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

**Caracterização de respostas morfológicas e fisiológicas de plantas de soja
submetidas a estresse hídrico**

Guilherme Felisberto

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2015**

**Guilherme Felisberto
Engenheiro Agrônomo**

**Caracterização de respostas morfológicas e fisiológicas de plantas de soja
submetidas a estresse hídrico**

Orientador:
Prof. Dr. **DURVAL DOURADO NETO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2015**

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

Felisberto, Guilherme

Caracterização de respostas morfológicas e fisiológicas de plantas de soja submetidas a estresse hídrico / Guilherme Felisberto. - - Piracicaba, 2015.
89 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. *Glycine max* (L.) Merrill 2. Potencial matricial do solo 3. Conteúdo relativo de água na folha 4. Prolina 5. Tolerância a deficiência hídrica I. Título

CDD 633.34
F315c

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

Aos meus pais, Edino Aparecido Felisberto e Elisabete Frutuoso Felisberto, pelo amor, carinho, compreensão, confiança, apoio e por, através da luta diária de vocês, me oferecerem a oportunidade de seguir em frente nos estudos.

Com todo amor, respeito, admiração e gratidão,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e acima de todas as coisas, agradeço a Deus por sempre me abençoar com graças diárias e pela vida, que a mim, o Senhor proporciona, concedendo-me saúde, uma família abençoada, amigos inestimáveis e oportunidades.

Nem com todas as palavras do dicionário seria capaz, mas gostaria aqui de agradecer meu pai Edino e minha mãe Elisabete, por absolutamente tudo. Vocês são meus pilares, meus exemplos de luta e dedicação diária, meu porto seguro, vocês são tudo para mim. Amo vocês.

Gostaria de agradecer, também de forma especial, minha vó Lourdes e meu vô Antônio, pelos ensinamentos de educação e caráter passados a mim. Amo muito vocês!

Agradeço, de maneira muito especial, meu irmão Gustavo e toda minha família (tios, tias, primos e primas), que sempre me apoiaram e me deram forças.

Agradeço também o professor, orientador e amigo Prof. Dr. Durval Dourado Neto, por todo o apoio, amizade, orientação, conselhos, confiança, respeito e conhecimentos transmitidos.

Agradeço também a todos do GFASP (Grupo de Fisiologia Aplicada e Sistemas de Produção): Ana Maria Marson, André Urano, Aline Alessi, Ana Scavone, Carlos Hertz, Érika Okamura, Giovane Assoni, Giovane Giorgeti, Giovane Papa, Guilherme Leite, Júlia Soave, Kauê Monteiro, Leonardo Papadoli, Mila Pessotto, Murilo Nadaletto e Thiago Bonassi. Obrigado pela dedicação e apoio no trabalho e por todos os momentos de descontração e, acima de tudo, muito obrigado pela amizade de cada um de vocês. Que juntos possamos ainda colher muitos frutos de nossa parceria e trabalho duro.

Meu grande amigo Felipe, muito obrigado, acima de tudo, pela amizade e companheirismo, também por toda a disposição e ajuda diária, nos tropeços e nas conquistas!

Com enorme carinho, gostaria de agradecer meus amigos: Adilson, Ananias, Antônio Neto, Antônio Pereira, César, Claudinei, Cláudio, Daniel, David, Edson Moraes, Erreinaldo, Helena, João Rodrigues, José dos Reis, Osvaldo, Rodrigo, Horst, Aparecido, Tino e Wilson, que tanto me ajudaram na realização diária do trabalho e também pelas inúmeras conversas e risadas.

Pessoal do Laboratório Multiusuário em Produção Vegetal: Ana Paula Schwantes, André Fróes de Borja Reis, Bruno Lago, Clovis Piovesan, Felipe Brendler, José Ari Formiga, Karla Vilaça Martins, Leonardo Soares, Pedro Paulo Teixeira, Rafaela Migliavacca, Sérgio

Zanon, Silas Maciel, Tiago Tezotto, Renan, Jérssica e Walquíria: muito obrigado por toda a vivência, apoio (dentro e fora das questões acadêmicas).

Queria agradecer meu amigo Robinho, do laboratório de física do solo (Cena), pela ajuda inicial em meu projeto.

Gostaria de agradecer também aos professores: Dr. Klaus Reichardt (Cena) e Dr. Quirijn de Jong van Lier (Cena), pela ajuda, valiosos conselhos e sugestões em minha pesquisa.

Agradeço, também carinhosamente, a Luciane, secretaria da PPG Fitotecnia, que tanto me ajudou desde o dia da minha matrícula. Muito obrigado pelo carinho e por todo o amor em que você ajuda a todos os alunos.

Gostaria de agradecer a CAPES, pelo auxílio financeiro para a realização do mestrado.

Também a todos meus amigos de São João da Boa Vista (SP) e Lavras (MG) (principalmente meus irmãos da República Berro Grosso), que para não esquecer de nenhum nome, não vou citá-los. Muito obrigado pelas, sempre calorosas, boas vindas e pela amizade que se perdura ao longo do tempo.

Gostaria de agradecer a todas as amigades que conquistei aqui em Piracicaba, de maneira especial aos irmãos da República Área 51, por me receberem e por estarem sempre presentes, nos momentos bons e ruins. Muito obrigado pelos momentos de descontração e divertimento, com certeza sem vocês, minha passagem por Piracicaba seria muito mais difícil.

“Conheça o mundo, mas nunca se esqueça do quintal da sua casa”.

Autor desconhecido

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS.....	21
1 INTRODUÇÃO	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 A cultura de soja.....	25
2.1.1 Características gerais	25
2.1.2 Características morfofisiológicas	27
2.2 Relações hídricas da planta de soja.....	28
2.3 Estresse, condutância estomática e fotossíntese.....	30
2.4 Alterações morfofisiológicas devido ao déficit hídrico	32
2.5 Sinalizações do estresse e alterações bioquímicas.....	35
3 MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1 Local e casa de vegetação.....	41
3.2 Cultivar, vaso, substrato, semeadura e manutenção da cultura.....	41
3.3 Curva de retenção de água no solo	43
3.3.1 Amostragem do substrato	43
3.3.2 Preparo das amostras laboratoriais	43
3.3.3 Instalação das amostras na câmara de Richards.....	43
3.3.4 Ajuste dos dados da curva de retenção	44
3.4 Tratamentos.....	44
3.5 Delineamento experimental e análises estatísticas	45
3.6 Parâmetros avaliados.....	45
3.6.1 Umidade do substrato	45
3.6.2 Potencial hídrico foliar	46
3.6.3 Conteúdo relativo de água na folha	46
3.6.4 Determinação dos teores de prolina livre nas folhas	47
3.6.5 Componentes de produção e a produção por planta.....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49

4.1	Curva de retenção de água	49
4.2	Umidade do substrato	50
4.3	Potencial hídrico foliar	52
2.1.	Conteúdo relativo de água nas folhas	53
4.4	Teor de prolina	55
4.5	Componentes de produção	57
4.5.1	Número de vagens abortadas	58
4.5.2	Número de vagens produtivas	59
4.5.3	Número total de vagens	60
4.5.4	Pegamento de vagens	61
4.5.5	Número de grãos por vagem	62
4.5.6	Número de grãos por planta	63
4.5.7	Massa de grãos	64
4.6	Produção por planta	65
4.7	Considerações finais	67
4.7.1	Estresse hídrico	67
4.7.2	Dinâmica de uso da água no sistema solo-planta-atmosfera	68
5	CONCLUSÕES	71
	REFERÊNCIAS	73
	ANEXOS	85

RESUMO

Caracterização de respostas morfológicas e fisiológicas de plantas de soja submetidas a estresse hídrico

A cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é muito importante mundialmente em função de seu uso na alimentação animal, como principal fonte de proteína e óleo, além de constituir a matéria prima básica para diversos setores da indústria. Sabe-se que a produtividade potencial de uma cultura é determinada por fatores genéticos e pelos seguintes atributos do ambiente de produção: temperatura, radiação solar, dióxido de carbono e fotoperíodo, sem restrição de água, nutrientes, plantas daninhas, pragas e doenças. A disponibilidade hídrica afeta o crescimento e desenvolvimento da cultura de soja, especialmente durante o período reprodutivo, fase de elevada atividade fisiológica. A deficiência hídrica é o principal fator limitante da produção mundial da cultura, que em sua maioria é cultivada em sistema de sequeiro em áreas com consideráveis riscos de ocorrência de *deficit* hídrico ao longo do ciclo da cultura. As plantas, ao longo do tempo, desenvolveram mecanismos para tolerar e/ou evitar os efeitos negativos desse estresse. O presente estudo teve como objetivo caracterizar esses mecanismos de tolerância associando-os ao potencial matricial do solo em processo de secagem. Foi avaliado a umidade gravimétrica e potencial matricial do solo, conteúdo relativo de água na folha, potencial hídrico foliar, prolina e caracteres relacionados à produção de plantas de soja, durante o período de enchimento de grãos, submetidas a três, seis, nove e doze dias sem irrigação, comparados com o controle irrigado diariamente. De acordo com o observado, os mecanismos de tolerância da soja à deficiência hídrica foram satisfatórios para a manutenção do conteúdo relativo de água e potencial hídrico foliar em níveis adequados até o valor de potencial matricial de água no solo de -0,8 atm, tendo a prolina papel importante nesse mecanismo. As avaliações hídricas, conteúdo relativo de água e potencial foliar se mostraram relacionados com a manutenção da produtividade de soja sob situação de deficiência hídrica, mostrando-se adequados para o estudo de tolerância de cultivares de soja à restrição hídrica.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill; Potencial matricial do solo; Conteúdo relativo de água na folha; Prolina; Tolerância a deficiência hídrica

ABSTRACT

Morphological and physiological characterization of soybean plants under water stress

Soybean crop (*Glycine max* (L.) Merrill) is very important worldwide because it is used in animal feeding, a source of protein and oil, and also raw material for many manufactured goods. It is known that a crop potential yield is determined by genetic factors and by the following production environment characteristics: temperature, solar radiation, carbon dioxide, photoperiod, water availability, nutrients, weeds, pests and diseases. Water availability affects soybean growth and development especially during the reproductive phase which has high physiological activity. Water deficit is a key factor on world's soybean production which is generally grown in dry land systems with considerable high risks of water deficit along soybean crop season. Plants have developed mechanisms over time to tolerate and/or avoid negative effects of this kind of stress. The present study had as the main goal to characterize these mechanisms of tolerance associating them with soil matric potential of a soil in a drying process. It was assessed the gravimetric humidity and soil matric potential, leaf relative water content, leaf water potential, proline and yield component of plants under three, six, nine and twelve days without irrigation during grain filling phase. In accordance with the observed, soybean water deficit tolerance mechanisms were enough to maintain leaf relative water content and leaf water potential at acceptable levels until soil matric potential were around -0.8 atm, which proline was a key factor in this mechanism. Leaf relative water content and leaf water potential showed to be related in maintaining soybean yield under water deficit and they may be used in studies of soybean tolerant cultivars to water restriction.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill; Soil matric potential; Leaf relative water content; Proline; Water deficit tolerance

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Comparativo entre as áreas nacionais de produção de soja e de condição hídrica geral destaque para a parcela da área produtiva sujeita a restrições por falta de chuva (região amarela no mapa inferior) (CONAB, 2015)26
- Figura 2 - Curva característica de retenção de água para o substrato utilizado: teor de água a base de massa (u , kg kg^{-1}) em função do potencial matricial (Ψ , cm). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015.....50
- Figura 3 - Valores relativos de umidades gravimétricas do substrato (UG, %) referentes aos tratamentos sob restrição hídrica (t, dias) (T_2 : 3 dias sem irrigação, T_3 : 6 dias sem irrigação, e T_4 : 9 dias sem irrigação) comparados ao controle (sem restrição hídrica) (T_1 : nenhum - 0 - dia sem irrigação) ($UG = 0,6308.t^2 - 14,395.t + 100,41 - R^2 = 0,9928$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 201552
- Figura 4 - Valores relativos de potenciais hídricos foliares (PHF, %) referentes aos tratamentos sob restrição hídrica (t, dias) (T_2 : 3 dias sem irrigação, T_3 : 6 dias sem irrigação, e T_4 : 9 dias sem irrigação) comparados ao controle (sem restrição hídrica) (T_1 : nenhum - 0 - dia sem irrigação) ($PHF = 8,3505.t^2 - 46,759.t + 115,18 - R^2 = 0,9935$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015..53
- Figura 5 - Conteúdos relativos de água (CRA, %) na folha dos tratamentos sob restrição hídrica (T_2 : 3 dias sem irrigação, T_3 : 6 dias sem irrigação, T_4 : 9 dias sem irrigação, e T_5 : 12 dias sem irrigação) comparados ao controle (sem restrição hídrica - T_1 : nenhum - 0 - dia sem irrigação). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 201555
- Figura 6 - Teores relativos de prolina na folha (PRO, %) dos tratamentos no intervalo de zero a nove dias sem irrigação (T_1 : nenhum - 0 - dia sem irrigação, T_2 : 3 dias sem irrigação, T_3 : 6 dias sem irrigação, e T_4 : 9 dias sem irrigação). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015.....56

Figura 7 - Teores relativos de prolina na folha (PRO, %) dos tratamentos no intervalo de zero a doze dias sem irrigação (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015 57

Figura 8 - Valores relativos de vagens abortadas (VA, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($VA = 0,0475.t^2 - 1,7542.t + 95,881 - R^2 = 0,2848$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015 58

Figura 9 - Valores relativos de vagens produtivas (NVP, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($NVP = -0,217.t^2 - 0,9077.t + 96,544 - R^2 = 0,9176$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015 59

Figura 10 - Valores relativos de vagens totais produzidas (NTV, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($NTV = -0,0753.t^2 - 1,3613.t + 96,189 - R^2 = 0,7246$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015 60

Figura 11 - Valores relativos de fixação (pegamento) de vagens (FV, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($FV = -0,25.t^2 + 1,0768.t + 100,02 - R^2 = 0,8603$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015..... 61

Figura 12 - Valores relativos do número de grãos por vagem (GPV, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($GPV = 0,3615.t^2 - 2,0161.t + 99,021 - R^2 = 0,9684$).

Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 201562

Figura 13 - Valores relativos do número de grãos produzidos (NG, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($NG = -0,1568.t^2 - 1,1335.t + 95,205 - R^2 = 0,7986$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 201563

Figura 14 - Valores relativos de massa do grão (MG, %) produzido de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($MG = -0,5045.t^2 + 3,0446.t + 102,27 - R^2 = 0,9313$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 201564

Figura 15 - Valores relativos da produção de grãos por planta (PGP, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($PGP = -0,4477.t^2 + 0,5577.t + 97,219 - R^2 = 0,9663$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 201566

Figura 16 - Valores relativos (%) da produção por planta (Prod13, % - teor de água no grão corrigido para 13%), conteúdo relativo de água (CRA, %), índice de pegamento de vagens (PegVag, %) e teores foliares de prolina (PRO, %), relacionados com diferentes regimes hídricos (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 201566

Figura 17 - Médias de temperatura (TEMP, °C) a cada decêndio (1, 2 e 3) (M3 - terceiro decêndio de março - a J2 - segundo decêndio de junho) do período de condução do experimento, entre os meses de março a junho (M - J). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de

Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015. Legenda: (S) semeadura, (R₅) estágio fenológico correspondente ao início da formação dos grãos (início da imposição dos tratamentos) e (C) colheita..... 87

Figura 18 - Médias de umidade relativa do ar (UR, %) a cada decêndio (1, 2 e 3) (M3 - terceiro decêndio de março - a J2 - segundo decêndio de junho) do período de condução do experimento, entre os meses de março a junho (M – J). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015. Legenda: (S) semeadura, (R₅) estágio fenológico correspondente ao início da formação dos grãos (início da imposição dos tratamentos) e (C) colheita..... 87

Figura 19 - Médias de radiação global (RG, MJ m⁻² dia⁻¹) a cada decêndio (1, 2 e 3) (M3 - terceiro decêndio de março - a J2 - segundo decêndio de junho) do período de condução do experimento, entre os meses de março a junho (M – J). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015. Legenda: (S) semeadura, (R₅) estágio fenológico correspondente ao início da formação dos grãos (início da imposição dos tratamentos) e (C) colheita..... 88

Figura 20 - Médias de radiação líquida (RL, MJ m⁻² dia⁻¹) a cada decêndio (1, 2 e 3) (M3 - terceiro decêndio de março - a J2 - segundo decêndio de junho) do período de condução do experimento, entre os meses de março a junho (M – J). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015. Legenda: (S) semeadura, (R₅) estágio fenológico correspondente ao início da formação dos grãos (início da imposição dos tratamentos) e (C) colheita..... 88

Figura 21 - Médias de evapotranspiração potencial (ETp, mm por 10 dias) a cada decêndio (1, 2 e 3) (M3 - terceiro decêndio de março - a J2 - segundo decêndio de junho) do período de condução do experimento, entre os meses de março a junho (M – J). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015. Legenda: (S) semeadura, (R₅) estágio fenológico correspondente ao início da formação dos grãos (início da imposição dos tratamentos) e (C) colheita..... 89

Figura 22 - Médias de evapotranspiração real (ETr, mm por 10 dias) a cada decêndio (1, 2 e 3) (M3 - terceiro decêndio de março - a J2 - segundo decêndio de junho) do período de condução do experimento, entre os meses de março a junho (M – J).

Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015. Legenda: (S) semeadura, (R₅) estágio fenológico correspondente ao início da formação dos grãos (início da imposição dos tratamentos) e (C) colheita89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Evapotranspiração real total (E_{TrT} , mm período ⁻¹) e média diária (E_{TrD} , mm dia ⁻¹) de períodos de desenvolvimento de plantas de soja.....	28
Tabela 2 - Resultados da análise química: pH ($CaCl_2$), teor de matéria orgânica (M.O., g dm ⁻³), teor de macronutrientes (P, mg dm ⁻³) (K, Ca, Mg, H+Al, Al, mmol _c dm ⁻³), soma de bases (S, mmol _c dm ⁻³), capacidade de trocas catiônica (CTC, mmol _c dm ⁻³), saturação por bases (V, %), saturação por alumínio (m, %), e teor enxofre (SO ₄ , mg dm ⁻³) do substrato utilizado. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015	41
Tabela 3 - Resultados da análise química de micronutrientes (Cu, Fe, Zn, Mn e B, mg dm ⁻³), e física (argila, silte, areia total, areia grossa e areia fina, g kg ⁻¹) do substrato que será utilizado. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015	41
Tabela 4 - Desenvolvimento fenológico da cultura de soja (FEHR; CAVINESS, 1977). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, 2015	42
Tabela 5 - Descrição dos tratamentos componentes do experimento. Todos os vasos foram mantidos com armazenamento de água no solo igual à capacidade de água disponível (teor de água correspondente à capacidade de campo) quando sob irrigação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015	45
Tabela 6 - Disposição das avaliações da umidade do solo, <i>status</i> hídrico da planta, teor relativo de água nas folhas e teor de prolina livre nos tratamentos sob restrição hídrica (T ₂ : 3 dias sem irrigação, T ₃ : 6 dias sem irrigação, e T ₄ : 9 dias sem irrigação) comparados ao controle (sem restrição hídrica) (T ₁ : nenhum - 0 - dia sem irrigação). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015.....	46
Tabela 7 - Dados obtidos em laboratório para a curva de retenção de água no substrato. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015.....	49

Tabela 8 - Umidades médias (u , kg kg^{-1}) e respectivos potenciais matriciais médios do solo, determinados para cada tratamento, comparados aos potenciais do ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de campo (CC), descritos na literatura. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015	51
Tabela 9 - Médias dos potenciais hídricos foliares (ψ_f , bar, atm e cm) dos tratamentos relacionados ao controle e suas respectivas avaliações. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015.....	52
Tabela 10 - Valores médios dos conteúdos relativos de água na folha (CRA, %) referentes aos tratamentos relacionados ao controle em suas respectivas avaliações. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015	54
Tabela 11 - Médias dos teores de prolina livre na folha (PRO, $\mu\text{mol g}^{-1}$ de matéria fresca - MF) dos tratamentos relacionados ao controle em suas respectivas avaliações. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015.....	56
Tabela 12 - Médias dos componentes de produção e produtividade por planta – número de vagens abortadas (NVA, vagens.planta $^{-1}$), número de vagens produtivas (NVP, vagens.planta $^{-1}$), número total de vagens (NTV, vagens.planta $^{-1}$), pegamento de vagens (PegVag, %), número de grãos (NG, grãos.planta $^{-1}$), número de grãos por vagem (GV, grãos.vagem $^{-1}$), massa de grãos (MG, mg.grão $^{-1}$) e produtividade (Prod, g.planta $^{-1}$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015.....	58

1 INTRODUÇÃO

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é muito importante mundialmente em função de seu uso na alimentação animal, como principal fonte de proteína e óleo, além de constituir a matéria prima básica para diversos setores da indústria. Muitas pesquisas têm demonstrado o seu efeito protetor na saúde humana, melhorando as taxas de colesterol, diabetes e obesidade nas populações que fazem uso contínuo desta oleaginosa (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 2013). No Brasil, a soja é um dos grãos mais produzidos, este aumento deve-se principalmente à alta tecnologia que os produtores vêm adotando em suas áreas de produção, como fertilizantes e insumos cada vez mais eficientes.

Sabe-se que a produtividade potencial de uma cultura é determinada por fatores genéticos e pelos seguintes atributos do ambiente de produção: temperatura, radiação solar, pressão parcial de dióxido de carbono e fotoperíodo, sem restrição de água, nutrientes, plantas daninhas, pragas e doenças, (DOORENBOS; KASSAM, 1994). A disponibilidade hídrica afeta o crescimento e desenvolvimento da cultura de soja, especialmente durante o período reprodutivo, fase de elevada atividade fisiológica (FAGAN, 2008).

Muito se tem estudado a respeito da interação das plantas com o ambiente e suas respostas aos diferentes estímulos do mesmo. Principalmente para culturas de grande interesse econômico, busca-se entender essas repostas e definir qual a relação das mesmas com o produto final de interesse, para que se possam desenvolver tecnologias de produção para mitigar os efeitos negativos de um ambiente desfavorável à planta e também para que se promova o melhoramento genético das espécies buscando uma melhor adaptação para esses ambientes desfavoráveis.

Segundo Taiz e Zeiger (2013), o estresse hídrico é responsável por grande parte da redução da produtividade da maioria das espécies cultivadas no mundo. Por esse motivo é de grande importância à caracterização das respostas das plantas a fatores abióticos, e elucidar os mecanismos fisiológicos e bioquímicos que regulam tais respostas.

Em estudos das relações hídricas entre solo, planta e atmosfera, busca-se sempre o *status* hídrico ideal para que a planta desenvolva e explore seu potencial produtivo. Porém, modelos referentes aos processos de transferência de água no sistema solo planta- atmosfera tratam o estresse hídrico de forma empírica em função de diversos fatores ambientais, sendo os mais importantes o teor de água no solo e o *deficit* pressão de vapor na atmosfera.

A quantificação da redução de transpiração, devido ao estresse hídrico, é necessária em modelos hidrológicos e de crescimento vegetal e essencial ao manejo da irrigação. A mesma depende do entendimento dos mecanismos que causam o estresse.

Estresse hídrico, aqui definido como a condição em que uma planta fecha parcialmente seus estômatos aumentando a resistência foliar, ocorre em função das condições físicas do ambiente de produção e fisiológicas da planta.

Sabe-se que a diminuição do teor de água no solo desencadeia uma série de reações nas plantas, a fim de otimizarem ao máximo a utilização da mesma, todavia essa diminuição no fluxo transpiratório pode afetar, dependendo da sua intensidade, a entrada de nutrientes pelo sistema radicular e consequente queda na produtividade devido às deficiências nutricionais.

Além das questões nutricionais, o ressecamento do solo provoca alterações fisiológicas nas plantas. O acúmulo do aminoácido Prolina nas folhas é bem característico em plantas estressadas.

Dentro deste contexto, o presente estudo teve como objetivo caracterizar os mecanismos de tolerância da soja, no período de enchimento de grãos, a deficiência hídrica associando-os ao potencial matricial do solo em processo de secagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura de soja

2.1.1 Características gerais

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é originada da China e pertence à família Fabaceae (SEDIYAMA; TEIXEIRA; BARROS, 2009). Participa do desenvolvimento de um amplo complexo agroindustrial, além de ser uma *commodity*, padronizada e uniforme, podendo ser produzida e negociada por produtores de diversos países (HIRAKURI; LAZZAROTO, 2011). A cultura tem destaque no cenário do agronegócio brasileiro, com produção de 96,2 milhões de toneladas, na safra 2014/2015 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2015), sendo uma importante fonte de divisas para o país, contribuindo com parcela significativa nas exportações.

Com a contínua expansão nos estados do norte e nordeste do país (Figura 1), região da nova fronteira agrícola brasileira denominada MATOPIBA, a soja é a cultura que mais cresceu nos últimos trinta anos, ocupando cerca de 46% da área semeada com grãos no país (EMBRAPA, 2015). Entretanto, segundo Farias et al. (2007), o sucesso de todo esse complexo é, ainda hoje, extremamente dependente das condições climáticas. São comuns perdas anuais em produtividade devido à escassez de água durante o ciclo da cultura, principalmente na região Sul do Brasil, já na região Centro Oeste ocorre o excesso de chuvas durante a colheita (SILVA, 2012).

Com produtividade média brasileira de 3.000 kg ha⁻¹ (CONAB, 2015), algumas regiões tradicionais de produção chegam a atingir níveis de produção na ordem de 5.000 kg ha⁻¹. A água é um dos principais fatores que mais contribuem para a redução da produtividade, uma vez que o *deficit* hídrico limita o crescimento da cultura (BOYER, 1982), devido ao fechamento estomático em resposta ao baixo conteúdo de água no solo, diminuindo a entrada de CO₂ com consequente redução da fotossíntese (WONG; COWAN; FARQUHAR, 1995; STRECK, 2004).

Relacionando o *deficit* hídrico com a produtividade de soja, Rambo et al. (2003) observaram uma redução de 18% na produtividade final devido ao estresse hídrico. Reduções mais drásticas na produtividade da cultura foram relatadas por Zhang et al. (2007), onde as perdas variavam de 20 a 46% e por Assad et al. (2007) encontrando perdas de até 70% na produtividade.

Figura 1 - Comparativo entre as áreas nacionais de produção de soja e de condição hídrica geral destaque para a parcela da área produtiva sujeita a restrições por falta de chuva (região amarela no mapa inferior) (CONAB, 2015)

Segundo Assad et al. (2007), controlar os efeitos que depreciam a produção da cultura da soja, tanto os bióticos quanto os abióticos, é de extrema importância para a economia já

que a demanda é crescente devido ao aumento constante da população e a necessidade de fontes alternativas de combustível como o biodiesel.

Com o crescimento do cultivo de soja em sistema irrigado (624 mil hectares) e em segunda safra (305 mil hectares), associadas a novos genótipos mais responsivos a tecnologia, a reavaliação das questões hídricas se torna fundamental para uma utilização mais racional e sustentável da água, no caso de irrigação, e em previsões de quebra de safra ocasionados pelo estresse hídrico em estádios críticos de desenvolvimento da planta, no caso de segunda safra (CONAB, 2015).

2.1.2 Características morfofisiológicas

A soja é uma planta do metabolismo fotossintético tipo C_3 . Sua morfologia é caracterizada por raiz pivotante, caule herbáceo e folha trifoliolada. Possui ciclo anual, apresentando grande capacidade adaptativa a diversos ecossistemas, o que propiciou a disseminação do seu cultivo nos diferentes ambientes agricultáveis do mundo (FERRARI; PAZ; SILVA, 2015).

A faixa de temperatura ótima do solo para germinação de sementes de soja está entre 20 a 30°C sendo 25°C considerada como ideal para rápida e uniforme emergência das plântulas (EMBRAPA, 2000; SILVA, 2013).

Para o crescimento e desenvolvimento a cultura tem como exigência a faixa de temperaturas ótimas entre 20°C e 30°C, sendo considerada como ideal a temperatura de 30°C. O crescimento vegetativo da soja é baixo ou nulo em temperaturas abaixo de 10°C, e acima de 40°C ocorrem efeitos adversos no metabolismo reduzindo o crescimento da planta, sendo agravado em condições de *deficit* hídrico (FONTANA et al., 2001; FARIAS et al., 2007).

Segundo Fontana et al. (2001), a soja tem o florescimento induzido apenas em temperaturas acima de 13°C, e em condições de altas temperaturas a soja adianta o florescimento ocasionando a diminuição da altura da planta. A soja é uma espécie de planta sensível ao fotoperíodo, existindo variação da sensibilidade entre os cultivares. Os cultivares sensíveis ao fotoperíodo são chamadas de plantas de dias curtos, por terem seu florescimento induzido quando o fotoperíodo decresce igual ou inferior ao mínimo exigido pelo cultivar. Através dos programas de melhoramento genético obtiveram-se plantas de soja com genes capazes de prolongar o período juvenil, adaptadas às regiões tropicais (FARIAS et al., 2007; EMBRAPA, 2011).

Cerca de 90% da massa da planta de soja é constituída por água, a qual atua em praticamente todos os processos fisiológicos e bioquímicos da planta sendo responsável por diversas reações, cuja exigência se intensifica principalmente em dois períodos: (a) semeadura a emergência (germinação) e (b) florescimento ao enchimento de grãos. Durante a germinação, o excesso e a falta de água são prejudiciais, pois, para uma boa germinação a semente necessita absorver 50% da sua massa em água, para isso o solo não deve conter acima de 85% nem abaixo de 50% da sua capacidade de retenção de água (FARIAS et al., 2007; SILVA, 2013). A tolerância a *deficits* hídricos é variável dependendo do cultivar utilizado, sendo que, quanto mais baixo o vigor da semente maior será a intolerância ao *deficit* hídrico (SANTOS et al., 1992).

A soja necessita de cerca de 450 a 800 mm de água durante seu ciclo (Tabela 1) para obter sua máxima produtividade (EMBRAPA, 2011). A necessidade de água aumenta durante o desenvolvimento da cultura, atingindo o máximo no período de floração/enchimento de grãos. Nesse período, a planta necessita de 7 a 8 mm dia⁻¹, decrescendo logo após essa etapa do ciclo (FARIAS et al., 2007). Berlato e Bergamashi (1979) obtiveram um consumo médio de 5,8 mm dia⁻¹ para cultivar Bragg, que variou de 2,2 mm dia⁻¹ no subperíodo semeadura-emergência, até o valor máximo de 7,4 mm dia⁻¹ no subperíodo que compreende do florescimento ao máximo surgimento de vagens.

Tabela 1 - Evapotranspiração real total (ET_{Tr}, mm período⁻¹) e média diária (ET_{TrD}, mm dia⁻¹) de períodos de desenvolvimento de plantas de soja

Período de desenvolvimento	ET _{Tr} mm período ⁻¹	ET _{TrD} mm dia ⁻¹
Semeadura - Emergência	16	2,2
Emergência - Início do Florescimento	266	5,1
Início do Florescimento - Início da formação de legumes	160	7,4
Início da formação de legumes - Maturidade Fisiológica	362	6,6
Maturidade Fisiológica - Colheita	36	3,7
Ciclo	840	5,8

Fonte: Berlato e Bergamaschi (1979)

2.2 Relações hídricas da planta de soja

De modo geral, a água que flui pelo vegetal provém do solo. A demanda evaporativa da atmosfera provoca uma perda da água pela planta ocasionando uma necessidade contínua de reposição da água perdida que se estende desde as folhas até as raízes passando pelo xilema. O fluxo de água do solo através da planta para a atmosfera é determinado pelo

gradiente de potencial hídrico do solo, da raiz da planta, dos vasos da planta, das folhas da planta e da atmosfera (SANTOS et al., 2012).

Segundo Vasellati et al. (2001), durante a seca, a disponibilidade hídrica do solo diminui e o “*continuum*” solo-planta-atmosfera pode ser perdido. A planta, portanto, fecha seus estômatos para prevenir perdas de água (STUHFAUTH; SCHEUERMANN; FOCK, 1990; OHASHI et al., 2006).

Para manter a água no seu interior, a célula cria um potencial hídrico, e esse potencial hídrico somado às características de elasticidade da parede celular conferem a turgescência celular. A turgescência é o estado hídrico da planta determinante para a abertura estomática e o crescimento celular (MELO et al., 2007). A folha de soja turgida apresenta potencial hídrico em torno de -2,0 MPa.

A perda de água da planta por evaporação, principalmente das folhas, via estômatos abertos, para a atmosfera é a transpiração, que é a força motriz que gera as tensões para a translocação da água na planta, e o movimento passivo da água do solo para a planta (absorção). Quando ocorre a diminuição da disponibilidade de água do solo, diminui-se a passagem de água para a atmosfera por meio da planta provocando um novo ajuste metabólico. Os impedimentos que a planta desenvolve que opõem resistências ao fluxo da água, e conseqüentemente a sua perda, são adaptações para superar o *deficit* hídrico (FERRARI et al., 2015).

A quantidade de água evaporada da planta através das folhas é controlada pelas condições meteorológicas e pela cultura, portanto a produtividade da cultura está diretamente relacionada à sua capacidade de extração de água do solo, principalmente quando esta se encontrar em condições de *deficit* hídrico (CARLESSO, 1995; PROCÓPIO et al., 2004). Também verificado por Farias et al. (2007), que afirmam que a transpiração é regulada pela demanda evaporativa da atmosfera, e quando a quantidade de água no solo causar restrição na transpiração, tem-se o início de um *deficit* hídrico. As perdas de água por transpiração da planta e a evaporação do solo de uma lavoura constituem a sua evapotranspiração. De acordo com Saldanha (2009), na fase inicial do desenvolvimento das plantas, as perdas de água através da transpiração são insignificantes, devido à sua pequena área foliar, assim, nesta fase, a perda de água ocorre principalmente através da evaporação, sendo esta influenciada pelo tipo de solo, cobertura vegetal e condições climáticas como temperatura, umidade relativa e radiação solar.

Segundo Carlesso (1995), os melhores indicadores de um *deficit* hídrico são a água total disponível para as plantas e a fração da água disponível, a qual é a razão entre a quantidade atual e a quantidade potencial de água no solo. Entretanto, visualmente, quando a planta de soja sofre falta d'água, ocorrem alterações morfofisiológicas, sendo o enrolamento e a murcha das folhas um indicador de severa escassez de água (EMBRAPA, 2011; GONÇALVES, 2013).

2.3 Estresse, condutância estomática e fotossíntese

A produção agrícola está sempre sujeita a ação de adversidades climáticas, como temperatura elevadas ou baixas, baixa luminosidade e excesso ou falta de chuvas, sendo este último o fator climático mais limitante para a produção de grãos (FIOREZE et al., 2011).

Campbell (1991) e Embrapa (2008) chamam a atenção para o fato da água atuar praticamente em todos os processos de uma planta, desempenhando um papel importante na manutenção e distribuição do calor, além de características funcionais de preenchimento, meio de transporte, solvente para reações celulares e processos.

