4, Variedade 1
Déficit	6	D1CTV1	Déficit de 50%, no Ciclo Total, Variedade 1
Excesso	7	E1S1V1	Excesso de 50%, apenas no subperíodo 1, Variedade 1
Excesso	8	E1S2V1	Excesso de 50%, apenas no subperíodo 2, Variedade 1
Excesso	9	E1S3V1	Excesso de 50%, apenas no subperíodo 3, Variedade 1
Excesso	10	E1S4V1	Excesso de 50%, apenas no subperíodo 4, Variedade 1
Excesso	11	E1CTV1	Excesso de 50%, no Ciclo Total, Variedade 1

Como mostra a Tabela 7, os tratamentos foram: Déficit no ciclo total (D1CTV1), Déficit no S1 (D1S1V1), Déficit no S2 (D1S2V1), Déficit no S3 (D1S3V1), Déficit no S4 (DVS4V1), Excesso no ciclo total (E1CTV1), Excesso no S1 (E1S1V1), Excesso no S2 (E1S2V1), Excesso no S3 (E1S3V1), Excesso no S4 (E1S4V1) e Irrigação Plena (IPCTV1). Quando a parcela não estava sob aplicação do respectivo tratamento, era então feita irrigação plena.

2.2.1.2 Safra 2012/2013

Visto que na safra 1 os tratamentos com lâminas de excesso não apresentaram diferenças significativas, os tratamentos da segunda safra sofreram algumas modificações. Foram acrescentadas lâminas de déficit intensificando o estresse hídrico, em lugar do excesso observado nos diferentes subperíodos da safra anterior. Como a alteração nos tratamentos

descaracterizaria o experimento como uma repetição, optou-se por mudar também a variedade e assim alcançar uma maior abrangência de dados.

Assim, para a Safra 2012/2013, a cultivar de soja utilizada foi a BMX POTÊNCIA RR de crescimento indeterminado, indicada para os estados de São Paulo, Paraná e Mato Grosso do Sul, por convenção chamada de variedade 2 (V2).

O plantio foi realizado em 06 de novembro de 2012 e a colheita em 08 de março de 2013. Nesse caso os tratamentos constaram de 4 lâminas de irrigação (30, 50, 100 e 150% da ETc) aplicadas em cada um dos 4 subperíodos da cultura. O Déficit de 50% (50% de reposição da ETc) foi chamado de D1 e o Déficit de 70% (30% de reposição da ETc) foi chamado de D2. Assim, os tratamentos com 50% de déficit ocorrendo nos 4 subperíodos e no ciclo total (CT) foram: D1S1V2, D1S2V2, D1S3V2, D1S4V2, D1CTV2. Da mesma forma os tratamentos com déficit de 70% foram chamados de: D2S1V2, D2S2V2, D2S3V2, D2S4V2 e D2CTV2. Houve ainda um tratamento com excesso (150% da ETc) chamado de E1CTV2 e o tratamento testemunha com Irrigação Plena (IPCTV2). Na Tabela 8 é possível visualizar a descrição detalhada de todos os tratamentos com seus respectivos códigos e significados.

Tabela 8 – Descrição detalhada dos tratamentos na Safra 2

Descrição	Nº	Código	Significado
Testemunha	1	IPCTV2	Irrigação Plena, Ciclo total, Variedade 2
Déficit 1	2	D1S1V2	Déficit de 50%, apenas no subperíodo 1, Variedade 2
Déficit 1	3	D1S2V2	Déficit de 50%, apenas no subperíodo 2, Variedade 2
Déficit 1	4	D1S3V2	Déficit de 50%, apenas no subperíodo 3, Variedade 2
Déficit 1	5	D1S4V2	Déficit de 50%, apenas no subperíodo 4, Variedade 2
Déficit 1	6	D1CTV2	Déficit de 50%, no Ciclo Total, Variedade 2
Déficit 2	7	D2S1V2	Déficit de 70%, apenas no subperíodo 1, Variedade 2
Déficit 2	8	D2S2V2	Déficit de 70%, apenas no subperíodo 2, Variedade 2
Déficit 2	9	D2S3V2	Déficit de 70%, apenas no subperíodo 3, Variedade 2
Déficit 2	10	D2S4V2	Déficit de 70%, apenas no subperíodo 4, Variedade 2
Déficit 2	11	D2CTV2	Déficit de 70%, no Ciclo Total, Variedade 2
Excesso	12	E1CTV2	Excesso de 50%, no Ciclo Total, Variedade 2

2.2.2 Montagem da área experimental

Foi utilizada a cobertura de uma casa de vegetação, equipada com 48 caixas impermeabilizadas e com controle de drenagem, com dimensões de 1,1m de largura por 1,3m de comprimento e 0,75m de profundidade (Figura 10).

Figura 10 - Planta baixa da casa de vegetação

Os detalhes da montagem das caixas de drenagem podem ser visualizados nas Figura 11 e Figura 12. As parcelas eram acessíveis por ambos os lados, sendo que cada fileira de caixas possuía dois corredores ao nível do solo e um outro rebaixado, que dava acesso aos poços de drenagem, bem como auxiliavam no manejo.

Figura 11 - Corte A-B

O experimento foi conduzido em ambiente protegido para se ter pleno controle das lâminas de déficit e excesso. Porém, para minimizar os efeitos da estufa na cultura, as cortinas foram mantidas abertas o tempo todo, com exceção apenas em momentos de chuva. Sendo assim, o efeito da estufa sobre a soja foi praticamente apenas com relação a cobertura.

Figura 12 - Corte C-D

A acomodação do solo nas caixas seguiu um processo cuidadoso quanto à colocação das camadas dos horizontes do solo bem como quanto à densidade, buscando sempre aproximar

o máximo possível da condição de campo. Para isso o solo foi cuidadosamente retirado em camadas de 10 em 10 centímetros e recolocado nas caixas obedecendo a ordem dos horizontes. Após ensaio laboratorial para determinação da densidade, foram pesados volumes conhecidos de solo para serem recolocados em cada camada de 10 cm nas caixas, utilizando um compactador graduado como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Reacomodação do Solo

2.2.3 Delineamento estatístico

O delineamento experimental foi blocos casualizados com 4 repetições, sendo 11 tratamentos na Safra 2011/2012 e 12 tratamentos na Safra 2012/2013, totalizando 48 unidades experimentais. Cada caixa recebeu 3 linhas de plantio, espaçadas em 0,45 m, sendo utilizada para as avaliações a linha central e as duas externas foram consideradas bordaduras.

A análise estatística foi realizada pelo software Statistical Analysis System (SAS) versão 9.2.

2.2.4 Manejo da irrigação

2.2.4.1 Cálculo da lâmina de irrigação

A Evapotranspiração da Cultura (ET_c) foi obtida pelo produto da Evapotranspiração de Referência (ET_o) e o Coeficiente de Cultivo (K_c). As estimativas de ET_o foram obtidas pelo método Penman-Monteith-FAO (Equação 1), conforme Allen et al. (1998), utilizando dados de uma estação meteorológica automática da marca Campbell Scientific, instalada no interior da casa de vegetação (Figura 14).

Figura 14 - Estação meteorológica no centro da área experimental

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

Em que:

ET_o - evapotranspiração da cultura de referência, mm d^{-1} ;

Rn - saldo de radiação à superfície, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;

G - fluxo de calor sensível no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;

T - temperatura média do ar a 2 m de altura, $^{\circ}\text{C}$;

U_2 - velocidade do vento a 2 m de altura, m s^{-1} ;

es - pressão de saturação de vapor, kPa;

ea - pressão atual de vapor, kPa;

Δ - declividade da curva de pressão de saturação, kPa °C⁻¹;

γ - constante psicrométrica, kPa °C⁻¹.

Os coeficientes de cultivo e a profundidade do sistema radicular de cada subperíodo (Tabela 9) foram definidos conforme recomendações, respectivamente, de Doorenbos e Kassam (1994) e Mantovani, Costa e Leal (1997).

Tabela 9 - Coeficientes de cultivo e profundidade efetiva do sistema radicular (Pe)

Subperíodos	Kc	Pe
	(adm.)	(m)
S a V2 (Emergência à crescimento)	0,35	0,15
V2 a R1 (Desenvolvimento vegetativo à floração)	0,75	0,30
R1 a R5 (Floração à frutificação)	1,07	0,40
R5 a R7 (Formação da produção à Maturação)	0,75	0,40

Fonte: (FAO Irrigation Paper, 56)

A textura do solo utilizado foi classificada no Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ESALQ-USP) como Franco Arenoso (Tabela 10) sendo: CC – Umidade na capacidade de campo ao potencial mátrico (ψ_m) de 0,1 atm; PMP – Ponto de murcha permanente em ψ_m de 15 atm; CAD – Capacidade de água disponível; Ds – Densidade do solo; PT – Porosidade total do solo. Os dados de Densidade de partículas (Dp) foram adaptados do trabalho de Chaves (2009) que utilizou esse mesmo tipo de solo.

Tabela 10 – Análise físico-hídrica do solo

Camada (cm)	CC (cm ³ cm ⁻³)	PMP (mm cm ⁻¹)	CAD (mm cm ⁻¹)	Ds (g cm ⁻³)	Dp* (g cm ⁻³)	PT (%)	Frações			Classe
							Granulométricas			Textural
							Areia	Silte	Argila	
							(%)			
0 - 15	0,252	0,100	2,12	1,40	2,65	0,47	75,78	6,45	17,77	Franco Arenoso
15 - 30	0,281	0,099	2,48	1,36	2,65	0,49	74,77	6,35	18,88	
30 - 45	0,284	0,102	2,45	1,34	2,64	0,49	75,28	6,40	18,33	

*Dp – Densidade de partículas (FONTE: CHAVES, 2009)

Também no Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ESALQ/USP), foi obtida a curva de retenção de água no solo apresentada na Figura 15.

Para a elaboração da curva, foram coletadas amostras de solo utilizando anéis volumétricos. Estes foram mantidos por 72 horas em recipiente com lâmina de água na metade de sua altura, até a constatação de que tivessem sido saturadas por ascensão capilar.

Após saturadas, as amostras tiveram sua massa determinada e foram submetidas a tensões crescentes para determinação dos pontos da curva de tensão, onde θ corresponde à umidade volumétrica e Ψ_m o potencial matricial do solo. Foram aplicadas 10, 20, 40, 60 cm.c.a. utilizando a mesa de tensão, e, para as tensões maiores, 100, 300, 500, 800, 5000, 15000 cm.c.a foram utilizadas as câmaras de Richards, conforme descrito por Romano, Hopmans e Dane (2002). Utilizou-se os valores médios para elaboração de uma única curva que representasse o solo utilizado (Tabela 11).

Tabela 11 – Dados obtidos em laboratório para a curva de retenção de água no solo

Camada	Tensão (cm.c.a)									
	0	10	20	40	100	300	500	800	5000	15000
(cm)	(cm ³ cm ⁻³)									
0 - 15	0,502	0,471	0,354	0,301	0,252	0,214	0,179	0,135	0,124	0,100
15 - 30	0,504	0,462	0,386	0,336	0,284	0,233	0,190	0,135	0,123	0,102
30 - 45	0,487	0,431	0,373	0,316	0,281	0,231	0,192	0,138	0,128	0,099
Média	0,498	0,455	0,371	0,317	0,272	0,226	0,187	0,136	0,125	0,100

Foi possível observar que apesar de todo processo de acomodação de solo, simulando a densidade no campo, os valores encontrados de potencial matricial e umidade foram muito semelhantes entre as diferentes camadas. O ideal quando se trabalha com lisímetros é aguardar o tempo máximo possível de repouso do solo, para que esse se reagregue naturalmente.

