

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

LUCIA HELENA WIECHETECK

**PONTO DE MURCHA PERMANENTE PARA TRIGO E CEVADA EM SOLOS DOS
CAMPOS GERAIS DO PARANÁ**

PONTA GROSSA

2017

LUCIA HELENA WIECHETECK

**PONTO DE MURCHA PERMANENTE PARA TRIGO E CEVADA EM SOLOS DOS
CAMPOS GERAIS DO PARANÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Ponta Grossa para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração: Agricultura. Linha de Pesquisa: Uso e Manejo do solo.

Orientadora: Prof. Dr^a. Neyde Fabíola Balarezo Giarola

PONTA GROSSA

2017

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

Wiecheteck, Lucia Helena
N572 Ponto de murcha permanente para trigo e
 cevada em solos dos Campos Gerais do
 Paraná/ Lucia Helena Wiecheteck. Ponta
 Grossa, 2017.
 68f.

 Dissertação (Mestrado em Agronomia -
 Área de Concentração: Agricultura),
 Universidade Estadual de Ponta Grossa.
 Orientadora: Prof^a Dr^a Neyde Fabíola
 Balarezo Giarola.

 1. Ponto de murcha permanente. 2. Umidade
 do solo. 3. Textura. I. Giarola, Neyde
 Fabíola Balarezo. II. Universidade
 Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em
 Agronomia. III. T.

CDD: 633.1



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

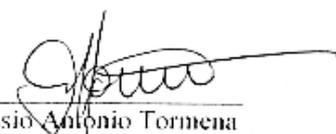
Título da Dissertação: "Ponto de murcha permanente para trigo e cevada em solos dos campos gerais do Paraná".

Nome: Lucia Helena Wiecheteck

Orientador: Neyde Fabiola Balarezo Giarola

Aprovado pela Comissão Examinadora:


Prof.ª Dr.ª Neyde Fabiola Balarezo Giarola


Prof. Dr. Cassio Antonio Tormena


Prof. Dr. Eduardo Augusto Agnellos Barbosa

Data da Realização: 28 de março de 2017.

*“ O caminho pode nos levar para onde não esperamos,
mas sempre para onde deveríamos estar ”.*

Autor desconhecido

“ ... a principal necessidade de nossas vidas é alguém que nos obrigue a fazer o que somos capazes de fazer ... ”

Autor desconhecido

À Lucia Maria Wiecheteck, pelos momentos de lucidez em minha insanidade.

À Ariane Lentice de Paula, em três palavras: aceitação, paciência, evolução.

À Solange Aparecida Carvalho pelas longas conversas regadas a chá.

DEDICO

" A mente que se abre a uma nova ideia jamais volta ao seu tamanho original ".

Albert Einstein

“ Às gerações de pesquisadores, que, ao longo de suas vidas, no silêncio inquieto dos laboratórios labutaram para desvendar os segredos das plantas ”.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Força Suprema de Sabedoria e Criação do Universo, por me conceder discernimento e disposição em abraçar novos desafios.

À família pela mais profunda fonte de aprendizado.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa pela estrutura e oportunidade de formação.

Ao Programa de Pós-Graduação e aos professores do programa pela contribuição em conhecimento.

À Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ); ao Prof. Dr. Álvaro Pires da Silva (*in memoriam*) e ao Programa de Pós-Graduação de Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade.

Em especial, a orientadora Prof. Dr^a. Neyde Fabíola Balarezo Giarola e ao Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena pelo incentivo, orientação e amizade.

Aos Laboratórios de Física de Solos da ESALQ e da UEPG.

Aos funcionários do departamento de Solos da ESALQ, Jair e Rossi, pelo apoio, competência e momentos de descontração.

Aos amigos Dácio Benassi e José Alfredo Baptista dos Santos, exemplos de conhecimento, superação, determinação, companheirismo e profissionalismo.

Aos amigos da pós-graduação, Adlíz Budziak, Fernanda Wagner, Isabela Passenti, Jessica Alves dos Santos, Renato Lima, Lorena Chagas Torres, Adriano Halisk, André Carlos Auler, Angelo Bini e demais colegas, pelos bons momentos.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização desta etapa.

WIECHETECK, L. H. PONTO DE MURCHA PERMANENTE PARA TRIGO E CEVADA EM SOLOS DOS CAMPOS GERAIS DO PARANÁ. 2017, 68 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2017.

RESUMO

Determinar o conteúdo de água armazenada no solo utilizando culturas indicadoras, permite reunir informações que podem levar a uma otimização no uso de recursos naturais em regiões propensas a períodos mais secos. O objetivo deste trabalho foi determinar o ponto de murcha permanente (PMP) para trigo e cevada em Latossolos de origem sedimentar com diferentes classes texturais. O estudo foi conduzido em vasos em casa de vegetação. O delineamento foi em blocos casualizados, em arranjo fatorial (3x2x2). Os tratamentos constituíram-se da combinação de solos com três classes texturais distintas (argiloso, franco-argilo-arenoso e arenoso), duas culturas (trigo e cevada) e quatro cultivares: trigo (NOBLE e MESTRE) e cevada (BRS BRAU e ANAG 01). Os solos foram mantidos próximos a 90% da capacidade de campo, até 45 dias, para o início do estresse hídrico, momento em que passaram a não receber água. Ao primeiro sinal de murcha das culturas, os vasos foram transferidos para uma câmara escura, com umidade relativa do ar próxima de 100%, para constatação do não retorno definitivo da turgidez. Em PMP foram coletadas amostras de solo sem raízes, para determinar o teor de água em base gravimétrica. Pelo método laboratorial a determinação do teor de água ocorreu na tensão de 1500 kPa. Anéis volumétricos foram retirados dos vasos e submetidos a mesa de tensão, em tensões de -0,1, -10, -20, -40, -60, -80, -100, -300, -500, -700 kPa. O conteúdo de água dos solos para o PMP, foram obtidos pelo método fisiológico e pela câmara de Richards. Os dados foram submetidos a análise estatística descritiva para observação da homogeneidade. Quando em conformidade com as pressuposições, realizou-se o teste F de significância para 5%. As variáveis de umidade obtida pelos dois métodos, foram correlacionadas, apresentando equivalência para as culturas. Por regressão estimou-se o potencial em que as plantas murcharam. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software R (R CORE TEAM, 2013). Os resultados demonstraram que as variáveis estruturais do solo apresentam correlação com os maiores teores de água e as texturais, assumiram correlação com os teores de água em maiores valores de tensão. O PMP fisiológico pôde ser utilizado para indicar cultura com maior tolerância ao déficit hídrico.

Palavras chave: Ponto de Murcha Permanente. Umidade do solo. Textura.

WIECHETECK, L. H. PERMANENT WILT POINT IN SOIL-PLANT RELATIONSHIP FOR WHEAT AND BARLEY. 2017, 68 s. Dissertation (Master Science in Agronomy) – Ponta Grossa State University, Ponta Grossa, 2017.

ABSTRACT

Determining the levels of water stored in the soil using indicator cultures allows gather information that can optimizing the natural use of resources in regions prone to drier periods. The objective of this work was to determine the permanent wilt point (PMP) for wheat and barley in sedimentar Latosols with different textural classes. The study was conducted in pots under greenhouse conditions. The design was in randomized blocks, in factorial arrangement (3x2x2). The treatments consisted in a combination of soils with three distinct texture classes (clayey, sandy loam, sandy loam), two cultures (wheat and barley) and four cultivars: wheat (NOBLE and MESTRE) and barley (BRS BRAU and ANAG 01). The soils were kept close to 90% of field capacity, up to 45 days, for the beginning water stress, when they didn't receive water. At the first sign of wilt in cultures, the pots were transferred to a dark chamber, with relative air humidity close to 100%, to verify the definitive non-return of the turgidity. In PMP soil samples were collected without roots to determine the water content on gravimetric basis. By the laboratory method the determination of water content occurred in 1500 kPa tension. Volumetric rings were removed from plots and submitted to tension table at: -0,1, -10, -20, -40, -60, -80, -100, -300, -500, -700 kPa. Soil water content for PMP was obtained by physiological method and Richards chamber. The data were submitted to descriptive statistical analysis to observe the homogeneity. When, according to assumptions, F-test of significance was performed for 5%. The moisture variables obtained by two methods were correlated, presenting equivalence for the cultures. By regression, the potential in which the plants were wilted was estimated. Statistical analyzes were performed using software R (R CORE TEAM, 2013). The results showed that the structural soil variables present correlation with the higher water contents and the textural ones, assumed correlation with the water contents in higher values of tension. The physiological PMP could be used to indicate crops with greater tolerance to water deficit.

Keywords: Permanent wilt Point. Soil Moisture. Texture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma das atividades realizadas.....	32
Figura 2: Análise textural pelo método do densímetro.....	34
Figura 3: Mapa do Brasil (A). Localização geográfica do município de Tibagi (B). Imagem por satélite da área de coleta de solo (C): Ponto (1) textura arenosa. Ponto (2) textura franco-argilo-arenosa. Ponto (3) textura argilosa.	36
Figura 4: Representação do sistema de irrigação (A). Sistema de irrigação em teste para determinação da tensão (B). Disposição das mesas na estufa (C).....	37
Figura 5: Filtros em saturação (A). Montagem dos filtros nos vasos (B). Teste do sistema de irrigação (C). Sistema de irrigação instalado (D).....	38
Figura 6: Corte do sistema de irrigação (A). Vedamento superficial (B).....	39
Figura 7: Vasos no interior da câmara úmida (A) e (B).	39
Figura 8: Coleta das amostras em anel volumétrico (A) (B) (C). Embalagem de uma das amostras (D).	40
Figura 9: Anéis volumétricos submetidos a mesa de tensão (A) e (B).....	41
Figura 10: Amostras deformadas em saturação para submissão em câmara de pressão em (A) e (B).	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coordenadas geográficas dos pontos coletados em Latossolo Vermelho distrófico.	33
Tabela 2: Distribuição do tamanho de partículas em Latossolo Vermelho distrófico.....	35
Tabela 3: Atributos químicos e granulométricos de Latossolo Vermelho distrófico na instalação do experimento.	35
Tabela 4: Esquema da análise de variância para a umidade em PMP fisiológico.....	43
Tabela 5: Análise descritiva para umidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em PMP Fisiológico.	44
Tabela 6: Dados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de significância para W e p-valor no PMP fisiológico.....	45
Tabela 7: Análise de variância para umidade em PMP fisiológico.....	46
Tabela 8: Teste de médias para a umidade em PMP fisiológico em função das texturas.	46
Tabela 9: Teste de médias para a umidade em PMP fisiológico em função das cultivares. ..	47
Tabela 10: Análise descritiva para umidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em PMP Laboratorial.	50
Tabela 11: Dados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de significância para W e p-valor no PMP laboratorial.	51
Tabela 12: Análise de variância para umidade em PMP laboratorial.....	51
Tabela 13: Desdobramento analisando o efeito do solo sobre a umidade em cada cultivar. ...	52
Tabela 14: Desdobramento analisando o efeito das cultivares sobre a umidade dentro de cada solo.	52
Tabela 15: Teste de médias para a umidade em PMP laboratorial em função das cultivares e do solo.	53
Tabela 16: Correlação para o PMP das culturas em relação ao solo.	54
Tabela 17: Potencial estimado para PMP fisiológico, equação de regressão e coeficiente de determinação.....	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 HIPÓTESE E OBJETIVOS	16
2.1 HIPÓTESE	16
2.2 OBJETIVO GERAL.....	16
2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 A ÁGUA NO SOLO	17
3.1.1 Propriedades da água.....	17
3.1.2 Ponto de murcha permanente (PMP) e sua determinação	17
3.1.3 Energia da água no solo.....	20
3.1.4 Outros fatores relacionados ao PMP	22
3.1.5 Armazenamento e disponibilidade de água no solo	23
3.1.6 Conceitos de disponibilidade de água no solo e suas implicações	24
3.1.7 Murcha baseada no conceito de equilíbrio hidráulico e termodinâmico	25
3.2 A ÁGUA NA PLANTA	26
3.2.1 Potenciais hídricos na planta	26
3.2.2 Efeitos do déficit hídrico	27
3.2.3 Culturas utilizadas	30
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	32
4.1 Caracterização dos solos.....	32
4.2 Análise textural e química dos solos	33
4.3 Caracterização do experimento e delineamento experimental	35
4.4 Montagem dos vasos	36
4.5 Instalação de sistema de irrigação e semeadura	37
4.6 Determinação do PMP Fisiológico.....	39
4.7 Determinação de umidade na mesa de tensão	41
4.8 Determinação da umidade na Câmara de pressão	41
4.8 CRAs e ajustes.....	42
4.9 Análises estatísticas	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1 Sinais de estresse hídrico em PMP fisiológico.....	43
5.2 Efeito das classes texturais e culturas para umidade em PMP fisiológico	44

5.2.1 Análise descritiva para a umidade em PMP fisiológico	44
5.2.2 Normalidade dos dados	45
5.2.3 Análise de variância.....	46
5.3 Efeito das classes texturais e culturas para umidade em PMP laboratorial.....	49
5.3.1 Análise descritiva para a umidade em PMP laboratorial na tensão de 1500 kPa.....	49
5.3.2 Normalidade dos dados	50
5.3.3 Análise de variância.....	51
5.4 Correlação entre umidades para o PMP pelos métodos fisiológico e laboratorial	53
5.5 Potencial estimado para o PMP fisiológico	54
6 CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
7 ANEXOS	67

1 INTRODUÇÃO

As estimativas dos efeitos das mudanças climáticas apontam para o aumento na temperatura global, sugerindo maior ocorrência de secas, com conseqüente mudança no cenário da produção agrícola (IPCC, 2015).

Nas regiões dos trópicos e subtropicais estão previstas secas mais longas e intensas, com previsão de queda na produtividade das culturas em caso de aumento das temperaturas entre 1,5 e 2,5 graus centígrados (WWAP, 2015). As culturas agrícolas são altamente dependentes da disponibilidade de água e, portanto, deverão passar por processos adaptativos buscando melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

O déficit hídrico irá interferir no comportamento vegetal, e a irreversibilidade envolverá fatores como o genótipo da planta, o estágio de desenvolvimento, a severidade e a duração do déficit. A quantificação da capacidade de armazenamento de água no solo disponível a planta, deverá considerar variações que ocorrem com a textura e as características físicas do solo, mostrando respostas distintas no mecanismo de tolerância.

Os solos da região dos Campos Gerais do Paraná, caracterizam-se por serem de textura arenosa e franco-arenosa (Behling, 1997), derivados sobretudo de rochas sedimentares como o Arenito Furnas e unidades arenosas do Subgrupo Itararé (ASSINE, 1999). A ocorrência de estação seca nestes solos, somado a baixas precipitações, acentua ainda mais os riscos de déficit hídrico.

O ponto de murcha permanente (PMP) é definido pela umidade do solo em que a planta sofre murchamento a partir do qual não se restabelece sua turgidez, mesmo se submetida a atmosfera saturada por doze horas, durante a noite. O relato mais antigo do PMP foi feito por Briggs e Shantz (1912), que observaram sua ocorrência, utilizando várias espécies de plantas, como indicadoras, apontando limites superior e inferior de umidade no solo.

A determinação do PMP pelo método fisiológico é considerada como padrão. Mas, sua demora, torna o método laboratorial mais utilizado, pois considera o PMP equivalente à água retida no solo na tensão de 1500 kPa. Alguns autores constataram diferentes valores para o PMP obtido pela câmara de pressão de Richards, em comparação ao método fisiológico, considerando a influência da espécie na determinação da tensão neste ponto.

A umidade em que ocorre o PMP varia em função do estágio de desenvolvimento da planta, bem como, com o tipo de solo.

Dexter, Czyz e Richard (2012) atribuíram o corte hidráulico ao momento em que não ocorre o preenchimento dos poros do solo por água para formar uma rede contínua, visto que o

deslocamento imiscível da água no solo ocorre em valores tão pequenos que podem ser desprezados.

Assume-se então que o sistema se encontra em equilíbrio hidráulico, indicando uma reduzida condutividade hidráulica. A murcha das plantas em função do estresse causado pelas elevadas tensões matriciais da água no solo está relacionada ao equilíbrio hidráulico da água no solo ou corte hidráulico, sendo controlada pelo potencial de água próximo as raízes. Em condição de equilíbrio, não ocorre gradiente de energia suficiente para o movimento de água em direção às plantas.

Porém, a umidade presente no solo em PMP fisiológico e a umidade residual em amostras de solo submetidas a câmara de Richards, são considerados serem os mesmos valores, em função do deslocamento imiscível cessar na sucção matricial que corresponde ao equilíbrio hidráulico.

As amostras de solo submetidas a extração de água em câmara de pressão mostram similaridade ao processo de absorção de água pelas plantas, e ambos processos, segundo Czyz e Dexter (2012), baseiam-se no deslocamento imiscível, em que a água é deslocada pelo ar por incremento na diferença de pressão. Pela sucção da água no solo manter-se menor que a pressão utilizada para as câmaras de pressão, ocorre a situação em que o deslocamento imiscível da água no solo torna-se mínimo ou desprezível, mesmo sob gradiente de pressão.

A determinação do conteúdo de água na tensão de 1500 kPa utilizando câmara de Richards, pode não mostrar a realidade, uma vez que a heterogeneidade do solo como reservatório de água apresenta diversidade tanto na capacidade de armazenamento quanto na associação com espécies de plantas e seus padrões de absorção.

O PMP fisiológico pode mostrar menores conteúdos de água que os determinados pelas câmaras de pressão. Entretanto, o maior desafio é identificar corretamente o ponto exato em que a planta chega ao estresse por déficit hídrico. Feita a correta determinação, as informações podem mostrar qual cultura ou cultivar apresenta maior tolerância ao déficit hídrico.

Este estudo determinou o PMP fisiológico para plantas de trigo e cevada, em duas de suas cultivares, em Latossolo com diferentes classes texturais, para observar quais diferenças ocorrem entre o PMP fisiológico e o PMP obtido pela câmara de Richards, buscando a possibilidade de indicar de maneira prática qual cultura ou cultivar pode ser indicada em regiões propensas ao déficit hídrico, em condição de similaridade aos solos testados.

2 HIPÓTESE E OBJETIVOS

2.1 HIPÓTESE

Este trabalho testa as seguintes hipóteses: a) que o PMP dos Latossolos não depende das classes texturais em que eles se enquadram; b) que as culturas de trigo e cevada não apresentam diferenças na umidade no PMP.