Estresse pode ser definido como qualquer fator ambiental capaz de induzir alterações no processo fisiológico ou funcional das plantas de forma a prejudicar as mesmas (LEVITT, 1982).

As plantas enfrentam o dilema crucial “perder água para fixar carbono”, pois há um conflito entre a conservação da água pela planta e a taxa de assimilação de CO₂ para a produção de carboidratos, mediado pela condutância estomática (SANTOS; CARLESSO, 1998; CHAVES; MAROCO; PEREIRA, 2003).

A condutância estomática é dependente de fatores como densidade estomática, tamanho e idade da folha, concentração subestomática de CO₂, turgor das células-guarda e epidérmicas, além da sinalização quanto à percepção do ambiente ao seu redor (JONES, 1992).

Larcher (2000) e Nobel (2005), em trabalhos relacionados a condutância estomática, observam que, quando os estômatos estão abertos, a absorção de CO₂ é mais limitada do que a perda de água devido a características físicas dos gases. Mas, em condições de baixa disponibilidade hídrica, a diminuição da abertura estomática exerce então maior desvantagem sobre a saída de água. Assim, com a redução da condutância estomática, a transpiração declina mais rápido do que a fotossíntese, visto que a perda de água transpirada pelos estômatos depende mais da condutância estomática do que a fotossíntese (LEI; TONG;

SHENGYAN, 2006). Dessa forma, para Stiller et al. (2008), a redução da condutância estomática parece ser o caminho mais eficiente para reduzir a perda de água por transpiração.

O fechamento estomático se apresenta como uma resposta primária ao *deficit* hídrico em condições de campo, o que gera uma limitação na difusão de CO₂ para dentro das folhas. O fechamento estomático pode ser em resposta tanto à redução do turgor da folha e redução do potencial hídrico da mesma ou pela baixa umidade relativa do ar (CHAVES et al., 2002).

Lawlor e Cornic (2002) concluíram em sua revisão dois tipos diferentes de comportamento em relação ao decréscimo no conteúdo relativo de água (CRA, %) em folhas de plantas C₃ para assimilação de carbono. No tipo 1, há duas fases distintas, sendo a primeira classificada como fase estomática (100 a 75% do CRA) e que pode ser superada com alterações na concentração atmosférica de CO₂, e a segunda classificada como inibição metabólica (abaixo de 75% do CRA) onde a assimilação de carbono vai se tornando progressivamente menos reversível com o aumento de CO₂ atmosférico. No tipo 2, não há uma distinção clara entre as fases acima e abaixo de 75% do CRA.

A redução das taxas fotossintéticas em situações de estresse pode ser resultado de fatores estomáticos ou não estomáticos (bioquímicos) (WISE; ORTIZLOPEZ; ORT, 1992; YORDANOV; VELIKOVA; TSONEV, 2003). A planta reage ao *deficit* de água no sistema fechando os seus estômatos para evitar uma perda ainda maior de água pela transpiração (CORNIC, 1994; LAWLOR, 1995). Como consequência, a difusão de CO₂ para dentro da planta é restringida (CHAVES, 1991; FLEXAS et al., 2006ab). A redução da fotossíntese líquida em plantas, em condições de baixo teor de água no solo, pode ser explicada pela baixa concentração interna de CO₂, prejudicando o funcionamento da RuBisCO (CORNIC et al., 1992) ou por inibição direta das enzimas fotossintéticas como a RuBisCO (HAUPTHERTING; FOCK, 2000) ou ATP sintase (TEZARA et al., 1999; NOGUÉS; BAKER, 2000).

Existem muitas controvérsias relativas ao qual é a limitação primária da fotossíntese sob *deficit* hídrico: fechamento estomático ou prejuízo metabólico (FLEXAS; MEDRANO, 2002; FLEXAS et al., 2006ab; LAWLOR; CORNIC, 2002).

Reynolds-Henne et al. (2010), em experimento sobre interação entre temperatura, seca e abertura estomática em legumes observaram dois padrões distintos de resposta dependendo da intensidade do estresse e concluíram que, para estresses “moderados”, o fechamento estomático ou a condutância estomática irregular ocorrem priorizando dessa forma as relações hídricas da planta. Já em estresses mais agudos (causados principalmente por altas

temperaturas e *deficit* hídrico concomitantes), as plantas apresentaram aumento da condutância estomática, indicando uma priorização da proteção ao aparato fotossintético contra as altas temperaturas.

2.4 Alterações morfofisiológicas devido ao *deficit* hídrico

A água é considerada como o principal fator ambiental da regulação do crescimento e desenvolvimento de uma planta, assim, a habilidade para resistir à falta de água é de fundamental importância para a continuidade do seu ciclo de vida (HONG-BO et al., 2008). A resposta das plantas frente à falta de água é considerada uma síndrome, ou seja, um grupo de respostas simultâneas (LAWLOR; CORNIC, 2002; MITTLER, 2006).

O *deficit* hídrico impõe um dilema entre a conservação da água pela planta e a taxa de assimilação de CO₂ para produção de carboidratos, e em resposta, a planta desenvolve mecanismos morfológicos e bioquímicos para otimizar o uso da água e reduzir a sua perda, a fim de garantir sua sobrevivência e a perpetuação da sua espécie (FARIAS et al., 2007).

Segundo Carlesso (1995) a eficiência das plantas no uso da água e sua habilidade em obtê-la do solo, determina o suprimento de água de que esta necessita. Chuvas isoladas, no início do período chuvoso não necessariamente caracterizam um *deficit* hídrico, pois a planta possuiu a capacidade de ajustar a absorção de água e a transpiração, e quando o ajuste chega ao ponto máximo do seu limite, este momento é considerado como um *deficit* hídrico, ou seja, quando a transpiração da planta é afetada pela disponibilidade de água do solo (FARIAS et al., 2007). Levitt (1980) observou que, durante o *deficit* hídrico, os ajustamentos fisiológicos da planta determinam as respostas adaptativas de ordem anatômica e morfológica, porém essas respostas variam de acordo com a espécie, o cultivar, o estado de desenvolvimento das plantas, como também a duração e a intensidade do *deficit* hídrico. Assim, plantas desenvolvem a capacidade de resistir a longos períodos de *deficit* hídrico, utilizando mecanismos para redução da perda de água.

As plantas podem ser classificadas em três categorias, conforme os mecanismos desenvolvidos para a resistência ao período seco: plantas que escapam da seca, pois possuem um rápido desenvolvimento fenológico; aquelas que toleram o período seco devido à elevação do potencial hídrico, ou seja, que adiam a desidratação, e as que toleram a seca sem alteração no potencial hídrico, portanto toleram a desidratação (TURNER, 1986; 1997).

Em decorrência do *deficit* hídrico, vários eventos fisiológicos são desencadeados na planta, como a redução do potencial hídrico foliar, o fechamento estomático que diminui a condutância estomática, provocando a redução da concentração interna de CO₂, e,

consequentemente, diminuindo a taxa fotossintética (HONG-BO et al., 2008). Plantas submetidas à falta de água podem alterar a interceptação da radiação solar, através de modificações na exposição (movimento foliar) e duração da área foliar. E quando submetida a *deficit* hídrico severo, a planta reduz a eficiência de utilização da radiação solar em prejuízo da fotossíntese (CONFALONE; NAVARRO DUJMOVICH, 1999; GONÇALVES, 2013).

Segundo Carneiro (2011), a água além de ser necessária ao crescimento das células, é um elemento essencial para a manutenção da turgescência. O estresse hídrico desencadeia uma grande variedade de respostas nas plantas, alterando a expressão genética e o metabolismo celular. A redução do potencial hídrico das folhas ocasionado pela falta de água provoca fechamento estomático e consequente, diminuição das trocas gasosas, inibindo vários processos bioquímicos e fisiológicos, como a fotossíntese, respiração, absorção de íons, metabolismo dos nutrientes, entre outros. Sob as condições de estresse hídrico, em razão do controle da abertura dos estômatos, ocorre diminuição da condutância estomática, que é fundamental na manutenção da turgescência (GONÇALVES, 2013).

Sob deficiência hídrica, a primeira alteração que ocorre nas plantas é a diminuição de turgescência, levando imediatamente a diminuição do crescimento. Assim, a redução na sua parte área pode ser considerada como a primeira reação das plantas submetidas à falta d'água (LARCHER, 2006; TAIZ; ZEIGER, 2009). Santos e Carlesso (1998) apresentam resultados demonstrando que uma pequena redução no potencial de água no solo determina a paralisação do processo de divisão celular, porém não na expansão celular. A turgescência é uma reação à tensão da parede celular, então, a extensibilidade desta determinaria o potencial de turgescência e o potencial hídrico celular, concluindo que o crescimento é primeiramente mais dependente da capacidade de extensão da parede que do turgor da mesma (NEUMANN, 1995).

A deficiência de água durante a diferenciação celular nas folhas acarreta redução irreversível da área e espessamento foliar, e pode aumentar a densidade estomática (ZAGDANSKA; KOSDOJ, 1994). Com o fechamento dos estômatos e a restrição do CO₂, ocorre um decréscimo da reação de oxirredução do carbono pelo ciclo de Calvin-Benson e em consequência, o NADP⁺ oxidado, que serve como aceptor de elétrons do processo. Na transferência de elétrons, estando a ferredoxina na forma reduzida, podem ser transferidos elétrons do fotossistema I para o oxigênio, produzindo as espécies reativas deste elemento (CARNEIRO, 2011).

Além da queda na produção da área foliar, as plantas podem responder, com fechamento dos estômatos, com a aceleração da senescência e com a abscisão das folhas (TAIZ; ZEIGER, 2009). Pallas et al. (1979) relatam que o amendoim, tal como a soja, recupera mais rapidamente a função dos seus estômatos com a atenuação do estresse hídrico que outras espécies, essa habilidade pode ser uma importante resposta adaptativa da planta à seca. A redução da expansão foliar e a antecipação da senescência, consequentes do estresse hídrico, prejudicam o equilíbrio entre demanda de assimilados e a fotossíntese em declínio. Este desequilíbrio possui um efeito maior nos tecidos jovens da planta, quando comparado aos tecidos adultos, sendo que, com a suplementação hídrica, ocorre a retomada do desenvolvimento somente nas folhas mais jovens (SANTOS; CARLESSO, 1998).

Embora a fase final do ciclo vital (senescência) seja menos sensível ao estresse hídrico, quando comparada a expansão foliar, durante o crescimento vegetativo, ela ocorre porque o nitrogênio do interior da planta é translocado das folhas mais velhas para os pontos de crescimento da mesma, desde que a planta não tenha capacidade de suprir a sua demanda por outros meios (ARAÚJO FILHO et al., 2013). De acordo com Jordan (1983), o *deficit* hídrico pode modificar a utilização de carboidratos, pois altera a eficiência com que os fotoassimilados são convertidos para o desenvolvimento de partes novas. Ocorrem mudanças na partição dos carboidratos no interior da planta, levando as mesmas a desenvolverem mecanismos de adaptação e resistência, para Kramer (1995), a baixa quantidade de água no solo, além de causar mudanças na expansão celular, na regulação estomática, na fotossíntese, na respiração, na translocação de substâncias, na síntese da parede celular, na redução da taxa de crescimento, também produz mudanças no padrão de translocação de matéria seca.

Em condições de *deficit* hídrico no solo ocorrem sinais químicos nas raízes, os quais agem no comportamento dos estômatos. Um rápido ressecamento do solo, mesmo não afetando a parte aérea, pode causar aumento na concentração de ácido abscísico no xilema, produzido provavelmente na coifa das raízes, ocasionando o fechamento dos estômatos e diminuindo a expansão celular (DAVIES; ZHANG, 1991).

Chaves Filho e Seraphin (2001), trabalhando com *Solanum lycocarpum*, observaram que, mesmo estando o teor de água do solo abaixo do ponto de murcha permanente, as plantas foram capazes de manter seu potencial hídrico foliar no mesmo nível do que os das plantas em substrato em capacidade de campo, provavelmente devido à absorção de água pelas raízes e ao fechamento estomático. Vidal et al. (1999), estudando essa espécie vegetal, afirmaram que essa planta em condições de baixa disponibilidade de água apresenta um maior

desenvolvimento do sistema radicular confirmando assim a adaptação da espécie às condições de estresse hídrico.

O *deficit* hídrico, ao provocar a secagem superficial do solo, estimula a expansão das raízes, as quais se aprofundam no solo em busca de umidade (GONÇALVES, 2013; SCALON et al., 2011). Nessas condições, as plantas investem no desenvolvimento do sistema radicular, aumentando o comprimento das raízes (FITTER; HAY, 1987).

2.5 Sinalizações do estresse e alterações bioquímicas

Por meio de alterações na morfologia externa, na histologia, na citologia e na fisiologia da planta, as diferentes espécies de plantas desenvolvem mecanismos para enfrentar a falta de água no solo, evitando-a ou tolerando-a (MACHADO, 2004).

Nas sementeiras antecipadas, quando ocorre *deficit* hídrico, sementes que possuem vigor reduzido, prioritariamente apresentaram alterações fisiológicas, pois as mudanças bioquímicas mais comuns são a diminuição do metabolismo respiratório, ocorrendo com a baixa absorção de oxigênio; maior permeabilidade das membranas celulares, levando a perda de metabólitos orgânicos e inorgânicos da semente e a diminuição da síntese de proteínas e polissacarídeos (NÓBREGA et al., 1998).

A capacidade da planta para manter suas atividades metabólicas enquanto sujeita ao estresse hídrico é mediada por rearranjos celulares que incluem mudanças: nos seus ciclos de síntese de substâncias, aumentando a produção do ácido indol-acético; no sistema de endomembranas, aumentando a síntese de oxirredutores; na vacuolização, acumulando fotoassimilados no interior dos vacúolos celulares; bem como alterações na arquitetura da parede celular (MENESES et al., 2006; TAIZ; ZEIGER, 2009). Pode-se citar outras alterações, que segundo Larcher (2006), são caracterizadas em não específicas como as alterações nas propriedades das membranas, inibição da fotossíntese, aumento da respiração, redução da produção de matéria seca, distúrbios no crescimento, baixa fertilidade e senescência prematura. Os efeitos não específicos são representados por uma expressão do grau de severidade de um distúrbio, enquanto que os efeitos específicos são mecanismos peculiares de cada vegetal, como a ativação do ajuste osmótico ou da desfolha em face à falta de água.

A expressão dos efeitos específicos e não específicos em grande parte é atribuída ao ácido abscísico (ABA), o qual é o hormônio vegetal intimamente ligado à percepção das

adversidades pela planta, e intensifica sua atuação na ocorrência de um *deficit* hídrico. O *deficit* hídrico desencadeia uma rápida redistribuição e acumulação do ABA, nos tecidos do vegetal. O ABA pode promover, através de sinais químicos, a comunicação das raízes com a parte aérea da planta, em decorrência da falta de água do solo (SHARP, 2002).

A elevação na concentração do ABA no apoplasto das células-guarda, reduzindo a condutância estomatal é uma expressão desta interação (DAVIES; ZHANG, 1991; TUBEROSA et al., 1994). O ácido abscísico regula as características morfofisiológicas das plantas, influenciando nas respostas ao *deficit* hídrico, como a diminuição da expansão celular. O ABA atua promovendo a estabilidade do mecanismo fotossintético na diferenciação estomática alterada, na síntese de ceras epicuticulares e na indução da formação de espinhos e tricomas (TUBEROSA et al., 1994).

Lea et al. (1995), em seus estudos com plantas de milho cultivadas em campo e em laboratório, observaram que o acúmulo de ABA originado nas raízes foi responsável pela diminuição no crescimento das folhas e pela manutenção do desenvolvimento da raiz. Em resposta ao estresse hídrico o mecanismo de ajuste primário é o enrijecimento da parede celular das folhas em desenvolvimento, que precede a lentidão do ajuste osmótico via acumulação ativa de solutos (PIMENTEL, 1999). Sob *deficit* hídrico, a biossíntese do ABA é induzida pela perda da turgescência, sendo que os estômatos se fecham antes que o teor de ABA nas folhas aumente (ZAMBRANO, 2004). Em plantas medicinais o ABA promove alterações no conteúdo de compostos secundários tais como fenóis, taninos, prolina, poliaminas e terpenoides (FONSECA et al., 2006). Outro hormônio vegetal, a auxina em condições de *deficit* hídrico tem atuação determinante na regulação do metabolismo e crescimento das raízes.

Ribaut e Pilet (1994) observaram aumento no nível de auxina em raízes de milho com o aumento do estresse hídrico. Para muitos pesquisadores, o acúmulo intracelular de solutos osmoticamente ativos em consequência ao estresse hídrico é o mais importante mecanismo de ajuste adotado pelas plantas que toleram a seca com baixo potencial hídrico (TURNER, 1986; CHAVES FILHO; SERAPHIN, 2001). Este mecanismo, conhecido como ajuste osmótico, foi constatado em inúmeras espécies vegetais sendo considerado um dos mais eficazes para manutenção da turgescência celular, permitindo a abertura estomática e a fotossíntese, mesmo sob baixo potencial hídrico no solo (TURNER, 1986; KRAMER, 1995).

O ajuste osmótico não impede que a taxa fotossintética seja reduzida sob condições de falta de água, a turgescência é mantida, permitindo que a fotossíntese e outras atividades

fisiológicas ocorram, mesmo em menor intensidade, possibilitando a redistribuição de carbono e nitrogênio (PALTA et al., 1994).

