

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR PARA A DETERMINAÇÃO
DA TENSÃO DA ÁGUA NO SOLO**

RAFAEL GUIMARÃES SILVA MORAES

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
MARÇO - 2021**

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR PARA A DETERMINAÇÃO
DA TENSÃO DA ÁGUA NO SOLO

RAFAEL GUIMARÃES SILVA MORAES

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal”

Orientador: Prof. Cláudio Roberto Marciano

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
MARÇO - 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

M827

Moraes, Rafael Guimarães Silva.

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR PARA A DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DA ÁGUA NO SOLO / Rafael Guimarães Silva Moraes. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

103 f.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2021.

Orientador: Cláudio Roberto Marciano.

Coorientador: Elias Fernandes de Sousa.

1. Sensor térmico. 2. Material Cerâmico. 3. Retenção de água no solo. 4. Curvas de calibração. 5. Caracterização física. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR PARA A DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DA ÁGUA NO SOLO

RAFAEL GUIMARÃES SILVA MORAES


“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal”

Aprovada em 10 de março de 2021.

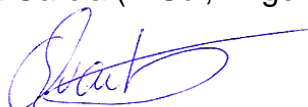
Comissão examinadora:



Prof. Elias Fernandes de Sousa (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF



Prof. Ricardo Ferreira Garcia (D.Sc., Engenharia Agrícola) – UENF



Prof. Quirijn de Jong van Lier (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) – USP



Prof. Cláudio Roberto Marciano (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) – UENF
(Orientador)

*A Deus.
À minha família.
Aos meus amigos.*

Dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, sem ele nada sou.

À minha família, pelo carinho, incentivo, confiança e companheirismo mesmo estando distantes.

Ao meu orientador Cláudio Roberto Marciano, por ser um exemplo de ser humano e orientador, pela grande amizade construída, pela oportunidade, conhecimento, incentivo e paciência.

Ao meu coorientador Elias Fernandes de Sousa, por todo o conhecimento e contribuições que permitiram a execução deste trabalho.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e ao Programa de Pós Graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade e concessão de bolsa.

Aos amigos do LSOL, Ederaldo, Gabriel, Jorge e Wesley pela convivência agradável e pelos bons momentos compartilhados.

Aos novos amigos Dandara, Guilherme, Ismael, Ivanessa, Kalyane, Laisa, Letícia, Lilian, Mickaelle, Rafael, Priscila, pelos momentos de descontração e que irei levar para a vida.

SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO	vi
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Água no solo.....	4
2.1.1 Umidade do solo e armazenagem de água.....	5
2.1.2 Potenciais da água no solo	6
2.1.3 Curva de retenção da água no solo.....	8
2.1.4 Disponibilidade de água para as plantas.....	10
2.2 Medições da água no solo	12
2.2.1 Medição da umidade do solo	12
2.2.2 Medição da tensão de água no solo.....	14
2.3 Sensores de dissipação térmica	17
2.4 Desenvolvimento de sensores e de sistemas de aquisição de dados	18
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1 Coleta e caracterização dos solos	21
3.1.1 Composição granulométrica	21

3.1.2 Densidade de partículas	22
3.1.3 Densidade do solo.....	23
3.1.4 Porosidade total	24
3.1.5 Curva de retenção de água.....	25
3.2 Caracterização do material cerâmico.....	27
3.2.1 Densidade da matriz cerâmica	28
3.2.2 Variáveis e relações gravimétricas e volumétricas dos blocos	29
3.2.3 Curva de retenção de água dos blocos	33
3.3 Aspectos construtivos e princípio de funcionamento do sensor	36
3.4 Configuração do sistema para geração de sinal e coleta de dados dos sensores usando a plataforma Arduino.....	40
3.5 Calibração e validação dos sensores.....	42
3.6 Ensaio para teste dos sensores de tensão da água em solos.....	45
3.7 Análise estatística.....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1 Caracterização física dos solos	48
4.2 Caracterização física do material cerâmico.....	55
4.3 Calibração e validação dos sensores.....	58
4.4 Ensaio para teste de funcionamento dos sensores	64
5. RESUMO E CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

RESUMO

MORAES, Rafael Guimarães Silva; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Março de 2021; Desenvolvimento de um sensor para a determinação da tensão da água no solo; Orientador: Cláudio Roberto Marciano; Coorientador: Elias Fernandes de Sousa.

A tensão da água no solo é um importante indicador da disponibilidade de água para as plantas. Com o tempo, além do tensiômetro, vários instrumentos foram desenvolvidos e introduzidos no mercado como o objetivo de medir a tensão de maneira mais fácil, rápida e precisa. No entanto, como cada um desses instrumentos alternativos apresenta suas limitações, há ainda espaço para inovações. O trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um sensor da tensão de água no solo cuja medição baseia-se na dissipação de calor em uma matriz porosa em contato com o solo, dando subsídios para suprir a demanda de possíveis usuários por um produto acessível e de baixo custo. Foi realizada a coleta de material dos horizontes superficial e subsuperficial de três solos do município de Campos dos Goytacazes-RJ, sendo um Argissolo Vermelho argiloso, um Cambissolo Háplico argilo siltoso e um Argissolo Amarelo franco argilo arenoso, para uso nos testes para validação do sensor. Foi feita a caracterização física dos solos e do material cerâmico, incluindo a obtenção da

curva de retenção de água (CRA). A CRA foi obtida em funis de placa porosa (tensões: 1, 3, 6 e 10 kPa) e câmaras de pressão de Richards (tensões: 20, 33, 50, 100, 500 e 1500 kPa). Foram confeccionados seis sensores, constituídos por um resistor e um termistor inseridos em furos abertos nos blocos cerâmicos, controlado pela plataforma Arduino. Para a calibração dos sensores, esses foram acionados e colocados em contato com água por 24 horas, para saturação, e posteriormente deixados suspensos para secagem ao ar, até atingir peso constante. Nesse período a quantidade de água no sensor foi monitorada por pesagem, permitindo a estimativa da tensão da água a partir da CRA e, também, a obtenção de curvas de calibração para os sensores. Os seis sensores foram avaliados quanto à sensibilidade para a medição da tensão da água em solos em dois ensaios conduzidos em vasos, sendo um com o material do Argissolo Vermelho e outro com o do Argissolo Amarelo. Os resultados mostraram que o equipamento é sensível às variações de conteúdo de água nos solos, permitindo que a tensão da água seja estimada a partir da leitura normatizada do sensor. No entanto, as curvas de calibração obtidas previamente produziram valores de tensão divergentes em relação tanto aos medidos com o tensiômetro quanto aos obtidos a partir da CRA. Novas curvas de calibração foram estimadas a partir dos dados coletados nos próprios ensaios de validação, o que evidencia a necessidade de novos estudos, seja para a obtenção de curvas de calibração funcionais e estáveis, seja para a readequação de aspectos construtivos do sensor proposto.

ABSTRACT

MORAES, Rafael Guimarães Silva; M.Sc.; Norte Fluminense State University-Darcy Ribeiro; March, 2021; Development of a sensor to the determination of the soil water tension; Advisor: Cláudio Roberto Marciano; co-advisor: Elias Fernandes de Sousa.

The water tension in the soil is an important indicator of water availability for plants. Over time, in addition to the tensiometer, several instruments were developed and introduced on the market with the objective of measuring tension in an easier, faster and more accurate way. However, as each of these alternative instruments has its limitations, there is still room for innovation. The work aimed to develop and evaluate a sensor of water tension in the soil whose measurement is based on the heat dissipation in a porous matrix in contact with the soil, providing subsidies to supply the demand of possible users for an accessible product and low cost. The collection of material from the superficial and subsurface horizons of three soils in the municipality of Campos dos Goytacazes-RJ was carried out, being a clay Ultisol, a silty clay Inceptisol and a sandy clay loam Ultisol, for use in the sensor validation tests. The physical characterization of soils and ceramic material was made, including obtaining the water retention curve (CRA). The CRA

was obtained in porous plate funnels (tension: 1, 3, 6 and 10 kPa) and Richards pressure chambers (tension: 20, 33, 50, 100, 500 and 1500 kPa). Six sensors were made, consisting of a resistor and a thermistor inserted in open holes in the ceramic blocks, controlled by the Arduino platform. For the calibration of the sensors, these were activated and placed in contact with water for 24 hours, for saturation, and later left suspended for air drying, until reaching constant weight. During this period, the amount of water in the sensor was monitored by weighing, allowing the estimation of the water tension from the CRA and also obtaining calibration curves for the sensors. The six sensors were evaluated for sensitivity to measure water tension in soils in two tests conducted on pots, one with the material of the clay Ultisol and the other with the sandy clay loam Ultisol. The results showed that the equipment is sensitive to changes in water content in soils, allowing the water tension to be estimated from the standardized reading of the sensor. However, the calibration curves obtained previously produced tension values divergent in relation to both those measured with the tensiometer and those obtained from the CRA. New calibration curves were estimated from the data collected in the validation tests themselves, which highlights the need for further studies, whether for obtaining functional and stable calibration curves, or for the readjustment of constructive aspects of the proposed sensor.

1. INTRODUÇÃO

A água que ocupa o espaço poroso do solo desempenha um papel essencial no ciclo hidrológico global, tendo um impacto importante no clima e nos fluxos de energia na superfície terrestre (Abellana et al., 2018). A compreensão desse papel passa por entender as relações hídricas do solo, em processos como infiltração, retenção e redistribuição de água no perfil do solo. Nesse contexto, as principais medidas a serem feitas são a umidade e a tensão da água no solo. Essas variáveis, sendo reflexo da quantidade e da condição energética da água, são importantes para entender inúmeros processos complexos de transferência de matéria e energia entre os diversos componentes do ecossistema terrestre (Abellana et al., 2018).

Uma ampla variedade de atividades antrópicas baseia-se em estimativas do conteúdo de água do solo e de sua mudança ao longo do tempo. Para que se estabeleça o melhor uso agrícola das terras é importante conhecer a aptidão do solo em reter e liberar água para as plantas, que é caracterizada pelas suas curvas de retenção de água (CRA) e de condutividade hidráulica. A CRA representa a relação gráfica e/ou matemática entre a umidade do solo e a tensão com a qual a água está retida. Desta maneira, a CRA é obtida pela determinação do conteúdo de água no solo em tensões distintas (Jorge et al., 2010).

A umidade pode ser obtida diretamente ou indiretamente. O principal método direto é o gravimétrico, em que extração da água de uma amostra de solo é feita por meio de calor utilizando-se estufas elétricas, determinando-se, assim, a umidade gravimétrica do solo pela relação entre a massa de água e a massa de solo seco (Klein, 2008). Métodos indiretos baseiam-se no uso de equipamentos cuja leitura relaciona-se ao conteúdo de água, como no TDR, na sonda de nêutrons, sensores de dissipação térmica, entre outros (Andrade et al., 1998, Evett, 2007), em que a medição refere-se primariamente outros atributos do solo que, então, se relacionam à umidade. São também exemplos de métodos indiretos os tensiômetros e outros sensores da tensão da água (Diene e Mahler, 2007; Libardi, 2010), que possibilitam estimar a umidade do solo a partir de sua relação com a tensão descrita pela CRA.

A tensão da água no solo é um importante indicador da disponibilidade de água para as plantas (Smajstrla e Harisson, 1998), se prestando, por exemplo, ao manejo da irrigação. Nesse contexto a tensão da água é usada para definir tanto o momento de irrigar, com base em uma tensão crítica para a cultura, quanto a lâmina a ser aplicada, com base na curva de retenção de água (Bernardo et al., 2006; Campos et al., 2008; Libardi, 2010).

Quando a tensão da água no solo é relativamente baixa, atingindo valores de até 85 kPa, sua medição pode ser realizada por meio de tensiômetros de leitura direta, usando manômetro de mercúrio, vacuômetro ou tensímetro de punção. Para se conhecer a tensão da água em uma faixa mais ampla é necessário lançar mão de suas relações com outros atributos do solo, sendo obtida de forma indireta. Isso pode ser feito por meio de psicômetros de termopar, blocos de gesso, sensores de matriz granular, equilíbrio com papel de filtro ou sensores de dissipação de calor (Young e Sisson, 2002; Durner e Or, 2006). O próprio valor da umidade do solo, medido ou estimado por qualquer dos métodos anteriormente descritos, pode ser usado para se conhecer a tensão da água no solo a partir da inversão da CRA (Azevedo et al., 2006).

Com o tempo, o objetivo de medir a tensão de maneira mais fácil, rápida, precisa, abrangendo uma ampla gama de potenciais hídricos do solo, fez com que vários sistemas de leitura fossem introduzidos no mercado. No entanto, cada um desses sistemas alternativos apresenta desvantagens, que reduzem seu uso, dependendo das condições. O alto custo de aquisição e a necessidade de mão de

obra especializada são alguns dos fatores que restringem seu uso no campo, limitando-os à pesquisa (Freire et al., 2018).

Diante do exposto, é de grande relevância a realização de estudos para desenvolver e validar novos equipamentos e técnicas que tornem mais simples, barata e confiável a medição de propriedades físicas do solo, como a tensão da água. O objetivo do presente trabalho foi desenvolver e calibrar um sensor da tensão de água no solo cuja medição baseia-se na dissipação de calor em uma matriz porosa em contato com o solo, dando subsídios para suprir a demanda de possíveis usuários por um produto opcional de baixo custo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Água no solo

O solo está posicionado na superfície da crosta terrestre, sendo cenário de inúmeros processos complexos de transferência de matéria e energia entre os diversos componentes do ecossistema terrestre com os quais se conecta. Como esses processos dinâmicos são regulados pelos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, o mesmo é fator essencial para a sustentabilidade dos ecossistemas (Vinhal-Freitas et al., 2017). Essa essencialidade fica demonstrada quando o solo cumpre o papel ecológico de servir como suporte físico e, ao mesmo tempo, disponibilizar nutrientes e água para o sistema radicular das plantas.

A água do solo é um recurso crítico para a sustentabilidade dos ecossistemas e, portanto, foco de inúmeras pesquisas na área de física do solo (Xing et al., 2017a, 2017b). Uma melhor compreensão das relações hídricas do solo passa por entender aspectos ligados à infiltração, distribuição e retenção de água no perfil do solo. Essa compreensão é essencial tanto para a proteção de áreas sob vegetação nativa (Hasler e Avissar, 2007; Alvarenga et al., 2012) quanto para a intervenção em áreas sob uso agropecuário. Neste último caso,

serve de base para ações voltadas para o aumento da eficiência de uso da água na agricultura irrigada (García et al., 2014; Sorrenti et al., 2016), bem como para a promoção do desenvolvimento sustentável da agricultura de sequeiro (Oliveira et al., 2009; Moraes et al., 2015).

A água aparece nas fases líquida e de vapor nas diversas partes do sistema solo-planta-atmosfera. A determinação de sua quantidade e estado de energia no solo é imprescindível para a compreensão dos processos dinâmicos que com ela ocorrem (Villa Nova et al., 1996). O movimento da água no solo é um fenômeno relacionado a essa energia, de modo que, sendo conhecidos os níveis de energia em diferentes pontos no solo, pode-se prever a direção do movimento a partir do sinal do gradiente do potencial total. Além disso, o fluxo de água no solo pode ter seu valor estimado pela equação de Darcy, sendo correspondente ao produto da condutividade hidráulica (K) pelo gradiente do potencial total.

2.1.1 Umidade do solo e armazenagem de água

A água ocupa total ou parcialmente o espaço poroso do solo, sendo a quantidade presente normalmente expressa em termos de umidade gravimétrica ou volumétrica. A umidade gravimétrica (U) é o quociente entre a massa de água e a massa de partículas presentes em uma porção de solo, geralmente expressa em $g\ g^{-1}$, $kg\ kg^{-1}$, etc. Por outro lado, a umidade volumétrica (θ) é o quociente entre o volume de água e o volume total de uma porção de solo considerada, geralmente expressa em $cm^3\ cm^{-3}$, $m^3\ m^{-3}$, etc.

Outra maneira bastante usual de se referir à quantidade de água no solo é em termos de sua armazenagem. A armazenagem (h) refere-se ao volume total de água presente em uma camada no solo, por unidade de área. Para sua obtenção multiplica-se a umidade volumétrica pela espessura da camada, assim pode-se expressar h em $L\ m^{-2}$, $m^3\ m^{-2}$, $m^3\ ha^{-1}$, etc. A forma mais comum de apresentar a armazenagem é expressá-la como altura de uma lâmina d'água, em mm, cm ou m. Normalmente a avaliação da armazenagem é feita em uma camada que se estende da superfície até uma profundidade de interesse qualquer, que pode ser a profundidade efetiva do sistema radicular, a profundidade para cálculo do balanço hídrico, a profundidade do lençol freático, etc. Portanto, é comum que a contabilização da armazenagem inclua diversas

subcamadas de solo com umidades distintas, de modo que h pode ser calculada tanto a partir da umidade média no perfil quanto pela soma das armazenagens nas diversas subcamadas.

A umidade do solo tem um papel fundamental na tomada de decisões agrícolas e agropecuárias. A detecção precisa da umidade do solo é essencial para o adequado manejo da irrigação, permitindo garantir a disponibilidade de água para as culturas e evitar o desperdício (Shepherd e McGinn, 2003; Odhiambo e Bomke, 2007). É de grande importância em processos hidrodinâmicos, como infiltração e evapotranspiração, sendo também um fator chave no crescimento das plantas e na dinâmica do ecossistema (Rodriguez-Iturbe e Porporato, 2004; Blume et al., 2009; Teuling et al., 2010; Feng et al., 2012; Corradini, 2014).