2.2 OBJETIVO GERAL

Foi determinar o PMP para plantas de trigo e cevada crescidas em Latossolos da região dos Campos Gerais do Paraná, utilizando o método direto (fisiológico) e o método indireto (câmara de Richards) aplicando tensões de 1500 kPa em amostras de solo. Como plantas indicadoras foram utilizadas duas cultivares de trigo (*Triticum aestivum*), NOBLE e MESTRE e duas de cevada (*Hordeum vulgare* L.), BRS BRAU e ANAG 01.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (i) Verificar entre as culturas, se ocorre diferença nos teores de umidade do solo relativo ao PMP fisiológico.
- (ii) Verificar se em cada cultura ocorre equivalência nos teores de umidade dos solos estudados e nos potenciais matriciais, obtidos pelo PMP fisiológico e câmara de Richards.
- (iii) Verificar nas condições testadas, se é possível indicar uma cultura ou cultivar que apresente maior tolerância ao déficit hídrico.
- (iv) Gerar as curvas de retenção de água nos solos para as diferentes classes texturais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A ÁGUA NO SOLO

3.1.1 Propriedades da água

A polaridade da molécula da água relaciona-se a quantidade de pontes de hidrogênio intermoleculares em estado líquido (KERBAUY, 2012). Seu calor específico elevado ($1,0 \text{ cal g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) tende a estabilizar temperaturas, embora comporte-se como excelente condutora de calor quando comparada a outros líquidos e sólidos não metálicos, com tensão superficial superior a maioria destes. A força coesiva alta entre as moléculas, determina a tensão requerida pela teoria da ascensão capilar (REICHARDT, 1985).

Sua densidade máxima a 4°C é de 1.000 kg m^{-3} . A alta constante dielétrica ou habilidade de neutralizar a atração entre cargas elétricas, contribui para seu comportamento como solvente universal (KRAMER; BOYER, 1995). Dissolve a maior quantidade de substâncias se comparada a outro solvente, em função de sua polaridade e tamanho (KERBAUY, 2012).

A neutralização de cargas iônicas, pela formação da camada de solvatação, induz ao isolamento elétrico, que decresce com a concentração do soluto. Tende ainda a se ligar fortemente à superfície de colóides do solo como areia, silte e argila, conferindo importância para a relação solo-planta (KERBAUY, 2012).

A atração para os polos positivos e negativos nas moléculas de água, mantém os íons rodeados pelas moléculas, permanecendo as cargas opostas separadas. Mostra efeito dipolar forte pelos átomos de hidrogênio formarem ângulo de $104,31^{\circ}$ com o oxigênio, resultando em molécula individual com forma de “V” (Libardi, 2012), garantindo propriedades como ponto de fusão e ebulição e a capacidade de dissolver substâncias (KRAMER; BOYER, 1995).

3.1.2 Ponto de murcha permanente (PMP) e sua determinação

A umidade no PMP, é definida como o teor de água em que ocorre murchamento irreversível com graves danos fisiológicos às plantas. Mesmo que a planta desenvolva altas succões, ela não é capaz de absorver a água presente (Moline et al, 2013), reduzindo o fluxo da água no solo para as raízes. A absorção não atende à demanda evaporativa, proporcionando o murchamento da planta (CUTFORD; JEFFERSON; CAMPBELL, 1991).

Vários trabalhos consideram a umidade no PMP, o conteúdo de água retida no solo sob tensão de 1500 kPa, não considerando a espécie vegetal. Souza, Oliveira e Silva (2000) e Klein (2008) ponderam o desafio de estabelecer critérios para definir os teores de água no qual o solo se encontra em PMP, visto que conceitualmente há dependência da espécie de planta e das características físicas do solo.

Richards e Weaver (1943) obtiveram para a tensão da água no solo equivalente a 1500 kPa valores semelhantes em 109 de 133 solos estudados, o qual foi determinado em plantas de girassol, estabelecendo assim a tensão de 1500 kPa como o valor da tensão da água no solo mais comumente relacionada com o PMP.

Furr e Reeve (1945) descreveram o procedimento que padronizou a determinação do murchamento fisiológico através do coeficiente de secamento do solo, realizado com girassol (*Helianthus annuus*), cultivados em solo de textura média em casa de vegetação.

Neste método, também chamado de método direto ou fisiológico, as plantas crescem em vasos, selados superficialmente em estágio pré-determinado de crescimento. Toma-se o cuidado de manter o conteúdo de água em níveis adequados, até atingirem o ponto de expansão completa do terceiro par de folhas para fabáceas, equivalendo ao período de alongação para poáceas. Neste momento, o fornecimento de água é suspenso e o selamento da superfície do solo garante perda de água das plantas somente por transpiração.

As plantas permanecem em ambiente com baixa demanda evaporativa até o completo murchamento das folhas. A verificação do murchamento irrecuperável é realizada em câmara úmida, onde as plantas são colocadas à tarde, permanecendo por período de doze horas. Se as folhas não retornam à condição de turgidez, considera-se aquele teor de água como o PMP.

Richards e Waldleigh (1952) constataram que o potencial hídrico do solo no PMP varia de 1500 a 2000 kPa para muitas plantas herbáceas. A maioria das plantas de cereais apresenta os valores de PMP próximo a 1500 kPa, utilizado como o potencial hídrico do solo aproximado no PMP. Entretanto, a umidade em que ocorre o PMP varia não só em função do estágio de desenvolvimento da planta, mas também com o tipo de solo (SLATYER, 1957; CZYZ; DEXTER, 2013).

Haise, Haas e Jensen (1955) determinaram que plantas de trigo (*Triticum* spp.) em estágio de maturação do grão, apresentam o seu limite inferior de disponibilidade de água próximo de 2451 kPa. Também Sykes (1969) determinando o potencial matricial de água para dois tipos de solo, obteve variações de 700 a 1100 kPa para o girassol, 1050 a 1610 kPa para o tabaco (*Nicotiana attenuata*), 1450 a 2140 kPa para o milho (*Zea mays*), 3470 kPa para a canela

(*Cassia fasciculata* Michs.) e 2050 a 3860 kPa para o capim trigo (*Agropyron intermedium* Host.).

Fernandes et al. (1978) determinaram a umidade em PMP para soja (*Glycine max*), milho e feijão (*Phaseolus vulgaris*) em casa de vegetação. Para a cultura do milho, eles obtiveram tensões entre 490 e 1470 kPa enquanto que para as culturas da soja e do feijão as tensões foram maiores que 1470 kPa. Estes resultados deixam claro que o conceito da umidade em PMP é influenciado pela espécie de planta e pelas características do solo em questão.

A umidade em PMP indica, portanto, o mínimo conteúdo de água disponível no solo para as plantas, sendo um valor de referência, uma vez que os sintomas de murchamento, com perdas produtivas, ocorrem antes que a tensão da água no solo atinja o PMP, com paralisação da atividade vegetal ocorrendo após atingir este ponto (ARRUDA; ZULLO; OLIVEIRA, 1987; VAN LIER, 2000).

Slatyer (1957) pressupôs que não haveria forte razão física para que a absorção de água parasse no PMP. Se ocorresse restrição no desenvolvimento radicular e diminuição significativa pelo baixo potencial hídrico associado ao movimento lento de água no solo em direção à raiz, a absorção seria severamente inibida e para efeitos práticos, considerada como paralisada. Baseando-se nisso, o PMP pode ser considerado como uma grandeza física de determinado solo, estimada pelos teores de água retida em tensão aproximada de 1500 kPa (HILLEL, 1980; ROMANO; SANTINI, 2002).

A determinação da tensão e umidade podem ser realizadas a campo com a utilização de sensores de determinação de umidade ou pelo princípio da gravimetria (REICHARDT; TIMM, 2004; LIBARDI, 2012). Em laboratório, utilizam-se funis de Haines, mesa de tensão, câmaras de Richards, minitensiômetros e psicômetros, entre outros métodos. Estas metodologias não determinam uma faixa única entre tensão e umidade. Frequentemente pela metodologia indireta utiliza-se a câmara de Richards e o psicômetro WP4.

O método direto ou fisiológico, proposto por Briggs e Shantz (1912), utiliza plantas indicadoras, sendo um método considerado demorado e trabalhoso, pois a definição clara da condição de umidade em que a planta murcha e não retorna à turgidez é indispensável (BERNARDO, 1982). A condição primordial é manter o conteúdo de água no solo em teores adequados para que as plantas atinjam determinado estágio de desenvolvimento, a partir do qual ocorrerá a suspensão do fornecimento de água.

As plantas podem chegar ao PMP, ao atingir tensões no solo, em faixas que variam de 800 a 3000 kPa (KLEIN; REICHERT; REINERT, 2006). Por comparação, constatou-se que o

PMP laboratorial e o PMP fisiológico, indicavam valores distintos com teores menores para o PMP realizado pela câmara de Richards, em culturas de milho e girassol.

Salvestro et al. (2013) defende a ideia de que não há um índice laboratorial que substitua o PMP no campo, pois a capacidade de retenção de água nos solos oscila entre 200 e 500 kPa (Reichardt; Timm, 2004) em função da classe textural, podendo ocorrer absorções sob tensão inferior a 1500 kPa.

Czyz e Dexter (2012) questionaram o uso de sucção matricial constante em 1500 kPa para o PMP, pois mostraram que o movimento da água se torna insignificante a um valor crítico de sucção, que pode ser tão pequeno como 300 kPa em solos arenosos. Eles mostraram ainda que em solos com menos de 28% de argila, o murchamento da planta só ocorreria em valores de sucção inferiores a 1500 kPa. Portanto, a sucção crítica depende não só das espécies de plantas, mas também do solo. Czyz e Dexter (2013) utilizando dados de 52 solos, com menos de 25% de argila, previram a média para a sucção matricial em 1030 kPa muito mais baixa que 1500 kPa considerado como referência.

3.1.3 Energia da água no solo

O estado de energia da água e seu movimento, ocorrem em resposta às forças provenientes da percolação, evaporação e absorção pelas plantas, influenciadas pela temperatura e quantidade de água (REICHARDT; TIMM, 2004). A movimentação é lenta, com energia cinética desprezível, e a variação da energia potencial entre dois pontos, força o movimento da água de um estado de maior energia para um de menor energia (REICHARDT, 1990).

A dinâmica da água no solo se faz pela soma de energias potenciais, que determinarão sua retenção e movimento (KLEIN, 2008).

O potencial total de água no solo fornece o sentido de movimento entre dois pontos considerados, quando comparados a um potencial padrão (reservatório de água pura, isenta de sais, e submetido à pressão relativa igual a zero sobre a superfície do solo) (VAN LIER, 2010; LIBARDI, 2012).

Em isotermia, as forças que atuam na retenção podem ser identificadas como: (a) resultante da interação da fase sólida com as fases líquida e gasosa = força matricial; (b) resultante das alterações na composição química da solução de solo = força osmótica; (c) forças decorrentes do potencial gravitacional.

Desta forma, o potencial de água traduz-se na soma de seus componentes de pressão, gravitacional, osmótico e matricial, representados na equação a seguir:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_g + \Psi_o + \Psi_m \quad \text{Equação (1)}$$

- Ψ - potencial total de água no solo.
- Ψ_p - potencial de pressão, ocorre quando a pressão externa, normalmente maior que a pressão de referência (P_o), atua sobre a água no solo.
- Ψ_g - potencial gravitacional, ocorre em decorrência da influência do campo gravitacional terrestre, determinado pela elevação relativa a um nível arbitrário de referência Z_o .
- Ψ_o - potencial osmótico ocorre como resultado pelo fato da água padrão ser pura e a água do solo ser uma solução.
- Ψ_m - representa o resultado das forças de interação entre a matriz do solo e a água, levando a pressões menores que P_o .

O Ψ_p somente ocorre quando a pressão que atua sobre a água é diferente e maior que a pressão atmosférica do padrão P_o (REICHARDT; TIMM, 2004). O Ψ_g sofre atuação da força gravitacional, tendendo a puxar a água em direção ao centro terrestre (KLEIN, 2008). O Ψ_o ocorre em função da diferença de composição química entre a água pura e a solução de solo, afetando as propriedades termodinâmicas e diminuindo sua energia potencial, reduzindo a pressão de vapor (BRADY; WEIL, 2013). O Ψ_m é resultado de forças capilares decorrentes da tensão superficial da água, seu ângulo de contato com a matriz do solo e das forças de adsorção que surgem pela interação entre água e a matriz de solo. É responsável pela retenção da água no solo, produzindo pressões que diminuem a energia potencial da água quando referenciada à água livre, apresentando-se com valores negativos (KLEIN, 2008).

Os fenômenos de capilaridade e adsorção dependem do arranjo e distribuição de poros, e da afinidade que a água apresenta com as superfícies sólidas e a superfície específica do solo. Deste modo, o Ψ_m é responsável pela umidade do solo e a relação entre ambos resulta na curva característica da água no solo ou CRA (LIBARDI, 2012).

Os cátions retidos à superfície negativamente carregada das argilas, também podem promover a adsorção das moléculas de água ou, as moléculas de água podem ser atraídas para as superfícies sólidas pelas forças de London-Van der Waals, que atuam a curto alcance (BRADY; WEIL, 2013).

As forças capilares e de adsorção atuando de forma combinada, constituem as forças mátricas que originam o Ψ_m (REICHARDT; TIMM, 2004). Embora as características de umidade e relações hidráulicas insaturadas dependam deste potencial, os baixos conteúdos de água no solo ainda permanecem pouco compreendidos (TOKUNAGA, 2009).

O teor de argila representa um importante papel, pois afeta a capacidade de retenção de água, propriedades hidráulicas e capacidade de trocas de cátions (CHEN et al, 2014). A água higroscópica, que envolve as superfícies minerais do solo, encontra-se intimamente correlacionada à superfície específica do solo e ao conteúdo de argila presente (WANG et al. 2011).

3.1.4 Outros fatores relacionados ao PMP

Hosseini et al. (2016) correlacionou alguns fungos endofíticos como *Epichloë* spp. a indução de adaptações e mecanismos de tolerância ao estresse hídrico em gramíneas de inverno. Presumiu que por modificações morfofisiológicas, estes fungos compensam efeitos de baixa condutividade hidráulica dos solos, sugerindo que o murchamento ocorre em decorrência de interações entre condições de solo e plantas, que muitas vezes não são completamente conhecidas.

Na diminuição dos teores de umidade, a adsorção da água dependente de propriedades relacionadas com a superfície específica do solo, tais como a textura, conteúdo de matéria orgânica e mineralogia da fração argila (WILLIAMS; PREBBLE; WILLIAMS, 1983).

A textura influencia na distribuição do diâmetro de poros, sendo o teor de argila, responsável por determinar a área de contato entre as partículas sólidas e a água, regendo as forças de retenção, quando relacionados a baixos potenciais como o PMP (REICHARDT, 1990). A condutividade hidráulica no solo é dependente do conteúdo de areia, em condição de baixa tensão, e da argila em tensões elevadas. Solos de textura fina apresentam uma movimentação lenta de fluidos, mantendo-se cheios, em função de seu sistema poroso constituir-se basicamente por poros de pequeno diâmetro (REICHARDT; TIMM, 2004).

Os solos de textura mais arenosa, apresentam-se sem estrutura e com capacidade limitada de adsorção, manutenção de umidade e fluxo de água às plantas. A presença de macroporos para estes solos, leva à condição de condutividade hidráulica saturada mais elevada, quando comparados aos solos de textura fina (KRAMER; BOYER, 1995).

Estudos realizados em várias partes do mundo, correlacionam o PMP com o conteúdo de argila e com a umidade (Botula et al, 2012; Botula et al, 2013; Hosseini et al., 2016),

acrescentando efeitos relacionados com a mineralogia, onde a relação de retenção de água e boa agregação em solos caulíníficos tropicais apresentam distinção dos solos com cargas minerais permanentes em regiões temperadas.

Por estes fatores, a utilização de dados relacionados a propriedades hidráulicas intimamente ligados a região de interesse é fundamental, pois utilizar conjunto de dados de solos de regiões temperadas para prever propriedades hidráulicas de solos de regiões tropicais, pode não ser a melhor escolha (BOTULA et al, 2013).

Nemes et al. (2006) utilizaram conjuntos de dados provenientes dos Estados Unidos, Europa e Brasil e constataram que, utilizando um conjunto de dados de solos de clima temperado como dados de treinamento para prever a retenção de água de solos tropicais do Brasil, as estimativas foram piores do que para outros pares de conjuntos de dados analisados, com erros no valor de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

3.1.5 Armazenamento e disponibilidade de água no solo

A polaridade, as pontes de hidrogênio e a tensão superficial fazem com que a água atinja estado de menor energia livre em sistemas porosos, ficando retida contra a gravidade (KERBAUY, 2012). No processo, as plantas utilizam esta reserva, devolvendo para a atmosfera uma parte na forma de vapor (REICHARDT; TIMM, 2004). O conteúdo disponível, retido nos espaços entre as partículas do solo, quer por capilaridade ou adsorção, conferem maior ou menor facilidade de extração pelas plantas (LEPSCH, 2002).

Considerando o sistema poroso do solo, a retenção ocorre por capilaridade, com ascensão da água contra a gravidade e lateralmente em função da diminuição do tamanho dos poros. Pelo secamento do solo, o volume de água retido diminui restringindo a lâmina de água retida à superfície das partículas por adsorção (BRADY; WEIL, 2013).

O teor de água no solo define o estado saturado, não saturado e seco (KRAMER; BOYER, 1995). A capacidade de armazenamento de água pelos solos é modificada pela textura, estrutura e conteúdo de matéria orgânica. Em condições de saturação, o sistema poroso apresenta-se preenchido com água e com ausência de ar. Nesta condição, os poros maiores preenchidos com água serão drenados pela ação da força gravitacional.

Solo não saturado, apresenta-se com ar nos macroporos e água nos microporos, os quais funcionam como tubos capilares. A água é referida como água capilar, mantendo-se retida no solo, mesmo contra a ação da gravidade, constituindo reservatório para as plantas. Solos secos, podem conter certa quantidade de água sob a forma de películas extremamente finas, ao

redor das partículas coloidais. A água ali presente é retida com força superior à capacidade de extração das raízes das plantas, tornando-se uma reserva indisponível a elas (REICHARDT; TIMM, 2004).