Com esses dados de umidade e tensão foi então obtida a curva de tensão de água no solo ajustando os dados de acordo com o modelo de Van Genuchten (1980) mostrado na Equação 2.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (2)$$

Em que:

θ - Umidade volumétrica, cm³ cm⁻³;

- θ_r – Umidade volumétrica residual, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;
 θ_s – Umidade volumétrica na saturação, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;
 h – Tensão aplicada, cm.c.a.;
 α – Parâmetro de ajuste do modelo, adm;
 n – Parâmetro de ajuste do modelo, adm;
 m – Parâmetro de ajuste do modelo, adm.

A Tabela 12 apresenta os parâmetros da equação de Van Genuchten ajustados para o solo utilizado. Foram utilizados os dados médios mostrados anteriormente na Tabela 11.

Tabela 12 – Parâmetros da equação de Van Genuchten ajustados para o solo utilizado

θ_s	θ_r	α	n	m
$(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$		(cm^{-1})	(adm)	
0,498	0,100	0,0793	1,4756	0,2966

Aplicando os valores obtidos para o solo do experimento, na equação 2, e ajustando os parâmetros apresentados na Tabela 12, temos então a equação 3, que nada mais é do que a equação da curva de retenção de água no solo apresentada na Figura 15.

$$\theta = 0,100 + \frac{0,498 - 0,100}{[1 + (0,079 * h)^{1,476}]^{0,297}} \quad (3)$$

Figura 15 – Curva de retenção de água no solo

Vale ressaltar que 1 atm equivale à aproximadamente 101,3 kPa ou ainda 1033 cm.c.a.

2.2.4.2 Sistema de irrigação

Embora o método de irrigação mais utilizado para soja em escala de campo tem sido por aspersão, com sistema pivô central, em escala experimental, no interior de casa de vegetação, este método impossibilitaria o controle rigoroso na aplicação dos tratamentos. Por isso, para permitir boa uniformidade de aplicação e controle de lâminas, cada parcela foi irrigada individualmente por um sistema de gotejadores auto-compensantes da marca NAAN modelo CPC 20 mm - $0,9 \text{ L h}^{-1}$ - 30 cm. Cada lisímetro recebeu três linhas com quatro gotejadores de vazão de $0,9 \text{ L h}^{-1}$, totalizando 12 gotejadores e vazão de $10,8 \text{ L h}^{-1}$ por parcela (Figura 16).

Figura 16 – Válvulas solenoides individuais

Na Figura 17 é possível observar a formação da faixa molhada para os gotejadores selecionados, no tempo inicial de irrigação, mostrando uma boa uniformidade de irrigação e área molhada.

Figura 17 – Faixa molhada

O sistema foi alimentado por uma bomba KSB P500 com vazão máxima de 2400 L h^{-1} (Figura 18a). Todo o sistema foi automatizado utilizando válvulas solenoides de baixo custo, controladas por “timers” COEL (Figura 18b).

(A)

(B)

Figura 18 – Sistema de Bombeamento (A) e automação (B)

2.2.4.3 Monitoramento semanal da umidade do solo

A umidade do solo foi monitorada utilizando o equipamento Time-Domain Reflectrometer (TDR) modelo TDR 100 da Campbell Scientific (Figura 19a), através de sondas instaladas em todas as parcelas em 3 profundidades: 0,05, 0,30 e 0,50 m (Figura 19b). Esses dados foram utilizados apenas para manejo da irrigação, monitorando a umidade do solo, visto que adotou-se o método de reposição de lâmina evapotranspirada.

Figura 19 – Sondas de TDR (A) e leitura semanal de umidade (B)

O equipamento foi calibrado para o solo utilizado na pesquisa, por meio de coluna de solo de volume conhecido. Foram feitas leituras diárias durante três meses deixando a coluna de solo perder umidade naturalmente. Os dados de conteúdo de água foram correlacionados com umidade volumétrica para obtenção da curva de calibração (Figura 20).

Figura 20 - Curva de calibração do TDR

Foram ainda, utilizados tensiômetros nos tratamentos controle, em duas profundidades, 0,05, 0,15m (Figura 21).

(A)

(B)

Figura 21 – Tensiômetro à 0,15m (A) e à 0,05m (B) de profundidade

2.2.5 Variáveis resposta

Os parâmetros biométricos foram determinados utilizando a média de 20 plantas por parcela, que representavam a linha central de plantio, analisando-se as seguintes avaliações:

2.2.5.1 Altura das plantas

A altura das plantas foi considerada como a máxima distância vertical da planta. Foi determinada por uma trena graduada a distância da superfície do solo até o final da última folha da copa, no final de cada estágio (Figura 22).

Figura 22 – Parâmetros Biométricos

2.2.5.2 Altura de inserção do primeiro legume

A altura de inserção do primeiro legume, também chamado de vagem, é considerada a máxima distância vertical entre o solo e o primeiro legume mais próximo do solo. Essa é uma avaliação que indica qualidade pois influencia na colheita mecanizada. Quando os legumes estão muito próximos do solo podem ser perdidos no momento da colheita. Essa medida foi determinada por meio de trena graduada no final do ciclo da cultura.

2.2.5.3 Número de plantas

Embora o número de plantas foi mantido o mesmo no início do experimento, alguns tratamentos resultaram em morte de algumas plantas. Por isso foi feita a contagem manual.

2.2.5.4 Número de legumes por planta

O número de legumes por planta foi obtido por contagem manual, sendo distinguidos legumes sadios, abortados e parcialmente abortados, por meio de análise qualitativa.

2.2.5.5 Número de grãos por planta

O número de grãos por planta foi obtido por contagem manual, sendo distinguidos grãos sadios; e grãos abortados por análise qualitativa. A Figura 23 mostra algumas situações de abortamento que ocorreram e como foram analisadas.

Figura 23 – Análise qualitativa para determinação de abortamento de grãos

2.2.5.6 Determinação do abortamento de grãos e vagens

Adotou-se uma metodologia onde foram contadas as vagens de acordo com sua quantidade de cavidades. Dessa forma foram contadas separadamente as vagens de uma, duas, três e quatro cavidades. Depois da abertura individual das vagens fez-se a análise qualitativa de grãos abortados já mostrados na Figura 23. Assim se obteve o percentual de abortamento através da Equação 4.

$$Abort = \frac{Na}{Nc} * 100 \quad (4)$$

Em que:

Abort – Quantidade de grãos que sofreram abortamento, %;

Na – Número total de grãos considerados não abortados, adm;

Nc – Número total de cavidades das vagens, adm.

2.2.5.7 Peso de 100 grãos

Foi feita a pesagem da amostra total de grãos após secagem em estufa à 65°C e em seguida calculado o peso de 100 grãos que é uma das variáveis resposta que indica qualidade da soja.

2.2.5.8 Diâmetro médio

Embora o grão de soja tenha um formato levemente elipsoidal, considerou-se a forma do grão como uma esfera perfeita para possibilitar o cálculo de diâmetro médio. Primeiramente foi obtido o volume de um número conhecido de grãos com o auxílio de uma proveta de 1 litro de capacidade. Foi fixado o volume de 500 mL de água. Em seguida foram despejados os grãos da amostra visualizando-se o volume de líquido deslocado. Esse volume de água é igual ao volume total da amostra com número de grãos previamente conhecido (Equação 5). Com esses valores utilizou-se a equação do volume da esfera rearranjando os fatores para chegar ao diâmetro do grão (Equação 6). Como o procedimento de imersão dos grãos e leitura da variação de volume era instantâneo, não havia absorção de água pelos grãos. Essa foi a última avaliação realizada com as amostras.

$$Vg = \frac{Vf - Vi}{Ng} \quad (5)$$

Em que:

Vg – Volume de grãos, mL;

Vi – Volume inicial de água da proveta, mL;

Vf – Volume final lido na proveta após inserir os grãos da amostra, mL;

Ng – Número total de grãos da amostra.

$$D = 2 * \left(\sqrt[3]{\frac{2 * Vg}{4 \pi}} \right) \quad (6)$$

Em que:

D – Diâmetro dos grãos, mm;

Vg – Volume de grãos, mm.

2.2.5.9 Produtividade

Foi realizada a colheita manual e a pesagem da matéria seca dos grãos. Foi feito ainda a adição de 13% de massa, considerando a umidade média do grão na colheita, umidade essa na qual o grão é comercializado. Os dados obtidos foram referentes à colheita da linha central de plantio em cada lisímetro (Figura 24).

Figura 24 – Colheita da linha do meio e as respectivas bordaduras

Para obter a produtividade em kg ha^{-1} foi considerado o comprimento de 1,30 m de cada linha e seu espaçamento de 0,45 m. Com isso foi extrapolado para área referente a 1 ha de acordo com a Equação 7.

$$P = \left(\frac{LL * Ep * Ma}{LL} \right) * \left(\frac{1000}{Ep} \right) \quad (7)$$

Em que:

P – Produtividade, kg ha^{-1} ;

LL – Comprimento da linha amostrada, m;

Ep – Espaçamento entre linhas, m;

Ma – Massa da amostra, kg.

A equação 7 pode ser simplificada, mas como o espaçamento e o comprimento das linhas amostradas podem variar optou-se por deixá-la nesse formato para facilitar o entendimento das transformações.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Safra 2011/2012

Na Tabela 13 estão apresentados os dados da análise estatística das 8 variáveis estudadas, com seus respectivos coeficientes de variação e resultados do teste F de Fisher-Snedecor. Médias com letras diferentes na vertical indicam diferenças significativas entre os tratamentos.

A altura de inserção do primeiro legume e altura total de plantas são variáveis importantes de se estudar pois, algumas variedades de soja quando submetidas ao déficit hídrico tendem a ter um menor crescimento. Podemos ver na Tabela 13, que a ocorrência de déficit no subperíodo 1, ou seja, na fase de crescimento vegetativo (D1S4V1), foi significativamente diferente em relação a ocorrência de déficit apenas no final do ciclo (D1S4V1). Isso poderia representar perdas no momento da colheita principalmente pela altura de corte das colhedoras. Porém, nesse caso embora houve diferença, a altura de 28,6 cm é suficiente para a altura de corte, que está entre 7 a 15 cm.

Tabela 13 – Análise de variância da Safra 1

Tratamentos	Altura de Inserção do Primeiro Legume⁽¹⁾ (cm)	Altura Total de Plantas⁽¹⁾ (cm)	Número de Vagens por Planta⁽¹⁾ (adm.)	Número de Grãos por Planta⁽¹⁾ (adm.)
IPCTV1	32,1 ^{ab}	111,6 ^{ab}	29,7 ^{ab}	63,9 ^a
D1S1V1	28,6 ^b	111,6 ^{ab}	25,4 ^{bc}	50,4 ^{ab}
D1S2V1	32,5 ^{ab}	111,5 ^{ab}	24,9 ^{bc}	52,2 ^{ab}
D1S3V1	33,9 ^{ab}	110,2 ^{ab}	25,6 ^{ab}	48,3 ^{ab}
D1S4V1	37,1 ^a	116,7 ^{ab}	28,7 ^{ab}	59,5 ^a
D1CTV1	35,5 ^{ab}	104,8 ^b	22,7 ^c	41,0 ^b
E1S1V1	34,7 ^{ab}	126,5 ^a	30,8 ^a	64,8 ^a
E1S2V1	31,8 ^{ab}	123,6 ^{ab}	30,7 ^a	63,9 ^a
E1S3V1	33,4 ^{ab}	111,4 ^{ab}	28,1 ^{ab}	59,3 ^a
E1S4V1	33,7 ^{ab}	116,8 ^{ab}	30,6 ^a	63,5 ^a
E1CTV1	33,9 ^{ab}	115,7 ^{ab}	28,8 ^{ab}	62,1 ^a
Teste F	2,33*	2,33*	4,13**	4,88**
CV(%)	10,07	8,02	13,31	17,78