Conhecendo as variações de umidade no solo, é possível avaliar a influência das plantas sobre a disponibilidade de água, fazer inferências a respeito da transpiração das plantas, determinar as regiões onde o sistema radicular atua de modo mais efetivo e outros efeitos da vegetação sobre a água do solo (Leite et al., 1999).

2.1.2 Potenciais da água no solo

Um texto muito completo que trata do assunto pode ser encontrado em Libardi (2010). O potencial da água no solo tem seu valor estabelecido em relação a uma condição arbitrária considerada como padrão. Normalmente condições dessa água-padrão são as seguintes: "água livre, de mesma energia interna que a água no solo e em cuja superfície plana, coincidente com a referência gravitacional, atua a pressão atmosférica do local onde a medida é feita" (Libardi, 2010). O potencial total da água no solo é a soma dos diversos componentes de potencial, sendo os mais relevantes usualmente o potencial mátrico, o de pressão e o gravitacional.

O potencial gravitacional depende exclusivamente da localização da água no campo gravitacional da Terra e, de modo mais específico, da distância vertical entre sua posição e o ponto arbitrário estabelecido para a água-padrão. Próximo à superfície da Terra o potencial gravitacional apresenta variação praticamente

constante com a posição vertical, sendo seu valor positivo se estiver acima e negativo se estiver abaixo da posição da água padrão (Libardi, 2010).

O potencial de pressão varia de acordo com a altura da coluna de líquido em relação à superfície plana, livre e sob pressão atmosférica da água. Em um ponto de interesse qualquer abaixo dessa superfície livre a coluna de água exerce uma pressão hidrostática maior que a atmosférica, resultando em uma pressão relativa positiva e sendo o potencial de pressão considerado positivo. Por outro lado, a coluna de água entre a superfície livre e um ponto qualquer acima exercerá uma pressão hidrostática menor que a atmosférica, resultando em uma pressão relativa negativa e sendo o potencial de pressão considerado negativo (Libardi, 2010).

O potencial mátrico é resultado das forças capilares e adsorptivas decorrentes da interação da água com a matriz do solo, a qual torna seu valor negativo, já que para retirar a água do interior do espaço poroso do solo e trazê-la para a condição padrão, livre do contato com o solo, há demanda de energia. À medida que os filmes de água ao redor das partículas e agregados se tornam mais finos e desconectados, e também à medida que a curvatura dos meniscos de água nos poros capilares aumenta, o potencial mátrico diminui, tornando-se cada vez mais negativo. Tratando o potencial mátrico em termos de tensão, cujo conceito é equivalente, porém com sinal é inverso, os valores são crescentes com o secamento do solo (Libardi, 2010).

Nem toda a água existente no solo está livre para as plantas de maneira parecida. À medida que o solo vai secando, mais difícil se torna à planta extrair água por meio de suas raízes, pois os filmes de água ficam fortemente retidos pelos sólidos do solo. No entanto, a elevação do teor de água no solo, com a tensão se aproximando de zero, não garante um bom desenvolvimento das plantas (Sousa et al., 2014), uma vez que o excesso de água pode prejudicar a oxigenação da zona radicular e a respiração das raízes.

A tensão da água no solo é um importante fator de disponibilidade hídrica para as plantas, sendo, para solos não salinos, o principal definidor da condição energética da água (Smajstrla e Pitts, 1997). Segundo Allen et al. (1998) e Evett (2007), a quantidade de água extraída do solo pelas raízes da planta é influenciada menos pelo teor de água do que pela tensão de água no solo e, mais ainda, pela condutividade hidráulica. Quanto maior a força de retenção da água

no solo, menor será a diferença de potencial total entre a água no solo e a da atmosfera, dificultando que a planta mantenha o grau de hidratação necessário para suas necessidades metabólicas. Assim, medidas de tensão da água podem ser usadas para analisar indiretamente a deficiência hídrica das plantas, pois a taxa de transpiração é controlada, dentro de certos limites, pelo próprio solo (Heermann et al., 1990; Silva et al., 1999). O potencial mátrico também está intimamente relacionado à condutividade hidráulica do solo (Rekika et al., 2014), uma vez que esta variável regula a dinâmica da água e, assim, o tempo com que ocorrem as alterações de tensão. O potencial mátrico depende, ainda, de vários outros fatores inter-relacionados, incluindo tamanho das partículas, distribuição de tamanho de poro, qualidade e quantidade de matéria orgânica do solo (Andersson e Wiklert, 1972; Hohmann, 1997; Hillel 2003).

2.1.3 Curva de retenção da água no solo

A relação funcional entre o teor de água no solo, na base peso ou volume, e o potencial mátrico é chamada de curva de retenção de água no solo (CRA). A CRA é fundamental como parâmetro para balizar práticas de manejo de solo e água, na busca por uma produção agropecuária eficiente e sustentável (Shwetha e Varija, 2015).

Geralmente as tensões empregadas para determinação da CRA são escolhidas de forma arbitrária (Silva et al., 2006). Assim, a variabilidade metodológica usada para medir a CRA é grande. Segundo Silva et al. (2006), normalmente são utilizados de seis a oito pontos de tensão na definição da CRA, conforme o modelo matemático adotado. Como não há uma uniformização dos valores de tensão a serem usados, Silva et al. (2006) recomendam que a CRA seja definida com o maior número possível de tensões.

As câmaras de Richards e funis de Haines são alguns dos instrumentos mais utilizados para determinar a curva de retenção de água do solo em laboratório. Ao usar esses instrumentos com placa porosa, a curva de retenção pode ser afetada por fatores como histerese, temperatura, condutância hidráulica do material poroso, contato de saturação da amostra entre a amostra e placa porosa, e a detecção correta do ponto de equilíbrio da água no instrumento em

cada tensão selecionada (Klute, 1986; Moraes et al., 1993; Munoz-Carpena et al., 2002; Abbasi et al., 2012; Solone et al., 2012).

Além do equilíbrio de amostras de solo em placas porosas sob sucção ou pressão, outros métodos também podem ser utilizados para a obtenção da curva de retenção. Como exemplo pode-se citar o procedimento proposto por Naime et al. (2004), baseado no método de Arya e Paris (1981). Nesse caso a curva de retenção é obtida por meio do software Qualisolo, que utiliza como base a distribuição do tamanho das partículas (DTP) resultante do analisador granulométrico, desenvolvido e produzido na Embrapa Instrumentação Agropecuária (Vaz et al., 1999; Naime et al., 2001).

Há também o método da centrifuga, em que uma amostra de solo saturada é submetida à centrifugação em rotações crescentes anteriormente escolhidas e que estão associadas a potenciais mátricos cada vez mais negativos. Possui a vantagem da rapidez na obtenção da curva característica de retenção, além de envolver uma única saturação, diminuindo os efeitos da histerese (Silva, 1980). Como desvantagem, há a presença de grumos, que complicam e podem limitar o fatiamento e a compactação da amostra (Freitas Junior e Silva, 1984).

Outro método é o da modelagem inversa, proposto por Wind (1969). Esse método é baseado em um processo iterativo que relaciona teor de água ou potencial mátrico com o total de massa de água evaporada pela superfície da amostra. A massa de água evaporada fornece a quantidade total perdida por evaporação, apenas pela superfície da amostra. Essas medições são periódicas e são combinadas por um processo iterativo para resultar na curva de retenção e na condutividade hidráulica (Halbertsma e Veerman, 1994).

De uma forma idealizada, a curva característica de retenção de água (CRA) representa uma curva de liberação de água que, para um solo rígido (um solo que não encolhe), pode ser dividida em três regiões. À medida que o potencial mátrico se torna mais negativo, inicialmente nenhuma água é drenada, sendo considerada "tensão saturada". Na sequência, ultrapassado o potencial mátrico crítico denominado "potencial de entrada de ar", parte da água sofre drenagem e a amostra de solo atinge uma umidade de equilíbrio, cujo valor é tanto menor quanto mais negativo for o potencial a que estiver submetida. Em potenciais mátricos muito baixos, os meniscos da água se rompem, o filme de

água recobrando as partículas se desconectam e o solo é considerado estar com o conteúdo de água residual (Whalley et al., 2012). Em solos agrícolas, a característica de liberação de água é altamente não linear e usualmente ajustada à “função van Genuchten” (van Genuchten, 1980). Essa função em particular é popular porque parâmetros ajustados podem ser usados para estimar a condutividade relativa do solo não saturado. A função de van Genuchten também foi modificada para permitir que a natureza histerética da curva de liberação de água seja descrita (Kool e Parker, 1987).

A curva de retenção se tornou um dos principais instrumentos na física do solo para entender como a água se move e é retida no solo (Ghanbarian et al., 2015). A partir dessa curva, informações importantes, como a distribuição do tamanho dos poros do solo e a modelagem do meio poroso para a predição da condutividade hidráulica do solo não saturado, podem ser obtidas (Burdine, 1953; Mualem, 1976; van Genuchten, 1980; Hunt et al., 2013; Ghanbarian et al., 2015). Entretanto, a curva de retenção pode ser afetada por características específicas do solo, como a mineralogia da fração argila, a natureza e teor da matéria orgânica, a forma e disposição das partículas do solo, ou a composição e concentração de solutos na solução do solo, entre outros (Grohmann e Medina, 1962; Beutler et al., 2002).

2.1.4 Disponibilidade de água para as plantas

Nos sistemas agrícolas, a água é essencial ao crescimento e desenvolvimento das plantas, regulando os demais fatores físicos do solo, que influenciam diretamente o crescimento e a produtividade das culturas (Letey, 1985). A disponibilidade de água às culturas varia de acordo com as características do solo, condições climáticas e necessidade da planta. Além disso, o aumento ou a redução da disponibilidade hídrica estão muito relacionados com o manejo dado ao solo (Michelon et al., 2007).

Os atributos hídricos do solo, como todos os demais, são determinados tanto pelas características (tamanho, forma, natureza) das partículas que compõem sua matriz e pelo arranjo espacial dessas partículas (ou seja, pela estrutura). A estrutura do solo influencia diretamente a disponibilidade de água para as culturas, uma vez que a disposição das partículas no solo determina

a distribuição dos diâmetros dos poros (Klein e Libardi, 2000), e esta determina a configuração das curvas de retenção de água (CRA) e de condutividade hidráulica.

A água é mantida entre as partículas do solo em diferentes tensões (ou sucções), dependendo da textura e estrutura do mesmo. Quanto à capacidade de um solo atender a demanda hídrica das plantas, Veihmeyer e Hendrickson (1931) propuseram o conceito de água disponível (AD), correspondente ao teor de água entre uma condição hídrica denominada capacidade de campo (CC) e outra denominada ponto de murcha permanente (PMP). A CC é condição que um solo inicialmente saturado atinge após drenagem livre da água (ação da gravidade) por uns poucos dias, tempo suficiente para que a variação de umidade torne-se desprezível. Enquanto os conteúdos de água associados à CC são extremamente distintos entre solos, os valores de potencial mátrico (ou tensão) correspondentes não apresentam variação tão expressiva. Desse modo, ao longo do tempo, buscando simplificar e padronizar sua determinação, valores específicos de tensão da água (33, 10 ou 6 kPa) foram sugeridos como correspondentes à CC. Por outro lado, o PMP é a condição hídrica do solo na qual a água do solo não é mais extraível pelas raízes das plantas. Também por simplificação e padronização conceitual e metodológica, um valor específico de tensão (1500 kPa) foi historicamente assumido como correspondente ao PMP (Assouline e Or, 2014).

O conceito de capacidade de água disponível (CAD) é decorrente do conceito de AD, correspondendo à quantidade de água disponível às plantas no solo em uma camada de interesse, por unidade de área. Refere-se, portanto, da armazenagem de água disponível no solo. A camada é geralmente a “zona radicular”, que se estende da superfície até a profundidade efetiva do sistema radicular, que contém 80% do total das raízes das plantas. O valor da CAD pode ser expresso em volume de água por unidade de área ou, mais comumente, em termos de lâmina d’água. Assim, a CAD indica a capacidade de um solo para armazenar e liberar água disponível para as raízes (Reichardt, 1988; Carlesso, 1995; Jong van Lier, 2000). Esse conceito tem reconhecida importância prática para o balanço hídrico das culturas, definição de épocas de plantio e, em particular, dimensionamento de projetos de irrigação, o que faz da CAD um parâmetro de grande importância no planejamento do uso da terra. A CAD pode ser entendida como uma propriedade do solo que indica a duração e a

intensidade do déficit hídrico, com a vantagem de depender principalmente da taxa de uso da água e das propriedades físicas do solo (Ritchie et al., 1972; Carlesso, 1995).

Comparativamente a solos com estrutura mais porosa e/ou textura arenosa, solos com estrutura mais compacta e/ou partículas mais finas geralmente retêm mais água tanto na CC quanto no PMP. Isso faz com que não necessariamente haja diferenças entre esses solos quanto ao conteúdo de água disponível às plantas (Rawls et al., 1982; Gaiser et al., 2000; Al Majou et al., 2008; Reichert et al., 2009).

2.2 Medições da água no solo

Para que se tire o melhor proveito das relações que os diversos atributos hídricos do solo têm entre si, com outros atributos do solo e mesmo com o desempenho produtivo desse solo, torna-se inicialmente necessário que esses atributos hídricos sejam adequadamente medidos ou estimados.

2.2.1 *Medição da umidade do solo*

A umidade do solo pode ser determinada por diferentes métodos e equipamentos, desde os mais práticos e simples até os mais sofisticados instrumentos e sensores eletrônicos (Campbell e Mulla, 1990; Phene et al., 1992; Evett, 2007).

Entre os métodos mais baratos e simples de medição da umidade do solo estão os métodos gravimétrico e o das pesagens (Bernardo et al., 2006; Marouelli e Guimarães, 2006). O método gravimétrico direto é o mais clássico e o mais utilizado na determinação do teor de água do solo, pois é referência para comparação e calibração de todos os outros métodos indiretos. Não necessita de equipamentos sofisticados e nem de adição de produtos químicos. As amostras são retiradas em vários locais e profundidades no campo. As mesmas são pesadas e levadas à estufa e mantidas até atingirem peso constante (Couto e Sans, 2002). Sua desvantagem é fornecer o resultado da umidade do solo somente 24 horas após a sua amostragem.

O método das pesagens se fundamenta na saturação da amostra de solo. É um método fácil onde, após obtenção da densidade de partículas do solo, precisa apenas de balança de precisão, sendo, portanto, acessível e, para fins práticos apresenta boa exatidão (Klar, 1984). A vantagem deste método é a sua rapidez para a determinação a campo em relação aos demais métodos, pois dá a resposta logo após a retirada da amostra. A limitação do método é que há necessidade que seja calibrado para cada tipo de solo e profundidade de trabalho (Bernardo et al., 2006).

Dentre os instrumentos e sensores eletrônicos para medir o teor de água no solo, podemos destacar a reflectometria com domínio do tempo (TDR), a reflectometria no domínio da frequência (FDR), a sonda de nêutrons e sensores de dissipação de calor, entre outros. O TDR é um dos métodos mais eficientes de determinação da umidade do solo, pois não necessita calibração para a maioria dos solos, é altamente sensível às mudanças do teor de água do solo e permite a coleta automática dos dados. A umidade do solo é estimada a partir da medição direta da constante dielétrica do solo, que se altera com a quantidade de água. Tem a desvantagem de apresentar um custo relativamente elevado, o que tem impossibilitado sua utilização para manejo em áreas de produção comercial (Andrade et al., 1998).

Os sensores FDR são classificados como sensores capacitivos. Os sensores capacitivos utilizam distintos tipos de osciladores eletrônicos, que produzem uma frequência de onda ressonante capaz de detectar variações nas propriedades dielétricas e, por consequência, no conteúdo de água no solo (Evet, 2007; Andrade et al., 2008). A maioria desses sensores opera em baixas frequências, de até 100 MHz, podendo, assim, detectar a água retida nas partículas finas do solo. Apresentam, como desvantagens, que os sistemas que operam em frequências mais baixas são mais suscetíveis a erros, decorrentes da salinidade do solo. Outro fator limitante na utilização desses tipos de sensores é que são necessárias calibrações em diferentes locais, procedimento que é oneroso e demorado (Murphy, 1996).

Outra técnica que pode ser utilizada para a determinação da umidade do solo é a sonda de nêutrons. A medida de umidade do solo pela sonda de nêutrons baseia-se no fato de que ela detecta o aumento na contagem de nêutrons termalizados (lentos) produzidos pela interação dos nêutrons rápidos com os

núcleos de hidrogênio da água do solo. Existe uma correlação direta entre a quantidade de nêutrons termalizados detectados e o teor de água do solo, que é expressa por uma equação, obtida por meio da calibração da sonda para cada tipo de solo (Falleiros, 1994). A maior limitação ao uso desse equipamento, entretanto, está no fato de usar uma fonte radiotiva de nêutrons rápidos, o que requer cuidados especiais para manuseio, guarda e manutenção (Andrade et al., 2008).

Sensores térmicos de umidade têm como base de funcionamento o fato de que pequenas variações no conteúdo de água no solo levam a alterações expressivas em suas propriedades térmicas. Essa relação é consequência do ar ocupar maior porção da porosidade do solo quando a umidade diminui e menor porção quando a umidade aumenta. Como o calor específico volumétrico da água é muito maior que o do ar do solo, as variações da capacidade térmica do meio podem ser usadas para a estimativa da umidade do solo. O calor específico da água também é maior que o das partículas do solo, mas isso somente interferiria na capacidade térmica do meio se houvesse alteração na condição de compactação do solo.