A disponibilidade de água compreende o limite superior, denominado de capacidade de campo (CC) e o limite inferior denominado de ponto de murcha permanente (PMP) como proposto por Veihmeyer e Hendrickson (1949). A CC representa a umidade retida no solo, após drenagem do excesso, tendo ocorrido o decréscimo do movimento descendente (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949; REICHARDT, 1988). A estimativa da CC associa a umidade ao potencial matricial. Em países de clima temperado, a CC representa a umidade retida em potencial de -33 kPa para solos argilosos, e -10 kPa para solos arenosos.

Em solos brasileiros a utilização destes potenciais pode mostrar distinção, como em Latossolo argiloso, principalmente oxídicos, que mostram melhor correlação para -10 kPa ou -6 kPa (REICHARDT, 1988; MELLO et al. 2002; ANDRADE; STONE, 2011).

A adoção de um valor fixo para o PMP, pode resultar em perda de acurácia pelas variações nas propriedades de retenção de água em situações que envolvem tanto o solo como o manejo do mesmo (MELLO, 2002).

3.1.6 Conceitos de disponibilidade de água no solo e suas implicações

Dexter (2004a e 2004b) enfatiza que ao ocorrer a secagem do solo, esvazia-se primeiro a porosidade estrutural, bem visível na curva de retenção de água do solo (CRA), onde o ponto de inflexão (PI) é responsável pela separação das porosidades em estrutural e textural. A partir do PI denota-se a predominância da porosidade textural, entre as partículas primárias do solo, que demandam maior tempo de secagem devido a menor condutividade hidráulica.

Na CRA, o PI, pode indicar um potencial mais próximo das condições de retenção de água no solo, permanecendo consideravelmente constante, mesmo com pouca variação de umidade. A alteração da curvatura no PI, indica mudança no diâmetro médio de poros, alterando a condutividade hidráulica.

Andrade e Stone (2011) utilizaram o PI para estimar a CC em 2242 amostras de solo do cerrado, constatando que a umidade ali presente representa uma variável isolada que melhor explica a CC.

Na CRA, a região para o PMP, apresenta potenciais consideravelmente negativos, assumindo inclinação próxima de zero. Descreve-se uma curva assintótica, estendendo-se de -infinito a +infinito, sem tocar o eixo horizontal, jamais anulando a função de x. Mesmo que

ocorram grandes variações de potencial matricial, ocorrerá pequena variação de umidade (CARDUCCI et al., 2011).

A água disponível às plantas é considerada como a água retida nos solos entre a CC e o PMP ou entre < 10 a < 30 kPa e < 1500 kPa (BRADY; WEIL, 2013). A disponibilidade resulta da interação entre fatores climáticos, atributos do solo relacionados a retenção e condutividade hidráulica, fatores da cultura como arquitetura de planta incluindo raízes com sua distribuição, volume, diâmetro e comprimento (ALLEN et al., 1998; VAN LIER, 2000).

A umidade pode decrescer abaixo de um valor limítrofe, na qual a água não chega à superfície radicular, com velocidade suficiente para suprir à demanda hídrica transpiratória, levando a cultura ao estresse hídrico por déficit (ALLEN et al. 1998). O efeito imediato se traduz na redução da taxa de absorção de CO_2 , ocorrendo redução da taxa fotossintética e menor crescimento da planta (VAN LIER, 2010).

3.1.7 Murcha baseada no conceito de equilíbrio hidráulico e termodinâmico

O movimento da água no solo ocorre em função do deslocamento imiscível, que se aplica às câmaras de pressão ou absorção de água pelas raízes. Considera-se o conteúdo de água presente no solo em murcha fisiológica, para diferentes espécies de planta, e o conteúdo de água presente em amostras de solo submetida a câmara de Richards (-1500 kPa), como sendo os mesmos. Esta consideração se faz, pelo fluxo de água cessar na sucção matricial que equivale ao corte hidráulico, precedente ao equilíbrio termodinâmico. Desta forma, a utilização de -1500 kPa como referência para o PMP ocorreu de forma imprópria, pois a leitura das medidas baseou-se na hipótese de que em amostras de solo submetidas a câmara de pressão, o equilíbrio termodinâmico ocorre com esta pressão aplicada (CZYZ; DEXTER, 2013).

A sucção matricial da água no solo em torno das raízes é responsável pelo murchamento, em função do (i) equilíbrio ou ausência de gradiente de potencial que cause movimento da água no solo e ao redor das raízes, ou (ii) quando ocorrem diferenças entre a sucção da água no solo e as raízes, não ocorrendo fluxos de água líquida (CZYZ; DEXTER, 2012).

Conforme esses conceitos, as plantas podem apresentar limitação na capacidade de absorção pelas raízes, ou pela sucção matricial em PMP ou pela sucção matricial no corte hidráulico, valendo o menor índice. Se a sucção matricial no corte hidráulico for menor que a sucção matricial em PMP, o solo é considerado o causador da murcha, podendo ocorrer variações de valores para as sucções entre a raiz e o solo, sem continuidade de fluxo líquido.

Entretanto, se a sucção matricial no corte hidráulico for maior que a sucção matricial em PMP, a planta torna-se a limitadora, pois as sucções entre raiz e solo encontram-se em equilíbrio, não ocorrendo movimento de água, por não ocorrer gradiente de potencial (CZYZ; DEXTER, 2012).

A utilização da sucção matricial ocorrendo em -1500 kPa, não mostra claramente os processos que ocorrem no sistema solo-planta. Czyz e Dexter (2012) sugerem grande influência de propriedades do solo na murcha de plantas, mostrando que o corte hidráulico pode ocorrer em sucções matriciais menores que -1500 kPa, em solos com conteúdo de argila inferior a 28 kg kg⁻¹. Traduz-se que nessa condição a murcha ocorre por não haver o equilíbrio da água no solo, pelas variações nas sucções entre o solo e as raízes, não preenchendo o espaço poroso pela água, e não ocorrendo portanto, o fluxo de água.

Czyz e Dexter (2013) concluíram que o murchamento de plantas na maioria das vezes ocorre pela limitação proveniente do solo, pelo fluxo de água para as raízes cessar pelo corte hidráulico, que corresponde a uma propriedade física do solo relacionada a textura.

3.2 A ÁGUA NA PLANTA

3.2.1 Potenciais hídricos na planta

As propriedades hidráulicas do solo incluem desde a quantidade até a força de retenção da água às partículas sólidas, abrangendo características de comportamento do solo e da vegetação nele presente, bem como as comunidades de organismos que ali se encontram (CASSINARI et al., 2015).

Nas plantas, o xilema é responsável pela condução da água, por fluxo de massa, gerado por gradiente de potencial de pressão ($\Delta\Psi_p$) entre as extremidades do sistema condutor (KERBAUY, 2012). A planta permite a entrada da solução de solo, através de processos seletivos, movimento simplástico, apoplástico e transmembrana, bem como em função do gradiente de Ψ_w (potencial hídrico) favorável. Ele ocorre desde a célula, onde a água entra pela maior concentração de sais no vacúolo, em comparação ao meio extracelular. A turgidez aumenta o volume da célula aumentando a pressão interna, tornando-a positiva em relação a água pura (KERBAUY, 2012).

O Ψ_g (potencial gravitacional) geralmente é desconsiderado (Taiz; Zaiger, 2009). O Ψ_o (potencial osmótico), atua na semi-permeabilidade das membranas celulares permitindo a passagem da água, sob seletividade dos íons. Em células de plantas bem irrigadas, os valores

típicos variam de -800 a -1200 kPa e sob estresse hídrico esse potencial pode ser ainda menor (FERRI, 1985).

O Ψ_m (potencial matricial), embora desprezível dentro da célula, é considerado em tecido meristemático com citoplasma denso, em sementes e outros tecidos desidratados, como as macromoléculas e espaços intercelulares (TAIZ; ZAIGER, 2009). O Ψ_p (potencial de pressão) dentro da planta bem irrigada, varia de 100 a 1000 kPa dependendo do potencial de soluto na célula (KERBAUY, 2012).

Os potenciais, de forma geral, apresentam como referência típica valores para o Ψ_p entre 200 a 500 kPa e -200 a -1000 kPa para o Ψ_o . Estas referências são responsáveis pelo turgor das células, mostrando plantas eretas e com crescimento em termos de alongamento (HOPKINS, 2000).

Pela transpiração, forma-se no xilema pressão negativa, podendo atingir valores de -1000 kPa ou menos, variando em função da taxa de transpiração e da altura da planta. Quando a transpiração é máxima, a pressão negativa no xilema alcança valores mais negativos. E, se a transpiração é reduzida, a planta se reidrata a noite, elevando o valor da pressão (FERREIRA, 1992).

Pela absorção, as plantas esgotam a água próximo à superfície das raízes, diminuindo o Ψ_p , estabelecendo gradiente de pressão em relação a locais próximos no solo. Logo que os espaços porosos preenchidos com água se interconectam, o movimento da água se faz em direção a superfície das raízes, obedecendo então um gradiente de pressão (TAIZ; ZAIGER, 2009).

Com o decréscimo do conteúdo de água, a condutividade hidráulica decresce, ocorrendo a substituição da água pelo ar nos espaços porosos. Em solos secos, o Ψ_w pode cair abaixo do PMP, não permitindo recuperação da pressão de turgidez, mesmo que cesse toda perda de água por transpiração, significando que o potencial hídrico do solo é menor ou igual ao potencial osmótico da planta (KERBAUY, 2012). Sendo o potencial osmótico da célula variável nas espécies, o PMP não é uma propriedade única do solo, mas é dependente da espécie vegetal (TAIZ; ZAIGER, 2009).

3.2.2 Efeitos do déficit hídrico

A disponibilidade de água e dióxido de carbono (CO_2) limitam a fotossíntese. A importância da água na fotossíntese relaciona-se a liberação de prótons e elétrons da etapa fotoquímica e na regulação estomática, permitindo a absorção de CO_2 e a mobilização de

fotoassimilados (FERNANDES et al., 2015). Em déficit hídrico, o decréscimo de difusão de CO_2 da atmosfera até o sítio de carboxilação, reduz a fotossíntese, interferindo no mesófilo e abertura estomática (CHAVES; FLEXAS; PINHEIRO, 2009; PINHEIRO; CHAVES, 2011).

A temperatura foliar aumenta pela redução da transpiração e decréscimo na capacidade de dissipar calor latente, desfavorecendo a fixação de CO_2 (KUMAR, 2009). Altas temperaturas elevam a relação de solubilidade entre O_2 e CO_2 com decréscimo para o CO_2 . O mesófilo foliar aumenta a resistência a passagem de CO_2 , favorecendo a fotorrespiração (BERTOLLI; SOUZA, 2012).

Plantas com fotossíntese C_3 e C_4 são mais adaptadas a ambientes com limitações de disponibilidade de água, pois podem assimilar CO_2 em condições hídricas adversas, controlando a abertura estomática (KERBAUY, 2012).

Por outro lado, a evaporação provoca perda de água pela planta, forçando reposição contínua de água das folhas às raízes. O gradiente de Ψ_w do solo determinará o fluxo de água do solo para a atmosfera através da planta (SANTOS; ALEXANDRE; COELHO, 2012).

A reposição de água na folha se faz por decréscimo em seu potencial, causado pela transpiração, carreando a água nos terminais do xilema. A água “entra” para dentro das células das folhas, criando uma pressão negativa sobre a seiva, transmitida para as regiões inferiores da planta, até as raízes, por coluna contínua nos traqueídeos ou elementos de vaso (KERBAUY, 2012).

A alta densidade radicular e profundidade das mesmas, favorece as relações hídricas, pois aumenta a área de contato com o solo, facilitando o fluxo hidráulico nas proximidades das raízes, movimentando todo o sistema (HOSSEINI et al., 2016).

As raízes, sintetizam fitohormônios como o ABA, que em solos secos, atuam como sensores de estresse hídrico, alterando seu metabolismo. Podem diminuir a produção de citocininas e aumentar a produção de ABA, que provocará o fechamento estomático das folhas. Alteram ainda o metabolismo de nitrogênio, enviando sinais para os brotos, diminuindo o crescimento. Observa-se alteração na condutância estomática e taxa de fotossíntese, independentemente do estado da água das folhas (KRAMER; BOYER, 1995).

Em déficit hídrico, o movimento contínuo é impedido, forçando a planta a criar um potencial hídrico celular para manter a turgescência, podendo chegar em folhas de soja turgidas a -2000 kPa (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

O Ψ_w interno da planta deve ser inferior ao do solo, para manter a turgescência e absorção de água. Os fluxos transpiratórios determinam os gradientes de Ψ_w e condutividade hidráulica, por determinar a velocidade de transporte da água em direção ao sistema radicular

(CHAVES, 2009). Isto exige aumento das trocas, por absorção de solutos do solo ou síntese de osmorreguladores em resposta as várias tensões, usadas como estratégia para a proteção e sobrevivência das plantas sob estresse abiótico (DAWOOD, 2016).

A incapacidade da planta em absorver água em quantidade suficiente causa alterações morfológicas, fisiológicas ou bioquímicas (Porch et al. 2009), interferindo no transporte de nutrientes (Hosseini et al., 2016), podendo em condições severas impedir a fotossíntese, causando distúrbios no metabolismo e morte da planta (JALEEL et al. 2009).

Quanto a adaptação das plantas à seca, fatores de escape relacionam-se a perda de água pelos estômatos e cutícula, e tolerância, a fatores de conservação da vida celular, prevenindo ou reparando a desnaturação e agregação de proteínas específicas. O acúmulo de prolina, quando as plantas entram em déficit hídrico, tem sido relatado desde 1954, em que Singh; Paleg e Aspinall (1973), em estudo com cevada constataram o rápido acúmulo de prolina em lâmina foliar e lento acúmulo em raízes com comportamento intermediário para pecíolos e ápice dos ramos.

Rajagopal; Balasubramanian, e Sinha (1977) relaciona o acúmulo de prolina em folhas de trigo sob estresse hídrico, como primeira resposta rápida à manutenção da pressão osmótica das células e tecidos, ocorrendo entre 12 e 15 horas. Estes autores sugeriram que com o estresse hídrico, os estômatos se fecham, não ocorrendo fotossíntese, diminuindo o potencial pela não síntese de produtos solúveis e conseqüentemente diminuindo a oxidação de prolina.

Segundo Bengtson et al (1978), em estudo de acúmulo de prolina em folhas de trigo, concluiu que quando as condições de estresse inibem o metabolismo para o ALA (ácido aminolevulínico) isso favorece o acúmulo de prolina, pois o ALA afeta a regeneração de protoclorofila (precursora da clorofila), com menor acúmulo de clorofila durante o estresse hídrico. Os mesmos autores sugerem que a prolina acumulada seja utilizada para a biossíntese de clorofila imediatamente após a reidratação.

O déficit hídrico é visível com danos já presentes, mostrando perda de turgescência, mudança de posição e coloração foliar, redução das partes mais expostas e aumento de temperatura nas folhas pelo fechamento de estômatos, entre outras (CHAVES; FLEXAS; PINHEIRO, 2009).

A redução da abertura estomática inibe o potencial de resfriamento evaporativo da folha, provocando queda na fotossíntese líquida enquanto a temperatura foliar aumenta, levando ao murchamento e secamento (PORCH et al. 2009; ZHANG et al., 2015).

O quadro evolui para morte de raízes superficiais, amarelecimento e senescência de folhas inferiores. Caracteristicamente as poáceas enrolam a folha no sentido bordo-nervura

central e as fabáceas realizam movimento de folíolo em fechamento típico, reduzindo a carga de radiação solar (PIRES et al., 2001).

A avaliação do estresse hídrico associa-se a capacidade da planta em retirar ou não água do solo, a taxas compatíveis com a demanda atmosférica (VAN LIER, 2010; GUBIANI et al., 2013). A tolerância ao déficit hídrico, pode ser observada dentro de espécies, diferentes ecossistemas ou mesmo estações, correspondendo a uma adaptação da planta (KAUR et al., 2013).

3.2.3 Culturas utilizadas

As culturas de trigo e cevada, cereais da família das poáceas, produzidos em várias regiões do planeta, formam a base da alimentação humana, assegurando subsistência a boa parte da população mundial, e por sua viabilidade econômica, vêm sendo estudadas mundialmente.

Na Universidade de Sidney - Austrália, testes tem sido feito em variedades de trigo tolerantes a seca, buscando a identificação desses genes (CONSELHO..., 2016).

No Egito, introduziu-se um gene de cevada em uma variedade de trigo local, tornando a planta resistente à seca. A redução da necessidade de irrigação nas variedades transgênicas quando comparadas as convencionais foi considerável.

A transferência do gene $HVA1_1$ da cevada para o trigo, produziu sementes geneticamente modificadas, testadas em estufa e campo, com rendimento superior as plantas não modificadas, segundo testes realizados desde 2001, divulgados pelo Instituto de Pesquisa e Engenharia Genética em Agricultura do Cairo - Ageri (PESQUISA FAPESP, 2004).

Sabe-se que o déficit hídrico é limitante a produtividade. Genótipos tolerantes ao estresse hídrico, em áreas propensas à seca vem avançando (Zhang et al., 2015), melhorando características morfofisiológicas que expressem melhor aproveitamento da água do solo (GRIFFIN et al., 1989).

Estas gramíneas pertencem ao ciclo fotossintético C_3 de redução do carbono, reduzindo o CO_2 a carboidratos, em que o acúmulo de matéria seca e crescimento, necessita que a produção de açúcares pela fotossíntese ultrapasse a queima através da respiração (TAIZ; ZAIGER, 2009).

O trigo é cultivado durante o inverno e consumido como farinha, grãos e broto, ou mesmo em ração animal. No Brasil, a produção anual está próxima a 6 milhões de toneladas, com o cultivo do trigo nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (BIOTRIGO, 2016). A demanda brasileira está em 10 milhões de toneladas, concentrada no Sul do país, onde está 90% da

produção (EMBRAPA, 2016). A cultivar MESTRE apresenta potencial produtivo em até 6.000 kg ha⁻¹ (BIOTRIGO, 2016).

A cevada, cereal de inverno, é utilizada na industrialização de bebidas, farinhas, medicamentos, produtos dietéticos e sucedâneos de café. É empregada na alimentação animal, como forragem e na fabricação de rações. No Brasil, a principal aplicação econômica da cevada, é a malteação, com consumo anual pela indústria cervejeira estimado em 1 milhão de toneladas, concentrando sua produção também na Região Sul (EMBRAPA, 2016).