Tratamentos	Abortamento⁽¹⁾ (%)	Diâmetro de Grãos⁽¹⁾ (mm)	Peso de 100 Grãos⁽¹⁾ (g)	Produtividade⁽¹⁾ (kg ha ⁻¹)
IPCTV1	20,5	6,0 ^a	12,4 ^{abc}	2783,0 ^a
D1S1V1	21,6	6,2 ^a	13,4 ^a	2399,2 ^{ab}
D1S2V1	19,7	6,2 ^a	13,3 ^a	2530,3 ^{ab}
D1S3V1	29,2	5,6 ^a	9,8 ^c	1728,4 ^b
D1S4V1	23,7	6,0 ^a	13,2 ^{ab}	2735,9 ^a
D1CTV1	22,4	5,5 ^a	10,0 ^{bc}	1715,3 ^b
E1S1V1	22,3	6,1 ^a	12,7 ^{abc}	2991,6 ^a
E1S2V1	22,5	6,1 ^a	12,9 ^{abc}	2875,1 ^a
E1S3V1	24,1	6,0 ^a	12,5 ^{abc}	2646,8 ^{ab}
E1S4V1	22,8	6,2 ^a	13,4 ^a	2868,5 ^a
E1CTV1	21,6	6,0 ^a	12,4 ^{abc}	2857,4 ^a
Teste F	0,91 ^{ns}	2,67*	3,74**	5,38**
CV(%)	22,10	5,44	10,96	22,03

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras distintas na vertical diferem entre si a 0,05% de probabilidade pelo teste de Tukey;

*Significativo a 0,05% de probabilidade pelo teste F; **Significativo a 0,01% de probabilidade pelo teste F; ^{ns}Não significativo; CV Coeficiente de Variação

A altura total de plantas foi prejudicada pela ocorrência de déficit no ciclo total da cultura (D1CTV1). O mesmo ocorreu para o número de vagens por planta, também chamado de número de legumes por planta, sendo que além de sua ocorrência no ciclo todo ter sido prejudicial, pode-se notar que ele também teve efeito considerável, quando ocorrido nos subperíodos S1 e S2 (D1S1V1 e D1S2V1), apresentando valores de 25,4 e 24,9 respectivamente, corroborando com Cunha e Bergamaschi (1992), Casagrande (2001) e EMBRAPA (2002), os quais ainda concluíram que os dois períodos mais sensíveis da soja à falta de água no solo são germinação e enchimento de grãos porque envolvem diretamente a formação dos componentes do rendimento. Valores menores que estes foram encontrados por Kuss et al. (2008), que foram em média 41,8 (não irrigado), 45,7 (irrigação em períodos críticos) e 47,0 (irrigação plena).

Com relação ao peso de 100 grãos (Tabela 13), também chamado de peso de 100 sementes, o déficit ocorrido no subperíodo S3 (D1S3V1), foi significativamente menor que as outras formas de ocorrência, principalmente quando comparado com a ocorrência no S1 e S2 (D1S1V1 e D1S2V1), que apresentaram 13,4 e 13,3 gramas respectivamente. Valores contrastantes foram encontrados por Kuss et al. (2008), trabalhando com populações de plantas e estratégias de manejo de irrigação na cultura da soja, em Santa Maria – RS, onde apresentaram valores de 15,4, 14,3 e 14,6 gramas para os tratamentos, não irrigado, irrigado em períodos críticos e irrigação plena. Ou seja, o tratamento não irrigado teria beneficiado o peso dos grãos em relação aos tratamentos irrigados. Porém, os mesmos autores encontraram as maiores médias de produtividade para o tratamento com irrigação plena (3307 kg ha⁻¹), seguido da irrigação em períodos críticos (2814 kg ha⁻¹) e não irrigado (2627 kg ha⁻¹). Porém esses dados de produtividade não apresentaram diferenças significativas, apresentando uma média geral de 2916 kg ha⁻¹, muito próximo dos 2783 encontrados para o tratamento de irrigação plena (IPCTV1).

A Figura 25 apresenta os gráficos da análise quantitativa e qualitativa de cada variável individualmente. É possível verificar que a ocorrência de déficit de água prejudicou a altura total das plantas, número de vagens por planta, número de grãos por planta, e o peso de 100 grãos, conseqüentemente afetando diretamente a produtividade. Resultado semelhante foi encontrado por Atti et al. (2005) que concluíram que déficit hídrico do solo afetou negativamente o crescimento e a produtividade da soja em ambos os níveis de estresse hídrico testados (25 e 50%, de reposição da ETc).

Verificou-se que a porcentagem de abortamento e o diâmetro de grãos não sofreram influência significativa do estresse hídrico tanto por déficit como por excesso de água, em relação à irrigação plena.

Em relação à altura de inserção do primeiro legume, variável qualitativa que pode representar perdas no momento da colheita, o déficit aplicado no estágio inicial foi prejudicial.

O excesso de água não foi prejudicial, mostrando que para o tipo de solo utilizado, pode-se aplicar lâminas de até 150% da ET_c, sem causar danos por estresse nas plantas. Porém Manosso (2005) constatou que as chuvas, ora criando excedentes hídricos, ora tornando os solos deficientes em água, influem diretamente sobre a dinâmica do rendimento anual das safras agrícolas, inclusive podendo representar uma perda de 47% em relação à produtividade média da soja, 59% do milho e 50% do trigo.

O déficit hídrico no ciclo total (D1CTV1) afetou negativamente a maioria das variáveis, porém, quando aplicado apenas em subperíodos, o déficit não afetou significativamente as variáveis em relação à testemunha (IPCTV1), exceto na produtividade, em que o déficit aplicado no momento do enchimento de grãos (D1S3V1) foi tão danoso quanto aplicado no ciclo total da cultura. Segundo Confalone e Navaro (1999) a deficiência hídrica na soja provoca a diminuição do índice de área foliar (IAF), o que afeta a captura de radiação. Quando é exposta ao estresse hídrico leve, a soja tende a maximizar a eficiência de utilização da radiação e a diminuir a eficiência de interceptação da radiação solar fotossinteticamente ativa (RFA). O déficit hídrico severo, no entanto, reduz a eficiência de utilização da radiação. O déficit hídrico produz um efeito diferencial sobre o crescimento e produção de biomassa na cultura da soja, segundo o momento e a severidade do estresse. Porém, segundo Calvache, Reichardt e Bacchi (1998) trabalhando com deficiência de irrigação no feijão, concluíra que o déficit apenas no estágio vegetativo não reduziu a produtividade, permitindo uma economia de água de 30%.

Figura 25 - Gráficos da análise quantitativa e qualitativa da Safra 1 (Continua)

Figura 26 - Gráficos da análise quantitativa e qualitativa da Safra 1 (Conclusão)

As lâminas de irrigação variaram para todos os tratamentos em função do subperíodo em que estava. Pode-se observar na Tabela 14, que os tratamentos com excesso tiveram maior lâmina de irrigação acumulada durante o ciclo da cultura, bem como os tratamentos com déficit foram os de menor lâmina acumulada no período.

A ETo somente apresentou valor acumulado maior do que o tratamento com déficit no ciclo total (D1CTV1). Isso é explicado pelo fato da soja ter Kc maior do que um (1,0) em grande parte de seu ciclo.

É possível verificar que o tratamento de excesso no subperíodo 1 (E1S1V1) e no subperíodo 4 (E1S4V1), praticamente tiveram a mesma lâmina de irrigação. Embora os subperíodos sejam diferentes em quantidades de dias, os Kcs também mudam, bem como a ETo. No caso desses dois tratamentos, o subperíodo 1 (S1) teve 45 dias de duração, com Kc variando entre 0,35 e 0,75. Já o subperíodo 2 (S2) teve apenas 15 dias de irrigação, porém com Kc variando entre 1,2 e 0,75.

As irrigações foram suspensas no 103º dia do ciclo, devido à fase final de maturação, que é quando a planta já não precisa de umidade no solo para completar o ciclo, sem que isso prejudique a produtividade.

O excesso estudado, buscou saber se regiões chuvosas poderiam ter redução na produção. Porém como essas lâminas resultaram em maiores médias de produtividade, poderíamos pensar em irrigar com lâminas maiores que as de irrigação plena obtendo assim melhores resultados. Mas quando analisamos os dados de quantidade produzida de soja por unidade de água, temos a chamada Produtividade da Água (PA). Ela nos mostra que as lâminas de excesso não são boas estratégias de irrigação, pois apresentaram baixos valores de PA. A Tabela 14, apresenta os dados de lâminas acumuladas em cada subperíodo, no ciclo total, as lâminas de déficits e excessos acumulados em cada tratamento, e ainda, a produtividade da soja, que permite chegar aos valores de produtividade da água.

Tabela 14 - Lâminas de Irrigação Acumuladas por subperíodo e no ciclo total para Safra 1

Trat.	Subperíodo					Déficit	Produtividade	Produtividade
	S1	S2	S3	S4	Total	e/ou	da Soja	da água
						Excesso		
	(mm)						(Kg ha ⁻¹)	(Kg m ⁻³)
IPCTV1	144,4	75,5	118,5	75,8	414,2	0,0	2783,0	0,67
D1S1V1	72,2	75,5	118,5	75,8	342,0	-72,2	2399,2	0,70
D1S2V1	144,4	37,7	118,5	75,8	376,4	-37,7	2530,3	0,67
D1S3V1	144,4	75,5	59,2	75,8	354,9	-59,2	1728,4	0,49
D1S4V1	144,4	75,5	118,5	37,9	376,3	-37,9	2735,9	0,73
D1CTV1	72,2	37,7	59,2	37,9	207,1	-207,1	1715,3	0,83
E1S1V1	177,2	75,5	118,5	75,8	447,0	32,8	2991,6	0,67
E1S2V1	144,4	109,1	118,5	75,8	447,8	33,7	2875,1	0,64
E1S3V1	144,4	75,5	152,7	75,8	448,4	34,3	2646,8	0,59
E1S4V1	144,4	75,5	118,5	112,6	451,0	36,8	2868,5	0,64
E1CTV1	177,2	109,1	152,7	112,6	551,6	137,4	2857,4	0,52

A Figura 27 apresenta os dados da tabela anterior, correlacionando os valores de produtividade da soja com os de produtividade da água. É possível observar que os tratamentos que permitem obter as maiores produções, não são necessariamente os mais viáveis por apresentarem baixa produtividade da água.

Figura 27 – Produtividade da Água na Safra 1

Analisando as diferentes lâminas de irrigação, 50, 100 e 150% de reposição da ETc, ocorrendo no ciclo todo, ou seja, os tratamentos D1CTV, IPCTV1 e E1CTV1, foi possível obter a função de produção abaixo (Figura 28).

Figura 28 – Função de produção Safra 1 (Variedade 1)

Visto que nenhum dos tratamentos com excesso causou efeito no que diz respeito à redução de produtividade, a Tabela 15 mostra a porcentagem de redução de produtividade para cada tipo de ocorrência de déficit estudado.

Tabela 15 – Porcentagem de redução de produtividade em função da ocorrência de déficit hídrico na safra 1

Tratamentos com Déficit	Porcentagem de Redução da Produtividade
IPCTV1	Testemunha
D1S1V1	14
D1S2V1	9
D1S3V1	38
D1S4V1	2
D1CTV1	38

Verifica-se que a redução de produtividade foi de cerca de 14% quando a ocorrência de déficit se deu na fase vegetativa da cultura. Já a ocorrência de déficit apenas na fase de

enchimento de grãos (D1S3V1), proporcionou redução de produtividade igual à da ocorrência de déficit no ciclo total (D1CTV1), chegando a 38%.

2.3.2 Safra 2012/2013

A Tabela 16 apresentam os resultados da análise estatística das 8 variáveis estudadas, com seus respectivos coeficientes de variação e resultados do teste F de Fisher-Snedecor. Médias com letras diferentes na vertical indicam diferença significativas entre os tratamentos.