Reece (1996) estudou um sensor de umidade, baseado no método térmico, que utiliza dentro de um bloco de gesso um fio de aquecimento e um par termoelétrico. O aumento de temperatura medida com o tempo, causado pela a passagem de corrente elétrica pelo fio, possibilita estimar o teor de água no solo com o auxílio de curvas de calibração. Phene et al. (1971) propuseram um sensor baseado na transmissão de calor em um meio poroso utilizando um diodo de junção envolvido por uma bobina de aquecimento, ambos colocados dentro de um bloco de gesso. As medidas de tensão elétrica no diodo correspondem às variações de temperatura no centro do sensor. Essas medidas são realizadas antes e após o aquecimento da bobina. A calibração do sensor é efetuada relacionando as variações da diferença de temperatura com as tensões de água no solo.

2.2.2 Medição da tensão de água no solo

Diversos equipamentos têm sido criados para medir a tensão de água no solo. Dentre outras aplicações, medidas de tensão da água no perfil do solo são

utilizados para fins de manejo de água por agricultores, permitindo estimar o momento e a quantidade de água a ser aplicada por irrigação.

O tensiômetro é o equipamento historicamente mais utilizado para medir a tensão de água no solo (Evelt, 2007; Heermann et al., 1990; Sanders, 1997). O tensiômetro consiste em uma cápsula porosa, normalmente feita de cerâmica, tendo finos poros, que é ligada, por meio de um tubo, a um medidor de vácuo. O tensiômetro, com sua cápsula porosa previamente saturada com água, é inserido no solo, preenchido com água e isolado do contato direto com o ar atmosférico. Desse modo, o equilíbrio entre o potencial da água no equipamento e no solo se dá por meio da cápsula porosa em contato com o solo. Para isso, sendo o potencial da água no solo não saturado inicialmente inferior ao potencial da água dentro do tensiômetro, ocorre o fluxo da água do tensiômetro para o solo através da cápsula porosa saturada, ocasionando em aumento da tensão da água dentro do tensiômetro, medida pelo vacuômetro (Andrade et al., 2008). Embora a técnica tensiométrica seja simples, relativamente fácil de usar, e sua faixa de medição seja adequada para a maioria das aplicações agronômicas (Young e Sisson, 2002), não cobre toda a faixa de interesse e é inadequada para algumas aplicações em que a água do solo limita o crescimento das plantas (Durner e Or, 2006). Além disso, uma desvantagem importante é a exigência de manutenção contínua, devido à cavitação da água quando o solo seca para tensões máximas da ordem de 85 kPa ou quando o ar flui através do corpo poroso (Durner e Or, 2006; van der Ploeg et al., 2010). Tanto o ar que entra nos tensiômetros quanto a cavitação são claramente visíveis nos dados, pois resultam em um aumento repentino e rápido no potencial mátrico. Se esse aumento ocorre e não está associado à chuva ou irrigação, indica um mau funcionamento dos tensiômetros (Van Iersel et al., 2013).

A fim de estender a faixa de operação de tensiômetros para valores mais baixos de potencial mátrico, alguns tensiômetros alternativos foram criados, a maior parte deles se utiliza das relações entre tensão da água e outros atributos do solo. Exemplo disso é o tensiômetro a gás, onde o mesmo mede tensões da água no solo, mesmo que estas tensões excedem o limite de operação de um tensiômetro comum (Calbo e Silva, 2006; Calbo et al., 2008). No tensiômetro a gás, a faixa linear de leitura de tensões de água vai de zero até uma tensão crítica, ou pressão de borbulhamento, que depende da cápsula porosa usada

como sensor. Diferente do tensiômetro comum, o tensiômetro a gás não precisa de adição de água nem saturação da cápsula porosa, pois sua cavidade trabalha cheia de ar (Calbo e Silva, 2006). Ele opera com ar comprimido, na cavidade de sua cápsula porosa. A medição da tensão da água é feita comprimindo-se o ar até que este comece a permear a cápsula porosa, nas medições em dessorção ou em secagem. Alternativamente a medição é feita diminuindo a pressão até que a penetração do gás através do meio poroso cesse, o que é denominado medição em sorção ou umidificação. A faixa de trabalho, a estabilidade da resposta e a pouca necessidade de manutenção deste sistema são as suas principais vantagens (Calbo e Silva, 2005).

Outro método também bastante utilizado são os blocos de resistência elétrica, que relacionam o potencial mátrico da água no solo com a resistência ao fluxo da corrente elétrica entre dois eletrodos colocados no corpo do bloco poroso em equilíbrio com o solo. O bloco possibilita a entrada e saída de água do sensor, à medida que o solo umedece ou seca, sendo controlada pela tensão de água no solo. Assim, quanto menor a tensão de água no solo, mais úmido estará o sensor e com mais facilidade a corrente elétrica fluirá entre os eletrodos dentro do sensor. A vantagem dos blocos de resistência elétrica é que modelos mais simplificados podem ser construídos localmente, a leitura pode ser automatizada com a utilização de computador ou do coletor de dados e podem ser empregados para automatizar sistemas de irrigação. No entanto, eles necessitam de calibração, podendo apresentar grande variação entre blocos, sofrer efeito da temperatura e da concentração da solução do solo e desgastarem com o uso, além de serem menos precisos na faixa de potencial elevado, ou seja, solo úmido (Andrade et al., 1998).

Um sensor comercial para medição do potencial mátrico cujo princípio de funcionamento se baseia no acima descrito para os blocos de resistência elétrica é o sensor WaterMarker. Segundo o fabricante (Irrrometer, 1979), o WaterMark é um dispositivo de detecção de circuito integrado da resistência elétrica que consiste em um par de eletrodos altamente resistentes à corrosão que são colocados dentro de uma matriz granular. O WaterMark é projetado para ser um sensor permanente colocado no solo, para ser monitorado e “lido” com frequência. Um ponto negativo desse tipo de sensor é que o teor de sais na solução que ocupa os poros do solo e também da matriz granular do sensor afeta

fortemente a condutividade elétrica e, portanto, sua leitura. Para a superação desse problema a matriz granular do sensor é acrescida de gipsita, a qual seria capaz de tamponar variações de condutividade elétrica no entorno dos eletrodos e deixar a leitura do sensor protegida do efeito das variações nos níveis da salinidade do solo encontrados normalmente em cultivos agrícolas irrigados. Péries e Enciso (2009), estudando a interpretação das leituras de sensores Watermark em solos específicos, observaram que estes sensores podem ser afetados pela circulação de ar nas rachaduras de solos expansíveis ou pelas interações com as raízes, conduzindo a erros na determinação da tensão de água no solo, devido ao mau contato entre o sensor e o solo.

2.3 Sensores de dissipação térmica

Os sensores de dissipação térmica são instrumentos de baixo custo e com princípio de funcionamento relativamente simples (Pinto Jr et al., 2013). Eles consistem em um bloco de cerâmica poroso contendo um sensor de temperatura e um aquecedor. As medições de condutividade térmica são realizadas medindo a dissipação de calor dentro do bloco poroso. Uma quantidade controlada de calor é gerada pelo aquecedor no centro do bloco, sendo uma parte do calor gerado dissipado por todo o bloco. A dissipação de calor é controlada pela presença de água dentro do bloco poroso, uma vez que as propriedades térmicas do sensor, como condutividade e difusividade térmica e calor específico, estão diretamente relacionadas a mudanças no teor de água do bloco (Fredlund, 1992).

Em trabalhos antigos como o de DeJager e Charles-Edward (1969) já se demonstrava que o princípio de dissipação de calor em um meio poroso pode ser usado como um índice da quantidade de água presente no solo. Shaw e Baver (1939) desenvolveram um dispositivo que consiste em um sensor de temperatura e aquecimento que podem ser instalados diretamente no solo para medições de condutividade térmica. No entanto, diferentes solos exigiriam diferentes calibrações para correlacionar as medições de condutividade térmica com o conteúdo de água do solo. Então, Johnston (1942) sugeriu que o sensor de condutividade térmica fosse inserido em um meio poroso, pois isso resultaria em uma curva de calibração padrão e, assim, o material poroso poderia ser colocado em equilíbrio com o solo em consideração.

Bloodworth e Page (1957) estudaram três pedras para uso como material poroso para os sensores de condutividade térmica. Gesso, argila queimada e castone (um pó de pedra disponível comercialmente) foram utilizados no estudo, sendo o castone considerado o melhor material poroso.

Um sensor que é fabricado e comercializado por Campbell Scientific, Inc. foi analisado por Reece (1996). O sensor consiste em uma junção de fios termopar e um fio de resistência elétrica, ambos inseridos em uma agulha hipodérmica que é embutida em uma matriz de cerâmica porosa. O sensor opera passando uma corrente elétrica pelo fio do aquecedor e medindo o aumento da temperatura do termopar com o tempo. A taxa de dissipação de calor através da cerâmica da agulha depende da condutividade térmica da cerâmica, que mudará com o conteúdo de água. Quando colocado em contato com o solo, o sensor deverá entrar em equilíbrio hidráulico e atingir o mesmo potencial hídrico do solo. Assumindo uma curva única de retenção de água para a cerâmica, para uma corrente elétrica e tempo de aquecimento específicos o aumento de temperatura do sensor pode ser calibrado em relação a potenciais matriciais de solo conhecidos.

2.4 Desenvolvimento de sensores e de sistemas de aquisição de dados

“Sensores” podem ser definidos como elementos provedores de informações para os sistemas de automação. Um sensor é um transdutor que altera sua característica física interna devido a um fenômeno físico externo (Rosário, 2005). As características desejáveis para um sensor incluem aspectos como: precisão, sensibilidade, eficiência e, muitas vezes, baixo custo (Pereira e Moura Neto, 2007). A utilização de sensores para acessar variáveis de interesse traz como vantagens a rapidez na manipulação e no acesso à informação; redução do esforço humano; disponibilização da informação no tempo necessário; controle integrado de informações distribuídas fisicamente; redução de redundância e de inconsistência de informações; compartilhamento de dados (Navathe e Elmasri, 2004).

O termo “aquisição de dados” refere-se ao acesso e registro dos valores de variáveis ou parâmetros em um processo de interesse, obtidos a partir da aplicação de uma ferramenta de medição (Garcia et al., 2003). A automatização

da aquisição de dados tem como principais vantagens a rapidez e confiabilidade na aquisição dos dados, contribuindo para uma rápida tomada de decisões (Dally et al., 1993).

Sistemas automáticos de aquisição de dados são geralmente constituídos de dispositivos eletrônicos agrupados em uma placa ou plataforma de tal modo que atuem para monitorar e registrar variáveis associadas a um fenômeno ou processo. A maior parte desses sistemas são desenvolvidos usando plataformas comerciais já disponíveis no mercado, sendo a plataforma Arduino uma das mais versáteis para este fim (McRoberts, 2011). A plataforma Arduino é uma plataforma física computacional tipo código aberto baseada em uma placa de microcontrolador simples, e um ambiente de desenvolvimento para escrever programas para a placa de controle. Pode ser utilizado para desenvolver objetos interativos, tendo entradas a partir de uma variedade de sensores ou interruptores, e controle de uma variedade de luzes, motores e outras saídas físicas (Arduino, 2021).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho constou do desenvolvimento e avaliação de um sensor de tensão de água no solo cuja medição baseia-se na dissipação de calor em uma matriz cerâmica porosa. O trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) e no Laboratório de Solos (LSOL), localizados no Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), em Campos dos Goytacazes, RJ.

O trabalho apresentou diversas etapas que a seguir serão descritas em detalhes, quais sejam: (i) coleta e caracterização dos solos utilizados no trabalho; (ii) obtenção e caracterização do material cerâmico com o qual os sensores foram confeccionados; (iii) confecção dos sensores de tensão da água; (iv) configuração do sistema para geração de sinal e coleta de dados usando a plataforma Arduino; (v) testes de funcionamento e calibração dos sensores; e (vi) ensaios para validação do uso dos sensores em solo.

3.1 Coleta e caracterização dos solos

Para dar suporte ao desenvolvimento do presente trabalho, em fevereiro de 2020 foi feita a coleta de material constitutivo dos horizontes superficial (A) e subsuperficial (B) de três solos do município de Campos dos Goytacazes-RJ, sendo o solo 1 um Argissolo Vermelho (PV, coletado no km 85, BR 101), o solo 2 um Cambissolo Háplico (CX, coletado na UAP-Vegetal da UENF) e o solo 3 um Argissolo Amarelo (PA, coletado no distrito de Travessão).

As amostras coletadas foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas ao LSOL/CCTA para preparo e posteriores análises. As amostras foram secas ao ar e passadas em peneiras de malha com abertura de 2 mm, obtendo-se a “terra fina seca ao ar” (TFSA) que foi caracterizada quanto aos atributos físicos descritos nos tópicos subsequentes.

3.1.1 Composição granulométrica

As análises granulométricas foram feitas com base em Teixeira et al. (2017), com modificações. Foi realizada a dispersão de 20 g de solo (TFSA) em 200 mL de água + 20 mL de NaOH (1 mol L^{-1}), com agitação por 16 horas a 120 ciclos por minuto em agitador horizontal. A fração areia foi obtida passando-se a suspensão por peneira com malha de 53 μm de abertura, sendo o material retido transferido para placa de Petri e pesado após secagem em estufa ($105 \text{ }^\circ\text{C}$) por 48 h, com o teor (%) sendo calculado em relação à massa de terra fina seca em estufa (TFSE) utilizada na análise. A suspensão que passou pela peneira, contendo argila + silte, foi recolhida em provetas de 1 L, completando-se o volume com água. A fração argila foi determinada pelo método da pipeta, coletando-se, a 5 cm de profundidade, após sedimentação do silte (cujo tempo foi calculado pela lei de Stokes), uma alíquota da suspensão (50 mL), que foi então também seca em estufa ($105 \text{ }^\circ\text{C}$) e pesada. O cálculo do teor de argila (%) em relação à TFSE foi feito considerando a fração da suspensão coletada por pipetagem, após desconto do peso obtido na prova em branco. O teor de silte foi obtido pela diferença entre a amostra utilizada (TFSE) e a soma das frações areia e argila.

3.1.2 Densidade de partículas

A densidade de partículas foi obtida pelo método do picnômetro, com base em Teixeira et al. (2017), com quatro repetições. Os seis picnômetros utilizados para a determinação foram previamente pesados estando vazios (P_1) e preenchidos com água deionizada e desaerada (P_2). Posteriormente, aos picnômetros vazios foram adicionadas massas conhecidas dos solos secos em estufa (M_{tfse} , de 2 a 3 g), sendo anotados os respectivos pesos (P_3). A seguir acrescentou-se água deionizada até quase completar o volume dos picnômetros e, então, agitou-se manualmente para deixar as amostras em suspensão e facilitar a eliminação do ar (Figura 1). Para desaerar a água e expulsar o ar remanescente entre as partículas do solo, os picnômetros foram colocados sob vácuo em um dessecador conectado a uma bomba de vácuo. Após o processo de retirada do ar, completou-se o volume dos picnômetros com água, colocou-se a respectiva tampa e pesou-se novamente (P_4). Para cada amostra, o volume das partículas (V_p) foi obtido pela equação:

$$V_p = [(P_2 - P_1) - (P_4 - P_3)] / D_a \quad (1)$$

onde:

V_p = volume das partículas, cm^3 ;

P_1 = massa do picnômetro, g;

P_2 = massa do picnômetro preenchido com água, g;

P_3 = massa do picnômetro com a amostra de solo seco em estufa, g;

P_4 = massa do picnômetro com o solo e preenchido com água, g;

D_a = densidade da água, g cm^{-3} .

A densidade de partículas (D_p) foi então obtida pela seguinte equação:

$$D_p = M_{tfse} / V_p \quad (2)$$

onde:

D_p = densidade das partículas, g cm^{-3} (ou Mg m^{-3});

M_{tfse} = massa de solo seco em estufa, g.

V_p = volume das partículas, cm^3 ;

3.1.3 Densidade do solo

A densidade do solo foi obtida em amostras com estrutura reconstituída em anéis com dimensões de 53 mm de altura; 49 mm de diâmetro interno e, portanto, com volume do anel (V_{anel}) de 100 cm³. Para cada material de solo foram preparadas 20 amostras, sendo que 10 continham apenas solo e 10 tinham a presença de um bloco cerâmico inserido no solo (vide item 3.2.3). A determinação foi feita após as amostras terem sido utilizados para a confecção da curva de retenção de água no solo (vide item 3.1.5). Procedeu-se conforme descrito em Teixeira et al. (2017), sendo as amostras secas em estufa a 105 °C por um período de 48 h, obtendo-se, por gravimetria, a massa das partículas que as compunham, e, então, sendo a densidade do solo (D_s) calculada por:

$$D_s = m_p/V \quad (3)$$

onde:

D_s = densidade do solo, g cm⁻³ (ou Mg m⁻³);

m_p = massa das partículas, g;

V = volume da amostra, cm³.