A cevada ganhou espaço no cerrado no final da década de 90, com o desenvolvimento pela Embrapa, de cultivares adaptadas às condições climáticas da região. O cerrado brasileiro tem ampliado suas áreas, diminuindo a importação do cereal que corresponde a 70% do consumo do país (SANTOS; KLAR; JADOSKI, 2008).

De aproximadamente um milhão de toneladas de malte consumidos no Brasil, 300 mil são produzidos no país. Tentando viabilizar a ampliação territorial do cultivo da cevada, pesquisas desenvolvidas pela EMBRAPA e UNESP tem mostrado a possibilidade de cultivo deste cereal em outras regiões do país (FARIA, 1993).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Para melhor entendimento do experimento, a Figura 1 dispõe os procedimentos realizados.

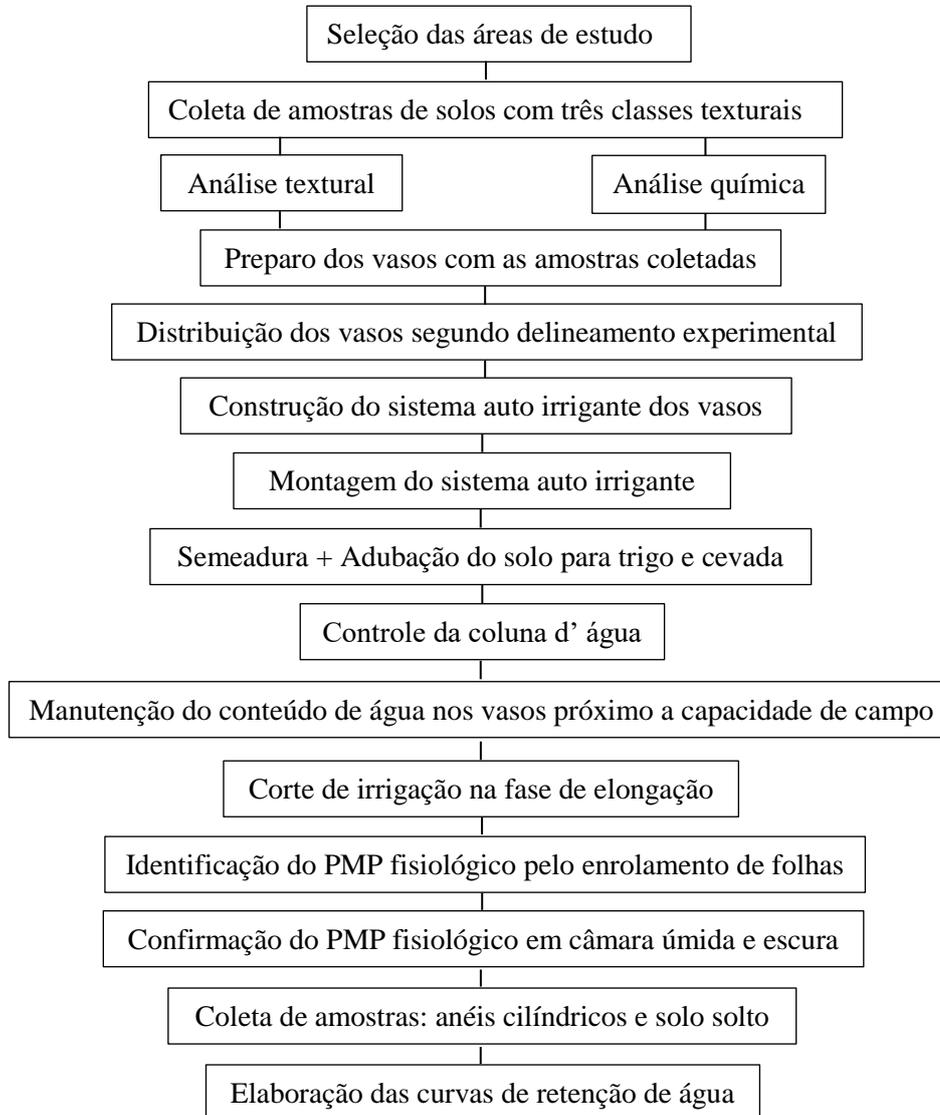


Figura 1: Fluxograma das atividades realizadas.

4.1 Caracterização dos solos

Foram retiradas amostras de 12 áreas de uma propriedade rural, para estabelecer as diferenças texturais. Após a primeira confirmação laboratorial, três pontos demarcados (Tabela 1), foram escolhidos para coleta de solo. As áreas selecionadas localizam-se no

município de Tibagi-PR, (latitude: 24°30'06" S e longitude: 50°26'30" O) (Figura 3), em solo classificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2013). O solo em questão, apresenta sua gênese em unidades arenosas do Subgrupo Itararé (Assine, 1999), com predominância de textura arenosa e franco-arenosa, e material de origem composto por rochas sedimentares (arenitos, folhelhos, siltitos e diamictitas) (MINEROPAR, 2005). A coleta do solo foi feita em Janeiro de 2016, e foi realizada na camada de 0-0,20 m.

Tabela 1: Coordenadas geográficas dos pontos coletados em Latossolo Vermelho distrófico.

Ponto	Latitude	Longitude	Classe Textural
1	24°43'20" S	50°17'00" O	Arenoso
2	24°43'23" S	50°17'25" O	Franco-Argilo-Arenoso
3	24°43'25" S	50°17'28" O	Argiloso

Localização dos pontos coletados no Município de Tibagi (PR).

4.2 Análise textural e química dos solos

No laboratório, os agregados maiores foram manualmente destorroados, homogeneizados e secos ao ar, passando-os em peneiras com abertura de malha de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), seguindo a metodologia da EMBRAPA (1997). A secagem foi feita em estufa de circulação forçada de ar por 48 horas a 40° C.

Foi realizada a segunda determinação textural, conforme metodologia utilizada pelo laboratório de Física de Solos da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, pelo método do densímetro. Separou-se 40 g de solo seco de cada amostra, passado em peneira com malha de 2 mm, que foram colocados em recipientes de vidro, com adição de 250 ml de solução dispersante, composta por hidróxido de sódio (NaOH) e hexametáfosfato de sódio (NaPO₃)₆ na quantidade de 4 e 10 g L⁻¹, respectivamente. Os frascos foram colocados em agitador horizontal ajustado para agitação lenta (120 oscilações por minuto) por 16 horas.

O conteúdo dos frascos foi lavado em peneira com 0,053 mm (53 µm) de malha, para a separação da fração areia, com o recolhimento em proveta do conteúdo da lavagem. A suspensão na proveta aferida para 1000 mL foi agitada por 20 segundos, como auxílio de bastão de vidro. As provetas foram colocadas em repouso por 24 horas, para ser realizada a leitura com o densímetro. A prova em branco recebeu 250 mL da solução dispersante, colocada em proveta de vidro calibrada para 1000 mL, com complementação por água destilada. Foi realizada a agitação e posterior repouso por 24 horas para leitura pelo densímetro de Bouyoucos (Figura 2). Este período de repouso é realizado para ambas as provetas, submetendo-as as

mesmas condições de variação de temperatura, por considerar a influência que a temperatura exerce sobre a viscosidade do líquido.

A areia retida nas peneiras foi colocada em cápsulas de porcelana, levadas a estufa à 105° C até a secagem, com posterior registro de massa. Determinou-se o fator de correção para umidade do solo (Fc), obtido pela razão entre TFSA (terra fina seca ao ar) e TFSE (terra fina seca em estufa). A metodologia utiliza ainda a fórmula para terra seca, que se obtém pela razão entre 40 g (TFSA) e o fator de correção (Fc).



Figura 2: Análise textural pelo método do densímetro.

A determinação da partição de areia, silte e argila foi realizada de acordo com as equações (2, 3 e 4). O resultado representou o total da fração areia, silte e argila em gramas por 1000 gramas. As frações silte e argila foram separadas pela Lei de Stokes com tempo de sedimentação de 24 horas, e leitura pelo densímetro de Bouyoucos (DANE; TOPP; CAMPBELL, 2002).

$$\text{Areia} = 1000 * \left(\frac{\text{peso da areia seca}}{\text{terra seca utilizada na análise}} \right)$$

Equação (2)

$$\text{Argila} = 1000 * \left(\frac{(\text{leitura do densímetro} - \text{amostra} - \text{leitura do densímetro} - \text{prova em branco})}{\text{terra seca utilizada na análise}} \right)$$

Equação (3)

$$\text{Silte} = 1000 - (\text{total de areia em gramas por 1000 g} + \text{total de argila em gramas por 1000 g})$$

Equação (4)

Com os resultados para areia, silte e argila, a classificação textural foi realizada através da utilização do triângulo textural usado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, no qual o cruzamento das porcentagens de areia, silte e argila forneceu a respectiva classe.

Tabela 2: Distribuição do tamanho de partículas em Latossolo Vermelho distrófico.

Pontos	Areia	Silte g kg ⁻¹	Argila	Classe Textural
1	803,26	71,43	125,31	Arenoso
2	616,86	105,51	277,64	Franco argilo arenoso
3	256,29	255,28	488,43	Argiloso

Areia: 2-0,05 mm; silte: 0,05-0,002 mm; argila: <0,002 mm (USDA, 2016).

Na implantação do experimento o solo apresentava-se com os atributos químicos conforme a Tabela 3, obtidos segundo metodologia do IAC (CAMARGO et al., 2009). O pH foi determinado pelo extrator CaCl₂ a 0,01N, a matéria orgânica determinada pelo extrator Na₂Cr₂O₇, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) determinados pela resina trocadora de íons, alumínio (Al) extraído por titulometria com KCl 1 mol⁻¹, acidez potencial (H+Al) usando solução tampão SMP com acetato de cálcio a pH 7, enxofre (S) determinado pelo extrator Ca (H₂PO₄)₂. Todas as análises químicas foram realizadas segundo metodologia descrita por RAIJ et al. (2001) e EMBRAPA (1999).

Tabela 3: Atributos químicos e granulométricos de Latossolo Vermelho distrófico na instalação do experimento.

Atributos	Unidade	Pontos de coleta de solo		
		1 Arenoso	2 Franco Argilo-Arenoso	3 Argiloso
pH	-	5,6	5,5	5,7
M.O.	g.dm ⁻³	22	38	33
P	mg.dm ⁻³	8	13	8
S	mg.dm ⁻³	2	6	7
K	mmol _c .dm ⁻³	2,0	4,2	2,4
Ca	mmol _c .dm ⁻³	20	37	26
Mg	mmol _c .dm ⁻³	8	12	8
Al	mmol _c .dm ⁻³	N.D.	N.D.	N.D.
H+Al	mmol _c .dm ⁻³	21	35	31
SB	mmol _c .dm ⁻³	30	53,2	36,4
CTC	mmol _c .dm ⁻³	51,0	88,2	67,4
V	%	59	60	54
% Al (CTC efetiva)	%	N.D.	N.D.	N.D.

Fonte: Laboratório de solos da Fundação ABC.

4.3 Caracterização do experimento e delineamento experimental

O experimento foi conduzido de junho a agosto de 2016, em casa de vegetação, pertencente à Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), no município de Ponta Grossa.

O clima da região segundo Köppen é Cfb (subtropical úmido), com temperatura amena no verão e ocorrência de geadas severas e frequentes no inverno (IAPAR, 2009). O delineamento experimental foi em 10 blocos casualizados em arranjo fatorial (3x2x2), com duas cultivares de trigo (*Triticum aestivum*) NOBLE e MESTRE, e duas cultivares de cevada (*Hordeum vulgare* L.) BRS BRAU e ANAG 01, crescidas em material de solo de três classes texturais, a saber: (i) argilosa (ARG), (ii) franco argilo-arenosa (FAA) e (iii) arenosa (ARN), totalizando 10 repetições e 120 unidades experimentais. Seguindo o delineamento experimental, obtivemos para o fator 1 as classes texturais do solo e para o fator 2 as cultivares, que não apresentam indicação de resistência ou tolerância a seca.

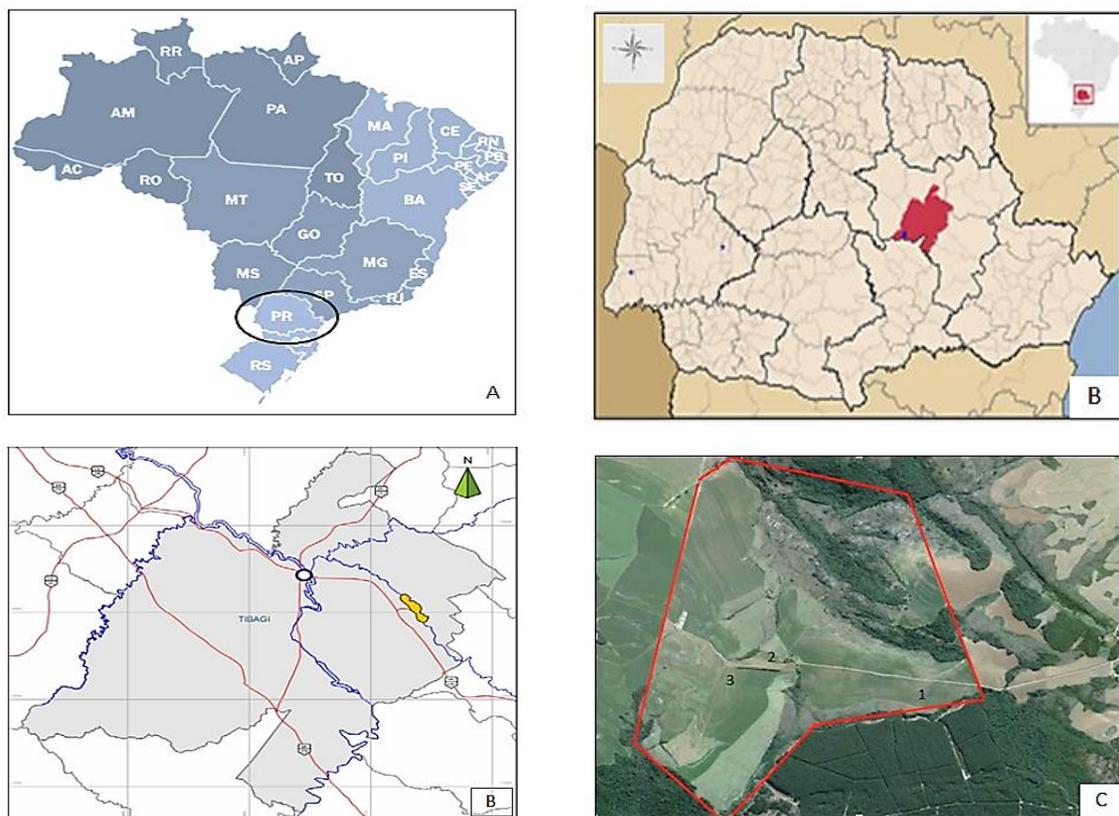


Figura 3: Mapa do Brasil (A). Localização geográfica do município de Tibagi (B). Imagem por satélite da área de coleta de solo (C): Ponto (1) textura arenosa. Ponto (2) textura franco-argilo-arenosa. Ponto (3) textura argilosa.

4.4 Montagem dos vasos

Os vasos em PVC foram preenchidos com TFSA, com massa de solo para cada vaso em 3,6 kg. Considerou-se a densidade média dos solos em $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$.

Em cada vaso, um saco plástico foi colocado com a dupla finalidade de impedir que o solo peneirado fosse perdido pelos orifícios de drenagem, causando alteração na massa dos vasos. Em um segundo momento serviu como vedamento entre o solo e a atmosfera, impedindo que a água presente no solo fosse perdida por evaporação, ao corte da irrigação. Para o preenchimento dos vasos, optou-se por dividir a massa em três porções, e com a utilização de um pequeno soquete, o solo foi acomodado no recipiente. Durante o teste piloto, sem as plantas, constatou-se que a umidade presente no solo, não configurou a condição de acúmulo na porção inferior dos vasos para as três classes texturais. Desta forma, foi decidido pela não perfuração dos sacos plásticos para drenagem.

4.5 Instalação de sistema de irrigação e sementeira

O sistema de irrigação instalado permitiu reposição de água contínua de acordo com a necessidade das plantas. A montagem foi realizada com vela de filtro (5 cm de diâmetro x 7 cm de altura), posicionada no terço médio e superior do vaso. Após saturação (24 horas), as velas foram conectadas por tubo plástico flexível a garrafas pet (2 L), que funcionaram como reservatório de água, sendo diariamente completadas para sua capacidade máxima (Figura 4).

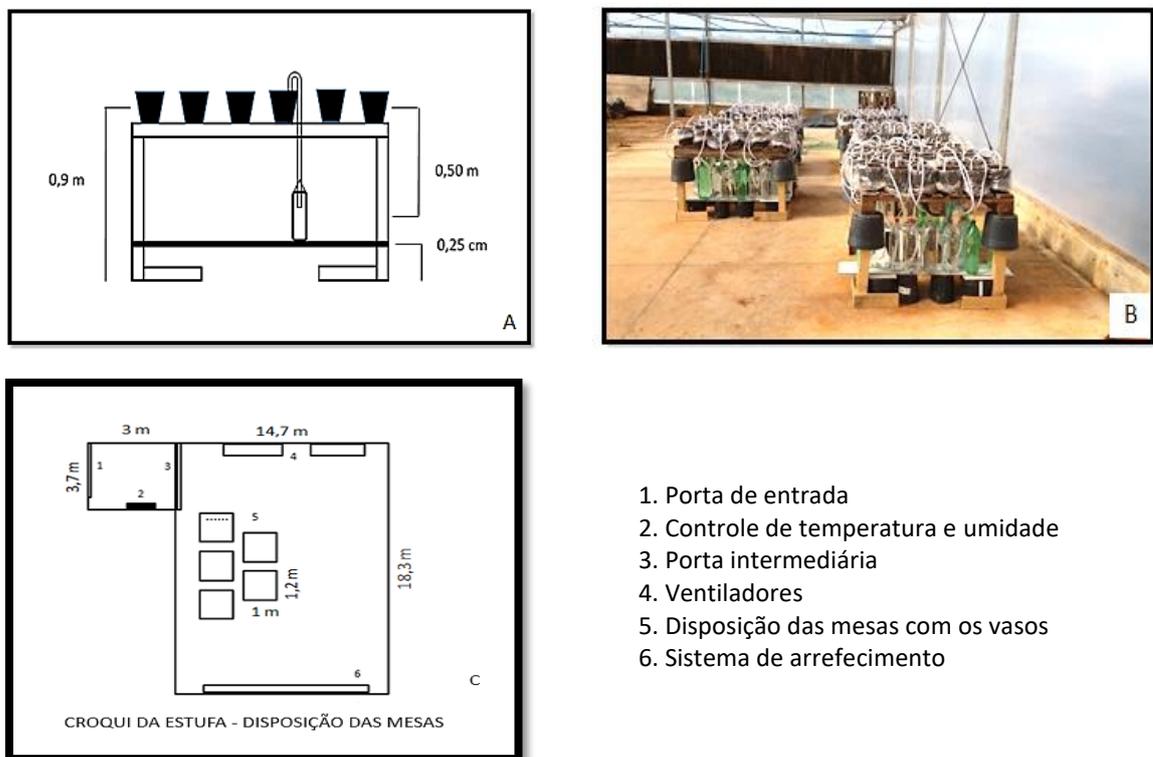


Figura 4: Representação do sistema de irrigação (A). Sistema de irrigação em teste para determinação da tensão (B). Disposição das mesas na estufa (C).