Os resultados mostraram que não ocorreram diferenças significativas entre os tratamentos para as variáveis: altura de inserção do primeiro legume, porcentagem de abortamento e diâmetro de grãos. Para os dois níveis de déficit testados (déficit severo de 30% de reposição da ETc e déficit moderado de 50% de reposição da ETc), a ocorrência no ciclo total (D2CTV2 e D1CTV2) foi altamente prejudicial à produtividade, porém quando aplicados somente em subperíodos não foram tão agressivos.

A ocorrência de déficit severo durante o ciclo total da cultura (D2CTV2) influenciou significativamente no crescimento e quantidade de grãos por planta, o que resultou queda de produtividade, corroborando com dados publicados por Confalone et al. (1998), Desclaux et al. (2000) e Neumaier et al. (2000).

O déficit severo aplicado na fase de enchimento de grãos (D2S3V2) resultou grãos de menor qualidade e mais leve como pode ser observado.

Os danos à produção de vagens foram maiores quando os déficits foram aplicados no ciclo total, porém, a ocorrência de déficit severo apenas no subperíodo do florescimento (D2S2V2) tem o mesmo efeito, que pode ser explicado pelo abortamento de flores nessa fase, assim como encontrado por Cunha et al. (2013), que concluíram que o efeito significativo do manejo diferenciado sobre o número de grãos por vagem pode ser explicado pela ocorrência de déficit hídrico na floração, em tratamentos que receberam 60 e 40% menos água. Para Jadoski et al. (2003) a redução no rendimento de grãos do feijoeiro pela ocorrência de deficiência hídrica durante o período reprodutivo é ocasionada pela alta taxa de abortamento de óvulos o que, sem dúvida, reduz o número de grãos por vagem.

Tabela 16 - Resultados da análise de variância Safra 2

Tratamentos	Altura de Inserção do Primeiro Legume ⁽¹⁾ (cm)	Altura Total de Plantas ⁽¹⁾ (cm)	Número de Vagens por Planta ⁽¹⁾	Número de Grãos por Planta ⁽¹⁾
IPCTV2	11,6	110,3 ^a	35,0 ^{ab}	67,0 ^{ab}
D1S1V2	13,6	87,1 ^a	25,9 ^{bcde}	47,9 ^{abc}
D1S2V2	10,2	99,5 ^{ab}	32,9 ^{cde}	59,6 ^{bc}
D1S3V2	14,3	103,4 ^a	30,1 ^{abcd}	57,2 ^{abc}
D1S4V2	12,5	101,4 ^a	34,5 ^{abcd}	66,0 ^{ab}
D1CTV2	12,6	86,9 ^b	22,3 ^e	42,0 ^c
D2S1V2	11,2	99,6 ^{ab}	27,1 ^{bcde}	52,7 ^{bc}
D2S2V2	13,3	87,6 ^a	23,9 ^{abcd}	45,4 ^{ab}
D2S3V2	14,6	107,6 ^a	28,4 ^{abcd}	52,4 ^{ab}
D2S4V2	12,5	107,1 ^a	31,6 ^{abc}	62,8 ^{ab}
D2CTV2	12,7	71,4 ^{ab}	16,4 ^{de}	27,2 ^{bc}
E1CTV2	11,2	110,7 ^a	39,4 ^a	76,1 ^a
Teste F	1,09 ^{ns}	5,46 ^{**}	8,14 ^{**}	6,44 ^{**}
CV(%)	20,42	15,51	25,32	28,56

Tratamentos	Abortamento ⁽¹⁾ (%)	Diâmetro de Grãos ⁽¹⁾ (mm)	Peso de 100 Grãos ⁽¹⁾ (g)	Produtividade ⁽¹⁾ (Kg ha ⁻¹)
IPCTV2	7,1	6,4	14,6 ^{abc}	3384,3 ^{ab}
D1S1V2	8,1	6,5	15,8 ^{abc}	2626,0 ^{bc}
D1S2V2	12,7	6,3	14,9 ^{abc}	3042,8 ^{bc}
D1S3V2	6,6	6,2	14,2 ^c	2736,5 ^{bc}
D1S4V2	7,4	5,8	13,1 ^{abc}	3087,4 ^{ab}
D1CTV2	8,1	6,8	14,5 ^{abc}	1956,8 ^c
D2S1V2	4,9	5,9	13,6 ^a	2388,0 ^{abc}
D2S2V2	7,4	6,2	14,5 ^{abc}	2271,3 ^{ab}
D2S3V2	11,7	5,9	12,3 ^{abc}	2228,0 ^{ab}
D2S4V2	4,8	6,2	13,8 ^{bc}	2968,7 ^{ab}
D2CTV2	14,9	6,0	13,4 ^{abc}	1224,8 ^{bc}
E1CTV2	4,1	6,0	15,3 ^{ab}	4037,2 ^a
Teste F	1,91 ^{ns}	1,39 ^{ns}	3,34 ^{**}	6,32 ^{**}
CV(%)	65,91	5,43	10,96	32,81

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras distintas na vertical diferem entre si a 0,05% de probabilidade pelo teste de Tukey;

*Significativo a 0,05% de probabilidade pelo teste F; **Significativo a 0,01% de probabilidade pelo teste F; ^{ns}Não significativo; CV Coeficiente de Variação

De fato, os resultados obtidos por Ávila et al. (2010) apontam o pré-florescimento, a formação das vagens e o enchimento de grãos como as fases mais sensíveis à deficiência hídrica e a falta de água nesses períodos resultou na queda de produtividade e em algumas de suas variáveis. O excesso não foi prejudicial, mostrando que para o tipo de solo estudado pode ocorrer excesso de até 150% da ETc sem que a planta sofra estresse hídrico. Porém, Santana et al. (2008), trabalhando com feijão, constataram que tanto a falta quanto o excesso de água provocam má formação dos grãos indicando que a disponibilidade hídrica adequada durante os estádios fenológicos do feijoeiro pode aumentar o número de óvulos fertilizados por vagem, o que propicia melhores rendimentos.

A Figura 29 e 30 apresentam os gráficos da análise quantitativa e qualitativa de cada variável individualmente, com as respectivas letras do teste de médias por Tukey, apresentados anteriormente na Tabela 16.

Figura 29 - Gráficos da análise quantitativa e qualitativa da Safra 2 (Continua)

Figura 30 - Gráficos da análise quantitativa e qualitativa da Safra 2 (Conclusão)

Na Tabela 17 é possível observar a ETo e as respectivas lâminas de irrigação acumuladas para cada tratamento ao longo do ciclo. A principal diferenciação observada é entre os tratamentos de excesso e déficit no ciclo todo, (E1CTV2; D1CTV2; D2CTV2). Os demais tratamentos não tiveram grandes diferenças entre as lâminas acumuladas totais, pois, como denotado anteriormente, embora os subperíodos sejam diferentes em números de dias, as lâminas dependem de várias variáveis, como ETo, Kc, etc. Por isso, as maiores variações ocorrem ao longo do ciclo, em momentos específicos de aplicação do respectivo tratamento.

É interessante notar que a ETo apresentava valores maiores no início. Porém, à medida que o Kc foi aumentando ao longo dos subperíodos, essa diferença em relação aos tratamentos foi diminuindo.

Os valores de lâminas acumuladas no ciclo total para cada tratamento, bem como para cada subperíodo, podem ser visualizados com maiores detalhes na Tabela 17. Os valores de produtividade da soja e da produtividade da água, corroboraram com os da primeira safra, mostrando que o excesso de água gerou as maiores médias de produtividade, mas não necessariamente a melhor relação de quantidade produzida por unidade de água.

Tabela 17 - Lâminas de Irrigação Acumuladas por tratamento Safra 2

Tabela 17 - Balanço de água acumulada por tratamento Seta 2								
Trat.	Subperíodo					Déficit	Produtividade	Produtividade
	S1	S2	S3	S4	Total	e/ou		da água
	(mm)					Excesso	(Kg ha ⁻¹)	(Kg m ⁻³)
IPCTV2	123,9	54,3	72,4	74,6	325,1	0,0	3384,3	1,0
D2S1V2	91,8	54,3	72,4	74,6	293,0	-32,1	2626,0	0,9
D2S2V2	123,9	16,3	72,4	74,6	287,2	-38,0	3042,8	1,1
D2S3V2	123,9	54,3	21,7	74,6	274,5	-50,7	2736,5	1,0
D2S4V2	123,9	54,3	72,4	22,4	273,0	-52,2	3087,4	1,1
D2CTV2	91,8	16,3	21,7	22,4	152,1	-173,0	1956,8	1,3
D1S1V2	100,9	54,3	72,4	74,6	302,2	-23,0	2388,0	0,8
D1S2V2	123,9	27,1	72,4	74,6	298,0	-27,1	2271,3	0,8
D1S3V2	123,9	54,3	36,2	74,6	288,9	-36,2	2228,0	0,8
D1S4V2	123,9	54,3	72,4	37,3	287,9	-37,3	2968,7	1,0
D1CTV2	100,9	27,1	36,2	37,3	201,6	-123,6	1224,8	0,6
E1CTV2	146,8	81,4	108,6	111,9	448,7	123,6	4037,2	0,9

A Figura 31 apresenta os dados da tabela anterior, correlacionando os valores de produtividade da soja com os de produtividade da água. Os valores da segunda safra corroboram com os valores apresentados anteriormente da primeira safra, mostrando que os tratamentos que permitem obter as maiores produções, não são necessariamente os mais viáveis por apresentarem baixa produtividade da água.

Figura 31 – Produtividade da Água na Safra 2

Quando analisadas as lâminas de irrigação aplicadas no ciclo total, como o tratamento D2CTV2 que é a reposição de 30% da ETc como lâmina de irrigação, do tratamento D1CTV2 que é a reposição de 50% da ETc, do tratamento IPCTV2, que é a reposição de 100% da ETc e do E1CTV2 que é a aplicação excessiva de 150% da ETc, é possível obter a função de produção a seguir (Figura 32).

Figura 32 - Função de produção da Safra 2 (Variedade 2)

Visto que o excesso não causou estresse hídrico no que diz respeito à redução de produtividade, a Tabela 18 mostra a porcentagem de redução de produtividade em relação à testemunha, para cada ocorrência de déficit estudado.

Tabela 18 - Porcentagem de redução de produtividade em função da ocorrência de déficit hídrico Safra 2

Tratamentos com Déficit	Porcentagem de Redução de Produtividade
IPCTV2	Testemunha
D1S1V2	22
D1S2V2	10
D1S3V2	19
D1S4V2	9
D1CTV2	42
D2S1V2	29
D2S2V2	33
D2S3V2	34
D2S4V2	12
D2CTV2	64

O fato da lâmina de irrigação de 150% da ET_c ter resultado nas maiores produtividades, poderia ser explicado por um K_c maior do que foi utilizado, e então o excesso aplicado na verdade não seria excesso e sim irrigação plena. Outros autores com Fehr e Caviness (1977), já apresentaram dados sugerindo K_c de 1,5 nas fases reprodutivas do R1 ao R6. Porém, esse solo apresenta a característica de ter boa drenagem por ser arenoso, e assim as lâminas de excesso não teriam causado estresse e sim, apenas deixado a água facilmente disponível por períodos maiores.

A ocorrência de déficit no ciclo total causou redução da produtividade tanto para déficit moderado de 50% da ET_o (D1CTV2) como para déficit severo de 70% da ET_o (D2CTV2), sendo de 42 e 64% respectivamente.

O déficit severo apenas nos subperíodos foi prejudicial em todas as formas de ocorrência. Porém em menor intensidade quando ocorrido na fase de maturação (D2S4V2). O mesmo ocorre com o déficit moderado que causa menor redução de produtividade quando sua ocorrência se dá na fase final (D1S4V2).