No caso geral tem-se que $V = V_{anel}$, mas para amostras que continham bloco cerâmico o volume do mesmo (V_b) foi descontado ($V = V_{anel} - V_b$). Ainda com respeito ao volume das amostras, em algumas delas os resultados dos fenômenos de expansão e de contração puderam ser evidenciados, em particular no Cambissolo. Nesses casos, se, após o equilíbrio com a placa porosa, houvesse solo acima da borda do anel, esse excesso de solo era removido para que o volume da amostra ainda fosse equivalente ao informado acima. Se, por outro lado, o solo houvesse sofrido contração e o nível da superfície da amostra estivesse abaixo da borda do anel, o rebaixamento era medido com régua para que o volume da amostra pudesse recalculado.

No presente caso, em que a determinação da densidade do solo foi feita após as amostras terem sido utilizados para a confecção da curva de retenção de água, o valor de D_s obtido vincula-se à umidade e à tensão da água (τ) da

amostra no momento da medição. No presente trabalho a significância dessa dependência foi verificada pela tentativa de ajuste dos dados obtidos à seguinte equação:

$$D_s = a \log \tau + b \quad (4)$$

onde:

D_s = densidade do solo, Mg m^{-3} ;

$\log \tau$ = logaritmo de base 10 da tensão da água;

a e b = coeficientes empíricos de ajuste da equação.

3.1.4 Porosidade total

A porosidade total do solo (P_T) das 20 amostras, sendo 10 repetições sem e 10 com o bloco cerâmico, foi calculada a partir da densidade do solo (D_s) e da densidade das partículas (D_p), por meio da equação:

$$P_T = 1 - D_s/D_p \quad (5)$$

onde:

P_T = porosidade total do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

D_s = densidade do solo, Mg m^{-3} ;

D_p = densidade das partículas, Mg m^{-3} ;

Igualmente ao mencionado para a densidade do solo, os valores de P_T obtidos no presente trabalho também se vinculam à umidade e à tensão da água (τ) da amostra no momento da medição. Assim, similarmente ao descrito para a densidade do solo, a suficiência ou não dos fenômenos de expansão e contração das amostras para tornar significativa essa dependência τ - P_T foi verificada a partir da tentativa de ajuste dos dados à equação:

$$P_T = a \log \tau + b \quad (6)$$

onde:

P_T = porosidade total do solo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

$\log \tau$ = logaritmo de base 10 da tensão da água;

a e b = coeficientes empíricos de ajuste da equação.

3.1.5 Curva de retenção de água

A curva de retenção de água (CRA) dos solos foi determinada a partir das amostras reconstituídas em anéis volumétricos, juntamente com a curva de retenção de água do bloco cerâmico (CRAb). Após serem saturadas por capilaridade por 24 horas, uma das 10 amostras sem bloco cerâmico e uma das 10 com bloco foram colocadas em contato com uma placa porosa sob uma das seguintes tensões (τ): 1, 3, 6 e 10 kPa, em funis de Haines (Figura 1A), e 20, 33, 50, 100, 500 e 1500 kPa, em câmaras de pressão de Richards (Figura 1B), permanecendo até entrarem em equilíbrio (até cessar a drenagem de água). Atingido o equilíbrio, as amostras foram pesadas, levadas à estufa por 48 h e novamente pesadas. Procedimentos específicos para as amostras com o bloco cerâmico inserido são descritos no item 3.2.3. A umidade volumétrica (θ) foi obtida pela equação:

$$\theta = V_a/V = (M_a/D_a)/V \quad (7)$$

onde:

θ = umidade volumétrica, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (ou $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

V_a = volume de água na amostra em equilíbrio no funil ou na câmara de pressão, cm^3 ;

V = volume da amostra, cm^3 ;

D_a = densidade da água, g cm^{-3} ;

M_a = massa de água na amostra, obtida pela diferença entre as pesagens no momento do equilíbrio e após a secagem em estufa, g.

Conforme anteriormente descrito, o volume das amostras foi considerado equivalente ao volume interno do anel, no caso mais geral, ou menor que isso, nos casos específicos em que foi feito o desconto do volume do bloco cerâmico,

presente em metade das amostras, e/ou da eventual contração do material do solo.

O modelo de Van Genuchten (1980) foi ajustado aos resultados obtidos (sendo, para cada material de solo, 10 pares τ - θ para anéis sem bloco cerâmico e 10 pares para anéis com bloco), obtendo-se equações que descrevem a relação entre a umidade volumétrica relativa (Θ) ou efetiva (θ) e a tensão (ou o potencial mátrico, ϕ_m) da água no solo:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha \cdot \phi_m|^n)^m} \quad \therefore \quad \theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha \cdot \phi_m|^n)^m} \quad (8)$$

onde:

Θ = umidade volumétrica relativa, que varia entre 0 (quando $\theta = \theta_r$) e 1 (quando $\theta = \theta_s$), $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

θ = umidade volumétrica, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

ϕ_m = potencial mátrico (sendo $\phi_m = -\tau$), kPa;

θ_s = umidade volumétrica na saturação, que na equação foi assumida como correspondente à porosidade total, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

θ_r = umidade volumétrica residual, que na equação foi substituída por expressão equivalente, apresentada abaixo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

α (kPa^{-1}) e m e n (adimensionais) = parâmetros empíricos do modelo. Na equação m foi considerado dependente de n (expressa por $m = 1 - 1/n$)

A variável θ_r foi substituída pela expressão equivalente:

$$\theta_r = U_r \frac{D_s}{D_a} \quad (9)$$

onde:

θ_r = umidade residual, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

U_r = umidade gravimétrica residual g g^{-1} (ou kg kg^{-1} , ou Mg Mg^{-1});

D_s = densidade do solo, g cm^{-3} ;

D_a = densidade da água, g cm^{-3} .

Para obtenção das equações específicas para cada solo os parâmetros U_r , α e m foram estimados pelo método dos mínimos quadrados com o auxílio do suplemento 'solver' do programa Microsoft Office Excel 2019.

Para o Cambissolo Háplico, foi identificada a ocorrência de valores de umidade expressivamente maiores em tensões mais elevadas do que em tensões mais baixas imediatamente anteriores. Isso sugere que tais amostras não entraram em equilíbrio com a tensão aplicada, o que pode decorrer da eventual perda de contato hidráulico com a placa porosa devido ao fenômeno da contração do volume das amostras. Nesses casos, o ajuste da CRA foi feito após a exclusão dos pares τ - θ em questão, sendo, para o horizonte A, três pares nas amostras sem bloco e um par nas com bloco cerâmico, e, para o horizonte B, um par nas amostras com bloco.

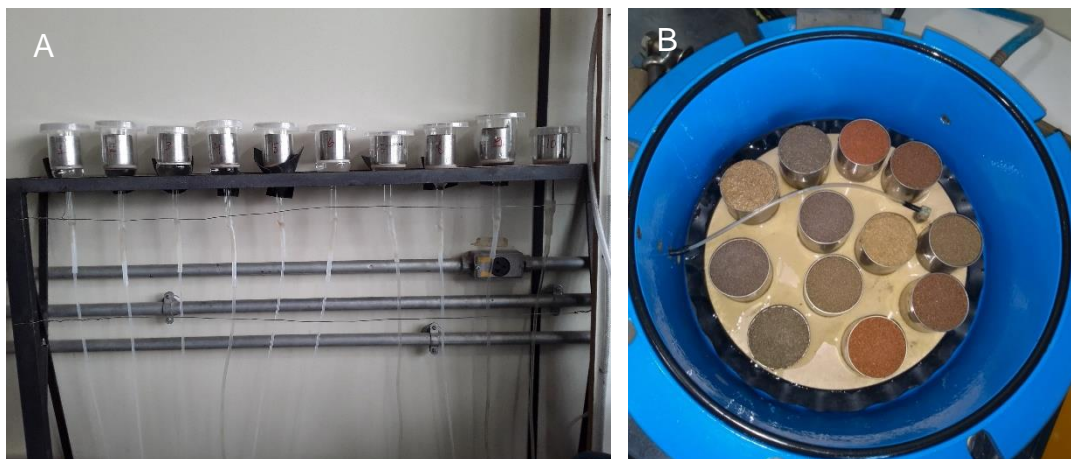


Figura 1. Amostras de solo reconstituídas em anéis volumétricos colocadas em funis de Haines (A) e em câmara de pressão de Richards (B).

3.2 Caracterização do material cerâmico

O sensor foi confeccionado a partir do material cerâmico microporoso de uma vela de filtro comercial, cuja composição é caulim. Foram cortados e moldados 24 blocos cerâmicos de tamanho semelhante, em formato prismático, tendo base com dimensões aproximadas de 9 mm x 11 mm e 40 mm de altura. A caracterização física desses blocos e do pó proveniente do corte e moldagem do material cerâmico foi realizada conforme descrito a seguir.

3.2.1 Densidade da matriz cerâmica

A densidade da matriz cerâmica foi obtida através do método do picnômetro, com seis repetições, com base em Teixeira et al. (2017). A determinação foi similar à anteriormente descrita para a densidade de partículas dos solos, diferindo apenas por se usar, ao invés dos solos, uma massa conhecida do pó cerâmico seco em estufa (M_{pcse} , de 2 a 3 g). Assim, foram realizadas as pesagens individuais dos seis picnômetros para a obtenção dos seguintes pesos: P_1 , referente à massa do picnômetro vazio; P_2 , referente à massa do picnômetro preenchido com água deionizada e desaerada; P_3 , referente à massa do picnômetro com a massa do pó cerâmico; e P_4 , referente à massa do picnômetro com o pó cerâmico e preenchido com água deionizada e desaerada. O volume de pó da matriz cerâmica (V_{pc}) usada em cada repetição foi obtido pela equação:

$$V_{pc} = [(P_2 - P_1) - (P_4 - P_3)] / D_a \quad (10)$$

onde:

V_{pc} = volume de pó da matriz cerâmica, cm^3 ;

P_1 = massa do picnômetro, g;

P_2 = massa do picnômetro preenchido com água, g;

P_3 = massa do picnômetro com amostra do pó cerâmico, g;

P_4 = massa do picnômetro com o pó cerâmico e preenchido com água g;

D_a = densidade da água, g cm^{-3} .

A densidade do pó da matriz cerâmica (D_{mc}) foi então obtida pela seguinte equação:

$$D_{mc} = M_{pcse} / V_{pc} \quad (11)$$

onde:

D_{mc} = densidade do pó da matriz cerâmica, g cm^{-3} (ou Mg m^{-3});

M_{pcse} = massa do pó cerâmico em estufa, g;

V_{pc} = volume de pó da matriz cerâmica, cm^3 .

3.2.2 Variáveis e relações gravimétricas e volumétricas dos blocos

Os 24 blocos cerâmicos utilizados no presente trabalho foram individualmente caracterizados quanto às variáveis gravimétricas e volumétricas, conforme descrito a seguir.

Inicialmente, realizou-se a pesagem dos blocos secos ao ar e após secagem em estufa a 105 °C por 48 horas, obtendo-se, respectivamente, as variáveis M_{bsa} e M_{bse} . A massa de água higroscopicamente retida (M_{ah}) foi obtida por diferença entre as pesagens, e a umidade gravimétrica higroscópica (U_{gh}) pela seguinte equação:

$$U_{gh} = (M_{bsa} - M_{bse}) / M_{bse} = M_{ah} / M_{bse} \quad (12)$$

onde:

U_{gh} = umidade gravimétrica higroscópica, g g⁻¹;

M_{bsa} = massa do bloco seco ao ar, g;

M_{bse} = massa do bloco seco em estufa, g;

M_{ah} = massa de água higroscopicamente retida, g.

Os blocos foram colocados verticalmente em um recipiente plástico, ao qual água foi sendo adicionada ao longo do dia, até atingir altura próxima à dos blocos, para saturá-los por capilaridade. Durante esse processo, para uma saturação mais efetiva, o recipiente com os blocos foi mantido em dessecador sob vácuo, sendo a bomba de vácuo acionada por cerca de um minuto após cada abertura e fechamento do dessecador, onde permaneceram durante uma noite. Após isso, os blocos foram pesados para a obtenção de sua massa estando saturados com água (M_{bsat}). A massa de água retida no bloco saturado (M_{asat}) foi então obtida por diferença entre pesagens, e a umidade gravimétrica na saturação (U_{gsat}) pela seguinte equação:

$$U_{gsat} = (M_{bsat} - M_{bse}) / M_{bse} = M_{asat} / M_{bse} \quad (13)$$

onde:

U_{gsat} = umidade gravimétrica na saturação, g g⁻¹;

M_{bsat} = massa do bloco saturados, g;

M_{bse} = massa do bloco seco em estufa, g;

M_{asat} = massa de água retida no bloco saturado, g.

O volume de cada bloco (V_b) foi obtido mediante sua submersão em água, sendo admitido como equivalente ao volume de água deslocada (V_{ad}). Para maior confiabilidade nos resultados, o V_{ad} foi medido utilizando-se dois procedimentos distintos. O primeiro foi similar ao descrito em Teixeira et al. (2017) para a determinação da densidade do solo pelo método do torrão parafinado. Inicialmente fez-se a pesagem de uma proveta de 50 mL com água até o menisco, obtendo-se $M_{prov+ág}$. Na sequência, com a proveta parcialmente preenchida com água, os blocos foram nela inseridos e o volume de água foi completado até o menisco. O bloco foi retirado e nova pesagem foi feita, agora com a proveta contendo apenas a água remanescente, obtendo-se $M_{prov+ág_rem}$. Assim, pela diferença entre essas pesagens obteve-se a massa de água deslocada (M_{ad1}), e dividindo-se pela densidade da água (D_a) obteve-se o volume de água deslocada (V_{ad1}), equivalente ao volume do bloco (V_{b1}).

$$V_{b1} = V_{ad1} = (M_{prov+ág} - M_{prov+ág_rem}) / D_a = M_{ad1} / D_a \quad (14)$$

onde:

V_{b1} = volume do bloco (resultado do procedimento 1), cm³;

V_{ad1} = volume de água deslocada no procedimento 1, cm³;

$M_{prov+ág}$ = massa da proveta mais água, g;

$M_{prov+ág_rem}$ = massa da proveta com a água remanescente, g;

D_a = densidade da água, g cm⁻³.

M_{ad1} = massa de água deslocada no procedimento 1, g.

Para o segundo procedimento utilizou-se uma balança com um pequeno suporte colocado sobre seu prato, com a leitura zerada, similarmente ao descrito em Embrapa (1997) para a determinação da densidade do solo pelo método do torrão impermeabilizado.

A cada bloco saturado foi amarrada uma linha de náilon, permitindo deixá-los pendurados no referido suporte e fazer sua pesagem tanto livres ao ar e quanto submersos na água de um recipiente colocado sobre uma base imediatamente abaixo do bloco.

Na pesagem livre ao ar a tensão na linha de náilon (que é transmitida ao prato da balança) equivale à força peso do bloco saturado, de modo que a leitura da balança fornece, novamente, a massa do bloco saturado (M_{bsat}). Na pesagem do bloco submerso a tensão na linha de náilon é equivalente à diferença entre a força peso do bloco saturado e a força de empuxo devido ao volume de água deslocado, de modo que a leitura da balança nesta situação ($M_{bsat-exc}$) corresponde à diferença entre M_{bsat} e a massa de água deslocada no procedimento (M_{ad2}).

Assim, novamente pela diferença entre essas pesagens, obteve-se outra estimativa da massa de água deslocada (M_{ad2}) e, dividindo-se pela densidade da água (D_a), do volume de água deslocada (V_{ad2}), equivalente ao volume do bloco (V_{b2}).

$$V_{b2} = V_{ad2} = (M_{bsat} - M_{bsat-exc}) / D_a = M_{ad2} / D_a \quad (15)$$

onde:

V_{b2} = volume do bloco (resultado do procedimento 2), cm^3 ;

V_{ad2} = volume de água deslocada no procedimento 2, cm^3 ;

M_{bsat} = massa do bloco saturado, g;

$M_{bsat-exc}$ = massa do bloco saturado “excedente” à massa da água deslocada, g;

M_{ad2} = massa de água deslocada no procedimento 2, g;

D_a = densidade da água, g cm^{-3} .

O volume de cada bloco (V_b) foi admitido como correspondente à média das duas estimativas do volume acima apresentadas (V_{b1} e V_{b2}). A densidade (D_b) do bloco foi obtida a partir da M_{bse} e do V_b , a partir da equação:

$$D_b = M_{bse} / [(V_{b1} + V_{b2}) / 2] = M_{bse} / V_b \quad (16)$$

onde:

D_b = densidade do bloco, g cm⁻³ (ou Mg m⁻³);

M_{bse} = massa do bloco seco em estufa, g;

V_{b1} = volume do bloco pelo procedimento 1, cm³;

V_{b2} = volume do bloco pelo procedimento 2, cm³;

V_b = volume do bloco (média dos dois procedimentos), cm³.

A porosidade total (P_{Tb}) dos 24 blocos foi obtida a partir da D_{mc} e da densidade de cada bloco (D_b), como segue:

$$P_{Tb} = 1 - D_b/D_{mc} \quad (17)$$

onde:

P_{Tb} = porosidade total do bloco, m³ m⁻³.

D_b = densidade do bloco, Mg m⁻³;

D_{mc} = densidade do pó da matriz cerâmica, Mg m⁻³.

Conhecendo-se a densidade de cada bloco, a umidade volumétrica na saturação (U_{vsat}) foi obtida pela equação:

$$U_{vsat} = U_{gsat} D_b/D_a \quad (18)$$

onde:

U_{vsat} = umidade volumétrica na saturação, cm³ cm⁻³;

U_{gsat} = umidade gravimétrica na saturação, g g⁻¹;

D_b = densidade do bloco, g cm⁻³;

D_a = densidade da água, g cm⁻³.