Neste sistema de irrigação foi necessária a saturação prévia, pois o ar no interior das velas precisou ser removido para não ocorrer a formação de bolhas, que poderiam romper a coluna d'água, quebrando a constância das unidades em fornecimento de água ao solo. O potencial de água no solo foi estabelecido por coluna de água em 0,50 m entre o vaso e o reservatório, correspondendo a tensão de 5 kPa.

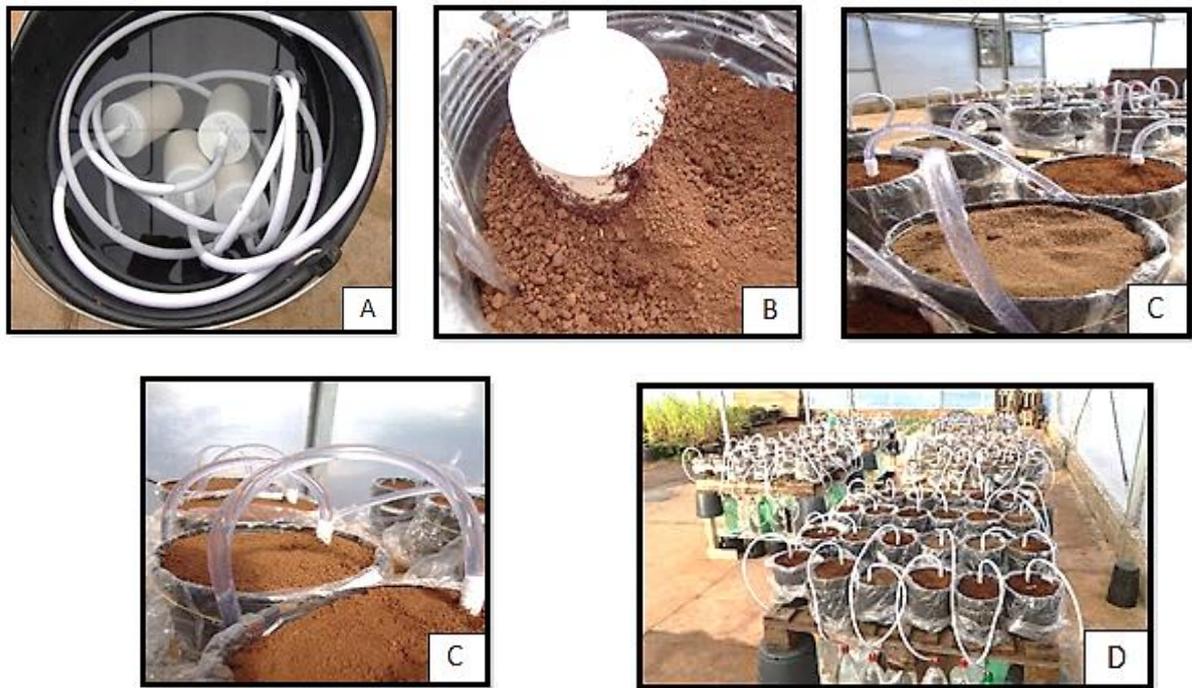


Figura 5: Filtros em saturação (A). Montagem dos filtros nos vasos (B). Teste do sistema de irrigação (C). Sistema de irrigação instalado (D).

O consumo de água foi constante para os vasos até a fase de alongação das plantas, aos 45 DAS, quando o sistema foi desativado. Este sistema foi modificado do modelo proposto por Montanheiro et al. (1979), utilizado e adaptado por Bonfim da Silva; Monteiro e Silva (2007). Foi necessário um teste piloto durante 7 dias, para ajustes relacionados a eficiência do sistema quanto a quebra das colunas d'água e funcionamento dos filtros.

Na semeadura, calculou-se a necessidade nutricional para as culturas pelo Manual de adubação e calagem (COMISSÃO..., 2004). Cada vaso recebeu em torno de 150 mg dm^{-3} (300 kg ha^{-1}) de P (superfosfato simples, 20% P_2O_5), 80 mg dm^{-3} (160 kg ha^{-1}) de K (cloreto de potássio, 60% K_2O) e 40 mg dm^{-3} (80 kg ha^{-1}) de N (sulfato de amônia, 20% de N), juntamente com 5 sementes das culturas, previamente tratadas com carboxanilida e dimetilditiocarbamato. A profundidade da semeadura foi de 0,02 m. Não foram necessários tratos fitossanitários, pois as plantas responderam satisfatoriamente ao tratamento de sementes. Aos 45 DAS, após corte

de água, os vasos receberam vedamento superficial com o saco plástico, evitando perdas por evaporação através da superfície do solo.

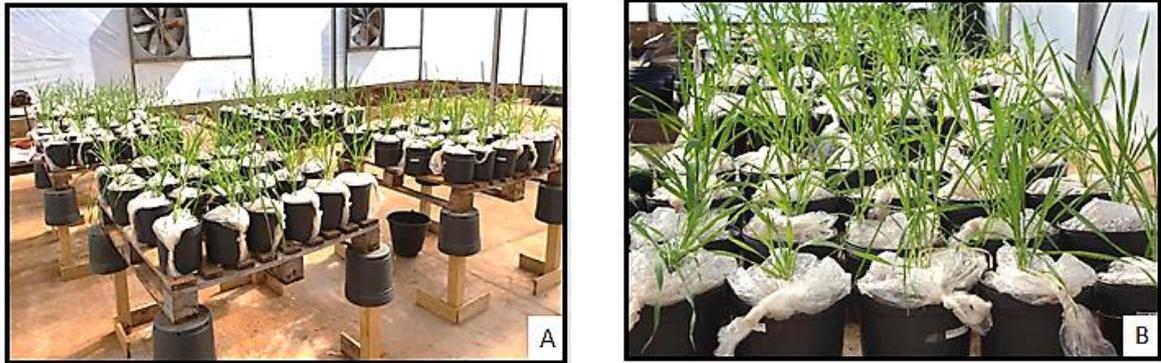


Figura 6: Corte do sistema de irrigação (A). Vedamento superficial (B).

A partir desta fase, a perda de água somente ocorreu pela absorção das raízes e transpiração das folhas.

4.6 Determinação do PMP Fisiológico

Aos primeiros sinais de murcha, com prostração e enrolamento de folhas, ao final da tarde os vasos foram retirados da casa de vegetação, e colocados em câmara úmida e escura, com umidade de saturação próxima a 100% (Figura 7), por 12 horas, para a recuperação da turgescência. Quando ocorreu a recuperação, os vasos foram recolocados na casa de vegetação, repetindo-se o procedimento quando a planta apresentou novo enrolamento de folhas. As plantas que não mais readquiriram a turgescência, ou seja, não tiveram recuperação no ambiente úmido da câmara, foram consideradas em PMP fisiológico irrecuperável (REICHARDT, 1988).

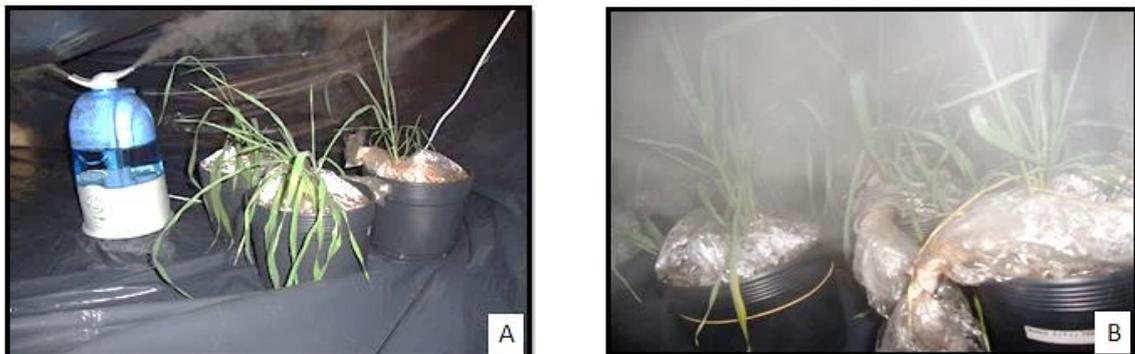


Figura 7: Vasos no interior da câmara úmida (A) e (B).

Em PMP fisiológico, os vasos foram retirados da câmara úmida e levados para o laboratório, onde foi aberto o selamento. As plantas foram cortadas rente ao solo, e em cada vaso, foi realizada a coleta de solo sem raízes, com cerca de 30 g. Aproximadamente 15 g de solo foram pesadas e levadas à estufa 105° C por 24 horas para determinação do conteúdo de água em base gravimétrica. As 15 g restantes foram colocadas em recipientes plásticos, vedados, sendo acondicionado em caixa térmica, para transporte até o laboratório de Física de solos da ESALQ, onde foram submetidos a câmara de pressão.

Em um segundo momento no mesmo procedimento, amostras de solo foram coletadas com anéis volumétricos de aço inox (5 cm altura x 5 cm diâmetro), foram embrulhados em plástico filme, identificados, e colocados em caixa térmica.

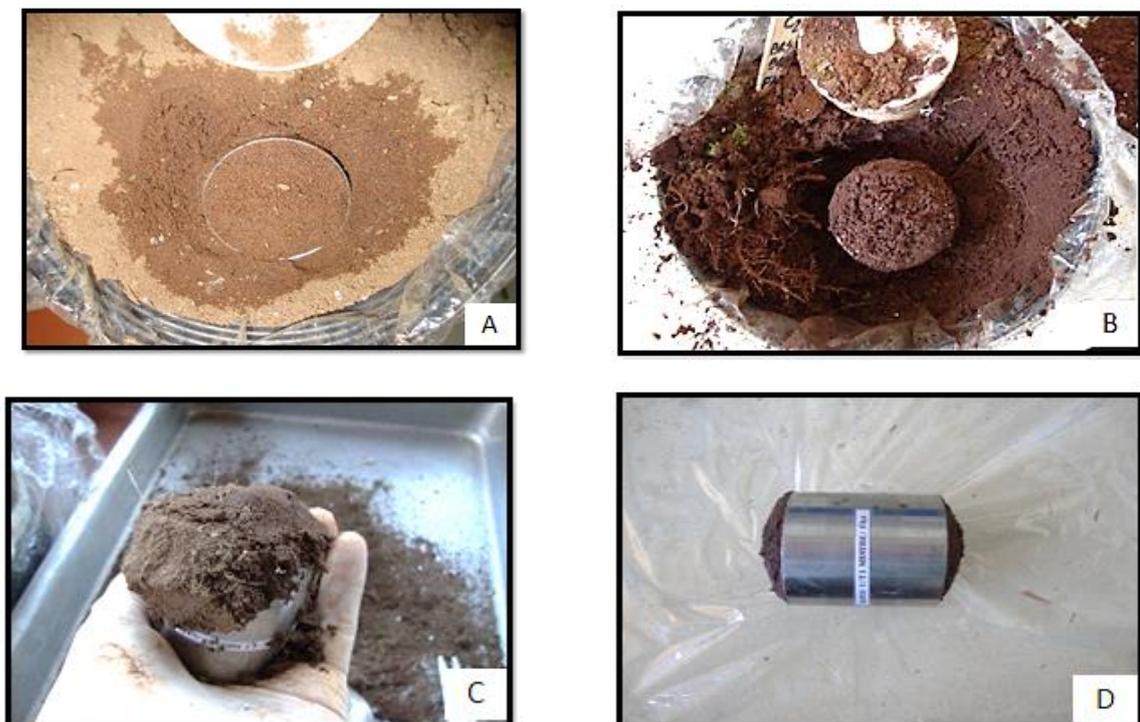


Figura 8: Coleta das amostras em anel volumétrico (A) (B) (C). Embalagem de uma das amostras (D).

Em virtude do solo ter sido moído e peneirado, foi necessário realizar o umedecimento do mesmo para remoção dos anéis. O solo foi umedecido com 50 ml de água destilada, com o aguardo de aproximadamente 20 minutos para que ocorresse a drenagem livre.

Após a secagem, as amostras levadas a estufa a 105-110° C por 24 horas, foram pesadas para obter a umidade gravimétrica conforme a Equação 5.

$$U_g = \frac{m_{úmida} - m_{seca}}{m_{seca}} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde U_g = umidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$); $m_{úmida}$ = massa de solo úmido (g); m_{seca} = massa de solo seco (g).

4.7 Determinação de umidade na mesa de tensão

No laboratório, as amostras foram saturadas, pesadas e submetidas a mesa de tensão e câmara de pressão de Richards. Após a saturação que ocorreu pelo processo de ascensão capilar (Klute; Dirksen, 1986), as amostras foram submetidas às tensões: -0,1, -10, -20, -40, -60, -80, -100, -300, -500, -700 e -1500 kPa.

Em equilíbrio, no momento em que cessou a drenagem de água dos poros do solo, as amostras foram pesadas, retornando imediatamente a mesa de tensão para aplicação da nova tensão. Após a última tensão submetida, as amostras foram levadas à estufa com temperatura de 105°C por 24 horas, novamente pesadas, cujos valores foram utilizados para cálculo do conteúdo de água em base volumétrica.

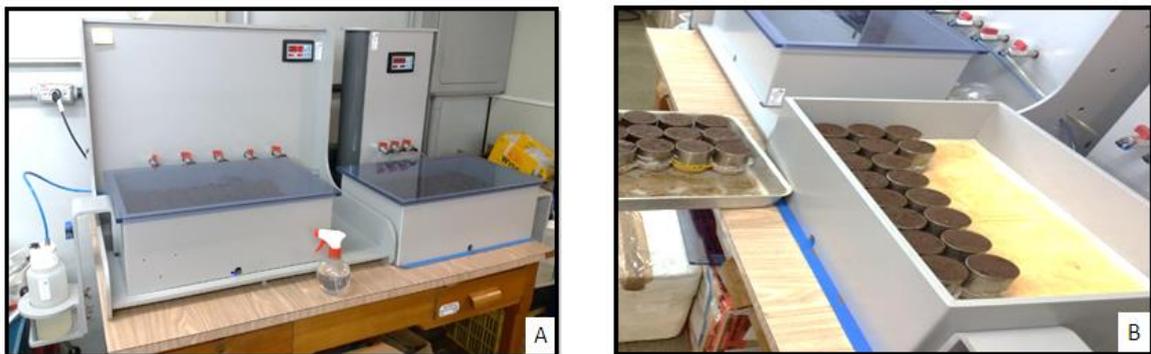


Figura 9: Anéis volumétricos submetidos a mesa de tensão (A) e (B).

4.8 Determinação da umidade na Câmara de pressão

As amostras deformadas referentes as 15 gramas coletadas no momento da abertura dos vasos, foram submetidas a câmara de pressão em sucção matricial de 1500 kPa. O solo foi colocado em anéis com dimensões de 13 mm de altura e 50 mm de diâmetro, com saturação diretamente sobre a placa porosa, por um período de 24 horas.

Por pressão, a água foi retirada do solo até o estabelecimento do equilíbrio a 1500 kPa.

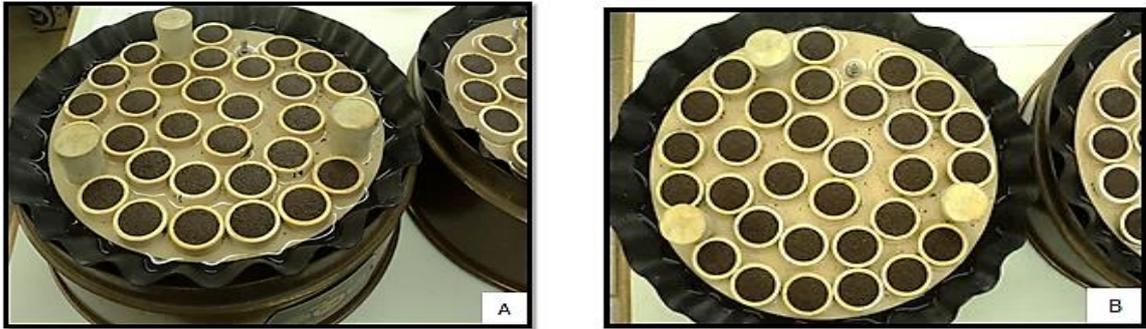


Figura 10: Amostras deformadas em saturação para submissão em câmara de pressão em (A) e (B).

4.8 CRAs e ajustes

As CRAs para os solos encontram-se no anexo, juntamente com os parâmetros de ajuste realizados pelo modelo de van Genuchten (1980) descrito na (Equação 6), com a restrição de Mualem (1986).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n]^m} \quad (\text{Equação 6})$$

sendo adotado o valor de m conforme a equação 7:

$$m = 1 - \left(\frac{1}{n} \right) \quad (\text{Equação 7})$$

θ_s e θ_r correspondem ao conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) de saturação e residual; ψ_m (potencial mátrico de água no solo); α , m e n são parâmetros empíricos da equação, os quais foram estimados durante o ajuste dos dados. O ajuste da equação aos dados foi feito com uso do software R versão 3.3.1 (R CORE TEAM, 2013).

4.9 Análises estatísticas

Análise descritiva prévia foi realizada para observar a homogeneidade dos dados. Os dados de umidade em PMP foram submetidos à análise de variância para experimentos

inteiramente casualizados em arranjo fatorial (3x4) com aplicação do teste F. As pressuposições de normalidade foram verificadas pelo teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$).

No caso de F significativo $p < 0,05$, foi aplicado o teste de Tukey para comparação de médias. O esquema da análise de variância pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4: Esquema da análise de variância para a umidade em PMP fisiológico.