2.3.3 Variação Climática entre as duas safras

Visto que foram estudadas duas variedades em anos distintos, os dados abaixo mostram variações entre as principais variáveis climáticas em que foram submetidas as variedades V1 e V2. Sabe-se que a ET_o é a combinação de várias variáveis climáticas, como, radiação, temperatura, velocidade do vento, etc. Porém, as mais importantes e que causam maiores variações são a radiação e temperatura. Sendo assim, a Figura 33 mostra a temperatura média e a radiação acumuladas no ciclo total de cada uma das variedades. Nota-se que no ciclo da variedade 1 (V1), a temperatura média acumulada foi um pouco menor do que para a variedade 2 (V2). O contrário ocorreu com a radiação, que foi maior no ciclo da V1.

Figura 33 – Temperatura Média e Radiação Acumuladas nos ciclos da V1 e V2

Ao analisar o acumulado geral nos ciclos verificam-se pequenas diferenças entre a temperatura e a radiação. Porém, foi possível verificar que o comportamento das variáveis é totalmente diferente quando analisado dia a dia em cada subperíodo (Figura 34).

Figura 34 – Variação da temperatura e radiação para as duas safras

Câmara et al. (1997) verificou em casa de vegetação que quando o fotoperíodo é superior ao considerado crítico à cultivar, a mesma apresenta maior altura devido a maior duração do subperíodo entre emergência e o início da floração, tendo, consequentemente maior acúmulo de fotoassimilados, corroborando com os resultados mostrados na Figura 30.

Para a semeadura de novembro o desenvolvimento vegetativo ocorre em condições de fotoperíodo superior ao crítico, possibilitando assim, o máximo crescimento da cultura, com o aumento do período entre a emergência e o início da floração (FIETZ; RANGEL, 2008).

Como apresentado anteriormente a temperatura do ar tem efeito sobre a duração do ciclo da cultura da soja, principalmente em cultivares menos sensíveis ao fotoperíodo. Há uma diminuição do período entre a emergência e início da floração sob temperaturas elevadas, o que pode acarretar em redução da estatura da planta, efeito mais pronunciado quando as maiores temperaturas ocorrem sob condição de déficit hídrico e insuficiência fotoperiódica durante a fase de crescimento, resultando em diferentes ciclos em mesma época de semeadura (FARIAS et al., 2009). Para a diferença da duração do ciclo entre cultivares em mesma época de semeadura, os autores atribuem a resposta diferenciada de cada cultivar ao fotoperíodo e a temperatura do ar.

A combinação dessas e de outras variáveis citadas anteriormente, resultam na ETo. A Figura 35 apresenta os dados de ETo acumulados no ciclo das duas variedades, mostrando haver pequena diferença, embora tenham sido cultivadas em épocas distintas.

Figura 35 – ETo acumulada no ciclo das duas variedades comparadas

A Figura 36 apresenta de forma detalhada a ocorrência da ETo ao longo do ciclo, mostrando que, embora os valores acumulados totais sejam próximos, o comportamento ao longo do ciclo foi bastante distinto entre as safras.

Figura 36 - ETo no ciclo das duas variedades comparadas

Porém, estudar os dados acumulados pode não evidenciar as diferenças ocorridas em subperíodos específicos das diferentes variedades, pois embora no acumulado geral os dados sejam semelhantes, a ocorrência dos mesmos pode ter sido totalmente diferente entre as duas variedades cultivadas em anos distintos.

A ocorrência de ETo, variou entre os subperíodos, tendo apresentado maiores valores acumulados nos subperíodos 1 e 3 para a variedade V1 e nos subperíodos 2 e 4 para a variedade V2. Isso pode contribuir diretamente na diferença dos resultados das variáveis estudadas, pois a demanda atmosférica sendo mais alta em um determinado subperíodo com déficit hídrico para uma das variedades, pode ser determinante na diferenciação dos resultados.

Vale ressaltar neste gráfico que a ETo acumulada no subperíodo 3, que é o subperíodo de enchimento de grãos e portanto o responsável pela formação da produção, apresentou maiores valores para a variedade V1. Ou seja, a demanda atmosférica foi maior para a variedade V1 na fase de formação da produção S3 e como se observou anteriormente na Figura 36, isso

pode ter influenciado na redução de produtividade e no acentuado abortamento de grãos dessa variedade.

Embora as duas safras fossem muito semelhantes no que diz respeito à quantidade de dias do ciclo total, aos dias após semeadura (DAS) em cada subperíodo e ETo acumulada no ciclo, a Tabela 19 mostram que a variação de ETo se diferencia em cada subperíodo, o que pode ser determinante nas variações dos resultados entre os tratamentos das diferentes safras.

Tabela 19 – Duração dos subperíodos e consumo hídrico das duas variedades estudadas

Subperíodo	DAS	Duração	V1	DAS	Duração	V2	Variação
	(Dias)	(Dias)	(mm)	(Dias)	(Dias)	(mm)	(mm)
S1	49	49	132,60	44	44	127,10	5,51
S2	62	13	39,51	59	15	43,74	4,23
S3	86	24	59,97	84	25	47,52	12,45
S4	123	37	75,67	120	36	92,40	16,72
Total	123	123	307,75	120	120	310,75	3,00

Valores semelhantes foram encontrados por Battisti (2013), e são apresentados na Tabela 20. Devemos comparar os dados da Tabela 19, com os valores do ciclo médio na Tabela 20, pois nossas duas variedades, V1 e V2 tiveram um ciclo de 123 e 120 dias, respectivamente. Sendo assim o nosso subperíodo S1 (49 dias para V1 e 44 para V2) pode ser comparado com a duração entre o S e o R1, que como mostrado abaixo foi de 50 dias. Para nosso subperíodo S3 (86 para V1 e 84 para V2), é possível comparar com o DAS até o R5, que como mostrado abaixo foi de 90.

Tabela 20 – Duração em dias dos principais subperíodos para soja de ciclo precoce, médio e tardio

Ciclo total	S – V2	V2 – R1	R1 – R5	R6 – R8
(dias)	DAS			
100 (precoce)	10	40	75	100
120 (médio)	15	55	90	120
140 (tardio)	15	60	110	140

FONTE: Adaptado de Battisti, 2013

Fehr e Caviness (1977), apresentaram dados detalhados sobre a duração dos estádios fenológicos para cultivares de diferentes durações de ciclo Tabela 21. Eles sugerem inclusive

que a soja alcance um Kc de 1,5 na fase reprodutiva, o que poderia explicar os dados por nós encontrados, mostrados anteriormente para as duas safras, onde a irrigação com 150% de reposição da ETc, alcançou as maiores produtividades.

Tabela 21 – Duração dos estádios fenológicos das cultivares de soja com diferentes ciclos e respectivos coeficientes de cultura (Kc)

Ciclos	S – V2	V2 – R1	R1 – R5/R6	R6 – R8
(Dias)	DAS			
110	10	45	80	110
115	10	45	85	115
120	15	50	90	120
130	15	55	100	130
135	15	55	105	135
140	15	60	110	140
Kc	0,56	1,21	1,50	0,90

*S- Semeadura; V2- Folha desenvolvida no primeiro nó acima do unifoliolado; R1- Início da floração; R5- Legume contendo grãos com até três milímetros em um dos quatro nós superiores; R6- Legume contendo grãos completamente desenvolvidos em um dos quatro nós superiores e R8- Maturidade completa.

FONTE: Fehr e Caviness (1977)

3 CONCLUSÕES

Nas condições em que o presente trabalho foi realizado e com base nos resultados obtidos, é possível se concluir que:

A redução de produtividade causada pela ocorrência de déficit apenas na fase de enchimento de grãos, é equivalente a ocorrência de déficit no ciclo total.

O déficit no ciclo total causou redução da produtividade, tanto para o déficit moderado como para déficit severo, chegando às reduções de produtividade de 42 e 64% respectivamente, em relação à irrigação plena.

A ocorrência de déficit não afetou o abortamento nem mesmo o diâmetro de grãos, mas influenciou significativamente no peso dos grãos, tanto para déficit severo como para o déficit moderado.

O excesso de umidade obtido com aplicação de 150% da ETc, não causou estresse hídrico, resultando inclusive, nas maiores médias de produtividade na safra 2. Porém, do ponto de vista da irrigação, não é viável irrigar com lâminas de excesso, sendo que essa lâmina estudada obteve os menores valores de produtividade da água.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**. Rome: FAO, 1998. 301 p. (FAO. Irrigation Paper, 56).

ALLIPRANDINI, L.F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P.F.; CAVASSIM, J.E.; GABE, H.L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M.N OLIVEIRA, M.A.R. de; PITOL, C.; PRADO, L.C.; STECKING, C. Understanding soybean maturity groups in Brazil: Environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science**, Madison, v. 49, p. 801-808, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. Complexo soja. Disponível em: <http://www.aboive.com.br>. Acesso em: 10 jan. 2013.

ATTI, S.; BONNELL, R.; PRASHER, S.; SMITH, D.L. Response of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under chronic water deficit to lco application during flowering and pod fillingy. **Irrigation and Drainage**, New Delhi, v. 54, p. 15-30, 2005.

BATTISTI, R. **Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil**. 2013. 261 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2013

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MÜLLER, A.G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831-839, set. 2004.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de latossolos vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 843-849, 2005.

BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. 2. ed. Viçosa. Ed. UFV, 2005. 969 p.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - MDIC. **Participação da soja nas exportações brasileiras em 2006**. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/>. Acesso em: 15 out. 2010.

CALVACHE, A.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Effect of water deficit at different growth stages for common bean (*Phaseolus iulgaris* L. cv. imbabello) on actual evapotranspiration. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 485-497, 1998

CÂMARA, G.M.S.; SEDIYAMA, T.; DOURADO-NETO, D.; BERNARDES, M.S. Influence os photoperiod and air temperature on the growth, flowering and maturation of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 54, p. 149-154, 1997.

CAMARGO, E.C.; BRUNINI, O.; MIRANDA, M.A.C. Temperatura-base para cálculos dos graus-dia para cultivares de soja em São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, p. 115-121, 1987.

CASAGRANDE, E.C.; FARIAS, J.R.B.; NEUMAIER, N.; OYA, T.; PEDROSO, J.; MARTINS, P.K.; BRETON, M.C.; NEPOMUCENO, A.L. Expressão gênica diferencial durante déficit hídrico em soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 168-184, 2001.

CHAVES, S.W.P. **Efeito da alta frequência de irrigação e do “mulching” plástico na produção da pimenta ‘Tabasco’ fertirrigada por gotejamento**. 2009. 153 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2009

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento de safra 2009/2010**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>> Acesso em: 10 dez. 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento de safra 2013/2014**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>> Acesso em: 10 abr. 2014

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Custo de produção: soja**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/8218897d1eb5849906fc53856bdbc894.pdf>> Acesso em: 20 dez. 2010

CONFALONE, A.; NAVARO, M.D. Influência do “déficit” hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 5, n. 3, p. 195-198, 1999.

CONFALONE, A.E.; COSTA, L.C.; PEREIRA, C.R. Crescimento e captura de luz em soja sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 165-169, 1998.

CRUZ, T.V.; PEIXOTO, C.P.; MARTINS, M.C. Crescimento e produtividade de soja em diferentes épocas de semeadura no oeste da Bahia. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 33-42, 2010.

CUNHA, G.R.; BERGAMASCHI, H. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. cap. 6, p. 85-97.

CUNHA, G.R.; BARNI, N.A.; HAAS, J.C.; MALUF, J.R.T.; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M.B.M.; PIRES, J.L.F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 446-459, 2001. (Nº Especial: Zoneamento Agrícola).

DESCLAUX, D.; HUYNH, T.; ROUMET, P. Identification of soybean plant characteristics that indicate the timing of drought stress. **Crop Science**, Madison, v. 40, n. 3, p. 716-722, 2000.

DOGAN, E.; KIRNAK, H.; COPUR, O. Deficit irrigations during soybean reproductive stages and CROPGRO-Soybean simulations under semi-arid climatic conditions. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 103, p. 154-159, 2007.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB; FAO, 1994. 306 p. (FAO. Estudos: Irrigação e Drenagem, 33).