Segundo Morgan (1984), a ação dos solutos no ajuste osmótico pode variar de acordo com a espécie. Por exemplo, em forrageiras tropicais Ford e Wilson (1981) observaram que o potássio e o cloro são os que mais contribuem. Já em soja, Meyer e Boyer (1981) relataram que os aminoácidos, a glicose, a frutose e a sacarose, foram os principais agentes osmóticos. O acúmulo de solutos ativos intracelularmente é mais eficaz na diminuição do potencial hídrico do que a própria diminuição da perda de água pela célula, sendo que, a adição dos solutos é responsável pela redução de até metade do valor do potencial osmótico.

Auxiliando a manutenção da abertura dos estômatos e no funcionamento do aparelho fotossintético, o ajuste osmótico permite que a fotossíntese opere mesmo em condições de baixo potencial hídrico. Assim, torna possível que o crescimento celular ocorra mesmo em um potencial hídrico que geralmente seria inibidor. Dentre os solutos que desencadeiam o ajuste osmótico, citam-se: açúcares solúveis, aminoácidos e o K^+ que corresponde de 60% a 100% do ajuste osmótico (KRAMER, 1995; TURNER, 1997).

Graciano (2009) verificou para plantas de amendoim que a concentração dos solutos orgânicos das folhas e das raízes sofreu influência da suspensão de água, aumentando em 200% a concentração de carboidratos solúveis, 150% proteínas solúveis, e em torno de 150% a concentração de aminoácidos livres, reduzindo o potencial hídrico foliar e o conteúdo relativo de água da folha. Entre os solutos avaliados, destacou-se o acúmulo de prolina, sendo que o cultivar 'BR1', no tratamento com rega diária, apresentou $1,37 \mu\text{mol g}^{-1}$ MF de folhas e $17,35 \mu\text{mol g}^{-1}$ MF de raízes. As plantas em estresse hídrico apresentaram 116,55 e 536,19 $\mu\text{mol g}^{-1}$ MF de folhas e de raízes, respectivamente. O cultivar 'BRS Hawana' apresentou, no tratamento controle, 0,59 $\mu\text{mol g}^{-1}$ MF de folhas e 19,24 $\mu\text{mol g}^{-1}$ MF de raízes. No tratamento sem irrigação, observou-se 53,59 e 97,45 $\mu\text{mol g}^{-1}$ MF de folhas e de raízes, respectivamente. Isso indica a importância dessa substância durante o estresse hídrico.

Machado (2004) relata que, sob *deficit* hídrico, a prolina se acumula no vacúolo celular, promovendo uma regulação osmótica, o que aumenta a capacidade da planta de extrair água do solo, de proteger a integridade celular, ou ainda, participar da constituição de estoque de N e C que poderiam ser usados no período após o estresse hídrico. Este autor explica que a prolina é um aminoácido pertencente à classe de pequenas moléculas denominadas soluto-compatíveis, as quais promovem o ajuste osmótico nas células, como os

íons inorgânicos, sem o efeito prejudicial destes últimos sobre enzimas ou outras macromoléculas do citoplasma, mesmo em altas concentrações.

Burle e Rodrigues (1990), apesar de não detectarem aumento de prolina em seus experimentos de soja (cultivar 'Doko') sob *deficit* hídrico, relataram o acúmulo de prolina na soja em resposta ao *deficit* hídrico em trabalhos, concluindo que esse é um mecanismo específico de cada cultivar. Aparentemente existe uma relação inversamente proporcional, entre o potencial osmótico e o comprimento do sistema radicular, com a diminuição do potencial osmótico ocorre o aumento do sistema radicular (MORAES; MENESES, 2003; MACHADO et al., 2003).

Braccini et al. (1996), estudando plântulas de soja, observaram uma diminuição da relação entre parte aérea e sistema radicular como decréscimo do potencial osmótico, em condições de *deficit* hídrico. Independentemente do tipo de metabolismo, o estresse hídrico causa redução na fotossíntese e o aumento da respiração, promovendo um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (PEREIRA et al., 2012).

Hong-Bo et al. (2008) relatam que o estresse hídrico pode promover um aumento na formação de espécies reativas de oxigênio podendo desencadear assim um estresse oxidativo. Isto ocorre porque durante a transferência de elétrons, quando a ferredoxina está reduzida, elétrons podem ser transferidos do fotossistema I (PS I) para o oxigênio, levando a formação do radical superóxido. Esse processo é conhecido como reação de Mehler, a qual provoca mais reações na cadeia, gerando mais espécies reativas de oxigênio, como espécies oxigênio *singlet*, peróxido de hidrogênio, superóxido, e radicais hidroxila, causando o estresse oxidativo (BEN AHMED et al., 2009).

As espécies reativas de oxigênio (ERO) são geradas nos cloroplastos, na mitocôndria e peroxissomos, sendo seu acúmulo potencialmente prejudicial às células, pois provoca danos ao DNA, RNA, proteínas membranas celulares. Em caso de estresse severo, pode ocorrer um aumento na produção de ERO, o que irá desencadear uma sequência de eventos, iniciada pela peroxidação dos lipídeos, avançando para a degradação das membranas e a morte celular (JALEEL et al., 2009).

As plantas desenvolveram estratégias para a proteção dos danos oxidativos, como o sistema de defesa não enzimático, composto por carotenoides, ascorbato, glutathione, α -tocoferóis, e ainda um enzimático, como a superóxido dismutase, catalisando a reação do radical superóxido a H_2O_2 ; catalase que produz água e oxigênio a partir da água; e enzimas do ciclo ascorbato-glutathione, como a ascorbato peroxidase e as peroxidases (BEN AHMED et al., 2009; JALEEL et al., 2009).

Carneiro (2011), em experimentos com girassol, observou maior atividade dessas enzimas antioxidantes nas folhas, porém sem incremento da atividade enzimática no sistema radicular, demonstrando que, o mesmo nível de estresse pode não ter atingido as raízes da planta, evidenciando as diferentes respostas do metabolismo dos órgãos vegetais quanto à ativação do mecanismo antioxidante.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e casa de vegetação

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Produção Vegetal (LPV) na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) - Piracicaba, SP (22°42' S, 47°30' W). O clima da região é caracterizado como *Cwa*, segundo a classificação climática de Köppen, descrito como subtropical de inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (com temperaturas superiores a 22°C).

3.2 Cultivar, vaso, substrato, semeadura e manutenção da cultura

O cultivar de soja utilizada foi a ‘Anta 82 RR’, com hábito de crescimento semideterminado, pertencente ao grupo de maturação 7,4, apresentando ciclo semiprecoce na região.

Foram utilizados vasos de polipropileno preto (Citropote) com dimensões de 150x150x350 mm e volume aproximado de 4 litros. Para evitar perdas de substrato, os vasos foram forrados com um tecido permeável.

Para o preparo do substrato utilizado, coletou-se solo de camada de subsuperfície, de área não utilizada para agricultura e após uniformização do material e retiradas de impurezas, através de peneira, o mesmo foi misturado à areia média e substrato comercial, em uma proporção de 1:1:1. As características físicas e químicas (macro e micronutrientes) são apresentadas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Resultados da análise química: pH (CaCl_2), teor de matéria orgânica (M.O., g dm^{-3}), teor de macronutrientes (P, mg dm^{-3}) (K, Ca, Mg, H+Al, Al, $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), soma de bases (S, $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), capacidade de trocas catiônica (CTC, $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), saturação por bases (V, %), saturação por alumínio (m, %), e teor enxofre (SO_4 , mg dm^{-3}) do substrato utilizado. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S	CTC	V	m	SO_4
5,2	7	26	0,5	12	5	22	0	18	40	44	0	11

* P: Resina

Tabela 3 - Resultados da análise química de micronutrientes (Cu, Fe, Zn, Mn e B, mg dm^{-3}), e física (argila, silte, areia total, areia grossa e areia fina, g kg^{-1}) do substrato que será utilizado. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Cu	Fe	Zn	Mn	B	Argila	Silte	Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina
0,5	14	0,4	3,2	0,25	179	21	800	470	330

* Cu, Fe, Zn e Mn: DTPA. B: água quente. Argila (<0,002mm). Silte (0,053-0,002 mm). Areia total (2,00-0,053 mm). Areia grossa (2,00-0,210 mm). Areia fina (0,210-0,053 mm). Textura: substrato arenoso (RAIJ, 1991)

Tabela 4 - Desenvolvimento fenológico da cultura de soja (FEHR; CAVINESS, 1977). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, 2015

Descrição dos estádios vegetativos		
Estádio	Subtítulo	Descrição ¹
V _E	Emergência	Cotilédones acima da superfície do solo
V _C	Estádio cotiledonar	Cotilédones completamente abertos
V ₁	Primeiro nó	Folhas unifoliadas desenvolvidas
V ₂	Segundo nó	Primeira folha trifoliada desenvolvida
V ₃	Terceiro nó	Segunda folha trifoliada desenvolvida
V _n	n-ésimo nó	n-ésima folha trifoliada desenvolvida
Descrição dos estádios reprodutivos		
Estádio	Subtítulo	Descrição ¹
R ₁	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó do caule ²
R ₂	Florescimento pleno	Uma flor aberta num dos dois últimos nós do caule com folha desenvolvida
R ₃	Início da frutificação	Vagem com 5 mm de comprimento num dos 4 últimos nós do caule com folha desenvolvida
R ₄	Vagem desenvolvida	Vagem com 2 cm de comprimento num dos 4 últimos nós do caule com folha desenvolvida
R ₅	Início da formação dos grãos	Grão com 3 mm de diâmetro num dos 4 últimos nós do caule com folha desenvolvida
R ₆	Grãos desenvolvidos	Grãos verdes preenchendo toda a cavidade da vagem de um dos 4 últimos nós do caule com folha desenvolvida
R ₇	Início da maturação	Uma vagem normal no caule com coloração madura
R ₈	Maturidade fisiológica	95% das vagens com coloração madura

¹ A caracterização do estágio fenológico é definida quando 50% ou mais das plantas da parcela ou da amostra apresenta as características descritas

² Denominou-se caule a haste principal da planta

O substrato teve seu pH corrigido para 6,5 com a adição de 1.300 kg ha⁻¹ de calcário (80% PRNT). A adubação utilizada foi calculada com base no volume de cada vaso e aplicada na forma de solução nutritiva, adicionando-se 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 80 kg ha⁻¹ de K₂O, sendo a adubação potássica dividida em duas vezes, sendo a primeira e a segunda parcela do fertilizante aplicada 15 e 30 dias após a semeadura, respectivamente. O substrato foi colocado nos vasos, acomodando a mesma massa de substrato em cada. A mistura do substrato bem como a homogeneização do calcário foi feita em betoneira pertencente ao Departamento de Produção vegetal (LPV) - USP/Esalq. As sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*, via inoculante líquido (Concentração: 5,0 x 10⁹ células viáveis por mL) e tratadas com piraclostrobina + fipronil + tiofanato-metílico. Os vasos foram semeados no dia 26 de

março de 2015, semeando-se 5 e posteriormente desbastando os mesmos para que houvesse 1 planta por vaso. Durante o ciclo da cultura foram feitas 3 aplicações de beta-ciflutrina + imidaclopride em V₄, V₈ e R₂ para controle de *Bemisia tabaci*. A escala fenológica utilizada no experimento foi a mesma proposta por Fehr e Caviness (1977) (Tabela 4).

3.3 Curva de retenção de água no solo

Para determinação da curva de retenção de água no solo foi utilizado o método descrito pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011), por intermédio da câmara de pressão de Richards (EMBRAPA, 2005).

3.3.1 Amostragem do substrato

Após uniformização e homogeneização, por intermédio de peneira granulométrica com abertura de 2 mm (padrão 10 ABNT), do substrato, coletou-se uma amostra deformada de 5 kg do mesmo que foi encaminhada para o laboratório de física do solo do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – Cena/USP campus Luiz de Queiroz.

3.3.2 Preparo das amostras laboratoriais

A amostra deformada foi acondicionada em anéis volumétricos de plástico, ajustando-se o substrato, com auxílio de espátula, para que o mesmo fique exatamente com o volume do anel. A parte inferior do anel é envolvida com tecido poroso e presa com uma liga de borracha.

O conjunto, amostra + anel, foi colocado sobre placa de cerâmica porosa, previamente saturada, e posteriormente transferido para dentro de uma bandeja com água destilada, até a metade da altura do anel cilíndrico, e mantido por 24 horas para ocorrer a saturação do meio (amostra e tecido poroso + placa porosa).

3.3.3 Instalação das amostras na câmara de Richards

Após o término do período de saturação do meio, as amostras foram retiradas da bandeja para medir a massa correspondente ao ponto de saturação (potencial matricial de 0 cm). Posteriormente, as amostras, sobre a placa porosa, foram levadas para o interior da câmara de pressão, onde foram submetidas a seis valores de potencial matricial: -60, -100, -330, -1.000, -3.000 e -15.000 cm, utilizando-se 5 repetições (amostras) em cada.

A cada tensão aplicada, sempre de forma crescente, após cessar a drenagem do excedente de água (equilíbrio entre tensão aplicada e a umidade relacionada) as amostras foram retiradas do interior da câmara e suas massas foram mensuradas, por intermédio de balança analítica de precisão. Em seguida, as mesmas foram recolocadas na câmara ajustando-a ao ponto de pressão seguinte. Desta forma, por diferença de massa, foram determinadas as umidades, de cada amostra, correspondente a cada pressão aplicada (potencial matricial).

Ao final da aplicação de todas as tensões pré-definidas, as amostras foram transferidas para latas de alumínio taradas e levadas para estufa a 105°C por 72 horas para a determinação da densidade do solo, massa de terra seca da amostra e posterior cálculo da umidade da mesma.

Após a finalização das determinações, o tecido poroso, anel volumétrico e a liga de borracha tiveram suas massas mensuradas para que se procedesse as devidas correções de cálculo da massa de cada amostra.

3.3.4 Ajuste dos dados da curva de retenção

O conjunto de pares de dados, pontos de potencial matricial *versus* conteúdo de água no solo (u , kg kg⁻¹), obtidos por intermédio da câmara de pressão de Richards, foram ao modelo proposto por van Genuchten (1980), apresentado a seguir:

$$u = u_r + \frac{(u_s - u_r)}{[(1 + \alpha \cdot |\Psi|)^n]^m} \quad (1)$$

em que u se refere ao conteúdo de água do solo (kg kg⁻¹), u_r ao conteúdo de água residual (kg kg⁻¹), u_s ao conteúdo de água na saturação (kg kg⁻¹), ψ ao potencial matricial (cm), α (cm⁻¹), n e m aos parâmetros empíricos do modelo. Adotou-se para o cálculo a seguinte restrição:

$$m = (1 - (1 / n)) \quad (2)$$

3.4 Tratamentos

Os tratamentos foram compostos por diferentes níveis de estresse por *deficit* hídrico (3, 6, 9 e 12 dias sem irrigação) aplicados no período de enchimento de grãos (R₅), além do tratamento controle conduzido sem restrição hídrica durante todo o ciclo. O tratamento controle foi mantido com umidade do solo igual a 100% da capacidade de água disponível (teor de água correspondente à capacidade de campo), assim como os demais tratamentos quando não estiveram no período de suspensão da irrigação para indução do estresse por *deficit* hídrico. A Tabela 5 apresenta a descrição de todos os tratamentos.

Tabela 5 - Descrição dos tratamentos componentes do experimento. Todos os vasos foram mantidos com armazenamento de água no solo igual à capacidade de água disponível (teor de água correspondente à capacidade de campo) quando sob irrigação. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Tratamento	Descrição
T ₁	Controle
T ₂	3 dias sem irrigação
T ₃	6 dias sem irrigação
T ₄	9 dias sem irrigação
T ₅	12 dias sem irrigação

3.5 Delineamento experimental e análises estatísticas

O experimento foi conduzido no formato de delineamento inteiramente casualizado composto por cinco tratamentos e cinquenta repetições. As análises estatísticas das variáveis foram realizadas por intermédio da análise da variância e teste de Duncan ($\alpha = 0,05$). Os parâmetros umidade do substrato, potencial hídrico foliar, conteúdo relativo de água na folha e prolina foram analisados sempre comparados ao controle (sem restrição hídrica) (Tabela 6), no dia em que se completava o número de dias sem irrigação estipulado para cada tratamento (Tabela 5) (para o melhor entendimento da discussão dos dados, os mesmos serão discutidos de forma relativa ao tratamento controle).

Os componentes de produção foram comparados ao final do ciclo da cultura entre todos os tratamentos. Todas as análises foram realizadas utilizando o *software* SAS (SAS INSTITUTE, 2001).

3.6 Parâmetros avaliados

3.6.1 Umidade do substrato

Para a determinação da umidade do substrato, foram utilizados três vasos de cada tratamento analisado em cada avaliação (Tabela 6). Cada vaso, após a retirada da planta, teve o substrato homogeneizado para diluir o efeito da diferença de umidade devido à profundidade. Posteriormente, dez amostras foram coletadas, acondicionadas em latas de alumínio, taradas e tiveram suas massas determinadas por intermédio de balança analítica de precisão.

As mesmas foram levadas para estufa, com circulação forçada de ar, a uma temperatura de 105°C por 72 horas. Logo em seguida, as latas tiveram novamente suas massas

determinadas e posteriormente sua respectiva umidade calculada por intermédio da diferença entre as determinações, que se refere à massa de água retirada pela estufa.