FONTES DE VARIACÃO	GRAUS DE LIBERDADE
Solo (S)	2
Cultivares (C)	3
Interação (S) * (C)	6
Tratamentos	11
Blocos (repetições)	9
Resíduo	99
Total	119

As análises estatísticas e os ajustes das CRAs foram realizadas pelo software R (R CORE TEAM, 2013).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Sinais de estresse hídrico em PMP fisiológico

A temperatura média registrada na casa de vegetação foi de $25,7^{\circ}$ C. A umidade relativa média no mesmo local foi de $75,3 \pm 8\%$ de variação. A câmara úmida registrou umidade relativa próxima a 100%.

Os primeiros sinais de estresse hídrico por déficit foram constatados 4 dias após o corte do sistema de irrigação no solo de textura ARN, para ambas as culturas. As plantas apresentaram sinal característico de enrolamento de folha no sentido da borda para a nervura central. Os mesmos sinais foram observados para a textura FAA aos 6 dias após o corte de água enquanto que no solo de textura ARG, estes mesmos sinais foram verificados 9 dias após o corte de água, primeiro para o trigo e depois para a cevada. Estes resultados estão em consonância com os de Procópio et al. (2004) que, verificaram que o PMP para as culturas de soja, feijão e também para algumas plantas daninhas, ocorreu aos 3 dias após a indução de estresse hídrico em um solo argiloso. Moline et al. (2013) constatou que em tomateiro, o PMP ocorreu aos 4 dias após o corte no fornecimento de água em um solo arenoso e 5 dias no solo argiloso. Registros para cevada e trigo não foram encontrados na literatura consultada sobre o tema.

5.2 Efeito das classes texturais e culturas para umidade em PMP fisiológico

5.2.1 Análise descritiva para a umidade em PMP fisiológico

Na Tabela 5, encontram-se os resultados da análise estatística descritiva para umidade em base volumétrica do PMP fisiológico, para as culturas de trigo e cevada, em diferentes classes texturais.

Tabela 5: Análise descritiva para umidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em PMP Fisiológico.

SOLO	CULTIVAR	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	D.P.	CV%
ARG	NOBLE	0,19	0,17	0,21	0,02	8,84
	MESTRE	0,19	0,17	0,21	0,01	6,29
	* MÉDIA TRIGO ARG	0,19	0,17	0,21	0,01	7,47
FAA	NOBLE	0,13	0,11	0,15	0,02	12,35
	MESTRE	0,12	0,11	0,15	0,01	8,41
	* MÉDIA TRIGO FAA	0,13	0,11	0,15	0,01	10,41
ARN	NOBLE	0,05	0,03	0,09	0,02	37,74
	MESTRE	0,05	0,03	0,09	0,02	40,69
	* MÉDIA TRIGO ARN	0,05	0,03	0,09	0,02	38,34
ARG	BRS	0,22	0,20	0,23	0,01	3,67
	ANAG	0,20	0,18	0,21	0,01	6,17
	* MÉDIA CEVADA ARG	0,21	0,18	0,23	0,02	7,53
FAA	BRS	0,15	0,13	0,17	0,01	7,77
	ANAG	0,14	0,13	0,17	0,01	7,39
	* MÉDIA CEVADA FAA	0,14	0,13	0,17	0,01	7,46
ARN	BRS	0,06	0,06	0,09	0,01	15,70
	ANAG	0,06	0,05	0,08	0,01	18,35
	* MÉDIA CEVADA ARN	0,07	0,05	0,09	0,01	17,91

ARG = solo argiloso. FAA = solo franco-argilo-arenoso. ARN= solo arenoso. D.P.= desvio padrão da média. CV=coeficiente de variação.

A média para umidade no PMP fisiológico da cultura do trigo em solo ARG foi de $0,19 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e $0,21 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para a cevada. Solos argilosos por reterem maiores quantidades de água por adsorção e apresentarem maior microporosidade, retêm maiores volumes de água em PMP. Segundo Ferreira et al. (1999), os Latossolos, mesmo quando muito argilosos, podem apresentar grande permeabilidade, em decorrência da estrutura granular muito pequena e bem expressa (KLEIN, REICHERT; REINERT, 2006).

No solo FAA, a média foi de em $0,13 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para a cultura do trigo e $0,14 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ para a cultura da cevada. O coeficiente de variação embora maior que o do solo ARG, ainda caracteriza dados homogêneos. Os valores de silte e argila no FAA corresponderam a índices menores que a metade do índice encontrado para o solo ARG.

No solo ARN, a cultura do trigo obteve média de $0,05 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e a cultura da cevada $0,07 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Os coeficientes de variação para o solo ARN mostraram heterogeneidade dos

dados e alta dispersão. De maneira geral, a composição granulométrica do solo descreve a sua capacidade em reter água, e os solos arenosos, pela maior macroporosidade presente, perdem rapidamente a água retida por gravidade. Pela maior macroporosidade e menor área superficial específica, os solos arenosos retêm menor volume de água para um mesmo potencial matricial (DONAGEMMA et al., 2016).

Considerando as frações que compõe as classes com maior participação da fração areia, os solos arenosos apresentam baixa retenção de água e elevada permeabilidade. A relação entre textura e retenção de água está ligada ao teor de argila e a fatores como empacotamento, forma e orientação dos grãos no solo, indicativo de que o aumento do potencial de retenção de água ocorre a partir da redução do tamanho de poros.

Segundo Bybordi (1973) citado por Donagemma et al. (2016), valores de condutividade hidráulica saturada (Ks) variam em mais de 20 vezes, na comparação entre areias grossas (12 mesh, com abertura de 1,68 mm) e areias finas (60 mesh, com abertura de 0,25 mm). Assim, mesmo nos casos de materiais constituídos exclusivamente pela fração areia, a mudança do tamanho dos grãos já implicaria alteração no seu comportamento físico-hídrico, podendo justificar os altos coeficientes de variação encontrados para o solo ARN.

5.2.2 Normalidade dos dados

O teste de normalidade por Shapiro-Wilk a 5% de significância apresenta os índices obtidos para o W e p-valor na tabela 6.

Tabela 6: Dados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de significância para W e p-valor no PMP fisiológico.

SOLO	CULTURA	CULTIVARES	NORMALIDADE DOS DADOS	
			W	p-valor
ARG	TRIGO	NOBLE	0,882	0,1376
		MESTRE	0,9519	0,6915
	CEVADA	BRS	0,8737	0,1105
		ANAG	0,8516	0,0606
FAA	TRIGO	NOBLE	0,9032	0,2375
		MESTRE	0,884	0,1451
	CEVADA	BRS	0,896	0,1977
		ANAG	0,8709	0,1025
ARN	TRIGO	NOBLE	0,8761	0,1178
		MESTRE	0,9025	0,2334
	CEVADA	BRS	0,8858	0,152
		ANAG	0,8456	0,0514

ARG = solo argiloso. FAA = solo franco-argilo-arenoso. ARN= solo arenoso.

O teste de normalidade calcula uma estatística W que testa se uma amostra aleatória de tamanho n provém de uma distribuição normal. Valores pequenos de W são evidência de desvios da normalidade.

É importante verificar se a distribuição dos dados em estudo se ajustam a uma distribuição normal. Por comparação do valor- p com o nível nominal de significância α adotado, decide-se por rejeitar ou não a hipótese nula de normalidade (PADOVANI, 2014).

Para este estudo, o teste considerou o resíduo normal para o PMP fisiológico.

5.2.3 Análise de variância

Na Tabela 7 encontram-se os resultados da análise de variância para a interação solo e cultivar com relação a umidade no PMP fisiológico.

Tabela 7: Análise de variância para umidade em PMP fisiológico.

CAUSAS DA VARIACÃO	GL	SQ	QM	F
Bloco	9	0,00159	0,000165	0,77 ns
Solos	2	0,38946	0,194732	903,68 *
Cultivar	3	0,01100	0,003668	17,02 *
Solos * Cultivar	6	0,00128	0,000214	0,99 ns
Resíduo	99	0,02133	0,000215	-
Total	119	0,04245	-	-
CV	11,25%	-	-	-

Significativo a 1 % (*). Significativo a 5 % (**). Não significativo (ns).

A influência do solo sobre a umidade em PMP fisiológico foi independente da cultivar, pois a interação do solo com a cultivar não apresentou significância a 5% de probabilidade. Para o teste de médias da umidade realizado em função das texturas, o solo ARG apresentou maior retenção de umidade, seguido do FAA e ARN (Tabela 8).

Tabela 8: Teste de médias para a umidade em PMP fisiológico em função das texturas.

SOLOS	ARG	FAA	ARN
MÉDIAS	0,1975 a	0,13575 b	0,05825 c

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

O teste de médias para a umidade no PMP fisiológico para as cultivares, apresentou significância a 1% de probabilidade segundo a tabela 9. A cultura da cevada reteve maior umidade no solo em relação a cultura do trigo. A cultivar BRS (cevada) entrou em PMP

fisiológico com maior umidade no solo. A cultivar ANAG (cevada) não diferiu das cultivares MESTRE e NOBLE (trigo).

Tabela 9: Teste de médias para a umidade em PMP fisiológico em função das cultivares.

CULTIVARES	MESTRE	NOBLE	BRS	ANAG
MÉDIAS	0,1206 c	0,1236 bc	0,1453 a	0,1323 b

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si ao nível de 1% de probabilidade.

Independente da classe textural, os teores de água no PMP foram maiores para a cultura da cevada em comparação com a cultura do trigo. Os menores valores de umidade no PMP para a cultura do trigo sugerem que as plantas de trigo são mais hábeis em extrair água sob menores potenciais do que a cultura da cevada. Isto é uma indicação de que a cultura da cevada, sob condições de restrição hídrica, tem maior propensão para sofrer estresse hídrico comparada à cultura do trigo.

Em condições de déficit hídrico para uma propriedade rural, com solos semelhantes aos testados, a indicação do trigo poderia ser feita para um solo de textura FAA, ao passo que a cevada poderia ser indicada para um solo de textura ARG, em função da capacidade de armazenamento destes solos e do aproveitamento da água pela cultura.

Para as cultivares de trigo a indicação pode ser feita para ambas, pois as mesmas não apresentaram diferenças para o teste de médias. A cevada por outro lado, na cultivar ANAG tem maior segurança na indicação, uma vez que ao murchar em menores conteúdos de umidade, apresenta maior adaptabilidade ao déficit hídrico.

Os resultados deste trabalho são parecidos com os obtidos por Costa; Nani e Jeske (1997) que obtiveram valores de PMP para solos com 68%, 49% e 25% de argila, verificando valores de PMP para a cultura do trigo equivalentes 0,2027; 0,1940 e 0,0750, respectivamente. Não foram verificadas diferenças significativas entre os diferentes materiais genéticos da cultura do trigo em relação ao PMP obtidos por resposta fisiológica da cultura.

A cultura da cevada, mostrou que há diferenças entre as variedades para os solos de classes texturais extremas, com os menores valores para a variedade ANAG em comparação com a variedade BRS. Estes resultados indicam que a resposta varietal diferenciada torna-se uma importante ferramenta de manejo, visando reduzir o impacto do déficit hídrico no crescimento e desenvolvimento da cultura.

Santos; Klar e Jadoski (2008) testando parâmetros fisiológicos para seis cultivares de cevada, através da imposição de ciclos de seca em diferentes estádios fenológicos da cultura, constatou que o potencial hídrico foliar e o teor relativo de água não variaram entre as cultivares. Comparando o teor relativo de água entre os tratamentos para cevada, ou seja, irrigação

constante até o fim de ciclo da cultura, ciclo de seca iniciado aos 45 DAS e ciclo de seca iniciado aos 65 DAS, constataram que embora não ocorressem diferenças entre as médias das cultivares, uma das variedades foi capaz de manter o maior teor de água em seus tecidos foliares quando submetida a déficit hídrico, em relação as demais cultivares com o mesmo potencial de água nas folhas.

Segundo Clarke e McGraig (1982) e Schonfeld; Johnson e Carver (1988), as cultivares que apresentam maiores valores de teor relativo de água, sob as mesmas condições ambientais, são as que apresentam maior tolerância à seca, mostrando tendência de melhor adaptação a déficits hídricos.

Portanto, as cultivares de cevada que são capazes de manter maior quantidade de água em seus tecidos foliares, apresentam melhores condições de adaptabilidade ao déficit hídrico. Foi constatado maior retenção de água em tecidos foliares das plantas que sofreram ciclos de seca em comparação as submetidas ao tratamento irrigado, indicando adaptação ao déficit hídrico (SANTOS; KLAR; JADOSKI, 2008).

Clark e Hiller (1973) também verificaram em seus estudos o aumento da resistência difusa com o decréscimo do potencial de água na folha, como consequência da diminuição das células guardas, aumentando a diferença de temperatura entre a folha e o ar, pela redução da taxa de transpiração.

Klar et al (1985) avaliando a adaptação de plantas de trigo a déficits hídricos, constataram que as plantas condicionadas à seca apresentaram maior resistência à transpiração foliar, quando comparadas às não expostas ao déficit hídrico. Concluíram que estas plantas desenvolveram um sistema de proteção que visa diminuir a perda de água.

Hand; Young e Vasconcelos (1982) estudando respostas fisiológicas para resistência à seca em plântulas de pera, verificaram correlação significativa entre resistência difusa dos estômatos ao vapor d'água e potencial de água nas folhas.

Em plantas de sorgo e algodão quando expostas à seca em ciclos curtos e frequentes, os estômatos permanecem abertos a menores potenciais de água das folhas, quando comparadas a plantas não submetidas ao estresse hídrico. Neste estudo tal fato foi constatado tanto para resultados em casa de vegetação e condições de campo (THOMAS; BROWN; JORDAN, 1976).

Segundo Klar et al. (1985), em plantas de trigo expostas à seca, a resistência difusa dos estômatos ao vapor d'água aumenta nas horas mais quentes, mesmo em solo com condições de umidade favorável. Plantas submetidas a ciclos de seca, tem seu desenvolvimento vegetativo afetado, com espessamento da cutícula e parede celular, bem como aumento da relação

raiz/parte aérea, mudanças na coloração de folhas entre outros fatores. Estas alterações mantêm mais elevados os potenciais de água, sob os mesmos potenciais de água do solo, quando em comparação as plantas constantemente irrigadas.

Segundo Blum; Gozlan e Mayer (1981), genótipos expostos à seca que mantêm potenciais de água das folhas mais elevados durante o período de déficit hídrico, sob mesmas condições ambientais podem ser considerados mais resistentes à falta de água.

Carlin; Rhein e Santos (2012) afirmam que a baixa disponibilidade hídrica no solo interfere na quantidade de nitrogênio da planta, limitando o crescimento, influenciando na fotossíntese de forma direta através da formação dos cloroplastos, síntese de clorofilas e proteínas ou atividade da enzima Rubisco, provocando a redução da concentração das clorofilas.

O ajustamento osmótico através da síntese de substâncias celulares com função osmoprotetora, como a prolina é uma das estratégias adaptativas dos vegetais aos múltiplos efeitos causados pelo estresse. Esta substância está correlacionada ao grau de resistência da planta, sendo considerada umas das principais respostas ao estresse hídrico (CARLIN; SANTOS, 2009).

É possível observar o aumento de 20 a 100 vezes na concentração de prolina, poucos dias após a exposição das plantas a situação de estresse hídrico. A prolina atua no ajuste osmótico de folhas sob baixo potencial hídrico, principalmente, na estabilização de proteínas e proteção das membranas contra os efeitos deletérios das espécies reativas de oxigênio, evitando a desidratação do citosol (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

5.3 Efeito das classes texturais e culturas para umidade em PMP laboratorial

5.3.1 Análise descritiva para a umidade em PMP laboratorial na tensão de 1500 kPa

Na Tabela 10 encontram-se os resultados da análise estatística descritiva para umidade em base volumétrica no PMP laboratorial, para as culturas de trigo e cevada, crescidas em solos de diferentes classes texturais.

Observa-se que os coeficientes de variação foram abaixo de 10%, o que configura homogeneidade dos dados, tornando as médias representativas para a variável umidade. No solo ARG, a média para ambas as culturas foi de $0,23 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$. No solo FAA a cultura do trigo obteve média de $0,15 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ e a cultura da cevada $0,14 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$. No solo ARN, a cultura do trigo mostrou média de $0,06 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$ e a cevada $0,05 \text{ cm}^3\text{cm}^{-3}$.

Tabela 10: Análise descritiva para umidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) em PMP Laboratorial.

SOLO	CULTIVAR	MÉDIA	MÍNIMO	MÁXIMO	D.P.	CV%
ARG	NOBLE	0,23	0,23	0,24	0,01	2,30
	MESTRE	0,22	0,20	0,23	0,01	4,35
	* MÉDIA TRIGO ARG	0,23	0,20	0,24	0,01	4,26
FAA	NOBLE	0,14	0,13	0,14	-	1,37
	MESTRE	0,14	0,13	0,15	-	3,09
	* MÉDIA TRIGO FAA	0,14	0,13	0,15	-	2,70
ARN	NOBLE	0,06	0,05	0,06	-	6,78
	MESTRE	0,06	0,06	0,07	-	4,69
	* MÉDIA TRIGO ARN	0,06	0,05	0,07	0,01	9,78
ARG	BRS	0,24	0,24	0,25	0,01	2,30
	ANAG	0,23	0,22	0,23	0,01	2,38
	* MÉDIA CEVADA ARG	0,23	0,22	0,25	0,01	3,60
FAA	BRS	0,15	0,14	0,16	0,01	4,36
	ANAG	0,15	0,14	0,17	0,01	6,86
	* MÉDIA CEVADA FAA	0,15	0,14	0,17	0,01	5,64
ARN	BRS	0,05	0,05	0,06	-	4,96
	ANAG	0,06	0,05	0,06	-	3,40
	* MÉDIA CEVADA ARN	0,05	0,05	0,06	-	4,29

ARG = solo argiloso. FAA = solo franco-argilo-arenoso. ARN= solo arenoso. D.P.= desvio padrão da média. CV=coeficiente de variação.

Comparando os resultados obtidos para o PMP fisiológico e laboratorial, observa-se que no fisiológico a média para umidade volumétrica em solo ARG para a cultura do trigo é menor que a cultura da cevada. O método laboratorial para o mesmo solo apresenta a mesma média para ambas as culturas.

No solo FAA, os resultados foram semelhantes, pois a média para a cultura do trigo foi menor que para a cultura da cevada. No solo ARN, os resultados foram distintos. No método fisiológico a cultura do trigo apresentou valores menores que a cultura da cevada, e no método laboratorial a cultura do trigo apresentou valor maior de umidade que a cultura da cevada.