Para cada bloco pôde-se, ainda, estimar a fração do volume correspondente a poros fisicamente bloqueados (P_{Bb}), por:

$$P_{Bb} = P_{Tb} - U_{vsat} \quad (19)$$

onde:

P_{Bb} = Poros bloqueados, cm³ cm⁻³;

P_{Tb} = porosidade total do bloco, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

U_{vsat} = umidade volumétrica na saturação, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

3.2.3 Curva de retenção de água dos blocos

A curva de retenção de água dos blocos (CRAb) foi determinada concomitantemente à determinação da curva de retenção de água dos solos. Os blocos cerâmicos, devidamente identificados, foram agrupados em quatro conjuntos com seis blocos cada.

Para cada tensão, além dos seis anéis volumétricos preenchidos exclusivamente com o material dos seis solos, outros seis anéis foram preparados com os materiais dos mesmos seis solos e um dos conjuntos de blocos cerâmicos, cada anel tendo um bloco inserido em seu interior (Figura 2). Como a curva de retenção de água dos blocos foi obtida a partir da aplicação de dez tensões, cada conjunto de seis blocos foi usado em duas ou três dessas tensões.



Figura 2. Blocos cerâmicos inseridos nos anéis volumétricos.

Após preparo, as amostras foram saturadas, colocadas em contato com as placas porosas sob uma das dez tensões já mencionadas, onde permaneceram até entrarem em equilíbrio. Atingido o equilíbrio, as amostras foram retiradas dos funis de Haines ou das câmaras de pressão de Richards, sendo feito o ajuste do volume ao anel, caso tenha havido expansão do solo, ou

medição do rebaixamento do nível da superfície da amostra, no caso de contração.

Os blocos foram retirados dos anéis e pesados, obtendo-se, em cada tensão, a massa do bloco em equilíbrio (M_{beq}). A estratégia de embutir os blocos cerâmicos nas amostras visou tanto prevenir a eventual perda de contato hidráulico desses com a placa porosa, principalmente nas maiores tensões, quanto avaliar a qualidade do contato entre os blocos cerâmicos e os solos. Após a retirada dos blocos, as amostras de solo foram também pesadas, tanto ainda estando em equilíbrio com a tensão da placa quanto após secagem em estufa (105 °C) por 48 h.

Os procedimentos para a caracterização física do solo dessas amostras contendo bloco cerâmico estão descritos nos itens 3.1.3 (densidade), 3.1.4 (porosidade total) e 3.1.5 (curva de retenção de água).

Para os blocos cerâmicos, a massa de água retida na condição de equilíbrio (M_{aeq}) com as referidas tensões foi obtida pela diferença entre M_{beq} e M_{bse} . Dividindo-se M_{aeq} pela densidade da água (D_a) obteve-se o volume de água retida da amostra (V_{aeq}) e, então, a umidade volumétrica dos blocos (θ_b) correspondente a cada tensão, pela equação:

$$\theta_b = [(M_{beq} - M_{bse})/D_a] / V_b = (M_{aeq}/D_a) / V_b = V_{aeq} / V_b \quad (20)$$

onde:

θ_b = umidade volumétrica dos blocos, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

M_{beq} = massa do bloco na condição de equilíbrio, g;

M_{bse} = massa do bloco seco em estufa, g;

D_a = densidade da água, g cm^{-3} ;

V_b = volume do bloco (média dos dois valores obtidos, V_{b1} e V_{b2}), cm^3 .

M_{aeq} = massa de água retida na amostra, g;

V_{aeq} = volume de água retida na amostra, cm^3 .

Como resultado do procedimento acima descrito, foram obtidos seis valores de umidade volumétrica dos blocos para cada uma das dez tensões da água (τ) - ou potenciais mátricos (ϕ_m), sendo 10 pares τ - θ_b em cada material de solo e 60 pares no total. Para a representação algébrica desses dados de

retenção de água, também foi utilizado o modelo de Van Genuchten (1980), já apresentado na equação 8, porém em sua forma bimodal (Durner, 1994; Jong van Lier, 2020), que permitiu melhor ajuste, correspondendo à equação a seguir:

$$\Theta_b = \frac{\theta_b - \theta_{br}}{\theta_{bs} - \theta_{br}} = w_1(1 + |\alpha_1 \cdot \phi_m|^{n_1})^{-m_1} + w_2(1 + |\alpha_2 \cdot \phi_m|^{n_2})^{-m_2} \quad \therefore$$

$$\theta_b = \theta_{br} + \frac{\theta_{bs} - \theta_{br}}{w_1(1 + |\alpha_1 \cdot \phi_m|^{n_1})^{m_1} + w_2(1 + |\alpha_2 \cdot \phi_m|^{n_2})^{m_2}} \quad (21)$$

onde:

Θ_b = umidade volumétrica relativa dos blocos, que varia entre 0 (quando $\theta_b = \theta_{br}$) e 1 (quando $\theta_b = \theta_{bs}$), $m^3 m^{-3}$;

θ_b = umidade volumétrica dos blocos, $m^3 m^{-3}$;

ϕ_m = potencial mátrico (sendo $\phi_m = -\tau$), kPa;

θ_{bs} = umidade volumétrica dos blocos na saturação, que na equação foi assumida como correspondente à porosidade total dos blocos, $m^3 m^{-3}$;

θ_{br} = umidade volumétrica residual dos blocos, que na equação foi substituída pela expressão equivalente, $\theta_{br} = U_{br} \times D_b/D_a$, $m^3 m^{-3}$;

U_{br} = umidade gravimétrica residual dos blocos, $g g^{-1}$ (ou $kg kg^{-1}$, ou $Mg Mg^{-1}$);

D_s = densidade dos blocos, $Mg m^{-3}$;

D_a = densidade da água, $Mg m^{-3}$.

w_1 e w_2 = fatores de ponderação cuja somatória é igual a 1, adimensionais;

α_1 e α_2 (kPa^{-1}) e m_1 , m_2 , n_1 e n_2 (adimensionais) = parâmetros empíricos do modelo. Na equação m_1 e m_2 foram considerados dependentes de n_1 e n_2 , respectivamente ($m_1 = 1 - 1/n_1$ e $m_2 = 1 - 1/n_2$).

Para representar a curva de retenção de água dos blocos (CRAb) foram inicialmente ajustadas seis equações específicas, uma para cada um dos seis materiais de solo previamente caracterizados. Esses resultados foram utilizados para subsidiar a avaliação tanto da qualidade da equação obtida quanto da contato hidráulico solo-bloco. Por fim, foi feito o ajuste de uma equação geral usando os dados advindos de todos os solos, a qual foi utilizada para subsidiar a avaliação do funcionamento dos sensores.

Para o ajuste das equações, os valores de U_{br} , w_1 e w_2 e dos parâmetros α_1 , α_2 , n_1 e n_2 foram estimados pelo método dos mínimos quadrados com o auxílio do suplemento 'solver' do programa Microsoft Office Excel 2019.

Para o ajuste das CRAb específicas obtidas nos horizontes A e B do Cambissolo Háplico, foram descartados os pares τ - θ_b provenientes das amostras submetidas à tensão de 500 kPa, que já haviam sido desconsiderados nos ajustes das CRA do solo.

Para o ajuste da CRAb geral foram excluídos, adicionalmente, outros pontos 15 pares τ - θ_b em que os valores de Θ_b foram identificados como *outliers* (diferindo da média três ou mais desvios-padrão).

3.3 Aspectos construtivos e princípio de funcionamento do sensor

Os sensores de tensão de água no solo, cujo princípio de funcionamento baseia-se na dissipação de calor em uma matriz cerâmica porosa, tiveram sua etapa de construção e teste eletrônico realizada no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) da UENF/CCTA. Os sensores foram constituídos por um resistor e um termistor inseridos no interior de uma cápsula porosa obtida de um dos blocos cerâmicos anteriormente caracterizados (Figura 3).

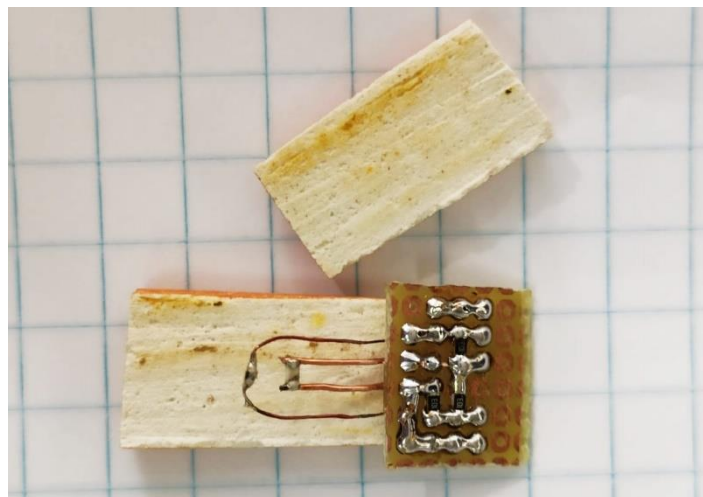


Figura 3. Esquema da construção do sensor (modelo inicial).

Após diversos testes, a configuração do sensor que se mostrou mais promissora foi a que utilizou a metade de um dos blocos cerâmicos anteriormente descritos, tendo dimensões aproximadas de 20 mm de altura e 9 mm x 11 mm

nas outras duas dimensões. Nesse bloco resistor e termistor foram inseridos separadamente em dois furos preenchidos com resina epóxi, com 10 mm de profundidade, próximos ao centro do bloco, afastados 3 mm entre si e paralelos no sentido do maior comprimento do bloco (altura). Foram confeccionados seis sensores, sendo que para a impermeabilização dos componentes foi utilizado esmalte, e a fixação da cápsula porosa à pequena placa eletrônica foi feita com resina epóxi (Figura 4).

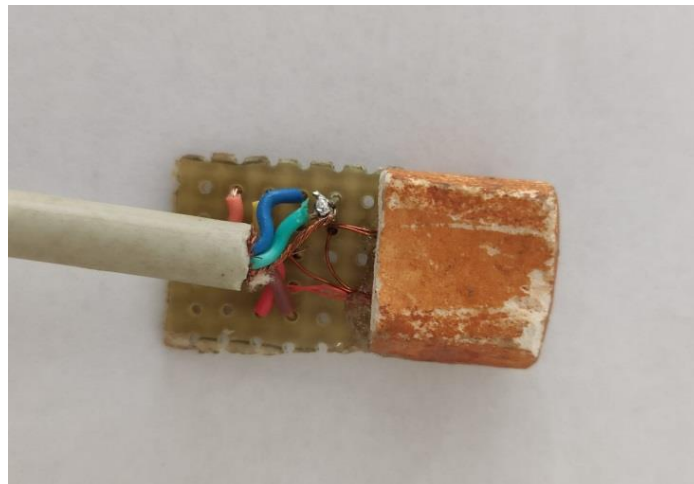


Figura 4. Esquema da construção do sensor (modelo final).

Quanto ao funcionamento do sensor, o início da aplicação de um pulso de corrente elétrica ao resistor promove seu aquecimento e gera uma onda de calor que se propaga pelo meio circundante. Algum tempo depois, essa onda de calor chega ao termistor, que experimenta aumento contínuo de sua temperatura. A interrupção da aplicação de corrente elétrica marca o término do pulso e da fase de aquecimento, seguindo-se uma fase de arrefecimento (ou resfriamento) por dissipação do calor acumulado. Novamente, algum tempo depois, a redução da temperatura alcança também o termistor.

Depreende-se, da descrição acima, que as ondas de aumento e redução da temperatura no termistor ocorrem com certa defasagem de tempo (Δt) em relação às fases de aquecimento e arrefecimento do resistor. Esse tempo de atraso (Δt) depende tanto da distância entre os dois pontos (que, no caso, é fixa, de cerca de 3 mm) quanto da condutividade térmica do meio. Por outro lado, assumindo-se que a dissipação do calor produzido no resistor dá-se radialmente, e considerando-se que o meio entre o resistor e o termistor tem propriedades

térmicas que permitem que o calor produzido não só se propague (condutividade térmica; difusividade térmica) como também seja armazenado (calor específico), depreende-se que a amplitude de oscilação da temperatura (ΔT) diminui com a distância, sendo, portanto, maior no resistor e menor no termistor. Um excelente texto para compreender mais profundamente aspectos aqui apresentados acerca da dinâmica de um pulso de calor aplicado ao sensor consta no Capítulo 8 do livro de Jong van Lier (2020).

Um ciclo de funcionamento do sensor se completa com a aplicação de um novo pulso de corrente elétrica ao resistor, que dá início ao ciclo subsequente, com suas fases de aquecimento - com propagação da nova onda de calor - e posterior arrefecimento. Com a ocorrência contínua de ciclos intermitentes de aquecimento e resfriamento, as oscilações de temperatura no resistor ocorrem de modo semelhante ao representado na Figura 5 (Venturin, 2016), que apresenta ciclos de 180 s, sendo 90 s de aquecimento e 90 s de arrefecimento.

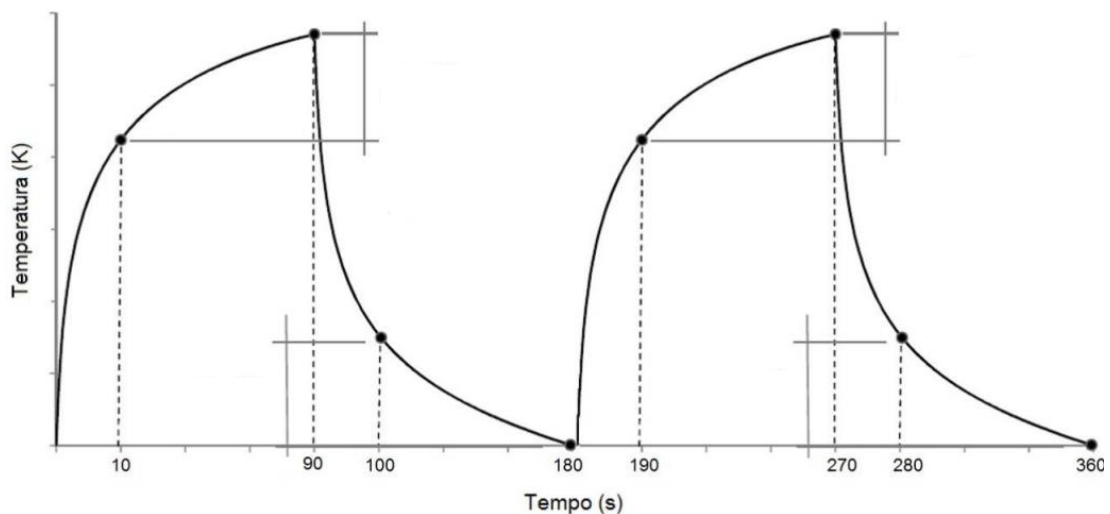


Figura 5. Simulação da temperatura nas fases de aquecimento e arrefecimento do resistor de um sensor térmico com ciclo de 180 segundos. Fonte: Venturin (2016).

No presente caso o ciclo adotado para o funcionamento do sensor foi de 120 s, mais curto que os 180 s da Figura 5, com ramo de aquecimento mais curto (12 s) e de resfriamento mais longo (108 s) que os utilizados por Venturim (2016). De modo bastante objetivo, a leitura do sensor pode ser representada pelo resultado da equação a seguir:

$$L = \Delta t \cdot \Delta T \quad (22)$$

onde:

L = leitura do sensor, s °C;

Δt = defasagem de tempo entre o início da aplicação do pulso de corrente elétrica no resistor e a chegada onda de calor no termistor, s;

ΔT = amplitude de variação da temperatura no termistor decorrente da passagem onda de calor (fases de aquecimento e arrefecimento), °C.

Variações na umidade do bloco cerâmico (θ_b) que compõe o sensor afetam as propriedades térmicas do meio acima citadas e, conseqüentemente, afetam os valores de Δt e ΔT no termistor e, assim, sua leitura. Por outro lado, como o material cerâmico tem sua curva característica de retenção de água, variações na θ_b também implicam em variações na tensão da água no bloco cerâmico (τ_b), podendo essa relação ser expressa por:

$$L = L(\theta_b) = L(\tau_b) \quad (23)$$

onde:

L = leitura do sensor, s °C;

$L(\theta_b)$ = função dependente da umidade volumétrica do bloco (θ_b), cuja solução produz valor equivalente à L , s °C;

$L(\tau_b)$ = função dependente da tensão da água no bloco (τ_b), cuja solução também produz valor equivalente à L , s °C.