Tabela 6 - Disposição das avaliações da umidade do solo, *status* hídrico da planta, teor relativo de água nas folhas e teor de prolina livre nos tratamentos sob restrição hídrica (T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, e T₄: 9 dias sem irrigação) comparados ao controle (sem restrição hídrica) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Avaliação	Tratamentos avaliados	Ocasão da amostragem
AV ₁ (primeira avaliação)	T ₁ ¹ e T ₂	3 ^o dia sem irrigação ²
AV ₂ (segunda avaliação)	T ₁ e T ₃	6 ^o dia sem irrigação
AV ₃ (terceira avaliação)	T ₁ e T ₄	9 ^o dia sem irrigação
AV ₄ (quarta avaliação)	T ₁ e T ₅	12 ^o dia sem irrigação

¹ O tratamento 1 foi conduzido, durante todo o ciclo das plantas, sem restrição hídrica

² A amostragem foi realizada ao final de cada período, pré determinado, sem irrigação

3.6.2 Potencial hídrico foliar

Para avaliar o potencial hídrico foliar das plantas, foi utilizado o equipamento SAPS II 3115 (*Soil moisture*, Santa Barbara, CA, Estados Unidos) (SCHOLANDER et al., 1965). Foram escolhidas ao acaso três repetições de cada tratamento, onde duas folhas trifolioladas foram coletadas em cada planta, resultando um total de seis repetições. Os potenciais hídricos das folhas da soja foram mensurados dois a dois (Tabela 6). As leituras foram realizadas antes do nascer do sol.

3.6.3 Conteúdo relativo de água na folha

Para a determinação do conteúdo relativo de água (CRA, %), foram retirados 6 discos foliares com diâmetro aproximado de 8 mm cada um e imediatamente pesados (M_f , g disco⁻¹) em balança com precisão de 1 mg. Em seguida, foram colocados em frascos de vidro, completados com água destilada e levados à geladeira ($\pm 2^\circ\text{C}$). Após seis horas, as superfícies dos discos foliares foram secas em papel toalha e pesadas novamente (M_{st} , g disco⁻¹). Após esta operação o material foi colocado em estufa com circulação forçada de ar (80°C) por 24 horas, obtendo-se assim a massa de matéria seca (M_s , g disco⁻¹), segundo metodologia proposta por Barrs e Weatherley (1962).

$$CRA = \left[\frac{(M_f - M_s)}{(M_{st} - M_s)} \right] \cdot 100 \quad (3)$$

em que CRA se refere ao conteúdo relativo de água na folha (%), M_f à massa de matéria fresca do disco foliar (g disco⁻¹), M_s à massa de matéria seca do disco foliar (g disco⁻¹), e M_{st} à massa de matéria fresca saturada do disco foliar (g disco⁻¹).

3.6.4 Determinação dos teores de prolina livre nas folhas

Para a determinação dos teores de prolina, foram utilizados os trifólios coletados em cada avaliação (Tabela 6).

O material coletado foi armazenado em freezer até o dia da análise em laboratório.

O extrato para determinação da prolina foi obtido pela adição de 5 mL de ácido sulfossalicílico a 3% em cerca de 200 mg de pó liofilizado das folhas, sendo a mistura deixada em agitação constante por uma hora a temperatura ambiente (25°C). Posteriormente, o homogenato foi centrifugado a 3000 x g por 10 minutos, a temperatura ambiente. Ao final da centrifugação, o precipitado formado foi descartado sendo o sobrenadante (extrato) utilizado para a determinação de prolina livre, segundo método descrito por Bates et al. (1973).

Para a reação, foram usados tubos de ensaio com tampa rosqueável, nos quais foram adicionados 1 mL de extrato, 1 mL de ninidrina ácida (solução que contém 1,25 g de ninidrina, em 30 mL de ácido acético glacial, e 20 mL de ácido fosfórico 6M) e 1 mL de ácido acético glacial, deixando-se a mistura em banho-maria (100°C) por uma hora, para o desenvolvimento da cor. Em seguida, os tubos de ensaio foram colocados em banho de gelo por 10 minutos para cessar a reação. A extração do cromóforo foi realizada pela adição de 2 mL de tolueno à mistura de reação, seguida de agitação vigorosa. Após repouso, e formação da mistura bifásica, a fase superior foi retirada para a quantificação dos níveis de prolina livre, por intermédio de medidas de absorbância em 520 nm.

Utilizou-se como branco apenas o tolueno. Como padrão, utilizou-se a prolina pura.

Os resultados obtidos são expressos em $\mu\text{mol g}^{-1}$ de matéria fresca. Cada repetição (amostra) foi representada por um extrato simples e dosado em triplicata.

3.6.5 Componentes de produção e a produção por planta

Os parâmetros relacionados à produção foram: (a) número de vagens por planta, (b) número de grãos por vagem, (c) número de vagens abortadas, (d) porcentagem de pegamento de vagens, (e) número de grãos por planta, (f) massa por grão e (g) produtividade de grãos por planta.

Ao final do ciclo, as plantas de soja foram retiradas para a determinação dos componentes de produção, sendo que para cada planta foram realizadas as contagens de número de vagens abortadas e cheias e os grãos produzidos. Posteriormente, foi calculado o número de grãos por vagem e a porcentagem de pegamento de vagens, que foi obtido pela

relação entre número de vagens abortadas pelo número total de vagens produzidas pela planta (viáveis ou não).

A produção de cada planta (massa de grãos produzidos) foi mensurada por intermédio de balança analítica de precisão. Em seguida foram levados para estufa, onde tiveram suas umidades determinadas para posterior correção do valor da massa para 13% (teor de água nos grãos). Após a correção, calculou-se a massa por grão (massa unitária de grão).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Curva de retenção de água

Após saturadas, as amostras tiveram suas massas determinadas e, posteriormente, foram submetidas a valores de potencial matricial em módulo crescentes para a determinação dos pontos da curva de retenção de água no solo, onde u corresponde à umidade gravimétrica e ψ_m ao potencial matricial do solo. Foram utilizados os seguintes valores de potencial matricial: -60, -100, -330, -1.000, -3.000 e -15.000 cm por intermédio do uso da câmara de pressão de Richards, conforme descrito por Embrapa (2005). Utilizou-se os valores médios para elaboração de uma única curva representativa do substrato utilizado (Tabela 7).

Tabela 7 - Dados obtidos em laboratório para a curva de retenção de água no substrato. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Repetição	Potencial matricial (cm)					
	-60	-100	-330	-1000	-3000	-15000
Teor de água a base de massa (u, kg kg ⁻¹)						
1	0,2320	0,2257	0,1740	0,0956	0,0707	0,0508
2	0,2432	0,2311	0,1585	0,1028	0,0697	0,0515
3	0,2366	0,2504	0,1382	0,0956	0,0719	0,0529
4	0,2325	0,2536	0,1626	0,0941	0,0701	0,0512
5	0,2466	0,2381	0,1556	0,0925	0,0723	0,0537
Média	0,2382	0,2398	0,1578	0,0961	0,0709	0,0520

Com os dados médios de umidade e potencial matricial, após ajustes dos mesmos ao modelo de van Genuchten (1980), obteve-se a equação (curva característica) para o substrato utilizado (Figura 2).

$$u = 0,05178 + \frac{(0,25146 - 0,05178)}{[(1 + 0,00478 \cdot |\Psi|)^{1,96007}]^{0,4898}} \quad (4)$$

Figura 2 - Curva característica de retenção de água para o substrato utilizado: teor de água a base de massa (u , kg kg⁻¹) em função do potencial matricial (Ψ , cm). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Ressalta-se que 1 atm equivale a aproximadamente 101,3 kPa ou ainda 1033 cm.

4.2 Umidade do substrato

Conforme o exposto na Tabela 8, em todos os tratamentos submetidos à suspensão da irrigação, foram verificadas diminuições significativas na umidade média do substrato, quando comparados ao tratamento controle (sem restrição hídrica).

Nascimento et al. (2010) afirmam que a curva característica de retenção de água no solo relaciona, de forma direta, a umidade com o potencial matricial do solo.

Os dados de potenciais foram calculados a partir da umidade do substrato. Sendo assim, pode-se inferir que as diferenças significativas observadas entre os demais tratamentos comparados ao controle podem ser consideradas nos respectivos potenciais matriciais do solo.

Na Figura 3, nota-se a diminuição gradativa, comparando-se ao controle (irrigado), da umidade gravimétrica do solo ao decorrer dos dias sem irrigação. Ressalta-se a diminuição de 80% na umidade do substrato aos doze dias sem irrigação, quando comparado ao controle.

Jones (2007) afirma que a utilização de métodos para a determinação da umidade gravimétrica do solo (u , kg kg⁻¹) são apontados como eficientes em estudos hídricos relacionados à adaptação de plantas ao *deficit* hídrico.

Tabela 8 - Umidades médias (u , kg kg^{-1}) e respectivos potenciais matriciais médios do solo, determinados para cada tratamento, comparados aos potenciais do ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de campo (CC), descritos na literatura. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Descrição		u (kg kg^{-1})	Potencial matricial	
			atm	kPa
AV ₁ (primeira avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	0,308 a*	- 0,06	- 6,0
	T ₂ (3 dias sem irrigação)	0,206 b	- 0,17	- 16,96
AV ₂ (segunda avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	0,326 a	- 0,06	- 6,0
	T ₃ (6 dias sem irrigação)	0,104 b	- 0,80	- 81,00
AV ₃ (terceira avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	0,320 a	- 0,06	- 6,0
	T ₄ (9 dias sem irrigação)	0,080 b	- 1,54	- 155,88
AV ₄ (quarta avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	0,314 a	- 0,06	- 6,0
	T ₅ (12 dias sem irrigação)	0,056 b	- 12,43	- 1259,71
PMP ¹			- 15,00	- 1500,00
CC ²			- 0,06	- 6,0

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Duncan (1955) ao nível de 5% de probabilidade

¹ Ponto de murcha permanente, proposto por Briggs e Shantz (1912)

² Capacidade de campo, proposta por Reichardt (1988)

De acordo com estudos realizados por Fioreze et al. (2011), a umidade do solo apresenta correlação com valores de conteúdo relativo de água, sendo possível observar um padrão de desidratação foliar, em função do secamento do solo. Entretanto, os autores chamam a atenção para o fato dos coeficientes dessa correlação variarem de acordo com o genótipo de soja estudado indicando assim uma sensibilidade diferencial entre eles à diminuição da água disponível no solo.

Figura 3 - Valores relativos de umidades gravimétricas do substrato (UG, %) referentes aos tratamentos sob restrição hídrica (t, dias) (T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, e T₄: 9 dias sem irrigação) comparados ao controle (sem restrição hídrica) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação) ($UG = 0,6308.t^2 - 14,395.t + 100,41 - R^2 = 0,9928$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

4.3 Potencial hídrico foliar

Nas médias dos potenciais hídricos foliares, apresentadas na Tabela 9, avaliadas em relação a diferentes períodos de estresse hídrico, não encontrou-se diferença estatística significativa para as avaliações um e dois, controle comparado a 3 DSI e controle comparado a 6 DSI, respectivamente.

Tabela 9 - Médias dos potenciais hídricos foliares (ψ_f , bar, atm e cm) dos tratamentos relacionados ao controle e suas respectivas avaliações. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Descrição		ψ_f (bar)	ψ_f (atm)	ψ_f (cm)
AV ₁ (primeira avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	2,50 a ¹	2,47	2549,29
	T ₂ (3 dias sem irrigação)	1,88 a ¹	1,85	1917,07
AV ₂ (segunda avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	2,54 a	2,51	2590,08
	T ₃ (6 dias sem irrigação)	2,42 a	2,39	2467,71
AV ₃ (terceira avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	1,08 b [*]	1,06	1101,29
	T ₄ (9 dias sem irrigação)	7,58 a	7,48	7729,45
AV ₄ (quarta avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	2,29 b	2,26	2335,15
	T ₅ (12 dias sem irrigação)	16,08 a	15,87	16397,04

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Duncan (1955) ao nível de 5% de probabilidade

¹ Comparação de médias entre tratamentos pertencentes à mesma avaliação

² ^{ns} não significativo pelo teste de F

Figura 4 - Valores relativos de potenciais hídricos foliares (PHF, %) referentes aos tratamentos sob restrição hídrica (t, dias) (T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, e T₄: 9 dias sem irrigação) comparados ao controle (sem restrição hídrica) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação) ($PHF = 8,3505.t^2 - 46,759.t + 115,18 - R^2 = 0,9935$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Segundo o critério proposto por Hsiao (1973), para que um estresse de deficiência hídrica seja considerado moderado/severo, o potencial hídrico e o CRA (%) devem ser considerados. O mesmo autor classifica como estresse hídrico severo quando a planta tem seu conteúdo relativo de água reduzido em mais de 20%.

Na Figura 4, nota-se um aumento em demasia do potencial hídrico foliar, analisando-o em conjuntamente a diminuição expressiva do conteúdo de água nas folhas (Figura 5), pode-se, segundo Hsiao (1973), se dizer que as plantas de soja, ao final do décimo segundo dia sem irrigação, encontram-se no estado de estresse hídrico severo.

4.3.1 Conteúdo relativo de água nas folhas

Na Tabela 10 apresentam-se o resultado do teste de médias, entre os tratamentos sob restrição hídrica e o controle. Observa-se que somente o T₅ (12 dias sem irrigação) diferiu estatisticamente do controle, na avaliação 4.

Tabela 10 - Valores médios dos conteúdos relativos de água na folha (CRA, %) referentes aos tratamentos relacionados ao controle em suas respectivas avaliações. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Descrição		CRA (%)
AV ₁ (primeira avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	52,93 a ^{*1}
	T ₂ (3 dias sem irrigação)	50,52 a ¹
AV ₂ (segunda avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	70,57 a
	T ₃ (6 dias sem irrigação)	73,26 a
AV ₃ (terceira avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	51,93 a
	T ₄ (9 dias sem irrigação)	54,83 a
AV ₄ (quarta avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	82,26 a
	T ₅ (12 dias sem irrigação)	51,86 b

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Duncan (1955) ao nível de 5% de probabilidade

¹ Comparação de médias entre tratamentos pertencentes a mesma avaliação

Existem duas estratégias básicas pelas quais as plantas resistem à seca: evitar e tolerar a desidratação (LEVIT, 1972). Características de evitar a desidratação atua na manutenção do conteúdo relativo de água (CRA, %) em tecidos, durante o período de *deficit* hídrico, enquanto plantas que apresentam a estratégia de tolerância apresentam tecidos que podem tolerar a desidratação até certo ponto (baixo conteúdo relativo de água crítico).

Segundo Jones (2007), a utilização da metodologia para determinação do conteúdo relativo de água (CRA, %) é apontada como eficiente no estudo da adaptação de plantas à seca.

Fioreze et al. (2011), estudando o comportamento de genótipos de soja submetidos a *deficit* hídrico intenso, verificaram redução do CRA (%), em comparação ao tratamento mantido sob irrigação para todos os genótipos estudados, porém de maneira diferencial. Entretanto essa diminuição ocorreu já no terceiro dia após a suspensão da rega, fato este não observado no presente estudo, onde, comparado ao tratamento irrigado, observou-se diminuição somente no décimo segundo dia após a suspensão da rega (Figura 5), fato este provavelmente explicado pelas diferenças entre as demandas por água (evapotranspiração), consequentes das épocas distintas de condução dos trabalhos.

A manutenção do CRA (%), observada, no caso do presente estudo, até o nono dia sem irrigação (Figura 1), também foi relatado por James, Lawn e Cooper (2008), onde os autores classificaram esta característica como eficiente na diferenciação de genótipos de soja, em grande parte dos trabalhos de pesquisa com *deficit* hídrico.

Figura 5 - Conteúdos relativos de água (CRA, %) na folha dos tratamentos sob restrição hídrica (T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) comparados ao controle (sem restrição hídrica - T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Maia et al. (2007), estudando o comportamento de dois cultivares de milho submetidos a estresse hídrico de cinco dias em cultivo de verão, também verificaram rápida redução do CRA (%).

Sinclair e Ludlow (1986) sugeriram que, em condições de *deficit* hídrico severo, em que os estômatos permanecem fechados na maior parte do dia, os baixos valores de condutância estomática são de grande importância para a manutenção do conteúdo relativo de água.

4.4 Teor de prolina

Na Tabela 11, estão discriminados os teores médios de prolina nas folhas de soja, para os diferentes tratamentos (dias sem irrigação). Foram observadas diferenças significativas apenas nas avaliações um, três e quatro.

Tabela 11 - Médias dos teores de prolina livre na folha (PRO, $\mu\text{mol g}^{-1}$ de matéria fresca - MF) dos tratamentos relacionados ao controle em suas respectivas avaliações. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Descrição		PRO ($\mu\text{mol g}^{-1}$ MF)
AV ₁ (primeira avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	1,04 b* ¹
	T ₂ (3 dias sem irrigação)	1,44 a ¹
AV ₂ (segunda avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	1,11 a
	T ₃ (6 dias sem irrigação)	1,25 a
AV ₃ (terceira avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	1,29 b
	T ₄ (9 dias sem irrigação)	2,70 a
AV ₄ (quarta avaliação)	T ₁ (nenhum dia sem irrigação)	0,92 b
	T ₅ (12 dias sem irrigação)	52,78 a

*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Duncan (1955) ao nível de 5% de probabilidade

¹ Comparação de médias entre tratamentos pertencentes a mesma avaliação

A Figura 6 ilustra o aumento dos teores médios de prolina nas folhas de soja ao longo dos dias sem irrigação (DSI), destacando-se um aumento, logo ao terceiro dia, de 38% e ao nono dia esse valor dobra em relação ao controle (aumento de 109%).