Em estudo para avaliar métodos de determinação de água disponível em solo cultivado com algodão, Souza et al. 2000 observaram variação expressiva na faixa de água disponível no solo, decorrente do método empregado na determinação, justificado por Souza; Oliveira e Silva (1999), que asseguram ser tal variação verdadeira, independente da textura do solo em avaliação, observando-se sempre a superioridade da faixa de água disponível determinada pelo método direto aqui considerado, tanto em razão do aumento do conteúdo de água do solo em capacidade de campo (CC), como da diminuição do conteúdo de água no solo em ponto de murcha permanente (PMP).

5.3.2 Normalidade dos dados

O teste de normalidade por Shapiro-Wilk a 5% de significância apresenta os índices obtidos para o W e p-valor na tabela 11.

Tabela 11: Dados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk a 5% de significância para W e p-valor no PMP laboratorial.

SOLO	CULTIVARES	NORMALIDADE DOS DADOS	
		W	p-valor
ARG	NOBLE	0,8946	0,191
	MESTRE	0,8905	0,1716
	BRS	0,885	0,1488
	ANAG	0,8526	0,0623
FAA	NOBLE	0,9065	0,2576
	MESTRE	0,868	0,0947
	BRS	0,8456	0,0514
	ANAG	0,85	0,0580
ARN	NOBLE	0,9108	0,2869
	MESTRE	0,8729	0,108
	BRS	0,8858	0,152
	ANAG	0,8905	0,1716

ARG: textura argilosa. FAA: textura franco argilo-arenosa. ARN: textura arenosa.

Pelos resultados, não se rejeita a hipótese de normalidade para a variável umidade, considerando-se a distribuição normal do resíduo.

5.3.3 Análise de variância

A tabela 12 mostra os resultados para ANOVA obtidos para o método laboratorial, seguindo o delineamento proposto.

Tabela 12: Análise de variância para umidade em PMP laboratorial.

CAUSA DA VARIAÇÃO	Gl	SQ	QM	F
Bloco	9	0,00055	0,000061	1,6 ns
Solos	2	0,61274	0,306370	8052,4 **
Cultivar	3	0,00194	0,000646	17,0 **
Solo * Cultivar	6	0,00297	0,000496	13,0 **
Resíduos	99	0,00377	0,000038	-
Total	119	0,62197	-	-
CV	4,27			

Significativo a 1 % (*). Significativo a 5 % (**). Não significativo (ns).

Pelo teste F a interação entre solo e cultivar apresentou significância para $p < 0,05$, mostrando que a umidade no solo é dependente dos efeitos dos fatores solo e cultivar. Pela significância da interação solo x cultivar, foi realizado o desdobramento desta interação, com

análise do comportamento do solo em cada cultivar (tabela 13) e o comportamento das cultivares em cada solo (tabela 14).

Tabela 13: Desdobramento analisando o efeito do solo sobre a umidade em cada cultivar.

CAUSAS DE VARIAÇÃO	Gl	SQ	QM	F
Bloco	9	0,00055	0,00006	1,6159 **
Cultivar	3	0,00194	0,00065	16,9673 **
Cultivar: Solo (NOBLE)	2	0,14112	0,07056	1854,5416 **
Cultivar: Solo (MESTRE)	2	0,14825	0,07412	1948,1973 **
Cultivar: Solo (BRS)	2	0,17874	0,08937	2348,9283 **
Cultivar: Solo (ANAG)	2	0,14761	0,07380	1939,7867 **
Resíduo	99	0,00377	0,00004	-
Total	199	0,62197	0,00523	-

Significativo a 1 % (*). Significativo a 5 % (**). Não significativo (ns).

O efeito do solo em cada cultivar foi significativo para $p < 0,05$, podendo desta forma afirmar que o solo apresenta diferentes efeitos sobre as cultivares. A quantidade de água retida é característica de cada tipo de solo, que resulta da ação concomitante de vários fatores, entre os quais a mineralogia da fração argila, o teor de matéria orgânica e distinções da microestrutura com elas relacionadas (KLUTE; DIRKSEN, 1986; REICHARDT, 1990).

Tabela 14: Desdobramento analisando o efeito das cultivares sobre a umidade dentro de cada solo.

CAUSAS DE VARIAÇÃO	Gl	QM	SQ	F
Bloco	9	0,00055	0,00006	1,61 **
Solos	2	0,61274	0,30637	8052,37 **
Solo: cultivar (ARG)	3	0,00236	0,00079	20,6761 **
Solo: cultivar (ARN)	3	0,00050	0,00017	4,3805 **
Solo: cultivar (FAA)	3	0,00205	0,00068	17,9602 **
Resíduo	99	0,00377	0,00004	-
Total	119	0,62197	0,00523	-

Significativo a 1 % (*). Significativo a 5 % (**). Não significativo (ns).

O efeito das cultivares em cada solo também foi significativo para $p < 0,05$, sendo que as cultivares apresentam diferentes efeitos sobre a umidade em cada solo. Kramer e Boyer (1995) concluíram, em seus trabalhos que, apesar das características adaptativas, anatômicas e funcionais observadas na parte aérea da planta, a profundidade, a distribuição e o grau de ramificação das raízes constituem fatores de extrema importância, correlacionados ao nível de tolerância à seca por parte das plantas cultivadas.

Distinções texturais, cobertura e espécies vegetais, quantidade de água recebida pelo solo, quer por precipitação ou irrigação, influenciam a dinâmica de água no solo principalmente

em ambientes semiáridos, com respostas no armazenamento de água alteradas pela época do ano e profundidade do perfil (ENGLISH et al., 2005).

A tabela 15 apresenta o teste de médias para o PMP laboratorial obtido para as cultivares em cada solo.

Tabela 15: Teste de médias para a umidade em PMP laboratorial em função das cultivares e do solo.

	MESTRE	NOBLE	BRS	ANAG
ARG	0,22 c A	0,23 b A	0,24 a A	0,22 c A
FAA	0,13 b B	0,14 b B	0,15 a B	0,15 a B
ARN	0,05 b C	0,06 a C	0,05 b C	0,05 ab C

Para cada Solo (a, b, c), médias de cada cultivar seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, a 5% de probabilidade. Para cada Cultivar (A, B, C), médias de cada Solo seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si.

As médias da umidade para as cultivares no solo ARG apresentaram os maiores teores na cevada BRS, seguida do trigo NOBLE. A cevada ANAG e o trigo MESTRE não apresentaram diferenças estatísticas.

No solo FAA as maiores médias para umidade foram para as cultivares de cevada BRS e ANAG. As cultivares de trigo NOBLE e MESTRE apresentaram as menores médias. No solo ARN, não houve diferença estatística para a umidade entre as cultivares.

Estes resultados mostram as diferenças que ocorrem na interação entre as cultivares e as classes texturais dos solos. Variações de sucção pequenas podem responder por quase toda a variação de umidade no solo ARN. Para o solo ARG, as modificações mais expressivas são conseguidas com a aplicação de sucções maiores. Isso está relacionado a porosidade, que em solo ARG possui maior quantidade com dimensões menores. Solos com textura mais fina, apresentam maior intensidade das forças adsorptivas (PREVEDELLO, 2015).

O efeito da textura do solo repercute nos espaços porosos, de modo que a retenção de água em potencial mátrico próximo a saturação é maior. Isso pode ser explicado pela condução da água, em equilíbrio termodinâmico, apresentar a mesma energia livre específica. Se este equilíbrio não ocorre, diferentes agrupamentos de moléculas de água poderão apresentar diferentes valores de energia livre, com distintos valores de pressão ou sucção em seus poros (CZYZ; DEXTER, 2013).

5.4 Correlação entre umidades para o PMP pelos métodos fisiológico e laboratorial

Embora se saiba que ocorre correlação para as variáveis umidade no PMP obtidas pelos métodos fisiológico e laboratorial, não se sabe a relação exata entre as variáveis.

O coeficiente de correlação (r) da umidade entre o PMP fisiológico e o PMP laboratorial, em função das culturas apresentou para a cevada $r = 0,97$ e para o trigo $r = 0,95$, obtidos através de 60 unidades amostrais.

O coeficiente de correlação obtido para as culturas em cada solo, encontram-se na Tabela 16. Comparando-se os coeficientes de correlação entre as culturas e das culturas nos solos (classes texturais), observa-se que nas diferentes texturas os coeficientes foram menores. Este resultado pode ter sido desfavorecido pelo número de amostragens utilizadas (20 unidades amostrais) em cada classe textural.

Tabela 16: Correlação para o PMP das culturas em relação ao solo.

	TRIGO	CEVADA
ARG	0,57	0,69
FAA	0,48	0,52
ARN	0,42	0,45

ARG = argiloso. FAA = franco-argilo-arenoso. ARN = arenoso.

A variável umidade para as culturas, obtida através do método fisiológico e laboratorial pode ser considerada equivalente no PMP, com coeficiente de correlação superior a 0,90. Para este estudo o PMP fisiológico pôde ser utilizado como indicador da cultura com maior tolerância ao déficit hídrico.

5.5 Potencial estimado para o PMP fisiológico

Com a umidade volumétrica obtida nos diferentes potenciais pela mesa de tensão e pela câmara de Richards, foi possível gerar equações de regressão para estimar o potencial em que as plantas entraram em PMP (tabela 17). A abordagem linear para descrever a relação que ocorre entre as sucções matriciais e o conteúdo de água no solo, tem sido utilizada na tentativa de criar novos modelos que predigam as características de retenção de água contínua, desde a saturação até o conteúdo de água zero, que corresponde ao solo seco em estufa (JENSEN, 2015).

Segundo Bacchi; Corrente e Reichardt (1991) a condutividade hidráulica depende da fluidez da água, a qual é proporcional a viscosidade e densidade, e da macroporosidade do solo, que é função da textura e estrutura do solo.

Hosseini et al. (2016), constataram que infecção fúngica endofítica em gramíneas, incrementa a habilidade de extração de água do solo. É provável que isto ocorra por processos

adaptativos tanto morfológicos quanto fisiológicos, para compensar o déficit na condutividade hidráulica em altas tensões matriciais, mostrando interação do sistema solo-planta.

Tolk (2003) também observou que a interação solo-planta pode influenciar no processo de murchamento. Obteve a murcha do milho (*Zea mays* L.) em teores de umidade maiores do que para o sorgo (*Sorghum bicolor* L.) em um mesmo solo. A própria conformação radicular, permite que raízes com maiores comprimentos absorvam água em camadas mais profundas, caracterizando fatores relacionados as plantas.

Tabela 17: Potencial estimado para PMP fisiológico, equação de regressão e coeficiente de determinação.

SOLO	Cultura	Cultivar	Ψ estimado para PMP Fisiológico	EQUAÇÃO	R ²
ARG	TRIGO	NOBLE	1451	$Y = -0,0003x + 0,6253$	0,70
		MESTRE	1436	$Y = -0,0003x + 0,6214$	0,69
NOBLE		1398	$Y = -0,0003x + 0,5394$	0,68	
MESTRE		1327	$Y = -0,0003x + 0,5281$	0,68	
NOBLE		941	$Y = -0,0003x + 0,3323$	0,63	
MESTRE		921	$Y = -0,0003x + 0,3263$	0,62	
ARG	CEVADA	BRS	1257	$Y = -0,0003x + 0,5971$	0,75
		ANAG	1417	$Y = -0,0003x + 0,6251$	0,74
BRS		1283	$Y = -0,0003x + 0,5349$	0,68	
ANAG		1265	$Y = -0,0003x + 0,5195$	0,71	
BRS		835	$Y = -0,0003x + 0,3105$	0,62	
ANAG		885	$Y = -0,0003x + 0,3255$	0,63	

MD = método direto ou fisiológico ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). MI = método indireto ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). Ψ estimado (kPa). R² = coeficiente de determinação. Y = umidade no PMP fisiológico. X = potencial estimado para o PMP fisiológico.

Diferenças na umidade para as duas determinações já foram encontrados como no trabalho de CIRINO e GUERRA (1994). Os resultados destes autores reforçam a condição de que o PMP sofre influência tanto do solo quanto da cultura. O uso da câmara de pressão representa uma metodologia confiável para determinar o volume de água armazenada no solo, apesar de demorada e da não consideração das características vegetais e ambientais (ROMANO; SANTINI, 2002).

Haise; Haas e Jensen (1955) estimaram para o trigo o PMP em 2451,5 kPa, e embora os resultados não tenham atingido a tensão de 1500 kPa, sabe-se que as plantas são capazes de extrair água a potenciais mais baixos ou mais altos, ou mesmo, que o equilíbrio potencial-teor de água do solo, pode não ter sido atingido nas amostras submetidas a câmara de Richards (KLEIN; REICHERT; REINERT, 2006).

6 CONCLUSÕES

O PMP fisiológico e laboratorial dos Latossolos depende das classes texturais do solo.

As avaliações realizadas mostraram que os teores de umidade obtidos pelo PMP fisiológico e câmara de Richards podem ser considerados equivalentes para as duas culturas.

O trigo na variedade MESTRE é mais indicado em regiões com condições de solo semelhante as testadas.

O teor de argila no solo afeta linearmente o conteúdo de água para o PMP.

As culturas da cevada e trigo entraram em PMP em potencial inferior a 1500 kPa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Rome: **Food and Agriculture Organization of the United Nations** - FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 111-116, 2011.

ARRUDA, F. B., ZULLO, J. R.; OLIVEIRA, J. B. de. Parâmetros do solo para cálculo da água disponível com base da textura no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1987.

ASSINE, M. L. Fácies, icnofósseis, paleocorrentes e sistemas deposicionais da formação Furnas no flanco sudeste da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 3, p. 357-370, 1999.

BACCHI, O. O. S.; CORRENTE, J. E.; REICHARDT, K. Análise comparativa de dois métodos simplificados de determinação da condutividade hidráulica de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 249-252, 1991.

BEHLING, H. Late Quaternary vegetation, climate and fire history of the Araucaria forest and campos region from Serra Campos Gerais, Paraná State (South Brazil). **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 97, p. 109-121, 1997.

BENGTSON, C.; KLOCKARE, B.; KLOCKARE, R.; LARSSON, S.; SUNDGVIST, C. The after-effect of water stress on chlorophyll formation during greening and the levels of abscisic acid and proline in dark grown in wheat seedlings. **Physiologia Plantarum**, v. 43, p. 205-212. 1978.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 2. Ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1982. 463 p.

BERTOLLI, S. C. **Caracterização Sistêmica de Alterações em Redes Fisiológicas de Plantas C3 e C4 Submetidas à Deficiência Hídrica**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências de Rio Claro, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/87835>. Acesso em: 28 set. 2016.

BIOTRIGO. Disponível em: <http://sementesroos.com.br/cultivar/tbio-mestre-2/>. Acesso em: 26 out. 2016.

BLUM, A.; GOZLAN, G.; MAYER, J. Manifestation of dehydration avoidance in wheat breeding germplasm. **Crop Science**, Madison, v. 21, p. 494-499, 1981.

BONFIM da SILVA, E. M.; MONTEIRO, F. A.; SILVA, T. J. A. da. Nitrogênio e enxofre na produção e no uso de água pelo capim braquiária em degradação. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 31, n. 32, p. 309-317, 2007.

BOTULA, Y. D.; CORNELIS, W. M.; BAERT, G.; VAN RANST, E. Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soil in Lower Congo (DR Congo). **Agricultural Water Management**. Amsterdam, v. 111, p. 1-10, 2012.

BOTULA, Y. D.; NEMES, A.; MAFUKA, P.; VAN RANST, E.; CORNELIS, W. M. Prediction of water retention of soils from the humid tropics by the nonparametric K-nearest neighbor approach. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 12, p. 1-17, 2013.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 668 p.

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).

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2009.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C. de; SEVERIANO, E. da C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 77-86, 2011.

CARLIN, S. D.; RHEIN, A. F. L.; SANTOS, D. M. M. Efeito simultâneo da deficiência hídrica e do alumínio tóxico no solo na cultivar IAC91-5155 de cana-de-açúcar. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 553-564, 2012.

CARLIN, S. D.; SANTOS, D. M. M. Indicadores fisiológicos da interação entre déficit hídrico e acidez do solo em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, n. 9, p. 1106-1113, 2009.

CASSINARI, C.; MANFREDI, L.G.; TREVISAN, M.; PICCINI, C. Relationship between hydraulic properties and plant coverage of the closed-landfill soils in Piacenza. **Solid Earth**, v. 6, p. 929-943, 2015.

CHAVES, M. M., FLEXAS, J., PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, v. 103, p. 551-560, 2009.

CHEN, C.; REN, T.; HU, K.; LI, B.; WANG, Y. 2013. Estimation of soil clay content using hygroscopic water content at an arbitrary humidity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, p. 119-124, 2014.

CIRINO, C. G.; GUERRA, H. O. C. Utilização das relações energia/umidade na caracterização físico-hídrica dos solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 12, p. 1973-1978, 1994.

CLARK, R. N.; HILLER, E. A. Plant measurements as indicator of crop water deficits. **Crop Science**, v. 13, p. 466-469, 1973.

CLARKE, J. M.; McGRAIG, T. M. Excised- leaf water retention capability as indicator of drought resistance of triticum genotypes. **Canadian Journal Plant Science**, v. 62, p.571-578, 1982.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. Ed. Porto Alegre, 2004.

CONSELHO DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOTECNOLOGIA – CIB. **Cientistas do Egito produzem trigo GM resistente à seca**. 2004. Disponível em: < <http://cib.org.br/em-dia-com-a-ciencia/noticias/cientistas-do-egito-produzem-trigo-gm-resistente-a-seca> >. Acesso em: 03 nov. 2016.

COSTA, A. C. S.; NANI, M. R.; JESKE, E. Determinação da umidade na capacidade de campo e ponto de murchamento permanente por diferentes metodologias. **Revista Unimar**, v.19, p.827-844, 1997.

CUTFORD, H. W., JEFFERSON, P. G., CAMPBELL, C. A. Lower limit of available water for three plant species grown on a medium-textured soil in southwestern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 71, p. 247-252, 1991.

CZYZ, E. A., DEXTER, A. R. Influence of soil type on the wilting of plants. **International Agrophysics**. Warsaw, v. 27, p. 385-390, 2013.

CZYZ, E. A.; DEXTER, A. R. Plant wilting can be caused either by the plant or by the soil. **Soil Research**, Wellington, v. 50, p. 708-713, 2012.