A cerâmica do sensor, colocada em íntimo contato com um solo qualquer, entrará em equilíbrio hidráulico com esse referido solo, de modo que o valor da tensão da água do bloco (τ_b) igualar-se-á à tensão da água no solo (τ). Com isso, e considerando que cada solo tem uma curva de retenção de água específica, a equação 23 pode ser reescrita para expressar a leitura do sensor em função das propriedades hídricas do solo, representada por:

$$L = L(\tau) = L(\theta) \quad (24)$$

onde:

L = leitura do sensor, s °C;

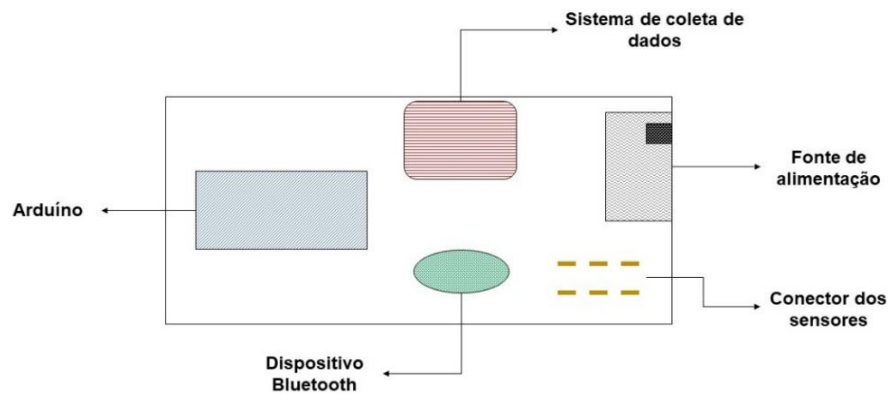
$L(\tau)$ = função dependente da tensão da água no solo (τ), aplicável a qualquer solo em equilíbrio hidráulico com o sensor, cuja solução produz valor equivalente à L , s °C;

$L(\theta)$ = função dependente da umidade volumétrica do solo (θ), específica para um dado solo em equilíbrio hidráulico com o sensor, cuja solução produz valor equivalente à L , s °C.

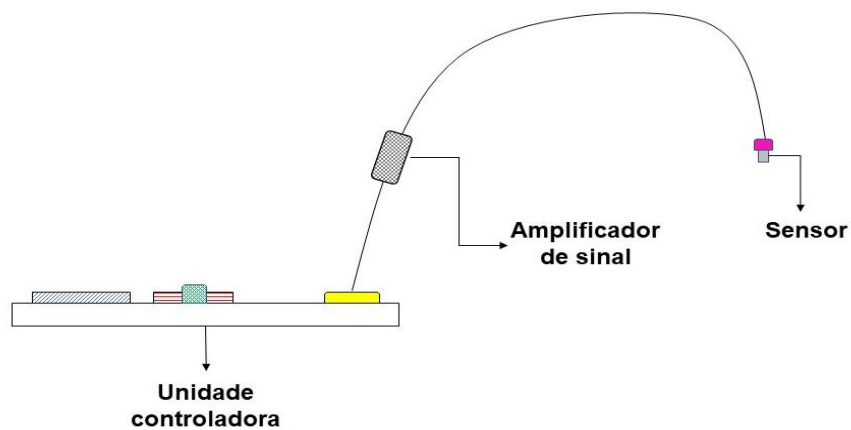
Considerando o propósito do presente trabalho, o maior interesse é na função $L = L(\tau_b)$, ou $L = L(\tau)$, em particular em sua forma inversa $\tau_b = \tau_b(L)$, ou $\tau = \tau(L)$, cuja utilização permite estimar, a partir da leitura do sensor, o valor da tensão da água no bloco cerâmico e, portanto, no solo. A obtenção de equações representativas dessa função será abordada mais adiante, no item 3.5, que trata da calibração e validação dos sensores.

3.4 Configuração do sistema para geração de sinal e coleta de dados dos sensores usando a plataforma Arduino

A unidade controladora utilizada no presente trabalho é uma protoboard composta por uma plataforma Arduino, na qual toda a configuração de funcionamento do sensor é programada, um sistema de coleta de dados, que possui uma entrada de cartão de memória Micro SD para o armazenamento dos dados, um dispositivo bluetooth, que possibilita o acompanhamento dos dados por qualquer aparelho compatível, uma fonte de energia, responsável pela alimentação elétrica da unidade, e um conjunto de conectores para os sensores, onde os cabos eram encaixados (Figura 6A). Cabe registrar, ainda, que os cabos dos sensores tinham, em sua porção média, amplificadores de sinal, cuja função é a redução de ruídos (Figura 6B).



(A)



(B)

Figura 6. Configuração do sistema para geração de sinal e coleta de dados dos sensores: (A) Unidade controladora e seus componentes; e (B) Conexão do sensor na unidade controladora.

A unidade controladora foi configurada para atuar com quatro sensores conectados simultaneamente. O sistema de coleta armazenava dois tipos de arquivo de dados, sendo um com informações mais detalhadas e outro com informações mais resumidas, ambos abrangendo um período de coleta de dados de uma hora. O arquivo mais detalhado registrava, a cada 4 s, linhas de dados com informações gerais (data; hora; ordem de leitura; acionamento ou não do resistor) e com os valores de temperatura dos quatro termistores. Nesse arquivo eram geradas 30 linhas de dados para cada ciclo do sensor, sendo quatro linhas na fase de aquecimento e 26 linhas na fase de arrefecimento.

O arquivo mais resumido continha 10 linhas de dados, uma a cada 6 min, que incluíam tanto informações gerais (data; hora) quanto informações

representativas de três ciclos consecutivos de funcionamento do sensor, quais sejam: (i) a fase (tempo) em que tem início da aplicação do pulso elétrico nos resistores; (ii) a fase (tempo) associada à chegada da onda de calor em cada termistor; e (iii) a amplitude associada à variação de temperatura de cada termistor decorrente da passagem da onda de calor.

Os valores de fase e amplitude armazenados no arquivo mais resumido, referenciados acima como associados à chegada e à passagem da onda de calor em cada termistor, referem-se, de fato, ao componente senoidal de primeira ordem, ou primeiro harmônico, da série de Fourier, obtidos a partir da análise das variações de temperatura nos termistores (Sousa et al., 2020). A leitura do sensor correspondente a cada período de 6 min foi calculada em planilha eletrônica a partir dos dados acima mencionados, utilizando equação similar à equação 22, representada por:

$$L = (f_T - f_R) \cdot \Delta A = \Delta f \cdot \Delta A \quad (25)$$

onde:

L = leitura do sensor, rad °C;

Δf = defasagem entre as fases no resistor (f_R) e no termistor (f_T), rad.

ΔA = amplitude associada à variação de temperatura no termistor, °C;

3.5 Calibração e validação dos sensores

Para a calibração dos sensores, os mesmos foram conectados à unidade controladora e esta à rede elétrica, para acionamento. Os sensores foram colocados em contato com água por 24 h, para que a saturação fosse atingida por capilaridade. Posteriormente os sensores foram retirados da água e deixados suspensos para que fossem secos ao ar, até atingir peso constante. Ao longo desse processo, a cada período de 30 min, a quantidade de água presente nos blocos era monitorada por pesagem (Figura 7A e 7B) e sua umidade volumétrica (θ_b) era calculada.

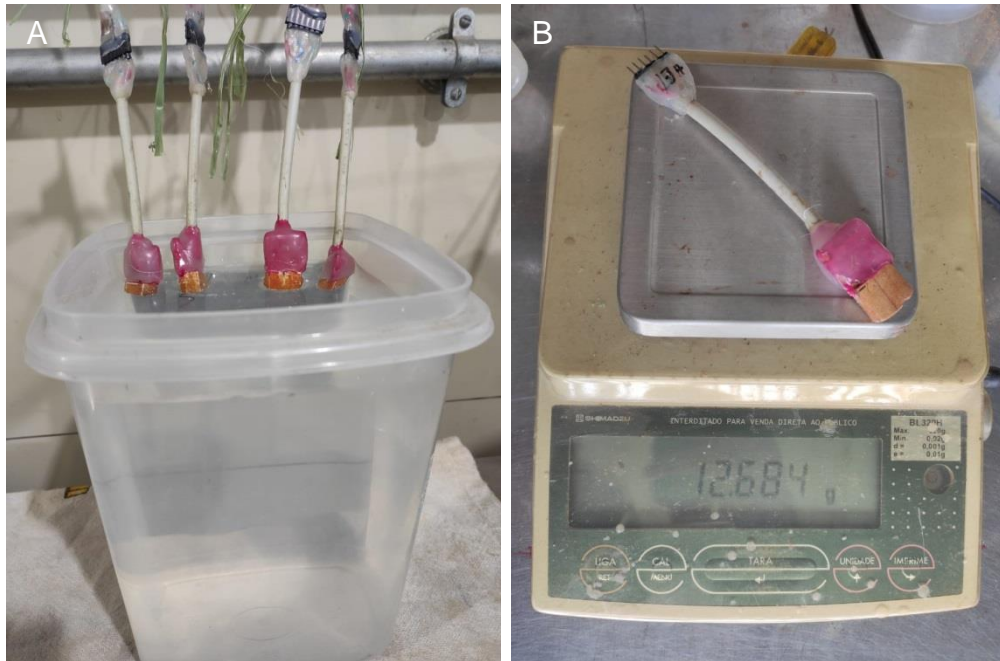


Figura 7. Calibração dos sensores: (A) saturação dos sensores por 24 h; e (B) monitoramento da água no bloco por pesagem durante a secagem.

Como o bloco cerâmico tem uma curva de retenção de água que lhe é característica (equação 21), a cada valor de umidade (θ_b) que este assume há um valor de tensão da água (τ_b) correspondente. Esses valores de τ_b foram obtidos em planilha eletrônica do programa Microsoft Office Excel 2019, pelo método iterativo, com o auxílio do suplemento 'solver'.

Os dados gravados na memória Micro SD do coletor de dados foram copiados para um computador pessoal. Conforme anteriormente mencionado, eram arquivos horários de dois tipos, sendo um com informações mais detalhadas (900 linhas de dados) e outro com informações mais resumidas (10 linhas de dados). Os arquivos mais resumidos foram importados para uma planilha do Microsoft Excel, em que foi feita a depuração de inconsistências e o cálculo da leitura do sensor (L) a partir da equação 25. Os arquivos mais detalhados eram consultados para identificar os momentos em que o funcionamento do sistema havia sido interrompido para realização da pesagem dos sensores, possibilitando que os valores de L fossem associados aos valores de θ_b e τ_b pertinentes.

Em decorrência das relações entre umidade e propriedades térmicas da cerâmica, as leituras do sensor (L) calculadas pela equação 25 eram crescentes com a secagem dos blocos cerâmicos, possibilitando que fossem relacionadas à umidade e, para os fins do presente trabalho, à tensão da água nos mesmos.

Para prevenir a interferência de eventuais variações construtivas dos sensores nos resultados, optou-se por trabalhar com as leituras normalizadas (L^*). Os valores de L^* foram calculados com base nas leituras dos sensores quando esses estavam completamente saturados, em que a leitura era mínima (L_{\min}), e completamente secos, em que a leitura era máxima (L_{\max}). O cálculo de L^* foi feito de modo que o valor máximo ($L^* = 1,0$) estivesse associado ao bloco saturado e o valor mínimo ($L^* = 0,0$) ao bloco completamente seco, de acordo com a seguinte equação:

$$L^* = \frac{L_{\max} - L}{L_{\max} - L_{\min}} \quad (26)$$

onde:

L^* = leitura normalizada do sensor, adimensional;

L = leitura normalizada do sensor, rad °C;

L_{\max} e L_{\min} = leitura máxima e mínima do sensor, respectivamente, rad °C.

Diversos modelos para a obtenção da tensão da água no bloco a partir da leitura normalizada do sensor foram testados. Bons ajustes dessa relação τ_b - L^* puderam ser obtidos usando modelos com um número de parâmetros de ajuste por vezes expressivo, o que os faz desejavelmente sensíveis, como o que segue:

$$\tau_b = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^k a_{2i} * L^{*2i}}{1 + \sum_{j=1}^{k^*} a_{2j-1} * L^{*2j}} \quad (27)$$

onde:

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_{2k}, a_{2k^*}$ = parâmetros empíricos de ajuste;

k e k^* = número de termos da variável independente no numerador e no denominador que permitiu a otimização da equação.

O processo de saturação e secagem dos blocos cerâmicos foi realizado duas vezes, para permitir que as equações de calibração obtidas no primeiro ensaio pudessem ser confrontados com dados obtidos no segundo ensaio, e vice-versa. Isso possibilitou a validação cruzada das curvas de calibração obtidas em ambos os ensaios que, por fim, poderiam justificar a obtenção de uma curva geral

de calibração com os dados dos dois ensaios que possivelmente fosse válida para todos os sensores confeccionados.

3.6 Ensaios para teste dos sensores de tensão da água em solos

Os ensaios para teste dos sensores de tensão da água em solos foram conduzidos no Laboratório de Solos (LSOL), localizado no Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), em Campos dos Goytacazes, RJ. A temperatura ambiental foi monitorada ao longo do ensaio, duas vezes por dia, às 9:00 h e às 17:00 h.

Os seis sensores confeccionados, testados quanto ao seu funcionamento eletrônico e calibrados conforme acima descrito, foram avaliados para a medição da tensão de água em solos. A funcionalidade do sensor com bloco cerâmico para a medição da tensão da água no solo baseia-se no princípio de que, ao entrarem em contato, o equilíbrio hidráulico entre ambos se estabelece, de modo que a tensão da água no solo é a mesma que a da água no bloco.

Para os ensaios, foram utilizados os materiais do horizonte superficial do Argissolo Vermelho e do Argissolo Amarelo, cuja coleta, preparação e caracterização foram previamente descritos.

Os ensaios com esses dois solos foram feitos sequencialmente, usando o mesmo aparato experimental. Para cada tipo de solo foram utilizados dois vasos com dimensões laterais de 12 x 12 cm e altura de 17,5 cm, com volume aproximado de 2,5 L. Como os solos apresentam densidades distintas, foram utilizadas quantidades diferentes de material para que o volume de 1,5 L fosse atingido, correspondendo a uma coluna de solo com cerca de 11 cm de altura. Para o Argissolo Vermelho foram utilizados 1881 g de solo seco ao ar (correspondente a 1850 g de TFSE), enquanto para o Argissolo Amarelo foram utilizados 2171 g de solo seco ao ar (correspondente a 2079 g de TFSE).

Durante cada ensaio, em um dos vasos foram instalados quatro sensores de tensão em avaliação e um tensiômetro de punção, enquanto no outro vaso apenas o tensiômetro foi instalado. A instalação foi feita de modo que tanto o bloco cerâmico do sensor quanto a cápsula porosa do tensiômetro ficassem em posição semelhante, com o ponto médio em cerca de 5,5 cm de profundidade. Em

cada tipo de solo foram colocadas quantidades de águas diferentes, deixando-os próximo a saturação. Todos os componentes foram individualmente pesados, possibilitando que a umidade do solo fosse obtida quando desejada, mediante pesagem do conjunto (Figura 8).

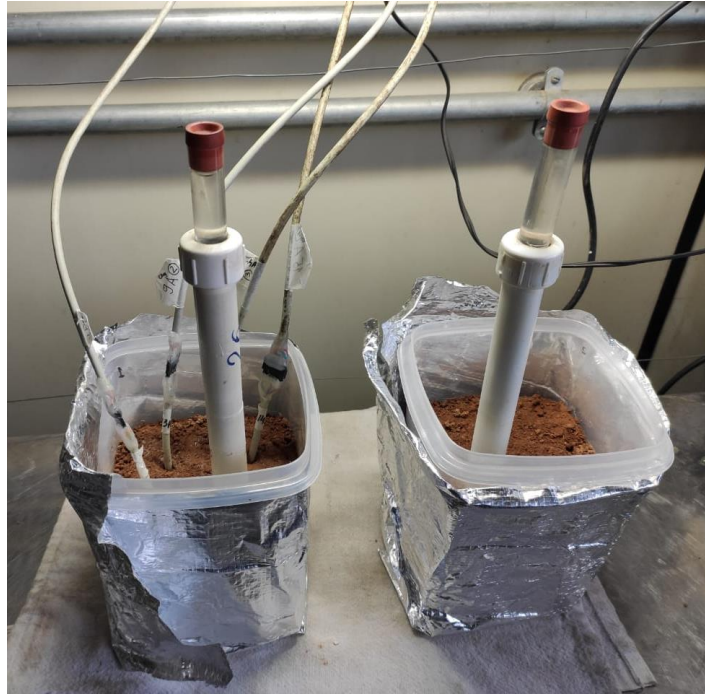


Figura 8. Ensaio para teste dos sensores de tensão da água em solos.

Após o enchimento dos vasos, instalação dos sensores e tensiômetros e umedecimento do solo, a unidade controladora foi acionada e os sensores lidos continuamente durante todo o processo de secagem do solo ao ar. A quantidade de água no vaso foi monitorada por pesagem e a leitura dos tensiômetros era realizada usando um tensímetro, sendo esses procedimentos realizados duas vezes por dia, às 09:00 e às 17:00 horas.

Para que o processo de secagem não demorasse demasiadamente no ensaio do Argissolo Vermelho, um ventilador foi mantido acionado durante todo o período. Já no ensaio do Argissolo Amarelo, o ventilador foi mantido acionado no período diurno, entre 9:00 h e 17:00 h. No período noturno, entre 17:00 h e 9:00 h, os vasos foram tampados para que não houvesse perda de água por evaporação e que houvesse a redistribuição completa de água pelo solo.

O ciclo de secagem estendeu-se até quando os solos atingiram umidade correspondente ao ponto de murcha permanente (1500 kPa), ou seja, estava

bastante seco, o que ocorreu após 11 dias para o Argissolo Vermelho e 16 dias para o Argissolo Amarelo. Nesse momento, foi iniciado um lento processo de reumedecimento dos solos, até que esses atingissem tensão correspondente à capacidade de campo ($\tau = 10$ kPa). Foi aplicada, diariamente, uma pequena quantidade de água, sendo os vasos mantidos tampados a fim prevenir a perda de água por evaporação e permitir a completa redistribuição de água pelo solo. Este processo foi repetido até o solo atingir a capacidade de campo (10 kPa), o que ocorreu após 10 dias para o Argissolo Vermelho e nove dias para o Argissolo Amarelo. Nos dois vasos que possuíam apenas o tensiômetro, foram realizadas coletas de solos periódicas, para medição da umidade volumétrica e comparação com a umidade obtida por pesagem.