Figura 6 - Teores relativos de prolina na folha (PRO, %) dos tratamentos no intervalo de zero a nove dias sem irrigação (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, e T₄: 9 dias sem irrigação). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Lobato et al. (2008), estudando o comportamento bioquímico da soja submetida a seis dias de estresse hídrico, no início da fase reprodutiva, observam um aumento de 67% nos teores de prolina, dentre outras alterações bioquímicas.

Sob estresse hídrico, aminoácidos livres como prolina e glicinabetaina são fortemente influenciados e, conseqüentemente, mais rapidamente acumulados (RAMOS et al., 2005).

Figura 7 - Teores relativos de prolina na folha (PRO, %) dos tratamentos no intervalo de zero a doze dias sem irrigação (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Aos doze DSI é caracterizado um aumento na ordem de cinquenta vezes, em relação ao controle (Figura 7), porém esta expressiva concentração de prolina nas folhas não foi suficiente para manter o conteúdo relativo de água nas folhas, como mostra a Figura 5, observa-se nesse ponto um decréscimo de 37% para tal parâmetro.

4.5 Componentes de produção

Segundo Lambert et al. (2007), além da produtividade de grãos outras características agrônomicas, como altura de plantas, altura de inserção do primeiro legume e índice de acamamento, são extremamente importantes e desejáveis a um cultivar, sendo estas características dependentes do genótipo além de sofrerem grande influência de fatores ambientais tais como fertilidade do solo, clima, ano agrícola, umidade, dentre outros.

Na Tabela 12, foram observadas as médias dos parâmetros avaliados seguidas de seus respectivos resultados das comparações pelo teste de Duncan a um nível de 5% de probabilidade.

Tabela 12 - Médias dos componentes de produção e produtividade por planta – número de vagens abortadas (NVA, vagens.planta⁻¹), número de vagens produtivas (NVP, vagens.planta⁻¹), número total de vagens (NTV, vagens.planta⁻¹), pegamento de vagens (PegVag, %), número de grãos (NG, grãos.planta⁻¹), número de grãos por vagem (GV, grãos.vagem⁻¹), massa de grãos (MG, mg.grão⁻¹) e produtividade (Prod, g.planta⁻¹). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

DSI ¹	NVA	NVP	NTV	PegVag	NG	GV	MG	Prod ²
0	10,42 a*	9,03 a	19,45 a	46,69 a	17,06 a	1,90 bc	121,21 a	2,06 a
3	8,83 a	7,60 ab	16,14 b	45,84 a	13,71 b	1,81 c	134,10 a	1,81 a
6	8,47 b	7,75 ab	16,22 b	48,05 a	14,33 b	1,87 bc	126,93 a	1,84 a
9	10,21 a	6,79 b	17,23 ab	39,13 b	13,76 b	2,17 ba	99,31 b	1,38 b
12	7,88 b	4,68 c	12,56 c	36,78 b	9,32 c	2,39 a	83,90 b	0,79 c
CV(%) ³	37,72	42,80	37,03	19,02	41,15	34,64	32,31	53,02

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Duncan (1955) ao nível de 5% de probabilidade

¹ Dias sem irrigação

² Prod: Produção por planta (produtividade) corrigida a 13% (teor de água no grão)

³ CV: Coeficiente de variação (%)

4.5.1 Número de vagens abortadas

Observa-se na Figura 8, a porcentagem relativa de vagens abortadas de acordo com o número de dias sem irrigação, para tal foi considerado o número de vagens do tratamento controle (plantas sem restrição hídrica durante todo o ciclo) como sendo 100% e os demais comparados de forma relativa ao mesmo.

Comparando-se as médias dos tratamentos (Tabela 12), notam-se diferenças significativas dentre as mesmas, sendo os tratamentos submetidos a zero, três e nove dias sem irrigação, os que apresentaram em média mais vagens abortadas.

Figura 8 - Valores relativos de vagens abortadas (VA, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($VA = 0,0475.t^2 - 1,7542.t + 95,881 - R^2 = 0,2848$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Observa-se uma tendência de diminuição no abortamento de vagens ao passo em que a intensidade do *deficit* hídrico aumenta. Concomitantemente, observa-se também uma diminuição significativa no número total de vagens (Tabela 12), corroborando novamente com a hipótese de Casagrande et al. (2001): a planta sob estresse hídrico direciona seus fotoassimilados, preferencialmente, para estruturas com maior probabilidade de sucesso reprodutivo, visando garantir a produção de descendentes.

4.5.2 Número de vagens produtivas

De acordo com os resultados observados, nota-se que houve diminuição no número de vagens produtivas ao passo que se intensifica o estresse hídrico (Figura 9).

Observa-se na Tabela 12, que o tratamento sem restrição hídrica foi superior quanto ao número de vagens produtivas. As plantas submetidas a nove e doze dias sem irrigação apresentaram as menores médias, 6,79 e 4,68, respectivamente.

Figura 9 - Valores relativos de vagens produtivas (NVP, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($NVP = -0,217.t^2 - 0,9077.t + 96,544 - R^2 = 0,9176$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Os dados apresentados corroboram com diversos resultados encontrados na literatura (THOMAS; COSTA, 1994; KARAM et al., 2005; SINCIK et al., 2008; GARCIA y GARCIA et al., 2010; MASOUMI et al., 2010), reafirmando o conceito da plasticidade e sensibilidade deste parâmetro para com o estresse hídrico.

4.5.3 Número total de vagens

Na Figura 10, observa-se uma tendência de diminuição do número total de vagens produzidas por planta, ao passo em que se aumenta a intensidade do *deficit* hídrico. Sendo que o tratamento sob restrição hídrica mais severa (doze dias sem irrigação) apresentou uma média de número de vagens produzidas 30% menor quando comparado às que plantas foram irrigadas durante todo o ciclo.

Fioreze et al. (2011), comparando em casa de vegetação três cultivares de soja submetidos a diferentes períodos de *deficit* hídrico no início do período reprodutivo da cultura, relataram diminuição da média do número de vagens totais produzidas por planta, em dois cultivares estudadas ('CD 201' e 'CD 217').

Em estudos realizados, em diferentes anos, lâminas de irrigação e cultivares de soja, Comlekcioglu e Simsek (2011) relataram diminuição significativa da média do número de vagens totais produzidas por planta, observando valores variando entre 54,33 e 111,33 vagens por planta, variando de acordo com o genótipo e ao regime hídrico. Os autores afirmam que dentre os componentes de produção da soja, este é o parâmetro mais importante para a produtividade da cultura, porém o mais sensível à restrição hídrica e, portanto uma oferta adequada de água é necessária para a produção de vagens, em cultivares de alta produtividade.

Figura 10 - Valores relativos de vagens totais produzidas (NTV, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($NTV = -0,0753.t^2 - 1,3613.t + 96,189 - R^2 = 0,7246$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo. 2015

Isoda et al. (2006) relatam que, em condições favoráveis de cultivo, cultivares de soja com elevadas produtividades produzem mais do que 60 vagens por planta.

Demirtaş et al. (2010) observaram resultado semelhante em que diferentes *deficits* de irrigação afetaram significativamente o número total de vagens por planta interferindo na produtividade da cultura.

4.5.4 Pegamento de vagens

Na Tabela 12, observam-se as médias de pegamento de vagem, nota-se que os tratamentos submetidos a maiores *deficits* hídricos, nove e doze dias sem irrigação, foram significativamente inferiores aos demais, ou seja, ambos apresentaram, em média, menores pegamento de vagens, porém não diferiram entre si.

Nas plantas submetidas a nove dias sem irrigação, nota-se um maior número de vagens totais, todavia, em contrapartida, as mesmas apresentaram um maior número de vagens abortadas. No caso das plantas sujeitas ao *deficit* hídrico mais severo, apresentam um menor número de vagens totais, porém com mais vagens produtivas. Entretanto esta diferença de comportamento não resultou em diferença significativa para o caractere pegamento de vagens.

Figura 11 - Valores relativos de fixação (pegamento) de vagens (FV, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($FV = -0,25.t^2 + 1,0768.t + 100,02 - R^2 = 0,8603$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

A Figura 11 apresenta esta tendência de diminuição no pegamento de vagens, à medida que se o solo perde água, possivelmente, pela diminuição do número total de vagens produzidas, apesar de no presente estudo este fato não ficar evidenciado.

Brevedan e Egli (2003) e Egli et al. (1983) observaram, em seus estudos avaliando os efeitos do *deficit* hídrico, em diferentes intensidades, no período de enchimento de grãos, um

aumento no abortamento de vagens e grãos concomitantemente a uma diminuição do número de vagens por planta, o que resulta em menores índices de pegamento de vagens nos tratamentos sujeitos a maiores estresses hídricos.

4.5.5 Número de grãos por vagem

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 12, foram observadas diferenças significativas, quanto ao número de grãos por vagem, em função do número de dias sem irrigação.

Nota-se, em média, uma tendência de aumento para esta característica (Figura 12) à medida que se intensifica o *deficit* hídrico. Possivelmente plantas sob condições hídricas mais restritivas priorizam a fixação de vagens com um maior número de grãos.

Figura 12 - Valores relativos do número de grãos por vagem (GPV, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($GPV = 0,3615.t^2 - 2,0161.t + 99,021$ - $R^2 = 0,9684$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

O número de grãos por vagem, dentre os demais componentes, é o que apresenta menor variação entre diferentes situações de cultivo. Isso demonstra uma uniformidade do melhoramento genético na busca de plantas com produção de, em média, dois grãos por legume (NAVARRO JÚNIOR; COSTA, 2002).

Na literatura, vários estudos relacionando *deficit* hídrico e componente de produção em soja, não verificam interações significativas entres estes fatores. Comlekcioglu e Simsek (2011), Fioreze et al. (2011) e Demirtaş et al. (2010) concluem que o número de sementes por legume está relacionado a taxa de fertilização dos óvulos e que o estresse hídrico não afeta

significativamente este processo, estando o mesmo diretamente relacionado com o genótipo da planta.

Possivelmente a discordância de resultados se deve ao fator “intensidade do estresse hídrico”, visto que no presente estudo o tratamento submetido a doze dias sem irrigação observou-se uma redução drástica na umidade do substrato submetendo as plantas a tensões extremamente negativas no solo (-12,43 atm), aproximando-se, inclusive, do ponto de murcha permanente adotado de -15 atm.

4.5.6 Número de grãos por planta

Na Tabela 12, verifica-se que o tratamento controle (sem restrição hídrica) foi superior, em média, quanto o número de grãos produzidos por planta. Os tratamentos três, seis e nove dias sem irrigação foram estatisticamente iguais, sendo o tratamento não irrigado por doze dias inferior quanto a esta característica.

Figura 13 - Valores relativos do número de grãos produzidos (NG, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T_1 : nenhum - 0 - dia sem irrigação, T_2 : 3 dias sem irrigação, T_3 : 6 dias sem irrigação, T_4 : 9 dias sem irrigação, e T_5 : 12 dias sem irrigação) ($NG = -0,1568.t^2 - 1,1335.t + 95,205$ - $R^2 = 0,7986$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Na Figura 13, observa-se o comportamento relativo dos tratamentos, quanto a esta característica, nota-se uma redução de, aproximadamente, 40% na média do número de grãos produzidos por planta submetida ao maior período sem irrigação, quando comparado ao controle.

Sincik et al. (2008), estudando níveis de *deficit* hídrico sobre o rendimento da cultura da soja, observaram redução significativa quanto a este parâmetro, sendo a redução de

aproximadamente 50% no tratamento submetido a maior intensidade de *deficit* hídrico comparando-se com o controle, conduzido com condições hídricas ideais. Em estudos similares Karam et al. (2005) e Rosadi et al. (2005), também verificaram efeitos significantes do estresse hídrico sobre os componentes de produção e o rendimento da cultura da soja, observando mesma tendência de diminuição no número de grãos por planta conforme intensifica-se o estresse.

Resultados contrários foram relatados por Fioreze et al. (2011), onde não foram verificadas significâncias, quanto a regimes hídricos diferentes, para este parâmetro.

4.5.7 Massa de grãos

Para a característica massa de grãos, não foram verificadas diferenças estatísticas para os tratamentos com restrição hídrica de até seis dias. Os tratamentos com nove e doze dias sem irrigação, não diferiram entre si significativamente, e foram inferiores aos demais apresentando médias iguais a 99,31 e 83,90 mg, respectivamente (Tabela 12).

Apesar da tendência de diminuição observada na presente pesquisa (Figura 14), Navarro Júnior e Costa (2002) dizem que a massa do grão apresenta valor característico de cada cultivar. Porém, os autores admitem que esta característica possa variar de acordo com as condições ambientais e manejo.

Figura 14 - Valores relativos de massa do grão (MG, %) produzido de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T₁: nenhum - 0 - dia sem irrigação, T₂: 3 dias sem irrigação, T₃: 6 dias sem irrigação, T₄: 9 dias sem irrigação, e T₅: 12 dias sem irrigação) ($MG = -0,5045.t^2 + 3,0446.t + 102,27 - R^2 = 0,9313$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo. 2015

Salinas et al. (1996) verificaram que, dentre os componentes de produção, o tamanho e a massa de grãos foram os mais sensíveis ao *deficit* hídrico. Esses autores argumentam ainda que a falta de água durante o enchimento de grãos reduz o tamanho e massa de grãos, devido

a diminuição do suprimento de fotoassimilados produzidos pela planta e/ou inibição do próprio metabolismo do grão.

Rambo et al. (2003), verificando as repostas da soja a irrigação, constataram que houve menor taxa de enchimento de grãos de soja nos tratamentos não irrigados.

Em contrapartida, Kuss et al. (2008) verificaram que a massa média de grãos foi maior nos tratamentos que não receberam irrigação durante o ciclo da cultura. Estes autores argumentam que em decorrência de *deficit* hídrico, ocorrido durante a condução do ensaio, nos períodos de florescimento e final de enchimento de grãos, nestes tratamentos ocorreu maior abortamento de flores e vagens, fazendo com que aqueles legumes que permaneceram na planta acumulassem mais massa seca em seus grãos em relação a plantas com maior número de vagens e grãos, que consequentemente demandariam mais fotoassimilados.

Para Casagrande et al. (2001), este referido comportamento é um mecanismo de tolerância a falta de água, tendo por objetivo direcionar o fluxo de fotoassimilados para as vagens que se apresentam mais adiantadas no processo de desenvolvimento e que, teoricamente, teriam maiores chances de produzir sementes viáveis.

4.6 Produção por planta

Não foram encontradas diferenças estatísticas significativas entre as três primeiras intensidades de *deficit* hídrico, para o caractere produção por planta. O tratamento com nove dias sem irrigação apresentou uma produção média de 1,38 gramas por planta, já o tratamento com maior restrição hídrica (doze dias sem irrigação) diferiu de todos os demais, apresentando a média de 0,79 gramas (Tabela 12).

Figura 15 - Valores relativos da produção de grãos por planta (PGP, %) de acordo com o número de dias sem irrigação (t, dias) (T_1 : nenhum - 0 - dia sem irrigação, T_2 : 3 dias sem irrigação, T_3 : 6 dias sem irrigação, T_4 : 9 dias sem irrigação, e T_5 : 12 dias sem irrigação) ($PGP = -0,4477.t^2 + 0,5577.t + 97,219 - R^2 = 0,9663$). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

A Figura 15 ilustra a expressiva redução da média de produção de grãos por planta, para os tratamentos sob estresse hídrico severo observa-se uma redução de, aproximadamente, 30 e 60% para os regimes de nove e doze dias sem irrigação, respectivamente.

Figura 16 - Valores relativos (%) da produção por planta (Prod13, % - teor de água no grão corrigido para 13%), conteúdo relativo de água (CRA, %), índice de pegamento de vagens (PegVag, %) e teores foliares de prolina (PRO, %), relacionados com diferentes regimes hídricos (T_1 : nenhum - 0 - dia sem irrigação, T_2 : 3 dias sem irrigação, T_3 : 6 dias sem irrigação, T_4 : 9 dias sem irrigação, e T_5 : 12 dias sem irrigação). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015

Segundo Fioreze et al. (2011), a manutenção do *status* hídrico e área foliar em condições de *deficit* hídrico merece destaque, em função da sua relação com o acúmulo de assimilados e com a manutenção do potencial produtivo.

Na Figura 16, observa-se o comportamento e interação de alguns parâmetros avaliados. No caso do conteúdo relativo de água (CRA, %), chama a atenção sua manutenção até o nono dia sem irrigação, resultante em um teor de água do substrato de $0,08 \text{ kg kg}^{-1}$ ($\Psi_{\text{solo}} = -1,54 \text{ atm}$). Muito provavelmente o efeito da concentração foliar de prolina, é o grande responsável por esta manutenção, visto que nesse mesmo período (até 9 DSI) os teores dobram, relativamente a testemunha (Figura 16). Segundo Nogueira et al. (2001), o acúmulo de prolina nas plantas representa um mecanismo compensatório para a sobrevivência da mesma, sendo que em condições normais esses teores podem variar, na soja, entre 1 a $5 \mu\text{mol g}^{-1}$ e em condições de estresse este valor pode ser de 20 a 100 vezes maior.

A partir deste ponto (9 DSI), pode-se dizer que a planta tem sua defesa natural contra a desidratação superada, observa-se um rápido aumento, significativo, do potencial hídrico foliar e alguns parâmetros, passam a ser significativamente prejudicados, como índice de pegamento de vagens, massa de grãos, número de grãos e produção de grãos por planta.