DANE, J. H.; TOPP, C. G.; CAMPBELL, G. S. (Eds). **Methods of soil analysis: Part 4 – Physical methods**. 3. Ed. Madison: Soil Science of America, 2002. 1692 p.

DAWOOD, M. G. Influence of osmoregulators on plant tolerance to water stress. **Scientia Agriculturae**, v. 13, p. 42-58, 2016.

DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I: theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004a.

DEXTER, A. R. Soil physical quality Part III: unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 227-239, 2004b.

DEXTER, A. R., CZYZ, E. A., RICHARD, G. Equilibrium, non-equilibrium and residual water: consequences for soil water retention. **Geoderma**, Amsterdam, v. 177, p. 63-71, 2012.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L. de; BALIEIRO, F. de C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C. dos; ALBUQUERQUE, M. R. de; MACEDO, M. C. M; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, set. 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, SPI/ CNPS, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Trigo**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/trigo/cultivos>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-cnps, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

ENGLISH, N. B.; WELTZIN, J. F.; FRAVOLINI, A.; THOMAS, L.; WILLIAMS, D. G. The influence of soil texture and vegetation on soil moisture under rainout shelters in a semi-desert grassland. **Journal of Arid Environments**, v. 63, n. 1, p. 324–343, 2005.

FARIA, M. A.; ZANOTO, M. D.; CATÂNEO, A.; KLAR, A. E. Comportamento de SEIS cultivares de cevada (*Hordeum vulgare* L.) sob regime de irrigação em Botucatu, Estado de São Paulo. **Científica**, São Paulo, v. 21, n.1, p. 97-111, 1993.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da Soja**. Londrina: Embrapa CNPSO, 9 p. (Circular Técnica, nº 48), 2007.

FERNANDES, B.; RESENDE, M.; RESENDE, S. B. Caracterização de alguns solos sob cerrado e disponibilidade de água para as culturas. **Experientiae**, v. 24, p. 209-260, 1978.

FERNANDES, F. B. P.; LACERDA, C. F. de; ANDRADE, E. M. de; NEVES, A. L. R.; SOUZA, C. H. C. de. Efeito de manejos do solo no déficit hídrico, trocas gasosas e rendimento do feijão-de-corda no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 506-515, 2015.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 507-514, 1999.

FERREIRA, L. G. R. **Fisiologia Vegetal: Relações Hídricas**. 1. Ed. Fortaleza: Edições UFC, 1992, 138 p.

FERRI, M. G. (Coord.) **Fisiologia Vegetal**. v. 1. 2. Ed. São Paulo: EPU, 1985, 361p.

FURR, J. R.; REEVE, J. O. Range of soil-moisture percentages through which some plants undergo permanent wilting in some soils from semiarid irrigated areas. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 71, p.149-170, 1945.

GRIFFIN, B. S. SHILLING, D. G.; BENNET, J. M.; CURREY, W. L. The influence of water stress on the physiology and competition of soybean (*Glycine max*) and florida beggarweed (*Desmodium tortuosum*). **Weed Science**. Champaign v. 37, p. 544-551, 1989.

GUBIANI, P. I.; REICHERT J. M.; CAMPBELL, C.; REINERT, D. J.; GLAIN, N. S. Assessing errors and accuracy in dew-point potentiometer and pressure plate extractor measurements. **Soil Science of America Journal**, v. 77, n. 1, p. 19-24, 2013.

HAISE, H. R., HAAS, H. J., JENSEN, L. R. Soil moisture of some great plains soil: II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and minimum point as related to 15 and 26 atmosphere percentages. **Soil Science Society of America**. Proc., v. 10, p. 20-25, 1955.

HAND, J. M.; YOUNG, E.; VASCONCELOS, A. C. Leaf water potencial, stomatal resistance and photosyntetic response to water stress in peach seedlings. **Plant Physiology**, Rockville, v. 69, p.1051-1054, 1982.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1980. 771 p.

HOPKINS, W. G. **Introduction to Plant Physiology**. 2. Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000, 512 p.

HOSSEINI, F.; MOSADDEGHI, M. A.; HAJABBASI, M. A.; SABZALIAN, M. R. Role of fungal endophyte of tall fescue (*Epichloë coenophiala*) on water availability, wilting point and integral energy in texturally-different soils. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 163, p. 197-211, 2016.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.

INSTITUTO AGONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná: classificação climática – segundo Köppen**, 2009. CD-ROM.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Climate Change, Food, and Agriculture**. MASTRANDREA, M. D.; MACH, K. J.; BARROS, V. R.; BILIR, T.E.;

DOKKEN, D. J. EDENHOFER, O.; FIELD, C. B.; HIRAIISHI, T.; KADNER, S.; KRUG, T.; MINX, J. C.; PICHS-MADRUGA, R.; PLATTNER, G. K.; QIN, D.; SOKONA, Y.; STOCKER, T. F.; TIGNOR, M. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2015. 68 p.

JALEEL, C. A.; MANIVANNAN, P.; WAHID, A.; FAROOQ, M.; AL-JUBURI, H. J.; SOMASUNDARAM, R.; PANNEERSELVAM, R. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 11, p. 100-105, 2009.

JENSEN, D. K.; TULLER, M.; JONGE, L. W.; ARTHUR, E.; MOLDRUP, P. A New Two-Stage Approach to predicting the soil water characteristic from saturation to oven-dryness. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 521, p. 498-507, 2015.

KAUR, K.; KAUR, N.; GUPTA, A. K.; SINGH, I. Exploration of the antioxidative defense system to characterize chickpea genotypes showing differential response towards water deficit conditions. **Plant Growth Regulation**, v. 70, n. 1, p. 49–60, 2013.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012. 431p.

KLAR, A. E.; CATÂNEO, A.; DENADAI, I. A. M.; SAAD, J. C. C.; OICARELI, M. Medidas de adaptação de plantas de trigo a déficits hídricos. **Científica**, São Paulo, v. 13, p. 117-127, 1985.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo, UPF Editora, 212 p., 2008.

KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 646-650, 2006.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In:_____. **Methods of soil Analysis: I. Physical and Mineralogical Methods**. 2. Ed. Madison: SSSA, 1986. 1358 p. p. 635-662.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. **Hydraulic conductivity and diffusivity**: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water Relations of Plants and Soils**. Academic Press. San Diego. 1995. 495 p.

KUMAR, A.; LI, C.; PORTIS A. R. Jr. Arabidopsis thaliana expressing a thermostable chimeric Rubisco activase exhibits enhanced growth and higher rates of photosynthesis at moderately high temperatures. **Photosynth Research**, v. 100, p. 143-153, 2009.

LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos. 2002. 178 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. Ed., Edusp, São Paulo, 2012. 335 p.

MELLO, C. R.; OLIVEIRA, G. C.; RESCK, D. V. S.; LIMA, J. M.; DIAS JÚNIOR, M. S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, n. 4, p. 836-841, 2002.

MINERAIS DO PARANÁ S.A. – MINEROPAR. **Avaliação geológica e geotécnica para o planejamento territorial e urbano do município de Tibagi**. Curitiba: Mineropar, 2005.

MOLINE, E. F. da V.; BARBOZA, E.; SIMÕES, L. P.; FERREIRA FILHO, G. S.; SOUZA, F. L. F.; SCHLINDWEIN, J. A. Ponto de murcha permanente em solos arenoso e argiloso utilizando o tomateiro como cultura indicadora. **Global Science Technology**, Rio Verde, v. 06, n. 01, p. 164-170, 2013.

MONTANHEIRO, M. N.; SAITO, S. N. T.; REICHARDT, K; LIBARDI, P. L. Controle de tensões de água no solo em vasos com feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*). In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 17., Manaus, 1979, Anais. Campinas, Sociedade brasileira de Ciência do Solo, 1979. p. 68.

MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical methods*. Madison, **Soil Science Society of America/American Society of Agronomy**. p.797-823. 1986.

NEMES, A.; TIMLIN, D. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Sensitivity of the nearest neighbor approach to estimate soil hydraulic properties. **Vadose Zone Journal**. v. 5, p. 1222–1235, 2006.

OR, D.; WRAITH, J.M. Soil water content and water potential relationships. In: WARRICK, A.W. (Ed.). **Soil physics companion**. Boca Raton: CRC Press, p. 49-84, 2002.

PADOVANI, C. R. **Delineamento de experimentos**. São Paulo: Cultura acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró Reitoria de Graduação, 2014. 128 p.

PESQUISA FAPESP. **No Egito, trigo tolerante à seca**. 2004. Disponível em: < [http:// revista.pesquisa.fapesp.br/2004/11/01/no-egito-trigo-tolerante-a-seca/](http://revista.pesquisa.fapesp.br/2004/11/01/no-egito-trigo-tolerante-a-seca/) >. Acesso em: 05 nov. 2016.

PINHEIRO, C; CHAVES, M. M. Photosynthesis, and drought: can we make metabolic connections from available data. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, p. 869-882, 2011.

PIRES, R. C. M.; SAKAI, E.; ARRUDA, F. B.; FOLEGATTI, M. V. Necessidades Hídricas das culturas e manejo da irrigação. In: Miranda, J. H.; Pires, R. C. M. (eds.). **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2001. cap.1, p. 121-194.

PORCH, T. G.; RAMIREZ, V. H.; SANTANA, D.; HARMSSEN, E. W. Evaluation of common bean for drought tolerance in Juana Diaz. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.195, p. 328-334, 2009.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo**: com problemas resolvidos. 2. Ed. rev. e ampl. Curitiba: C. L. Prevedello, 2015. 474 p.

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. **Plantas Daninhas**, v. 22, p. 35-41, 2004.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2013. URL <http://www.R-project.org/>.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas Instituto Agrônômico, 2001. 284p.

RAJAGOPAL, V.; BALASUBRAMANIAN, V.; SINHA, S. K. Diurnal fluctuations in relative water content, nitrate reductase and proline content in water-stressed and non stressed wheat. **Physiology Plantarum**, Copenhagen, v. 40, p.69-71, 1977.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188p.

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

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 466p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. Piracicaba: Manole, 2004. 478p.

RICHARDS, L. A.; WALDLEIGH, C. H. Soil water and plant growth. **Soil physical conditions and plant growth**. Madison: ASA, 1952. 31p.

RICHARDS, L. A., WEAVER, L. R. Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. **Soil Science**, v. 56, p. 331–340, 1943.

ROMANO, I.; SANTINI, A. Water retention and storage: field. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (Eds) *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*. Madison: **Soil Science Society of America**, 2002. p.721-738.

SALVESTRO, A. C.; FREITAS, P. S. L. de; REZENDE, R.; VIEIRA, C. V.; FRISKE, E.; CHIERICI, G.; SAPIA, J. G.; BARBOSA, PRECHLAK, A. Permanent wilting point of soybean in Rhodic Ferralsols with and without biodegradable organic residue incorporation and physiological monitoring in relation to the behavior of moisture. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 11, n. 3-4, p. 1248-1252, 2013.

SANTOS, A. B. A. dos; KLAR, A. E.; JADOSKI, C. J. Parâmetros fisiológicos de cultivares de cevada sob déficits hídricos. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 4, p. 438-448, 2008.

SANTOS, F. L.; ALEXANDRE, C. A.; COELHO, R. R. Relações Solo-Água-Planta. In: Shakib Shahidian, Rita Guimarães, Carlos Miranda Rodrigues (eds). **Hidrologia Agrícola**. Évora: ICAAM, 2012. p.153-203.

SCHONFELD, M. H.; JOHNSON, R. C.; CARVER, B. F. Water relations in winter wheat as drought resistance indicator. **Crop Science**, v. 28, p. 526-531, 1988.

SINGH, T. N.; PALEG, L. G.; ASPINALL, D. Stress metabolism III. Variations in response to water deficit in the barley plant. **Australian Journal of Biology Science**, v. 26, p. 65-76, 1973.

SLATYER, R. O. The significance of the permanent wilting percentage in studies of plant and soil water relations. **Botanical Review**, v. 23, p. 585-636, 1957.

SOUZA, C. C. de; OLIVEIRA, F. A. de; SILVA, I. de F. da; ANDRADE, A. P. de. Manejo da irrigação e da adubação nitrogenada na cultura do algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 125-130, 1999.

SOUZA, C. C. de; OLIVEIRA, F. A. de; SILVA, I. F. da; AMORIM NETO, M. S. Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 338-342, 2000.

SYKES, D. J. Reconsideração sobre o conceito de umidade de murchamento permanente. **Turrialba**, v. 19, p. 525-530, 1969.

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

THOMAS, J.C.; BROWN, K. W.; JORDAN, W. R. Stomatal response to leaf water potencial as affected by preconditioning water stress i the field. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 706-708, 1976.

TOLK, J. A., Soils, permanent wilting points. In: Stewart, B. A., Howell, T. A. (Eds.), **Encyclopedia of Water Science**. Marcel Dekker Press, New York, US, p. 927–929, 2003.

TOKUNAGA, T. K. Hydraulic properties of adsorbed water films in unsaturated porous media. **Water Resources Research**. v. 45, p. 06415 - 06424, 2009.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. USDA, NRCS. **Soil Mechanics Level I: Module 3. USDA Textural Soil Classification**. Disponível em: <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/training/soilother/soil-USDA-textural-class.pdf>. Acesso em: 14 out. 2016.

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

VAN LIER, Q. de J. Disponibilidade de água às plantas. In: VAN LIER, Q. de J. (Ed.) **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

VAN LIER, Q. de J. Índice da disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do solo**, 2000. p. 95-106.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soil. **Soil Science**, Oxford, v. 68, n. 1, p. 75-94, July 1949.

ZHANG, M.; JIN, Z. Q.; ZHAO, J.; WU, F. Physiological and biochemical responses to drought stress in cultivated and Tibetan wild barley. **Plant Growth Regulation**, v. 75, p. 567–574, 2015.

WANG, Y.; LU, S.; REN, T.; LI, B. Bound water content of air-dry soils measured by thermal analyses. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, p. 481-487, 2011.

WILLIAMS, J.; PREBBLE, R.; WILLIAMS, W. T. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v. 21, n. 1, p. 15-31, 1983.

WWAP. **United Nations World Water Assessment Programme**. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO. Disponível em: < https://www.unesco-ihc.org/sites/default/files/wwdr_2015.pdf >. Acesso em: 01 nov. 2016.

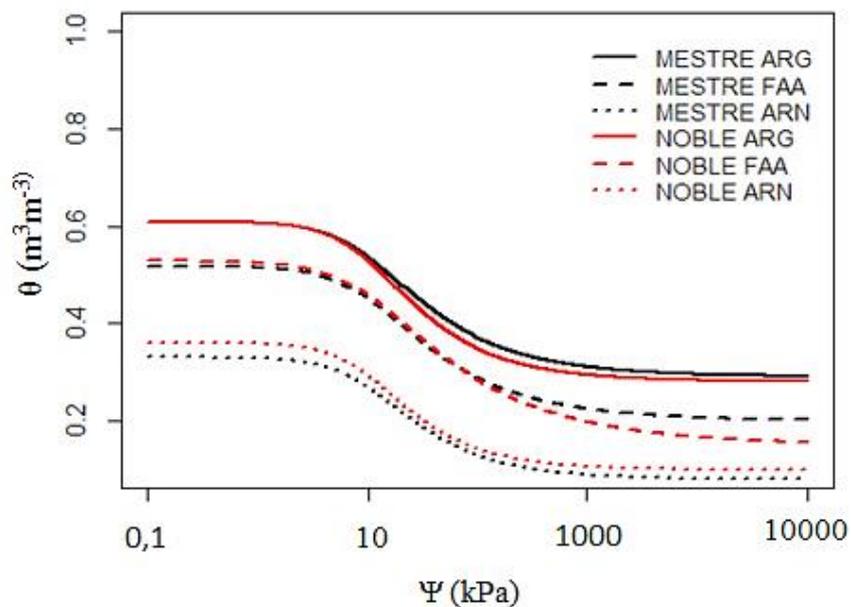
7 ANEXOS

Anexo 1: Parâmetros das curvas de retenção de água ajustadas pelo modelo matemático de van Genuchten (1980), para diferentes tipos de solo.

Cultivar	Tipo de solos	Variedade	θ_s	θ_r	α	n	m	R ²
			$m^3 \cdot m^{-3}$		cca			
TRIGO	Argiloso	MESTRE	0,61**	0,29**	0,01**	1,6**	0,37**	0,95
		NOBLE	0,61**	0,28**	0,01 ^{ns}	1,69**	0,40**	0,96
	Franco Argilo-Arenoso	MESTRE	0,52**	0,20**	0,01**	1,56**	0,35**	0,98
		NOBLE	0,53**	0,15**	0,01**	1,45**	0,31**	0,97
	Arenoso	MESTRE	0,33**	0,08**	0,01**	1,7**	0,41**	0,94
		NOBLE	0,36**	0,10 ^{ns}	0,01 ^{ns}	1,78**	0,43**	0,95
Cultivar	Tipo de solos	Variedade	θ_s	θ_r	α	n	R ²	
			$m^3 \cdot m^{-3}$		cca			
CEVADA	Argiloso	ANAG 01	0,6**	0,29**	0,01 ^{ns}	1,79**	0,44**	0,98
		BRS BRAU	0,6**	0,29**	0,01**	1,74**	0,42**	0,97
	Franco Argilo-Arenoso	ANAG 01	0,51**	0,10**	0,01 ^{ns}	1,37**	0,27**	0,96
		BRS BRAU	0,53**	0,16**	0,01**	1,54**	0,35**	0,96
	Arenoso	ANAG 01	0,29**	0,10 ^{ns}	0,01**	1,82**	0,45**	0,94
		BRS BRAU	0,34**	0,10 ^{ns}	0,01**	1,69**	0,40**	0,95

Modelo de van Genuchten (1980): $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \{1 + (\theta\Psi)^n\}^{-1/n}$, em que θ é o conteúdo volumétrico da água no solo; θ_r é o conteúdo volumétrico residual da água no solo; θ_s é o conteúdo volumétrico saturado da água no solo; n é o fator de ajuste (sem dimensão); α é o fator de ajuste (cca). ns: F não significativo; *: F significativo a 5%; **: F significativo a 1%.

Anexo 2: Curvas de retenção de água para o trigo nos solos ARG, FAA e ARN, ajustadas a partir da equação de van Genuchten.



Anexo 3: Curvas de retenção de água para a cevada nos solos ARG, FAA e ARN, ajustadas a partir da equação de van Genuchten.