Os arquivos de dados dos sensores obtidos durante os ensaios com solos foram copiados do coletor para um computador pessoal e tratados conforme anteriormente mencionado no item 3.5. Assim, os arquivos mais resumidos foram importados para planilhas do Microsoft Excel, sendo feita a depuração de dados inconsistentes e os cálculos tanto da leitura do sensor (L), a partir da equação 25, quanto de sua leitura normatizada (L^*), a partir da equação 26. No presente caso, em que a condição hídrica no bloco do sensor não era diretamente monitorada por pesagem, os valores de L^* eram utilizados para estimar, a partir da equação 27, a tensão da água no bloco cerâmico dos sensores (τ_b). Dado o presumido equilíbrio hidrostático entre o bloco cerâmico e o solo, os valores de τ_b obtidos puderam ser confrontados com os valores de tensão da água no solo (τ). Esses valores de τ foram obtidos tanto diretamente, a partir da leitura dos tensiômetros, quanto indiretamente, a partir da curva de retenção de água no solo (equação 8), rearranjada para deixar τ em função de θ , e da umidade volumétrica (θ) do solo nos vasos, monitorada por pesagem.

3.7 Análise estatística

Os resultados dos testes de funcionamento dos sensores foram interpretados a partir da análise descritiva dos dados (médias, desvios, distribuição estatística, gráficos de dispersão) e de análises de regressão entre as diversas variáveis medidas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização física dos solos

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados da análise granulométrica dos materiais que compõem os horizontes superficial (A) e subsuperficial (B) de três solos do município de Campos dos Goytacazes-RJ, assim como os valores médios de densidade de partículas (D_p) e da densidade (D_s) e porosidade total (P_T) de amostras de solo com estrutura reconstituída em anéis volumétricos, com e sem a inserção de um bloco de material cerâmico no interior da amostra.

Os solos apresentaram expressiva diversidade de composição granulométrica e de D_p , assim como coerência entre esses dois aspectos físicos da matriz do solo. A D_p foi maior no material da classe textural argila (horizonte B do Argissolo Vermelho), menor nos materiais da classe textural argilo siltosa (horizontes A e B do Cambissolo Háplico), e intermediária nos materiais da classe textural franco arenosa (horizonte A do Argissolo Amarelo) e franco argilo arenosa (horizonte A do Argissolo Vermelho e horizonte B do Argissolo Amarelo).

Quanto aos atributos estruturais das amostras de solo reconstituídas em anéis volumétricos, estes também evidenciaram diversidade entre os seis materiais estudados, com a D_s variando entre 0,958 e 1,400 Mg m⁻³ e a P_T entre

0,471 e 0,620 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (Tabela 1). Aqui também se observa coerência entre essas duas variáveis estruturais e a textura da matriz do solo, com o maior valor de D_s e menor de P_T ocorrendo no horizonte A do Argissolo Amarelo (franco arenosa), os menores valores de D_s e maiores de P_T no horizonte B do Argissolo Vermelho (argila) e nos horizontes A e B do Cambissolo Háptico (argilo siltosa), e os valores intermediários de D_s e P_T ocorrendo horizonte B do Argissolo Amarelo e no horizonte A do Argissolo Vermelho (franco argilo arenosa).

Observa-se que a presença do bloco inserido no anel não alterou os valores de densidade e porosidade total dos solos, de modo que nas demais etapas do presente trabalho foram levados em consideração valores médios ou modelos que incluem ambos os tipos de amostra.

Outro aspecto a considerar é que a D_s e a P_T foram determinadas em anéis volumétricos de solo após esses serem submetidos a diferentes tensões durante a confecção da curva de retenção de água, de modo que parte dos valores obtidos eventualmente foram afetados por fenômenos de expansão e contração do solo durante o processo de saturação da amostra e sua posterior drenagem.

Tabela 1. Atributos físicos do material dos horizontes superficial (A) e subsuperficial (B) de três solos do município de Campos dos Goytacazes-RJ⁽¹⁾

Classe de solo	Horizonte	Areia Silte Argila (g kg ⁻¹)			Classe Textural	D_p (Mg m ⁻³)	
		-----	-----	-----			
PV	A	600,8	100,8	298,4	franco argilo arenosa	2,625 b	
	B	346,3	71,7	582,0	Argila	2,745 a	
CX	A	89,9	447,2	462,9	argilo siltosa	2,507 c	
	B	63,9	435,6	500,5	argilo siltosa	2,524 c	
PA	A	736,2	94,8	169,0	franco arenosa	2,646 b	
	B	668,0	95,9	236,1	franco argilo arenosa	2,643 b	
		----- D_s (Mg m ⁻³) -----			----- P_T (m ³ m ⁻³) -----		
		c/ bloco	s/ bloco	média	c/ bloco	s/ bloco	Média
PV	A	1,249 A b	1,234 A b	1,241	0,524 A d	0,530 A d	0,527
	B	1,064 A d	1,070 A d	1,067	0,612 A a	0,610 A ab	0,611
CX	A	1,003 A e	0,998 A e	1,001	0,600 A b	0,602 A b	0,601
	B	0,958 A f	0,962 A f	0,960	0,620 A a	0,619 A a	0,620
PA	A	1,390 A a	1,400 A a	1,395	0,475 A e	0,471 A e	0,473
	B	1.172 A c	1.189 A c	1,181	0.557 A c	0.550 A c	0,553

⁽¹⁾ Classes de solo: PV - Argissolo Vermelho; CX - Cambissolo Háptico; PA - Argissolo Amarelo. Frações granulométricas: areia - 2000-53 μm ; silte - 53-2 μm ; argila - <2 μm . D_p : densidade das partículas; D_s : densidade do solo; P_T : porosidade total. Valores de D_s e P_T são referentes a amostras com estrutura reconstituída em anéis volumétricos de 100 cm^3 a partir da terra fina seca ao ar, com ou sem a inserção de um bloco de material cerâmico no interior da amostra ("c/ bloco" e "s/ bloco", respectivamente). Médias seguidas de mesma letra maiúscula, na linha, não diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade; Médias seguidas de mesma letra minúscula, na coluna,

não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Valores não seguidos de letras não foram submetidos a teste de comparação de médias.

Para as amostras dos dois Argissolos, esse efeito não foi detectado, mas para o Cambissolo Háplico se verificou, para ambos os horizontes, que as amostras submetidas às maiores tensões (que experimentam maior drenagem e que, portanto, atingem menores umidades) apresentaram evidente contração de seu volume, resultando em maiores valores D_s e menores de P_T (Figura 9), o que ocorreu de forma indistinta para as amostras com e sem a presença do bloco cerâmico.

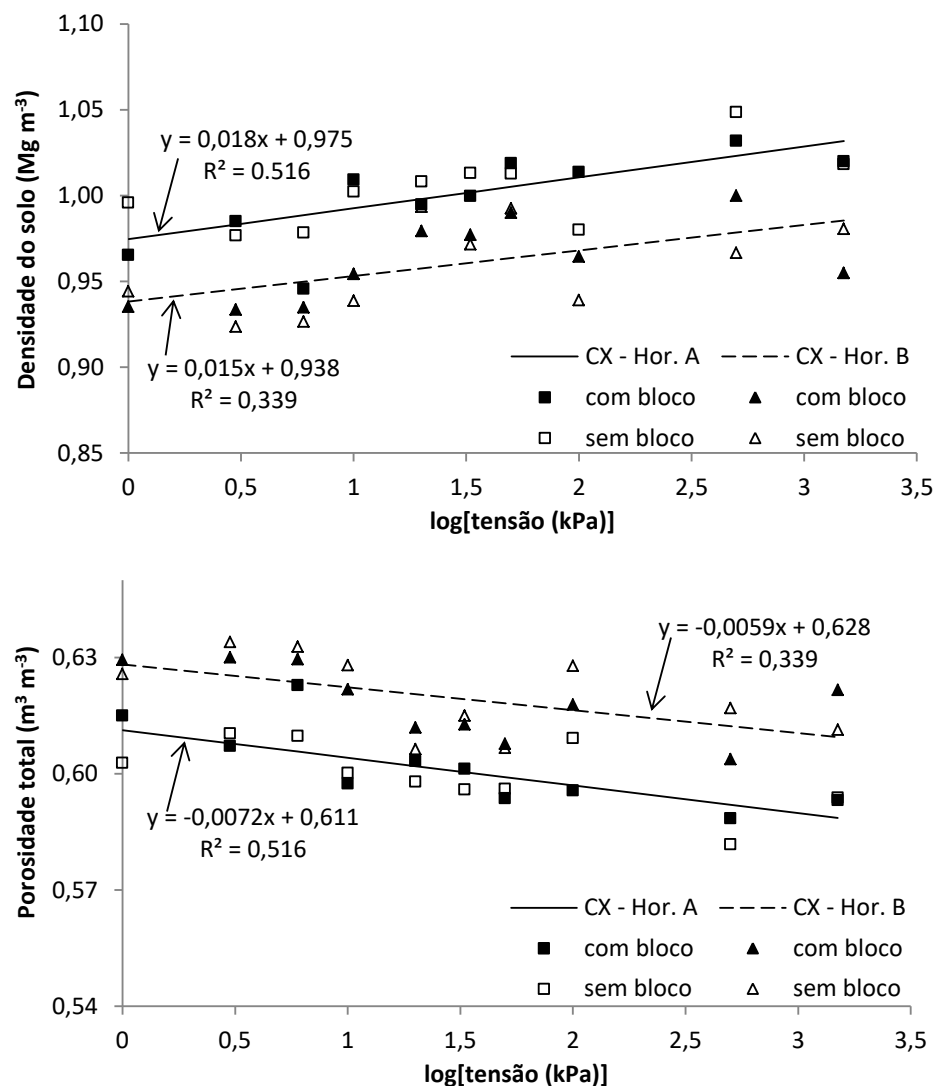


Figura 9. Densidade (D_s) e porosidade total (P_T) das amostras dos horizontes A e B do Cambissolo Háplico (CX) reconstituídas em anéis volumétricos, com e sem a presença de blocos cerâmicos, em função da tensão aplicada durante a confecção da curva de retenção de água.

As curvas de retenção de água (CRA) obtidas para os seis materiais de solo estão apresentadas nas Figuras 10 a 12. Em todos os gráficos pode-se observar grande similaridade entre as CRA obtidas para as amostras com e sem a presença do material cerâmico poroso, resultando em altos valores do índice de concordância de Willmot (d entre 0,999 e 0,998). Isso comprova que, para um solo específico, a presença dos blocos cerâmicos no interior das amostras não promoveu diferenças entre as CRA obtidas.

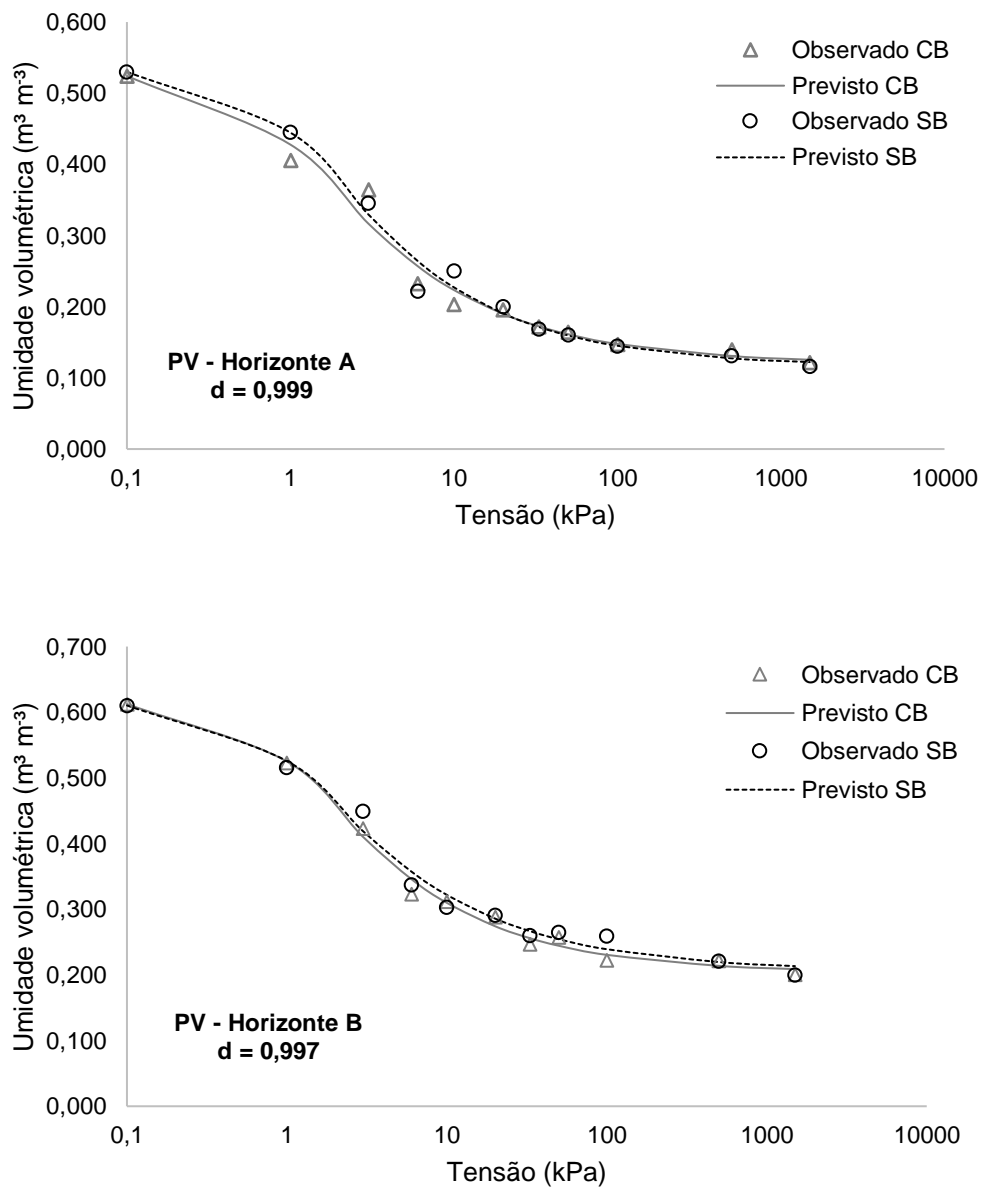


Figura 10. Curvas de retenção de água dos horizontes A e B do Argissolo Vermelho (PV), com (CB) e sem (SB) a presença dos blocos cerâmicos nas amostras, sendo d o índice de concordância de Willmot entre as curvas CB e SB.