EFETHA, A.; HARMS, T.; BANDARA, M. Irrigation management practices for maximizing seed yield and water use efficiency of Othello dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Southern Alberta, Canadá. **Irrigation Science**, v. 29, p. 103-113, 2011.

EMBRAPA. Exigências climáticas. **Tecnologias de produção de soja - Paraná - 2003**. Londrina: Embrapa Soja, 2002. cap. 1, p. 28-30. (Sistemas de Produção, 2).

EMBRAPA SOJA. **Vazio sanitário da soja é realidade em 7 estados**. Londrina. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/alerta/ver_alerta.php?cod_pagina_sa=177&cultura=1>. Acesso: 17 jan. 2011.

FAO. **Relatórios**. Disponível em: <<https://www.fao.org.br/ultimosRelatoriosFao.asp>>. Acesso em: 10 out. 2010.

FARIAS, J.R.B.; ASSAD, E.D.; ALMEIDA, I.R. de; EVANGELISTA, B.A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, p. 415-421, 2001.

FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular Técnica, 48).

FARIAS, J.R.B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L. Soja. In: MONTEIRO, J.E.B.A. **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. cap. 15, p. 261-278.

FEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DE MATO GROSSO DO SUL - FAMASUL. **Irrigação aumenta produtividade de milho e soja em cerca de 60%**. Disponível em: <<http://www.canaldoprodutor.com.br/comunicacao/noticias/irrigacao-aumenta-produtividade-de-milho-e-soja-em-cerca-de-60>>. Acesso em: 25 jan. 2013.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11 p. (Special Report, 80).

FIETZ, C.R.; RANGEL, M.A.S. Época de semeadura da soja para a região de Dourados –MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 666-672, 2008.

FIETZ, C.R.; URCHER, M.A. Deficiência hídrica da cultura da soja na região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 262-265, 2002.

FIGUEIREDO, M.G.; FRIZZONE, J.A.; PITELLI, M.M.; REZENDE, R. Lâmina ótima de irrigação do feijoeiro, com restrição de água, em função do nível de aversão ao risco do produtor. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 1, p. 81-87, 2008.

GAVA, R. **Evaporação da água do solo sob diferentes taxas de cobertura com resíduos vegetais**. 2010. 47 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

GOMES, P. **A soja**. 5. ed. São Paulo: Nobel, 1990. 149 p.
HAMAWAKI, O.T.; POLIZEL, A.C.; JULIATTI, F.C.; NAMAWAKI, R.L.; BRUNETTA, P. UFUS-Imperial: nova cultivar de soja para o Estado do Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 137-139, 2007.

HERNANDEZ, F.B.T. **Manejo da irrigação**. Disponível em:
<<http://www.agr.feis.unesp.br/irrigacao.html>>. Acesso: 10 jan. 2011.

KASTER, M.; FARIAS, J.R.B. Regionalização dos testes de VCU – Valor de Cultivo e uso de cultivares de soja – Terceira Aproximação. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL, n. 37, 2011, Londrina. **Resumos...** Londrina: EMBRAPA SOJA, 2011. p. 231-235.

KUSS, R.C.R. **Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja**. 2006. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

KUSS, R.C.R.; KÖNIG, O.; DUTRA, L.M.C.; BELLÉ, R.A.; ROGGIA, S.; STURMER, G.R. Populações de plantas e estratégias de manejo de irrigação na cultura da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1133-1137, 2008.

MANOSSO, F.C. A produtividade de soja, trigo e milho e suas relações com a precipitação pluviométrica no município de Apucarana-PR no período de 1968 a 2002. **Geografia**, Londrina, v.14, n.1, p. 87-98, jan./jun. 2005

MANTOVANI, E.C.; COSTA, L.C.; LEAL, B.G. SISDA – Sistema de suporte a decisão agrícola. In: CONGRESSO DE INFORMÁTICA APLICADA À AGROPECUÁRIA E AGROINDÚSTRIA, 1.; WORKSHOP ON SUPPLY CHAIN MANAGEMENT IN AGRIBUSINESS, 1997, Belo Horizonte. **Agrosoft 97**. Juiz de Fora: Softex- Agrosoft, 1997. 1 CD-ROM.

MARTIN, T.N.; DUTRA, L.M.C.; JAUER, A.; STORCK, L.; ZABOT, L.; UHRY, D.; SANTI, A.L.; STEFANELO, C.; LUCCA FILHO, O.A. Tamanho ótimo de parcela e número de repetições em soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 271-276, 2005.

MOTA, F.S. da. Condições climáticas e produção de soja no sul do Brasil. In: VERNETTI, F.J. (Coord.). **Soja**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. p. 91-126.

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

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A.L.; FARIAS, J.R.B. Estresses de ordem ecofisiológica. In: BONATO, E.R. (Ed.) **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. p. 45-65.

NOGUEIRA, A.D.S.S.; NAGAI, V. Deficiência hídrica simulada nos diferentes estádios de desenvolvimento de um cultivar precoce de soja. **Bragantia**, Campinas, v. 47, p. 9-14, 1988.

PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; McMAHON, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, Delft, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia**: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B. do; SILVA, A.A. da; COSTA, L.C. Desenvolvimento foliar das culturas da soja e do feijão e de plantas daninhas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 207-211, 2003

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; THOMPSON, H.E.; BENSON, G.O. **How a soybean plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1997. 20 p. (Special Report, 53).

RODRIGUES, O.; DIDONET, A.D.; LHAMBY, J.C.B.; BERTAGNOLLI, P.F.; LUZ, J.A. da. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 431-437, 2001.

ROMANO, N.; HOPMANS, J.W.; DANE, J.H. Suction table. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4: Physical methods, p. 692-698.

SAAD, A.M. **O déficit de irrigação como estratégia de manejo da água em feijoeiro**. 1996. 147 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

SANTOS, J.B. do; PROCÓPIO, S.O.; SILVA, A.A. da; COSTA, L.C. Captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 1, p. 147-153, 2003.

UNITED STATES. Department of Agriculture. **A produção mundial de soja na safra 2008/2009**. Disponível em: <<http://www.usdabrazil.org.br/home/>>. Acesso em: 20 nov. 2010.

XAVIER, A.A.P. **Comportamento da cultura da soja em função dos resíduos culturais, mobilização do solo e irrigação, em semeadura direta**. 2005. 100 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALLEN, R.G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. Reston, v. 112, n. 4, p. 348-368, 1986.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A. MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 596 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

EMBRAPA SOJA. **Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil**. Londrina, 1999. 226 p.

FRIZZONE, J.A. **Análise de decisão econômica em irrigação**. Piracicaba: ESALQ, LER, 2005. 371 p. (Série didática, 17).

FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R.; FREITAS, P.S.L. de. **Irrigação por aspersão**. Maringá: EDUEM, 2011. 271 p.

FRIZZONE, J.A.; FREITAS, P.S.L. de; REZENDE, R.; FARIA, M.A. de. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: EDUEM, 2012. 271 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <<http://www1.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa>>. Acesso em: 01 jan. 2010.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Análise de variância das variáveis da Safra 1

CV	GL	SQ	QM	F _{Calc.}	F _{Tab. 0,05}	F _{Tab. 0,01}
----- Altura de Inserção do Primeiro Legume -----						
Blocos	3	42,602	14,201	1,717	2,92 ^{ns}	4,51 ^{ns}
Tratamentos	10	193,619	19,362	2,337	2,16*	2,98 ^{ns}
Erro	30	249,630	8,321			
Total	43	485,852				
----- Altura total de Plantas-----						
Blocos	3	104,272	34,757	0,525	2,92 ^{ns}	4,51 ^{ns}
Tratamentos	10	1541,350	154,135	2,328	2,16*	2,98 ^{ns}
Erro	30	1986,373	66,212			
Total	43	3631,995				
----- Número de Vagens por Planta-----						
Blocos	3	67,671	22,557	3,083	2,92*	4,51 ^{ns}
Tratamentos	10	302,465	30,247	4,134	2,16*	2,98**
Erro	30	219,478	7,316			
Total	43	589,614				
----- Número de Grãos por Planta-----						
Blocos	3	353,599	117,866	2,272	2,92 ^{ns}	4,51 ^{ns}
Tratamentos	10	2530,865	253,086	4,878	2,16*	2,98**
Erro	30	1556,524	51,884			
Total	43	4440,988				
----- Porcentagem de Abortamento-----						
Blocos	3	19,008	6,336	0,233	2,92 ^{ns}	4,51 ^{ns}
Tratamentos	10	248,305	24,831	0,911	2,16 ^{ns}	2,98 ^{ns}
Erro	30	817,522	27,251			
Total	43	1084,835				
----- Diâmetro de Grãos-----						
Blocos	3	0,330	0,110	1,470	2,92 ^{ns}	4,51 ^{ns}
Tratamentos	10	2,000	0,200	2,673	2,16*	2,98 ^{ns}
Erro	30	2,245	0,075			
Total	43	4,575				
----- Peso de 100 grãos-----						
Blocos	3	13,144	4,381	2,539	2,92 ^{ns}	4,51 ^{ns}
Tratamentos	10	64,588	6,459	3,743	2,16*	2,98**
Erro	30	51,761	1,725			
Total	43	129,493				
----- Produtividade-----						
Blocos	3	1418802,011	472934,004	3,200	2,92*	4,51 ^{ns}
Tratamentos	10	7956700,582	795670,058	5,384	2,16*	2,98**
Erro	30	4433225,719	147774,191			
Total	43	13808728,312				

CV – Fator de Variação; GL – Grau de Liberdade; SQ – Soma de Quadrados dos Desvios; QM – Quadrado Médios dos Desvios; F_{Calc.} – F calculado; F_{Tab.0,05} – F tabelado para 0,05%; F_{Tab.0,01} – F tabelado para 0,01%; *Significativo a 0,05% de probabilidade pelo teste F; **Significativo a 0,01% de probabilidade pelo teste F; ^{ns}Não significativo; CV Coeficiente de Variação

APÊNDICE B - Valores das variáveis amostradas por tratamento e repetição na Safra 1

Altura de Inserção do Primeiro Legume

(continua)

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV1	30,3	30,4	34,6	33,2	128,5	32,1
2	D1S1V1	25,6	29,6	29,7	29,3	114,2	28,6
3	D1S2V1	33,4	27,7	32,7	36,3	130,1	32,5
4	D1S3V1	37,8	31,4	34,7	31,8	135,7	33,9
5	D1S4V1	36,3	36,4	38,4	37,1	148,2	37,1
6	D1CTV1	38,3	34,6	35,8	33,4	142,1	35,5
7	E1S1V1	38,5	36,6	31,3	32,2	138,6	34,7
8	E1S2V1	31,4	30,0	29,1	36,8	127,3	31,8
9	E1S3V1	32,6	33,8	38,4	28,9	133,7	33,4
10	E1S4V1	33,5	29,0	34,9	37,2	134,6	33,7
11	E1CTV1	35,3	29,0	35,3	36,1	135,7	33,9
12	F1CTV1	-	-	-	-	-	-
Soma		373,0	348,5	374,9	372,3	1468,7	33,4

Altura total de Plantas

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV1	102,7	120,1	106,1	117,3	446,2	111,6
2	D1S1V1	121,6	119,3	100,9	104,4	446,2	111,6
3	D1S2V1	105,6	110,6	113,8	116,1	446,1	111,5
4	D1S3V1	106,4	109,3	121,3	103,7	440,7	110,2
5	D1S4V1	118,7	123,4	97,9	126,8	466,8	116,7
6	D1CTV1	105,1	108,6	104,2	101,4	419,3	104,8
7	E1S1V1	123,1	130,2	134,9	117,7	505,9	126,5
8	E1S2V1	119,3	129,9	125,6	119,5	494,3	123,6
9	E1S3V1	116,3	100,5	115,4	113,4	445,6	111,4
10	E1S4V1	122,0	115,9	114,3	114,9	467,1	116,8
11	E1CTV1	129,0	114,6	115,6	103,6	462,8	115,7
12	F1CTV1	-	-	-	-	-	-
Soma		1269,8	1282,4	1250,0	1238,8	5041,0	114,6