4.7 Considerações finais

4.7.1 Estresse hídrico

A temática em torno do estresse hídrico de plantas cultivadas com interesse econômico é frequentemente abordada por pesquisadores do mundo todo, porém, até mesmo pela complexidade do assunto e pelas dificuldades metodológicas para realizar estudos dessa natureza, os pesquisadores tendem a explorar o tema a partir de um ramo da ciência, podendo ser ele, por exemplo, a fisiologia vegetal, a agrometeorologia, física do solo ou pela fitotecnia (produção vegetal). Sendo assim, acaba-se gerando uma dificuldade de comparação de resultados e até mesmo para interpretação dos resultados, ocasionado pelas diferentes abordagens ao mesmo assunto.

O presente trabalho foi desenvolvido no intuito de aproximar e, tentar, correlacionar essas pesquisas. Para tal, foram realizadas avaliações de parâmetros relacionados a solo, bioquímica da planta, e, por fim, componentes relacionados à produtividade da soja.

Sabe-se que o solo sofre, de acordo com as condições ambientais, ciclos de umedecimentos e ressecamentos, e essas variações ocorrem durante o ciclo das culturas. Para sobreviver a tais eventos, as plantas, ao longo do tempo, foram se adaptando através de estratégias para tolerar ou evitar o estresse hídrico (pode ser causado exclusivamente pela diminuição da umidade no solo ou pela associação com temperaturas elevadas), sendo que em

alguns casos específicos esses mecanismos podem fazer com que a planta tolere e supere esse período de *deficit* hídrico, sem que ocorram prejuízos significativos a produção.

Tais mecanismos de adaptação variam de acordo com as espécies vegetais e até mesmo com o estágio de desenvolvimento em que elas se encontram. A presença e eficiência, de tais mecanismos, são cada vez mais desejados para o desenvolvimento de novos genótipos mais adaptados a situações adversas.

Para a soja, tem-se a informação de que estes mecanismos são eficientes até um certo ponto, porém ao serem vencidos a planta sofre sérios prejuízos tendo sua produção reduzida.

Os dados observados no presente estudo sugeriram que para valores de potencial matricial no solo de até, aproximadamente -0,1 atm (seis dias sem irrigação), os mecanismos de proteção da planta foram suficientemente eficientes em manter o conteúdo de água relativo e potencial hídrico foliar adequado, no caso deste trabalho, particularmente, esses efeitos foram atribuídos à prolina (aminoácido osmoprotetor). A partir desse ponto, no final do nono dia sem irrigação, o solo atinge um potencial matricial de -1,54 atm, o teor de prolina dobra sua concentração (em relação ao controle). Porém, o conteúdo de água e o potencial hídrico foliar já começam a apontar a desidratação dos tecidos da planta, o que refletiu nos componentes de produção da planta.

Ao décimo segundo dia sem irrigação ($\psi_m = -12,43$ atm), os teores de prolina já aumentam demasiadamente. Porém, os parâmetros hídricos da planta já apontam um *deficit* hídrico classificado como severo resultando em reduções drásticas nos componentes de produção.

Enfim, com as tendências de comportamento dos caracteres avaliados e suas prováveis relações entre si, evidencia-se a necessidade de maiores estudos no assunto, buscando integrar o conhecimento das diversas áreas para que se tenha uma visão mais abrangente do problema e como trabalhá-lo.

4.7.2 Dinâmica de uso da água no sistema solo-planta-atmosfera

Tal como ocorre no sistema solo-planta-atmosfera, o movimento da água ocorre constantemente em função da diferença de potencial (abordagem termodinâmica), nos sistemas biológicos, a densidade de fluxo de água é governada pelo potencial hídrico (ψ_w), com a água se movimentando de regiões de maior para regiões de menor potencial.

Dentre todos os elementos do clima, os que afetam o consumo de água pelas plantas são: temperatura e umidade relativa do ar (ou *deficit* de pressão de vapor), porque ambos

definem o potencial total da água, os quais (temperatura e umidade relativa do ar) são alterados pela velocidade do vento e radiação solar, principalmente.

Com o aumento da radiação solar, há o aumento da temperatura com consequente diminuição da umidade relativa: processos diretamente ligados à evaporação da água, onde quando se aumenta a pressão de saturação do vapor de água, aumentando o *deficit* de pressão de vapor, diminui-se a umidade relativa do ar, diminuindo o potencial total, elevando a demanda evapotranspirativa da atmosfera, implicando em maior consumo de água pelas plantas (devido ao aumento da transpiração das mesmas). Por outro lado, o aumento da radiação solar pode ocasionar o aumento diferenciado da temperatura devido à diferença de calor específico do ar em diferentes pontos da atmosfera provocando vento (o ar mais seco, com menor calor específico, aquece mais quando comparado ao ar mais úmido, com maior calor específico, que aquece menos). O vento transporta massa de ar afetando a transferência de água do sistema, também elevando a demanda evapotranspirativa da atmosfera, implicando em maior transpiração, o que pode ser benéfico (ou maléfico), se houver (ou não houver) suprimento de água pelo solo de modo a recuperar turgidez a noite, ocasionando alta (ou baixa) produtividade.

Em resumo, quanto maior for o *deficit* de pressão de vapor, menor será a umidade relativa do ar e maior será a demanda evapotranspirativa da atmosfera, resultando em maiores taxas de transpiração pelas plantas.

Sendo assim, para um mesmo teor de água no solo (potencial matricial), a ocorrência e intensidade do estresse por deficiência hídrica em plantas dependerá da demanda atmosférica por água e do período de duração do estresse.

Considerando que o *deficit* hídrico (diferença entre a evapotranspiração potencial da cultura e a evapotranspiração real) pode ocorrer em duas situações: (i) quando o solo contém água suficiente para que a demanda às plantas seja atendida (no período de 24 horas – dia e noite – ocorre o *deficit* hídrico temporário durante o dia), ou (ii) quando o solo não contém água suficiente para que a demanda (transpiração) às plantas seja atendida: nesse caso, a planta não absorve em velocidade e quantidade suficiente para suprir a demanda atmosférica e não recupera turgidez a noite, a folha com menor teor de água (diminui calor específico) aquece acima do normal afetando o metabolismo (atividade enzimática), ocasionando estresse (como por exemplo, produzindo espécies reativas de oxigênio). Senso assim, os parâmetros

atmosféricos influem diretamente na evapotranspiração da cultura, devendo serem atentamente observados em estudos desta natureza.

5 CONCLUSÕES

Nas condições do presente estudo, os mecanismos de tolerância ao *deficit* hídrico da planta de soja foram suficientes, mantendo o *status* hídrico da planta e sua produtividade até que o potencial matricial no solo de -0,8 atm, sendo que até este valor a prolina se apresentou adequada em seu papel osmoprotetor.

Em períodos de estresse hídrico, a produtividade da planta de soja se encontra correlacionada com a manutenção do conteúdo relativo de água e do potencial hídrico foliar.

Os parâmetros conteúdo de água relativo na folha e potencial hídrico foliar se mostraram adequados para estudos de avaliação quanto à tolerância ao *deficit* hídrico.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO FILHO, J.T.; PAES, R.A.; AMORIM, P.L.; COMASSETTO, F.F.; SILVA, S.C. Características morfológicas e produtivas da maniçoba cultivada sob lâminas hídricas e doses de nitrogênio. **Revista Brasileira Saúde e Produção Animal**, Salvador, v. 14, n. 4, p. 609-623, 2013.
- ASSAD, E.D.; MARIN, F.R.; EVANGELISTA, S.R.; PILAU, F.G.; FARIAS, J.R.B.; PINTO, H.S.; JÚNIOR, J.Z. Forecast system of soybean crop yield for Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 5, p. 615-625, 2007.
- BARRS, H.D.; WEATHERLEY, P.E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficit in leaves. **Australian Journal of Biology Science**, East Melbourne, v. 15, p. 413-428, 1962.
- BATES, L.S.; WALDREN, R.P.E.; TEARE, I.D. Rapid determination of free proline for water stress studies: short communication. **Plant and Soil**, The Hague, v. 39, p. 205-207, 1973.
- BEN AHMED, C.H.; BEN ROUINA, B.; SENSOY, S.; BOUKHRIS, M.; BEN ABDALLAH, F. Changes in gas exchange, proline accumulation and antioxidative enzyme activities in three olive cultivars under contrasting water availability regimes. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 67, n. 2, p. 345-352, 2009.
- BERLATO, M.A.; BERGAMASHI, H. Consumo de água da soja I: evapotranspiração estacional em condições de ótima disponibilidade de água no solo. In. SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DA SOJAEMBRAPA, 1., 1979, Londrina. **Anais...** Londrina: Embrapa CNPSo, 1979. p. 53-58.
- BOYER, J.S. Plant productivity and environment. **Science**, Washington, v. 218, p. 443-448, 1982.
- BRACCINI, A.D.L.; RUIZ, H.A.; BRACCINI, M.D.C.; REIS, M.S. Germinação e vigor de sementes de soja sob estresse hídrico induzido por soluções de cloreto de sódio, manitol e polietileno glicol. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 18, n. 1, p. 10-16, 1996.
- BREVEDAN, R.E.; EGLI, D.B. Short periods of water stress during seed filing, leaf senescence and yield of soybean. **Crop Science**, Hoboken, v. 43, p. 2083-2088, 2003.
- BRIGGS, L.J.; SHANTZ, H.L. **The wilting coefficient for different plants and its indirect determination**. Washington: Department of Agriculture, 1912. 83 p. (Bulletin, 230).
- BURLE, M.L.; RODRIGUES, G.C. Relações hídricas internas da soja sob *deficit* hídrico em condições de campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 25, n. 6, p. 905-913, 1990.

CAMPBELL, M.K. **Biochemistry**. Fort Worth: Harcourt Brace Jovanovich College Publishers, 1991. 622 p.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-188, 1995.

CARNEIRO, M.M.L.C. **Trocas gasosas e metabolismo antioxidativo em plantas de girassol em resposta ao deficit hídrico**. 2001. 43 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia vegetal) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

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 *deficit* hídrico em soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 168-184, 2001.

CHAVES, M.M. Effects of water deficits on carbon assimilation. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 42, p. 1-16, 1991.

CHAVES, M.M.; MAROCO, J.P.; PEREIRA, J.S. Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 30, p. 239-264, 2003.

CHAVES, M.M.; PEREIRA, J.S.; MAROCO, J.; RODRIGUES, M.L.; RICARDO, C.P.P.; OSORIO, M.L.; CARVALHO, I.; FARIA, T.; PINHEIRO, C. How plants cope with water stress in the field: photosynthesis and growth. **Annals of Botany**, Oxford, v. 89, p. 907-916, 2002.

CHAVES FILHO, J.T.; SERAPHIN, E.S. Alteração no potencial osmótico e teor de carboidratos solúveis em plantas jovens de lobeira (*Solanum lycocarpum* St. Hil.) em resposta ao estresse hídrico. **Revista brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 199-204, 2001.

COMLEKCIOGLU, N.; SIMSEK, M. Effects of deficit irrigation on yield and yield components of vegetable soybean (*Glycine max* L. (Merr.)) in semi-arid conditions. **African Journal of Biotechnology**, Nairobi, v. 10, n. 33, p. 6227-6234, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: décimo segundo levantamento**. Brasília, 2015. 139 p.

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

CORNIC, G. Drought stress and high light effects on leaf photosynthesis. In: BAKER, N.R.; BOYER, J.R. (Ed.). **Photoinhibition of photosynthesis: from molecular mechanisms to the field**. Milton Park: BIOS Scientific, 1994. p. 297-313.

CORNIC, G.; GHASHGHAIE, J.; GENTY, B.; BRIANTAIS, J.M. Leaf photosynthesis is resistant to a mild drought stress. **Photosynthetica**, Praha, v. 27, p. 295-309, 1992.

DAVIES, W.J.; ZHANG, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in raying soil. **Annual Review Plant Physiology Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 42, p. 55-76, 1991.

DEMIRTAŞ, Ç.; YAZGAN, S.; CANDOĞAN, B.N.; SINCIK, M.; BUYUKCANGAZ, H.; GOKSOY, A.T. Quality and yield response of soybean (*Glycine max* L. Merrill.) to drought stress in sub-humid environment. **African Journal of Biotechnology**, Nairobi, v. 9, n. 41, p. 6873-6881, 2010.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de, H.R. Ghey et al. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p.

DUNCAN, D.B. Multiple range and multiple F tests. **Biometrics**, New Haven, v. 11, n. 1, p. 1-42, 1955.

EGLI, D.B.L.; MECKEL, L.; PHILLIPS, R.E.; RADCLIFFE, D.; LEGGETT, J.E. Moisture stress and N redistribution in soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 1027-1031, 1983.

EMBRAPA. **Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 2000/01**. Londrina: Embrapa Soja, 2000. 245 p.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Manual de laboratórios: Solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos. São Carlos, Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 334p.

_____. **Tecnologias de produções de soja - região central do Brasil, 2008**. Londrina: Embrapa Soja; Embrapa Cerrados; Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. 208 p. (Embrapa Soja, Sistemas de Produções, 12).

_____. **Tecnologias de produção de soja: Região Central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 262 p.

_____. Embrapa Soja. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=294&cod_pai=17>. Acesso em: 25 out. 2015.

FAGAN, E.B. **A cultura da soja: modelo de crescimento e aplicação da estrobilurina piraclostrobina**. 2007. 83 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

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

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: Agricultural Experimental Station, 1977. 80 p. (Special Report).

FERRARI, E.; PAZ, A.; SILVA, A.C. *Deficit hídrico no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas no Mato Grosso*. **Nativa**, Sinop, v. 3, n. 1, p. 67-77, 2015.

FIGOREZE, S.L.; PIVETTA, L.G.; FANO, A.; MACHADO, F.R.; GUIMARÃES, V.F. Comportamento de genótipos de soja submetidos a *deficit* hídrico intenso em casa de vegetação. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 3, p. 342-349, 2011.

FITTER, A.H.; HAY, R.K.M. **Environmental physiology of plants**. New York: Academic Press. 1987. 422 p.

FLEXAS, J.; MEDRANO, H. Drought-inhibition of photosynthesis in C₃ plants: stomatal e non- stomatal limitations revisited. **Annals of Botany**, Oxford, v. 89, p. 183-189, 2002.

FLEXAS, J.; BOTA, J.; GÁLMÉS, J.; MEDRANO, H.; RIBAS-CARBÓ, M. Keeping a positive balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress. **Physiologia Plantarum**, Kobenhavn, v. 127, p. 343-352, 2006a.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBO, M.; BOTA, J.; GÁLMES, J.; HENKLE, M.; MARTINEZ-CANELLAS, S.; MEDRANO, H. Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO₂ concentration. **New Phytologist**, London, v. 172, p. 73-82, 2006b.

FONSECA, J.M.; RUSHING, J.W.; RAJAPAKSE, N.C.; THOMAS, R.L.; RILEY, M.B. Potential implications of medicinal plant production in controlled environments: the case of feverfew (*Tanacetum parthenium*). **HortScience**, Alexandria, v. 41, n. 3, p. 531-535, 2006.

FONTANA, D.C.; DUCATI, J.R.; WEBER, E.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H.; FIGUEIREDO, D.C. **Monitoramento e previsão da safra de soja 1999/2000 no Brasil**. Porto Alegre: CEPSSRM; UFRGS, 2001. 121 p.

FORD, C.W.; WILSON, J.R. Changes in levels of solutes during osmotic adjustment to water stress in leaves of four tropical pasture species. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 8, n. 1, p. 77-91, 1981.

GARCIA y GARCIA, A.; PERSSON, T.; GUERRA, L.C.; HOOGENBOOM, G. Response of soybean genotypes to different irrigation regimes in a humid region of the southeastern USA. **Agricultural Water Management**, Griffin, v. 97, p. 981-987, 2010.

GONÇALVES, J.G.R. **Identificação de linhagens de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tolerantes à seca**. 2013. 82 p. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas, 2013.

GRACIANO, E.S.A. **Estudos fisiológicos e bioquímicos de cultivares de amendoim (*Arachis hypogaea* L.) submetidas à deficiência hídrica**. 2009. 68 p. Dissertação (Mestrado em Botânica) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.

HAUPT-HERTING, S.; FOCK, H.P. Exchange of oxygen and its role in energy dissipation during drought stress in tomato plants. **Physiologia Plantarum**, Lund, v. 110, p. 489-495, 2000.

HIRAKURI, M.H.; LAZZAROTTO, J.J. **Evolução e perspectivas de desempenho econômico associadas com a produção de soja nos contextos mundial e brasileiro**. 3. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2011. (Documentos, Embrapa Soja, 319).

HONG-BO, S.; CHU, L.Y.; JALEEL, C.A.; ZHAO, C.X. Water deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. **Comptes Rendus Biologies**, Paris, v. 331, n. 3, p. 215-225, 2008.

HSIAO, T.C. Plant responses to water stress, **Annual Review of Plant Physiology**, New York, v. 24, p. 519-570, 1973.

ISODA, A.; MORI, M.; MATSUMOTO, S.; LI, Z.; WANG, P. High yielding performance of soybean in northern Xinjiang, China. **Plant Production Science**, Kyoto, v. 9, n. 4, p. 401-407, 2006.

JALEEL, C.A.; RIADH, K.; GOPI, R.; MANIVANNAN, P.; INES, J.; AL-JUBURI, H.J.; CHANG-XING, Z.; HONG-BO, S.; PANNEERSELVAM, R. Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constraints. **Acta Physiology Plant**, Poznan, v. 31, n. 3, p. 427-436, 2009.

JAMES, A.T.; LAWN, R.J.; COOPER, M. Genotypic variation for drought stress response traits in soybean. I. Variation in soybean and wild Glycine for epidermal conductance, osmotic potential and relative water content. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 59, p. 656-669, 2008.