Número de Vagens por Planta

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV1	27,4	32,3	26,8	32,5	118,9	29,7
2	D1S1V1	24,0	25,9	22,8	29,0	101,8	25,4
3	D1S2V1	23,7	25,6	23,2	27,2	99,7	24,9
4	D1S3V1	25,7	26,7	26,8	23,2	102,4	25,6
5	D1S4V1	29,9	28,4	24,8	31,8	114,9	28,7
6	D1CTV1	23,4	21,8	20,2	25,4	90,8	22,7
7	E1S1V1	35,1	28,3	28,6	31,2	123,3	30,8
8	E1S2V1	32,9	34,8	27,1	28,0	122,7	30,7
9	E1S3V1	32,8	29,9	26,1	23,4	112,2	28,1
10	E1S4V1	31,3	27,9	30,5	32,8	122,5	30,6
11	E1CTV1	34,3	27,3	26,8	26,8	115,1	28,8
12	F1CTV1	-	-	-	-	-	-
Soma		320,5	308,9	283,7	311,2	1224,2	27,8

APÊNDICE B – Valores das variáveis amostradas por tratamento e repetição na Safra 1

Número de Grãos por Planta

(continuação)

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV1	56,5	75,0	55,8	68,3	255,5	63,9
2	D1S1V1	48,2	50,8	47,2	55,5	201,7	50,4
3	D1S2V1	47,6	53,0	51,2	57,1	208,8	52,2
4	D1S3V1	39,7	54,2	50,1	49,3	193,3	48,3
5	D1S4V1	65,2	58,3	51,0	63,7	238,2	59,5
6	D1CTV1	46,4	38,5	38,7	40,2	163,9	41,0
7	E1S1V1	73,9	61,8	57,9	65,4	259,0	64,8
8	E1S2V1	72,6	67,2	55,0	60,9	255,6	63,9
9	E1S3V1	75,3	58,7	57,1	45,9	237,0	59,3
10	E1S4V1	61,9	59,9	64,9	67,2	253,9	63,5
11	E1CTV1	80,9	57,8	51,9	57,9	248,6	62,1
12	F1CTV1	-	-	-	-	-	-
Soma		668,1	635,2	580,9	631,3	2515,6	57,2

Porcentagem de Abortamento

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV1	20,5	18,8	21,8	20,8	81,9	20,5
2	D1S1V1	24,5	22,8	14,2	24,7	86,2	21,6
3	D1S2V1	22,0	21,8	18,1	16,7	78,6	19,7
4	D1S3V1	41,1	25,9	28,8	20,9	116,7	29,2
5	D1S4V1	21,1	24,7	20,1	28,7	94,6	23,7
6	D1CTV1	17,7	24,3	16,5	31,0	89,5	22,4
7	E1S1V1	22,5	20,8	24,8	21,1	89,2	22,3
8	E1S2V1	18,5	27,3	24,6	19,4	89,8	22,5
9	E1S3V1	16,6	27,6	21,7	30,6	96,5	24,1
10	E1S4V1	25,6	21,1	19,9	24,4	91,0	22,8
11	E1CTV1	14,7	21,5	30,6	19,4	86,2	21,6
12	F1CTV1	-	-	-	-	-	-
Soma		244,8	256,6	241,1	257,7	1000,2	22,7

Diâmetro de Grãos

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV1	6,1	6,1	6,1	5,8	24,1	6,0
2	D1S1V1	6,3	6,2	6,0	6,2	24,7	6,2
3	D1S2V1	6,2	6,3	6,1	6,1	24,7	6,2
4	D1S3V1	5,4	5,5	5,5	5,9	22,4	5,6
5	D1S4V1	5,9	6,1	5,9	6,2	24,1	6,0
6	D1CTV1	6,1	5,8	4,3	6,0	22,2	5,5
7	E1S1V1	6,0	6,0	6,2	6,1	24,3	6,1
8	E1S2V1	6,2	6,2	6,2	6,0	24,5	6,1
9	E1S3V1	6,1	6,2	6,0	5,8	24,2	6,0
10	E1S4V1	6,4	6,2	6,1	6,1	24,8	6,2
11	E1CTV1	6,2	6,0	6,0	6,0	24,2	6,0
12	F1CTV1	-	-	-	-	-	-
Soma		66,9	66,6	64,4	66,2	264,1	6,0

APÊNDICE B – Valores das variáveis amostradas por tratamento e repetição na Safra 1

Peso de 100 grãos

(conclusão)

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV1	12,7	13,3	12,6	11,0	49,6	12,4
2	D1S1V1	13,7	13,9	12,1	13,8	53,4	13,4
3	D1S2V1	13,2	14,1	13,1	12,8	53,2	13,3
4	D1S3V1	8,7	9,3	9,8	11,2	39,1	9,8
5	D1S4V1	14,3	12,8	12,4	13,2	52,7	13,2
6	D1CTV1	13,1	11,1	4,5	11,4	40,1	10,0
7	E1S1V1	12,3	12,5	13,2	12,7	50,8	12,7
8	E1S2V1	13,5	13,2	13,0	12,0	51,7	12,9
9	E1S3V1	13,5	13,7	11,7	11,0	49,8	12,5
10	E1S4V1	14,7	14,0	12,3	12,6	53,5	13,4
11	E1CTV1	12,7	12,3	12,1	12,4	49,4	12,4
12	F1CTV1	-	-	-	-	-	-
Soma		142,4	140,0	126,9	134,0	543,4	12,3

Produtividade

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV1	2770,3	3223,9	2555,7	2582,0	11131,9	2783,0
2	D1S1V1	2268,1	2571,9	1968,4	2788,5	9596,9	2399,2
3	D1S2V1	2288,4	2723,7	2448,3	2661,0	10121,4	2530,3
4	D1S3V1	1263,7	1840,8	1796,3	2012,9	6913,7	1728,4
5	D1S4V1	2841,2	2867,5	2183,0	3051,8	10943,6	2735,9
6	D1CTV1	2217,5	1468,2	1500,6	1674,7	6861,0	1715,3
7	E1S1V1	3325,2	2814,9	2792,6	3033,6	11966,3	2991,6
8	E1S2V1	3177,4	3051,8	2458,5	2812,8	11500,5	2875,1
9	E1S3V1	3487,2	2926,3	2438,2	1735,5	10587,2	2646,8
10	E1S4V1	2758,2	3047,8	2580,0	3088,3	11474,2	2868,5
11	E1CTV1	3942,8	2590,1	2290,4	2606,3	11429,6	2857,4
12	F1CTV1	-	-	-	-	-	-
Soma		30339,9	29126,9	25011,9	28047,5	112526,1	2557,4

APÊNDICE C – Análise de variância das variáveis da Safra 2

CV	GL	SQ	QM	F _{Calc.}	F _{Tab. 0,05}	F _{Tab. 0,01}
----- Altura de Inserção do Primeiro Legume -----						
Blocos	3	19,220	6,407	0,999	2,90 ^{ns}	4,45 ^{ns}
Tratamentos	11	76,970	6,997	1,092	2,10 ^{ns}	2,85 ^{ns}
Erro	33	211,530	6,410			
Total	47	307,720				
----- Altura total de Plantas-----						
Blocos	3	927,668	309,223	2,918	2,90 [*]	4,45 ^{ns}
Tratamentos	11	6370,068	579,097	5,465	2,10 [*]	2,85 ^{**}
Erro	33	3496,917	105,967			
Total	47	10794,652				
----- Número de Vagens por Planta-----						
Blocos	3	119,903	39,967	2,037	2,90 ^{ns}	4,45 ^{ns}
Tratamentos	11	1755,908	159,628	8,135	2,10 [*]	2,85 [*]
Erro	33	647,502	19,621			
Total	47	2523,312				
----- Número de Grãos por Planta-----						
Blocos	3	380,222	126,741	1,188	2,90 ^{ns}	4,45 ^{ns}
Tratamentos	11	7554,081	686,735	6,437	2,10 [*]	2,85 ^{**}
Erro	33	3520,500	106,682			
Total	47	11454,803				
----- Porcentagem de Abortamento-----						
Blocos	3	210,514	70,171	3,029	2,90 [*]	4,45 ^{ns}
Tratamentos	11	486,563	44,233	1,909	2,10 ^{ns}	2,85 ^{ns}
Erro	33	764,616	23,170			
Total	47	1461,693				
----- Diâmetro de Grãos-----						
Blocos	3	1,447	0,482	2,037	2,90 ^{ns}	4,45 ^{ns}
Tratamentos	11	3,608	0,328	1,385	2,10 ^{ns}	2,85 ^{ns}
Erro	33	7,814	0,237			
Total	47	12,869				
----- Peso de 100 grãos-----						
Blocos	3	34,317	11,439	10,189	2,90 [*]	4,45 ^{**}
Tratamentos	11	41,224	3,748	3,338	2,10 [*]	2,85 ^{**}
Erro	33	37,047	1,123			
Total	47	112,589				
----- Produtividade-----						
Blocos	3	1549260,029	516420,010	1,544	2,90 ^{ns}	4,45 ^{ns}
Tratamentos	11	23275424,029	2115947,639	6,324	2,10 [*]	2,85 ^{**}
Erro	33	11040840,397	334570,921			
Total	47	35865524,455				

CV – Fator de Variação; GL – Grau de Liberdade; SQ – Soma de Quadrados dos Desvios; QM – Quadrado Médios dos Desvios; F_{Calc.} – F calculado; F_{Tab.0,05} – F tabelado para 0,05%; F_{Tab.0,01} – F tabelado para 0,01%; *Significativo a 0,05% de probabilidade pelo teste F; **Significativo a 0,01% de probabilidade pelo teste F; ^{ns}Não significativo; CV Coeficiente de Variação

APÊNDICE D - Valores das variáveis amostradas por tratamento e repetição na Safra 2

Altura de Inserção do Primeiro Legume

(continua)

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV2	13,0	12,8	10,6	10,1	46,4	11,6
2	D1S1V2	13,1	13,4	12,4	15,2	54,2	13,6
3	D1S2V2	9,3	11,4	14,4	5,8	40,9	10,2
4	D1S3V2	17,6	14,4	12,9	12,4	57,3	14,3
5	D1S4V2	10,1	14,9	9,3	15,9	50,1	12,5
6	D1CTV2	7,5	13,1	13,6	16,1	50,3	12,6
7	D2S1V2	14,6	9,9	9,2	11,0	44,7	11,2
8	D2S2V2	13,8	16,5	12,2	10,8	53,3	13,3
9	D2S3V2	12,1	13,7	17,7	15,0	58,5	14,6
10	D2S4V2	13,1	16,2	9,6	11,1	50,0	12,5
11	D2CTV2	11,4	15,6	10,8	13,1	50,8	12,7
12	E1CTV2	11,9	11,3	10,5	10,9	44,6	11,2
Soma		147,7	163,1	143,2	147,3	601,4	12,5

Altura total de Plantas

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV2	106,1	116,7	117,8	100,6	441,2	110,3
2	D1S1V2	109,7	75,4	75,0	88,4	348,5	87,1
3	D1S2V2	83,9	108,6	124,1	81,5	398,1	99,5
4	D1S3V2	105,1	99,7	104,7	103,9	413,4	103,4
5	D1S4V2	106,3	109,3	82,3	107,8	405,7	101,4
6	D1CTV2	84,7	87,5	91,4	83,8	347,4	86,9
7	D2S1V2	107,4	104,5	96,5	90,1	398,5	99,6
8	D2S2V2	96,9	89,4	86,5	77,6	350,4	87,6
9	D2S3V2	110,9	111,4	110,1	98,1	430,5	107,6
10	D2S4V2	115,9	120,1	102,8	89,7	428,5	107,1
11	D2CTV2	81,0	67,1	74,8	62,5	285,4	71,4
12	E1CTV2	103,7	122,8	116,5	99,6	442,6	110,7
Soma		1211,6	1212,5	1182,5	1083,6	4690,2	97,7

Número de Vagens por Planta

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV2	36,2	32,6	35,3	35,8	139,9	35,0
2	D1S1V2	37,6	28,0	17,6	20,5	103,7	25,9
3	D1S2V2	24,4	36,6	42,9	27,6	131,5	32,9
4	D1S3V2	30,4	30,6	31,6	27,6	120,2	30,1
5	D1S4V2	40,4	32,5	30,0	34,9	137,8	34,5
6	D1CTV2	19,5	24,4	23,6	21,7	89,2	22,3
7	D2S1V2	28,2	25,9	26,5	27,9	108,5	27,1
8	D2S2V2	28,8	23,0	21,8	21,9	95,5	23,9
9	D2S3V2	29,5	26,6	28,4	29,1	113,6	28,4
10	D2S4V2	37,9	35,5	29,2	23,6	126,2	31,6
11	D2CTV2	21,4	14,9	14,4	14,8	65,5	16,4
12	E1CTV2	42,0	39,9	35,4	40,1	157,4	39,4
Soma		376,3	350,5	336,7	325,5	1389,0	28,9

APÊNDICE D - Valores das variáveis amostradas por tratamento e repetição na Safra 2

Número de Grãos por Planta

(continuação)

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV2	66,8	62,1	70,8	68,3	268,0	67,0
2	D1S1V2	68,7	51,7	33,2	38,1	191,7	47,9
3	D1S2V2	35,7	70,4	85,1	47,0	238,2	59,6
4	D1S3V2	57,7	55,6	63,2	52,3	228,8	57,2
5	D1S4V2	77,6	63,6	53,3	69,3	263,8	66,0
6	D1CTV2	34,5	47,3	43,2	43,0	168,0	42,0
7	D2S1V2	57,9	49,1	51,5	52,1	210,6	52,7
8	D2S2V2	54,6	44,8	43,5	38,5	181,4	45,4
9	D2S3V2	56,0	47,2	55,0	51,2	209,4	52,4
10	D2S4V2	71,9	77,8	55,0	46,3	251,0	62,8
11	D2CTV2	35,9	23,7	23,6	25,7	108,9	27,2
12	E1CTV2	84,4	75,9	66,1	77,9	304,3	76,1
Soma		701,7	669,2	643,5	609,7	2624,1	54,7

Porcentagem de Abortamento

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV2	10,5	7,8	2,7	7,2	28,2	7,1
2	D1S1V2	10,0	9,0	8,9	4,3	32,2	8,1
3	D1S2V2	35,9	6,9	2,4	5,4	50,6	12,7
4	D1S3V2	9,0	10,9	2,1	4,4	26,4	6,6
5	D1S4V2	9,4	8,0	7,3	4,8	29,5	7,4
6	D1CTV2	10,0	7,2	10,3	5,0	32,5	8,1
7	D2S1V2	3,5	5,5	4,4	6,1	19,5	4,9
8	D2S2V2	10,8	6,7	6,0	6,2	29,7	7,4
9	D2S3V2	9,5	14,6	10,6	12,0	46,7	11,7
10	D2S4V2	9,6	0,0	5,5	4,0	19,1	4,8
11	D2CTV2	16,1	18,8	12,6	12,2	59,7	14,9
12	E1CTV2	4,1	3,0	5,5	3,9	16,5	4,1
Soma		138,4	98,4	78,3	75,5	390,6	8,1

Diâmetro de Grãos

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV2	6,3	6,2	6,4	6,5	25,4	6,4
2	D1S1V2	6,5	6,2	6,8	6,6	26,1	6,5
3	D1S2V2	6,1	6,2	6,4	6,6	25,2	6,3
4	D1S3V2	6,2	6,3	5,9	6,6	25,0	6,2
5	D1S4V2	6,3	4,7	5,7	6,4	23,1	5,8
6	D1CTV2	6,3	5,9	6,2	8,6	27,0	6,8
7	D2S1V2	6,0	5,6	5,8	6,2	23,7	5,9
8	D2S2V2	6,3	6,2	5,9	6,3	24,8	6,2
9	D2S3V2	5,8	5,7	6,0	6,0	23,4	5,9
10	D2S4V2	6,3	6,1	6,0	6,4	24,7	6,2
11	D2CTV2	5,6	5,9	6,1	6,2	23,9	6,0
12	E1CTV2	6,5	6,4	6,3	4,8	24,1	6,0
Soma		74,3	71,4	73,5	77,2	296,4	6,2

APÊNDICE D - Valores das variáveis amostradas por tratamento e repetição na Safra 2

Peso de 100 grãos

(conclusão)

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV2	15,1	14,3	14,3	14,8	58,6	14,6
2	D1S1V2	16,0	13,3	17,1	16,7	63,0	15,8
3	D1S2V2	14,8	13,9	14,7	16,3	59,6	14,9
4	D1S3V2	13,8	14,8	12,1	16,1	56,8	14,2
5	D1S4V2	14,2	11,3	11,5	15,5	52,6	13,1
6	D1CTV2	15,8	12,4	14,0	15,7	57,9	14,5
7	D2S1V2	14,1	12,5	12,4	15,2	54,3	13,6
8	D2S2V2	14,1	15,3	13,4	15,4	58,1	14,5
9	D2S3V2	12,6	11,3	12,7	12,6	49,2	12,3
10	D2S4V2	14,3	12,9	12,0	15,8	55,1	13,8
11	D2CTV2	13,0	11,0	15,2	14,5	53,7	13,4
12	E1CTV2	15,9	14,8	14,6	15,9	61,1	15,3
Soma		173,6	157,8	163,9	184,6	679,9	14,2

Produtividade

n°	Tratamentos	Repetições				Soma	Média
		1	2	3	4		
1	IPCTV2	3538,1	3121,3	3568,3	3309,6	13537,3	3384,3
2	D1S1V2	3862,1	2413,2	1993,8	2234,9	10503,9	2626,0
3	D1S2V2	1855,7	3427,6	4381,8	2506,1	12171,2	3042,8
4	D1S3V2	2792,3	2892,8	2310,2	2950,5	10945,8	2736,5
5	D1S4V2	3879,6	2528,7	2159,5	3781,7	12349,5	3087,4
6	D1CTV2	1775,3	2069,1	2119,4	1863,2	7827,1	1956,8
7	D2S1V2	2669,3	2003,8	2091,7	2787,3	9552,2	2388,0
8	D2S2V2	2696,9	2413,2	1895,9	2079,2	9085,1	2271,3
9	D2S3V2	2488,5	1883,3	2270,0	2270,0	8911,8	2228,0
10	D2S4V2	3618,5	3518,0	2159,5	2578,9	11874,9	2968,7
11	D2CTV2	1408,7	914,0	1265,6	1310,8	4899,1	1224,8
12	E1CTV2	4710,8	3947,4	3141,4	4349,2	16148,8	4037,2
Soma		35295,8	31132,4	29357,1	32021,4	127806,7	2662,6

ANEXOS

ANEXO A – Análise química composta do solo

Laboratório Agrotécnico Piracicaba Ltda

Interessado:	JOSE ANTONIO FRIZZONE
Propriedade:	
Procedência:	
Data de Recebimento da Amostra:	18/10/2011
Data de Envio do Resultado:	25/10/2011

ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

Laboratório	Interessado	pH	M.O	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	Soma	CTC	Sat. bases	Sat. Al	S
		CaCl ₂		resina						bases				SO ₄
										S.B.				
			g dm ⁻³	mg dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³				V%	m%	mg dm ⁻³
19468	AM.1	5,0	14	4	1,2	17	9	25	1	27	52	52	4	12

ANEXO B – Análise química de solo por tratamento

Laboratório Agrotécnico Piracicaba Ltda

Interessado: JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

Propriedade:

Procedência:

Data de Recebimento da Amostra: 19/04/2012

Data de Envio do Resultado: 27/04/2012

ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

Laboratório	Interessado	pH CaCl ₂	M.O	P resina	K	Ca	Mg	H+Al	Al	Soma bases S.B.	CTC	Sat. bases	Sat. Al	S SO ₄
4951	1	4,8	9	4	0,5	16	6	22	2	23	45	51	8	12
4952	2	4,7	9	4	0,5	15	6	25	1	22	47	46	4	22
4953	3	4,8	9	4	0,3	17	7	22	1	24	46	52	4	19
4954	4	4,8	9	5	0,3	15	6	22	1	21	43	49	4	19
4955	5	4,8	11	4	0,3	17	6	25	2	23	48	48	8	7
4956	6	4,7	11	4	0,5	15	6	22	1	22	44	49	4	19
4957	7	4,7	9	4	0,6	16	6	22	1	23	45	51	4	21
4958	8	4,9	9	5	0,5	17	6	22	1	24	46	52	4	35
4959	9	4,8	11	4	0,5	16	6	22	1	23	45	51	4	15
4960	10	4,8	11	5	0,5	16	6	22	0	23	45	51	0	19
4961	11	5,0	9	4	0,5	18	6	22	0	25	47	53	0	15
4962	12	4,7	11	5	0,5	15	5	25	2	21	46	45	9	15

ANEXO C – Fases de desenvolvimento da soja proposta por Fehr e Caviness (1977), com detalhamento proposto por Ritchie et al. (1997)

Período	Fase	Descrição; ⁴ Característica relacionada a produtividade
Vegetativo	VE	Cotilédones acima da superfície do solo;
	VC	Cotilédones completamente abertos; A perda precoce dos dois cotilédones pode resultar em perdas de até 9% na produtividade final de grãos.
	V1	Folhas unifolioladas completamente desenvolvida; Fotossíntese das folhas e a absorção de água e nutrientes pelas raízes já são capazes de sustentá-la.
	V2	Primeira folha trifoliolada completamente aberta; Início da fixação biológica de nitrogênio e intenso crescimento radicular lateral até fase V5.
	V3	Segunda folha trifoliolada completamente aberta.
	Vn	Ante-enésima folha trifoliolada completamente aberta.
Reprodutivo	R1	Início do florescimento – Uma flor aberta em qualquer nó do caule; Elevada taxa de crescimento vertical das raízes até a fase R5.
	R2	Florescimento pleno – Uma flor aberta em um dos 2 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida; Máximo acúmulo de nutrientes nos órgãos vegetativos e com início do acúmulo nos órgãos reprodutivos, associado com o aumento da taxa de fixação biológica de nitrogênio.
	R3	Início da formação do legume – Legume com 5 mm de comprimento em um dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida; Crucial no estabelecimento do número de legumes por plantas (principal componente de produtividade).
	R4	Legume completamente desenvolvido – Legume com 2 cm de comprimento em um dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida; Intenso crescimento dos legumes e início do desenvolvimento dos grãos.
	R5	Início do enchimento dos grãos – Grãos com 3 mm de comprimento no legume em um dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida; Intenso crescimento de grãos com redistribuição de nutrientes e matéria seca e quando sob déficit hídrico ocorre redução drástica de produtividade.
	R5.1 ³	Grãos perceptíveis ao tato a 10% da granação.
	R5.2 ³	Granação de 11% a 25%.
	R5.3 ⁴	Granação de 26% a 50%.
	R5.4 ³	Granação de 51% a 75%.
	R5.5 ³	Granação de 76% a 100%.
Reprodutivo	R6	Grãos cheios – legume contendo grãos verdes, preenchendo a cavidade do legume de um dos últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida; Legume com máximo peso total e máximo acúmulo de nutrientes em toda a planta.
	R7	Início da maturação – um legume normal no caule com coloração madura; Grãos prontos como semente e com 60% de umidade, sendo que o ataque de percevejos e excesso hídrico afetam a produtividade.
	R8	Maturação plena – 95% das vagens com coloração madura; Necessário haver redução de umidade do grão para a realização da colheita.