JONES, H.G. **Plants and microclimate**. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

_____. Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 58, p. 119-130, 2007.

KARAM, F.; MASAAD, R.; SFEIR, T.; MOUNZER, O.; ROUPHAEL, Y. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, Griffin, v. 75, p. 226-244, 2005.

KRAMER, P.J. **Water relations of plants and soils**. New York: Academic Press, 1995. 495 p.

KUSS, R.C.R.; KÔNIG, 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.

LAMBERT, E.S.; MEYER, M.C.; KLEPKER, D. **Cultivares de soja 2007/2008 Região Norte e Nordeste**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 36 p. (Documento, 284).

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Tradução de C.H.B.A. Prado. São Carlos: RIMA Artes e Textos, 2000. 531 p.

_____. **Plant ecophysiology**. São Carlos: RIMA Artes e Textos, 2006. 531 p.

LAWLOR, D.W. The effects of water deficit on photosynthesis. In: SMIRNOFF, N. (Ed.): **Environment and plant metabolism: flexibility and acclimation**. Milton Park: BIOS Scientific, 1995. p. 129-160.

LAWLOR, D.W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant Cell Environment**, Oxford, v. 25, p. 275-294, 2002.

LEA, P.J.; AL-SULAITI, A.; PALMER, S.; DAVIES, W.J. Absorção e metabolismo de nitrogênio sob estresse hídrico. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE ESTRESSE AMBIENTAL: O MILHO EM PERSPECTIVA, 1., 1995, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Embrapa, CNPMS, 1995. p. 163-194.

LEI, W.; TONG, Z.; SHENGYAN, D. Effect of drought and rewatering on photosynthetic physioecological characteristics of soybean. **Acta Ecologica Sinica**, Amsterdam, v. 26, n. 7, p. 2073-2178, 2006.

LEVITT, J. **Responses of plants to environmental stress**. New York, Academic Press, 1972. 698 p.

LEVITT, J. **Response of plants to environmental stress II: walter radiations, salt and other stress**. New York: Academic Press, 1980. 606 p.

_____. Stress terminology. In: TURNER, N.C.; KRAMER, P.J. (Ed.). **Adaptation of plants to water and high temperature stress**. New York: Wiley-Interscience, 1982. p. 437-439.

LOBATO, A.K.S.; OLIVEIRA NETO, C.F.; SANTOS FILHO, B.G.; COSTA, R.C.L.; CRUZ, F.J.R.; NEVES, H.K.B.; LOPES, M.J.S. Physiological and biochemical behavior in soybean (*Glycine max* cv. Sambaiba) plants under water deficit. **Australian Journal of Crop Science**, Amsterdam, v. 2, n. 1, p. 25-32, 2008.

MACHADO, A.V. **Efeitos do estresse hídrico em plantas jovens de *Hedyosmum brasiliense* Mart. (Chloranthaceae)**. 2004. 65 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MACHADO, J.C.; OLIVEIRA, J.A.; VIEIRA, M.G.G.C.; ALVES, M.C. Controle da germinação de sementes de soja em testes de sanidade pelo uso da restrição hídrica. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 25, n. 2, p. 77-81, 2003.

MAIA, P.S.P.; FERREIRA NETO, C.; CASTRO, D.S.; FREITAS, J.M.N.; LOBATO, A.K.S.; COSTA, R.C.L. Conteúdo relativo de água, teor de prolina e carboidratos solúveis totais em folhas de duas cultivares de milho submetidas a estresse hídrico. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, supl. 2, p. 918-920, 2007.

MASOUMI, H.; MASOUMI, M.; DARVISH, F.; DANESHIAN, J.; NOURMOHAMMAD, G.; HABIBI, D. Change in several antioxidant enzymes activity and seed yield by water deficit stress in soybean (*Glycine max* L.) cultivars. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici**, Cluj-Napoca, v. 38, n. 3, p. 86-94, 2010.

- MELO, H.C; CASTRO, E.M.; SOARES, A.M.; MELO, L.A.; ALVES, J.D. Alterações anatômicas e fisiológicas em *Setaria anceps* Stapfex Massey e *Paspalum paniculatum* L. sob condições de *deficit* hídrico. **Hoehnea**, Lavras, v. 34, n. 2, p. 145-153, 2007.
- MENESES, C.H.S.G.; LIMA, L.H.G.M.; LIMA, M.M.A.; VIDAL, M.S. Aspectos genéticos e moleculares de plantas submetidas ao *deficit* hídrico. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 1039-1072, ago. 2006.
- MEYER, R.F.; BOYER, J.S. Osmoregulation, solute distribution, and growth in soybean seedlings having low water potentials. **Planta**, Berlin, v. 151, n. 5, p.482-489, 1981.
- MITTLER, R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. **Trends in Plant Science**, Kidlington, v. 11, n. 1, p. 15-19, 2006.
- MORAES, G.A.F.; MENEZES N.L. Desempenho de sementes de soja sob condições diferentes de potencial osmótico. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 2, p. 219- 226, 2003.
- MORGAN, J.M. Osmoregulation and water stress in higher plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 35, p. 299-319, 1984.
- NASCIMENTO, P.S.; BASSOI, L.H.; PAZ, V.P.S.; VAZ, C.M.P.; NAIME, J.M.; MANIERI, J.M. Estudo comparativo de métodos para a determinação da curva de retenção de água no solo. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 2, p. 193-207, 2010.
- NAVARRO JÚNIOR, H.M.; COSTA, J.A. Contribuição relativa dos componentes do rendimento para a produção de grãos em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 3, p. 269-274, 2002.
- NEUMANN, P.M. The role of cell wall adjustment in plant resistance to water deficits. **Crop Science**, Madison, v. 35, n. 5, p. 1258-1266, 1995.
- NOBEL, P.S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. 3rd ed. New York: Academic Press, 2005. 567 p.
- NÓBREGA, L.H.P.; RODRIGUES, T.J.D.; MALHEIROS, E.B.; NÓBREGA, J.C.M. Deficiência na germinação de sementes de soja. **Revista Brasileira de sementes**, Brasília, v. 20, n. 1, p. 126-13, 1998.
- NOGUEIRA, R.J.M.C.; MORAES, J.A.P.V.; BURITY, H.A.; BEZERRA, E.N. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleiras submetidas a *deficit* de água. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 13, p. 75-87, 2001.
- NOGUÉS, S.; BAKER, N.R. Effects of drought on photosynthesis in Mediterranean plants grown under enhanced UV-B radiation. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 51, p. 1309-1317, 2000.

OHASHI, Y.; NAKAYAMA, H.; SANEOKA, H.; FUJITA, K. Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants. **Biologia Plantarum**, Praha, v. 50, p. 138-141, 2006.

JORDAN, W.R. Whole plant response to water deficits: an overview. In: TAYLOR, H.M.; JORDAN, W.R.; SINCLAIR, T.R. **Limitations to efficient water use in crop production**. Madison: ASA; CSSA; SSA. 1983. p. 289-317.

PALLAS, J.E.; STANSELL, J.R.; KOSKE, T.J. Effects of drought on florunner peanuts. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, n. 5, p. 853-858, 1979.

PALTA, J.A.; KOBATA, T.; TURNER, N.C.; FILLERY, I.R. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by post anthesis water deficits. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 1, p. 118-124, 1994.

PEREIRA, J.W.L.; MELO FILHO, P.A.; ALBUQUERQUE, M.B.; NOGUEIRA, R.J.M.C.; SANTOS, R.C. Mudanças bioquímicas em genótipos de amendoim submetidos a *deficit* hídrico moderado. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 4, p. 766-773, 2012.

PIMENTEL, C. Relações hídrica em dois híbridos de milho sob dois ciclos de deficiência hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 11, p. 2021-2027, 1999.

PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A.; DONAGEMMA, G.K.; MENDONÇA, E.S. Ponto de murcha permanente de soja, feijão e plantas daninhas. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 35-41, 2004.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres; Potafos, 1991. 343 p.

RAMBO, L.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L.F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F.G. Rendimento de grãos da soja em função do arranjo de plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 3, p. 405-411, 2003.

RAMOS, M.L.G.; PARSONS, R.; SPRENT, J.I. Differences in ureide and amino acid content of water stressed soybean inoculated with *Bradyrhizobium japonicum* and *B. elkanii*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Goiânia, v. 40, p. 453-458, 2005.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 211-216, 1988.

REYNOLDS-HENNE, C.E.; LANGENEGGER, A.; MANI, J.; SCHENK, N.; ZUMSTEG, A.; FELLER, U. Interactions between temperature, drought and stomatal opening in legumes. **Environmental Experimental Botany**, Oxford, v. 68, p. 37-43, 2010.

RIBAUT, J.M.; PILET, P.E. Water stress and indol-3ylacetic acid content of maize roots. **Planta**, Berlin, v. 193, p. 502-507, 1994.

ROSADI, R.A.B.; AFANDI, M.S.; SENGE, M.; ITO, K.; ADOMAKO, J.T. Critical water content and water stress coefficient of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under deficit irrigation. **Paddy Water Environmental**, Heidelberg, v. 3, p. 219-223, 2005.

SALDANHA, G.S. **Evaporação de água do solo na fase inicial desenvolvimento das culturas do milho e soja**. 2009. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

SALINAS, A.P.R.; ZELENER, N.; CRAVIOTTO, R.M.; BISARO, Z. Respuestas fisiológicas que caracterizan el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la diferencia hídrica en el suelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 5, p. 331-338, 1996.

SANTOS, F.L.; ALEXANDRE, C.; COELHO, R. Relações solo-água-plantas. In: SHAHIDIAN, S.; GUIMARÃES, R.; RODRIGUES, C.M. (Ed.). **Hidrologia agrícola**. Évora: ICAAM, 2012. p. 153-203.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. *Deficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SANTOS, V.L.M.; CALIL, A.C.; ALVARENGA, E.M.; SANTOS, C.D. Efeito do estresse salino e hídrico na germinação e vigor das sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 14, n. 2, p. 189-194, 1992.

SAS INSTITUTE. **SAS users guide: statistics: version 8.2.6**. Cary, 2001.

SCALON, S.P.Q.; MUSSURY, R.M.; MELLHO EUZÉBIO, V.L.; KODAMA, F.M.; KISSMANN, C. Estresse hídrico no metabolismo e crescimento inicial de mudas de Mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 4, p. 655-662, 2011.

SCHOLANDER, P.F.; HAMMEL, H.T.; BRASTREET, E.D.; HEMMINGSEN, E.A. Sap pressure in vascular plants. **Science**, New York, v. 148, p. 339-346, 1965.

SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R.C.; BARROS, H.B. Origem, evolução e importância econômica. In: SEDIYAMA, T. (Ed.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Mecenass, 2009.

SILVA, R.C.B. **Germinação e desenvolvimento inicial de plântulas de melancia submetidas ao aumento do CO₂, temperatura e salinidade**. 2012. 88 p. Dissertação (Mestrado em Horticultura Irrigada) - Universidade do Estado da Bahia, Juazeiro, 2012.

SILVA, R.R. **Relação entre precipitação pluviométrica da cultura de soja no município de Ibirubá - RS**. 2013. 93 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

SINCIK, M.; CANDOGAN, B.N.; DEMIRTAŞ, C.; BUYUKCANGAZ, H.; YAZGAN, S.; GOKSOY, A.T. Deficit irrigation of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a sub-humid climate. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 2250, n. 194, p. 200-205, 2008.

SINCLAIR, T.R.; LUDLOW, M.M. Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grains legumes. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 13, p. 329-341, 1986.

SHARP, R.E. Interaction with ethylene: changing views on the role of abscisic acid in root and shoot growth responses to water stress. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 25, p. 211-222, 2002.

STILLER, I.; DULAI, S.; KONDRÁK, M.; TARNAI, R.; SZABÓ, L.; TOLDI, O.; BÁNFALVI, Z. Effects of drought on water content and photosynthetic parameters in potato plants expressing the trehalose-6-phosphate synthase gene of *Saccharomyces cerevisiae*. **Planta**, Berlin, v. 227, p. 299-308, 2008.

STRECK, N.A. Do we know how plants sense drying soil? **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 581-584, 2004.

STUHFAUTH, T.; SCHEUERMANN, R.; FOCK, H.P. Light energy dissipation under water stress conditions. **Plant Physiology**, Rockville, v. 92, p. 1053-1061, 1990.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

_____. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.

TEZARA, W.; MITCHELL, V.J.; DRISCOLL, S.D.; LAWLOR, D.W. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. **Nature**, New York, v. 401, p. 914-917, 1999.

THOMAS, A.L.; COSTA, J.A. Influência do *deficit* hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 9, p. 1389-1396, 1994.

TUBEROSA, R.; SANGUINETI, M.C.; LANDI, P. Absciscic acid concentration in leaf and xylem sap, leaf water potential, and stomatal conductance in maize. **Crop Science**, Madison, v. 34, n. 4, p. 1537-1563, 1994.

TURNER, N.C. Adaptation to water deficits: a changing perspective. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 13, n. 1, p. 175-190, 1986.

_____. Further progress in crop water relations. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Advances in agronomy**. New York: Academic Press, 1997. p. 293-337.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soybeans and oil crops**. 2013. Disponível em: <<http://www.ers.usda.gov/topics/crops/soybeans-oilcrops/background.aspx>>. Acesso em: 27 out. 2015.

van GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VASELLATI, V.; OESTERHELD, D.; MEDAN, D.; LORETI, J. Effects of flooding and drought on the anatomy of *Paspalum dilatatum*. **Annals of Botany**, Oxford, v. 88, p. 355-360, 2001.

VIDAL, M.C.; SERAPHIN, E.S.; CÂMARA, H.H.L.L. Crescimento de plântulas de *Solanum lycocarpum* St. Hil. (Lobeira) em casa de vegetação. **Acta Botânica Brasílica**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 3, p. 271-274, 1999.

WISE, R.R.; ORTIZLOPEZ, A.; ORT, D.R. Spatial-distribution of photosynthesis during drought in field-grown, acclimated, and non-acclimated growth chamber-grown cotton. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 100, p. 26-32, 1992.

WONG, S.C.; COWAN, I.R.; FARQUHAR, G.D. Leaf conductance in relation to rate of CO₂ assimilation. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 78, p. 830-834, 1995.

YORDANOV, I.; VELIKOVA, V.; TSONEV, T. Plant responses to drought and stress tolerance. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, Sofia, v. 19, 2003.

ZAGDANSKA, B.; KOZDOJ, J. Water stress-induced changes in morphology and anatomy of flag leaf of spring wheat. **Acta Societatis Botanicorum Poloniae**, Warszawa, v. 63, n. 1, p. 61-66, 1994.

ZAMBRANO, O.D.B. **Sinalização entre os sistemas radiculares e caulinares em genótipos contrastantes de *Lycopersicon* sob estresse por deficiência hídrica**. 2004. 46 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia e Bioquímica de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

ZHANG, M.; DUAN, L.; TIAN, X.; HE, Z.; LI, J.; WANG, B.; LI, Z. Uniconazole - induced tolerance of soybeans to water deficit in relation to changes in photosynthesis, hormones and antioxidant system. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 164, p. 709-717, 2007.

ANEXOS

ANEXO A

Figura 17 - Médias de temperatura (TEMP, °C) a cada decêndio (1, 2 e 3) (M3 - terceiro decêndio de março - a J2 - segundo decêndio de junho) do período de condução do experimento, entre os meses de março a junho (M - J). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015. Legenda: (S) semeadura, (R₅) estágio fenológico correspondente ao início da formação dos grãos (início da imposição dos tratamentos) e (C) colheita

ANEXO B

Figura 18 - Médias de umidade relativa do ar (UR, %) a cada decêndio (1, 2 e 3) (M3 - terceiro decêndio de março - a J2 - segundo decêndio de junho) do período de condução do experimento, entre os meses de março a junho (M - J). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015. Legenda: (S) semeadura, (R₅) estágio fenológico correspondente ao início da formação dos grãos (início da imposição dos tratamentos) e (C) colheita

ANEXO C

Figura 19 - Médias de radiação global (RG, MJ m⁻² dia⁻¹) a cada decêndio (1, 2 e 3) (M3 - terceiro decêndio de março - a J2 - segundo decêndio de junho) do período de condução do experimento, entre os meses de março a junho (M – J). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015. Legenda: (S) semeadura, (R₅) estágio fenológico correspondente ao início da formação dos grãos (início da imposição dos tratamentos) e (C) colheita

ANEXO D

Figura 20 - Médias de radiação líquida (RL, MJ m⁻² dia⁻¹) a cada decêndio (1, 2 e 3) (M3 - terceiro decêndio de março - a J2 - segundo decêndio de junho) do período de condução do experimento, entre os meses de março a junho (M – J). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015. Legenda: (S) semeadura, (R₅) estágio fenológico correspondente ao início da formação dos grãos (início da imposição dos tratamentos) e (C) colheita

ANEXO E

Figura 21 - Médias de evapotranspiração potencial (ETp, mm por 10 dias) a cada decêndio (1, 2 e 3) (M3 - terceiro decêndio de março - a J2 - segundo decêndio de junho) do período de condução do experimento, entre os meses de março a junho (M - J). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015. Legenda: (S) semeadura, (R₅) estágio fenológico correspondente ao início da formação dos grãos (início da imposição dos tratamentos) e (C) colheita

ANEXO F

Figura 22 - Médias de evapotranspiração real (ETr, mm por 10 dias) a cada decêndio (1, 2 e 3) (M3 - terceiro decêndio de março - a J2 - segundo decêndio de junho) do período de condução do experimento, entre os meses de março a junho (M - J). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. 2015. Legenda: (S) semeadura, (R₅) estágio fenológico correspondente ao início da formação dos grãos (início da imposição dos tratamentos) e (C) colheita