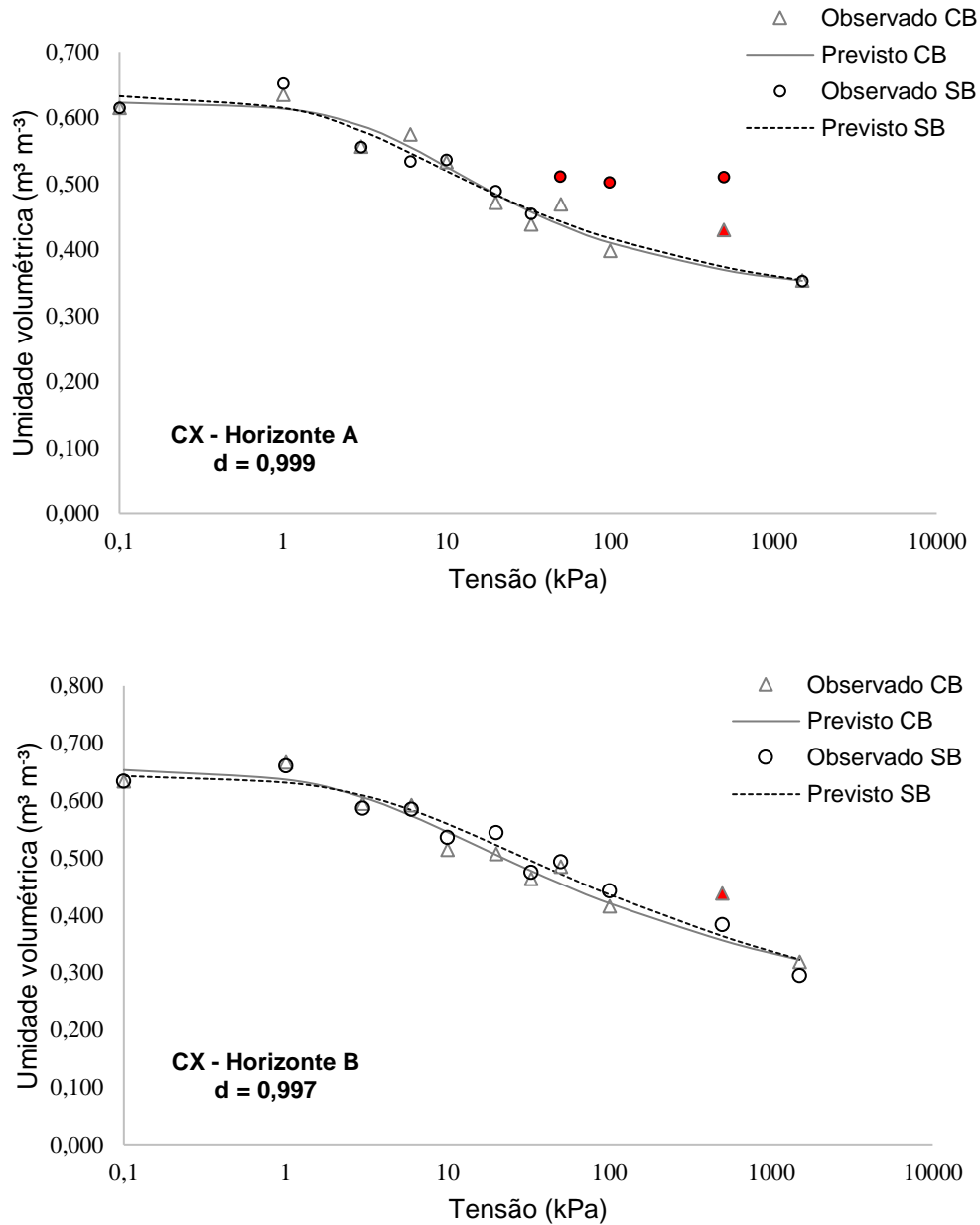


Figura 11. Curvas de retenção de água dos horizontes A e B do Cambissolo Háplico (CX), com (CB) e sem (SB) a presença dos blocos cerâmicos nas amostras, sendo d o índice de concordância de Willmot entre as curvas CB e SB. *Obs.: Pares τ - θ em destaque (representados por círculos e triângulos preenchidos) não foram levados em consideração para o ajuste das equações representativas da curva de retenção de água no solo, por terem sido identificados como "outliers" (valores de umidade relativa Θ_b diferindo da média naquela tensão em três ou mais desvios-padrão).*

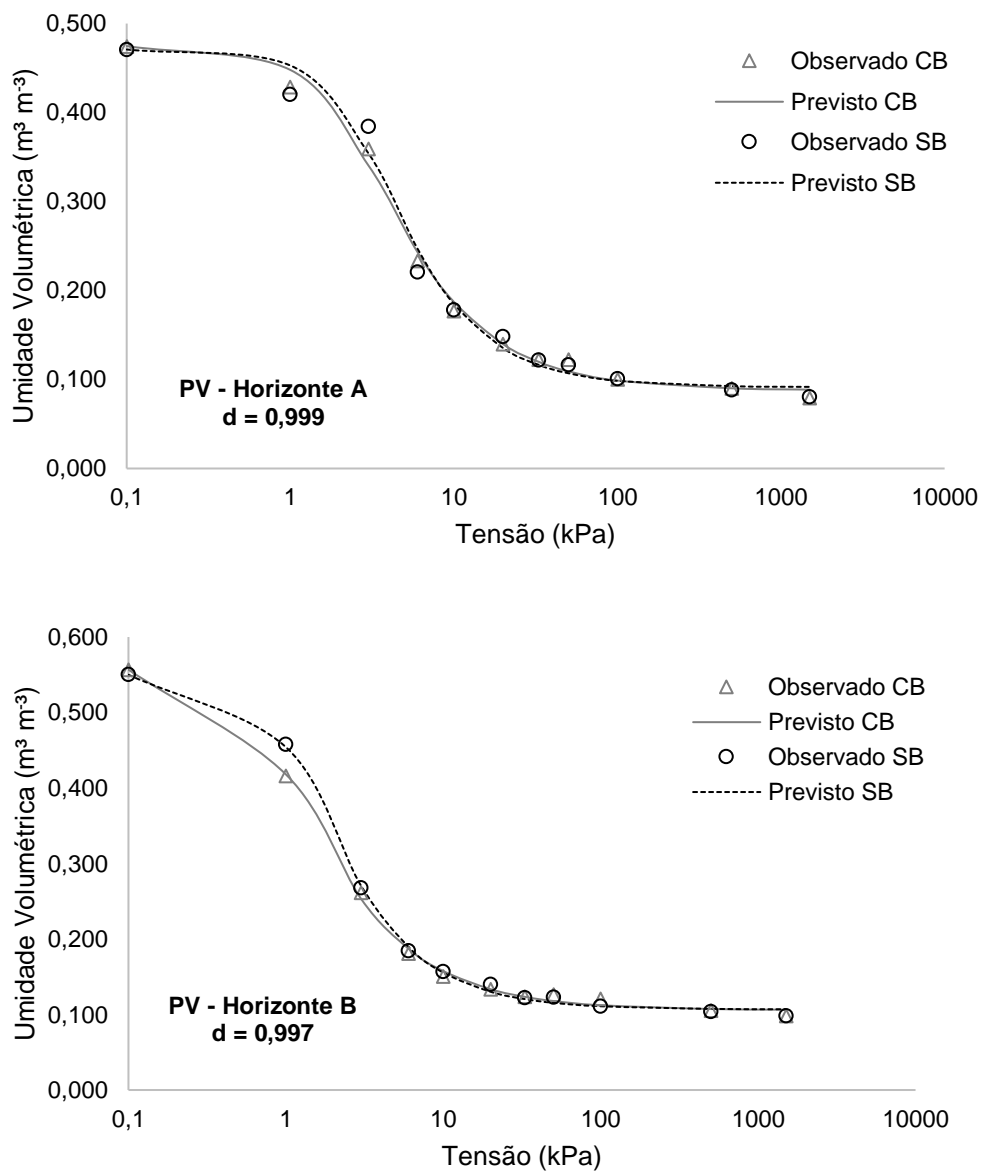


Figura 12. Curvas de retenção de água dos horizontes A e B do Argissolo Amarelo (PA), com (CB) e sem (SB) a presença dos blocos cerâmicos nas amostras, sendo d o índice de concordância de Willmot entre as curvas CB e SB.

Ademais, os altos valores do índice d sugerem que os blocos estavam efetivamente em equilíbrio com os solos e com as tensões aplicadas às amostras, indicando que o referido material cerâmico tem potencial para uso como sensor de tensão da água no solo. A eventual ausência desse equilíbrio implicaria que, no momento da retirada da amostra, ainda estaria ocorrendo drenagem do excesso de água dos blocos para o solo, fazendo com que a umidade dessas amostras fosse maior que a daquelas sem a presença dos blocos cerâmicos.

Em relação às CRA do solo 2 (Cambissolo Háplico), para o horizonte A os ajustes foram feitos após a exclusão de três pares τ - θ , das amostras sem bloco, e de um par τ - θ , das amostras com bloco cerâmico, e para o horizonte B com a exclusão um par τ - θ , das amostras com bloco. Tais exclusões foram feitas com base na percepção do não equilíbrio amostra-placa, identificado pela ocorrência de valores de umidade não esperados, maiores em tensões mais elevadas do que em tensões mais baixas imediatamente anteriores.

Os parâmetros de ajuste das CRA (equação 8) dos seis materiais de solo estudados (obtidas considerando as amostras com e sem a presença de bloco cerâmico) estão apresentados na Tabela 2. Também são apresentados outros atributos físicos do solo relacionados à CRA, sendo esses usados ao longo do presente trabalho tanto para eventuais cálculos quanto para a interpretação e contextualização dos demais resultados. Os valores de umidade volumétrica na saturação (θ_s), na capacidade de campo (θ_{CC}), no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e residual (θ_r) foram calculados a partir das CRA ajustadas para cada material de solo (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água (CRA) e outros atributos físicos relacionados, obtidos para o material dos horizontes superficial (A) e subsuperficial (B) de três solos do município de Campos dos Goytacazes-RJ⁽¹⁾

Classe de solo	Horizonte	U_r (kg kg ⁻¹)	α (kPa ⁻¹)	m -	n -	θ_s -----	θ_{CC} (m ³ m ⁻³)	θ_{PMP} -----	θ_r -----
PV	A	0,095	1,034	0,363	1,571	0,527	0,225	0,124	0,118
	B	0,194	0,924	0,372	1,592	0,611	0,315	0,213	0,207
CX	A	0,316	0,180	0,276	1,382	0,616	0,523	0,358	0,331
	B	0,140	0,167	0,146	1,171	0,634	0,554	0,322	0,141
PA	A	0,062	0,384	0,492	1,967	0,473	0,188	0,088	0,087
	B	0,090	0,943	0,490	1,961	0,553	0,158	0,106	0,106

⁽¹⁾ Classes de solo: PV - Argissolo Vermelho; PV - Cambissolo Háplico; PA - Argissolo Amarelo. Coeficientes de ajuste das curvas de retenção de água (CRA): α , m e n - parâmetros empíricos; U_r - umidade gravimétrica residual. Outros atributos calculados a partir das CRA: umidade volumétrica na saturação (θ_s); umidade volumétrica à 10 kPa - ou na capacidade de campo (θ_{CC}); umidade volumétrica à 1500 kPa - ou no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}); e umidade volumétrica residual (θ_r).

Nesses cálculos foram considerados, para ambos os Argissolos, os valores médios de densidade e porosidade total de cada material. Para o Cambissolo, devido à sua expansividade, as umidades θ_s , θ_{CC} , θ_{PMP} e θ_r foram calculadas considerando-se os valores de densidade e de porosidade total

correspondentes às tensões 0,1, 10, 1500 e 10000 kPa, respectivamente, valores esses obtidos a partir da aplicação das equações que constam da Figura 9.

4.2 Caracterização física do material cerâmico

Na Tabela 3 estão apresentados resultados da caracterização física do material cerâmico poroso utilizado no trabalho, incluindo tanto a densidade da matriz cerâmica (que desconsidera os poros) quanto os atributos físicos dos blocos cerâmicos moldados (densidade, porosidade total, porosidade bloqueada, umidade gravimétrica, umidade volumétrica).

Tabela 3. Atributos físicos do material cerâmico utilizado para a confecção de sensores de tensão da água no solo, em Campos dos Goytacazes-RJ⁽¹⁾

Atributo	Unidade	Bloco 8	Bloco 13	Bloco 14	Bloco 17	Média	Desvio-padrão
D_{mc}	Mg m ⁻³	-	-	-	-	2,617	0,018
D_b	Mg m ⁻³	1,147	1,187	1,151	1,137	1,210	0,048
P_{Tb}	m ³ m ⁻³	0,562	0,546	0,560	0,566	0,537	0,018
U_{gh}	g kg ⁻¹	1,851	1,156	1,713	1,380	1,310	0,474
U_{gsat}	kg kg ⁻¹	0,464	0,431	0,458	0,459	0,415	0,032
U_{vsat}	m ³ m ⁻³	0,540	0,512	0,523	0,525	0,501	0,023
P_{Bb}	m ³ m ⁻³	0,015	0,033	0,041	0,038	0,036	0,016

⁽¹⁾ D_{mc} : densidade da matriz cerâmica; D_b : densidade do bloco; U_{gh} : umidade gravimétrica higroscópica; U_{gsat} : umidade gravimétrica na saturação; U_{vsat} : umidade volumétrica na saturação; P_{Tb} : porosidade total do bloco.; P_{Bb} : porosidade bloqueada do bloco. A D_{mc} foi obtida usando pó do material cerâmico e os demais atributos usando blocos moldados de 4 cm³. Os blocos 8, 13, 14 e 17 foram utilizados para a confecção do modelo final do sensor. A média e o desvio-padrão apresentados referem-se a um conjunto de 24 blocos cerâmicos.

O valor médio da densidade da matriz cerâmica foi de 2,617 Mg m⁻³, inferior aos valores encontrados para três caulins estudados por Santos et al. (2010), que variaram de 2,786 a 2,841 Mg m⁻³. O valor mais baixo aqui encontrado se justifica tanto pela variabilidade natural da composição desses materiais quanto pelas alterações físicas propiciadas pelo processo de cozimento da cerâmica, o que inclui perda de massa por vaporização de compostos, expansão da estrutura dos minerais, entre outras.

Quanto à densidade e a porosidade total dos blocos, os valores médios foram de 1,210 Mg m⁻³ e 0,537 m³ m⁻³, respectivamente, que são valores próximos aos de solos. Esse elevado valor de porosidade total sugere que o material é promissor para uso em sensores térmicos, já que possibilita ampla variação de sua umidade e, por consequência, de suas propriedades térmicas.

Os blocos cerâmicos apresentaram proporção não desprezível de poros bloqueados, de 3,6%, e umidade higroscópica muito baixa, de apenas 1,310 g kg⁻¹ (ou 0,131%), o que indica baixa superfície específica disponível para a adsorção de água. Os resultados obtidos para esses dois atributos provavelmente estão associados ao processo de cozimento da cerâmica, o qual promove a ligação física entre partículas vizinhas, eliminando parte da superfície da matriz sólida e, ao mesmo tempo, levando ao isolamento físico de poros, impedindo que durante a tentativa de saturação dos blocos a água preencha esses poros bloqueados.

As curvas de retenção de água dos blocos (CRAb) específicas para cada um dos seis materiais de solo estudados constam na Figura 13.

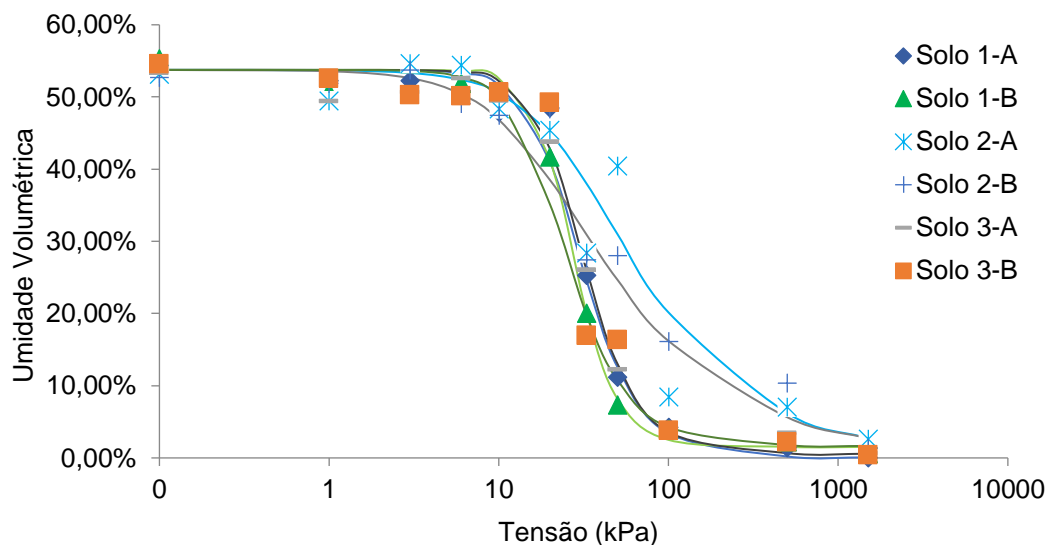


Figura 13. Curvas de retenção de água dos blocos inseridos no material dos horizontes A e B de três solos coletados no município de Campos dos Goytacazes-RJ, específicas para cada material de solo (solo 1: PV - Argissolo Vermelho; solo 2: CX - Cambissolo Háplico; solo 3: PA - Argissolo Amarelo).

Pode-se observar que os blocos inseridos no Cambissolo apresentaram, nas tensões mais elevadas, comparativamente aos Argissolos, valores mais altos de umidade. Isso corrobora a percepção anteriormente mencionada no item 4.1 de que, nessas amostras que apresentam fenômenos de expansão e contração, a perda de contato hidráulico do solo tanto com a placa porosa quanto com os blocos nele inseridos pode eventualmente ocorrer. Restrições ao fluxo de água entre esses componentes do sistema dificultam que se estabeleça o equilíbrio de

potencial, tornando os dados obtidos com o material do Cambissolo inadequados para a caracterização da cerâmica no que se refere à CRAb.

A Tabela 4 mostra a comparação entre as curvas dos blocos nos diversos solos, a partir do índice de concordância de Willmot (d). Embora todos os índices d obtidos tenham sido elevados, a divergência entre as CRAb obtidas no Cambissolo e as obtidas nos Argissolos foi maior (com valores mais baixos de d , entre 0,944 e 0,973) do que entre as CRAb obtidas nos Argissolos (com valores de d mais baixos, entre 0,997 e 1,00).

Tabela 4: Índices de concordância de Willmot (d) entre as curvas de retenção de água dos blocos (CRAb) específicas obtidas para cada um dos seis materiais de solos avaliados⁽¹⁾

Classe de solo	Horizonte do solo	PV		CX		PA	
		Hor. A	Hor. B	Hor. A	Hor. B	Hor. A	Hor. B
PV	A	-	0,999	0,955	0,971	1,000	0,997
	B	-	-	0,944	0,962	0,998	0,999
CX	A	-	-	-	0,997	0,958	0,946
	B	-	-	-	-	0,973	0,966
PA	A	-	-	-	-	-	0,997
	B	-	-	-	-	-	-

⁽¹⁾ Classes de solo: PV - Argissolo Vermelho; CX - Cambissolo Háplico; PA - Argissolo Amarelo.

A aplicação de critérios para a identificação de *outliers* - qual seja, a umidade relativa Θ_b diferindo da média em três ou mais desvios-padrão - levou à exclusão de 14 dos 20 pares τ - θ obtidos no Cambissolo, enquanto para os dois Argissolos apenas 3 dos 40 pares τ - θ foram excluídos. Isso permitiu a obtenção de uma curva de retenção de água geral dos blocos mais robusta, apresentada na Figura 14, a qual será utilizada nas demais etapas do presente trabalho.

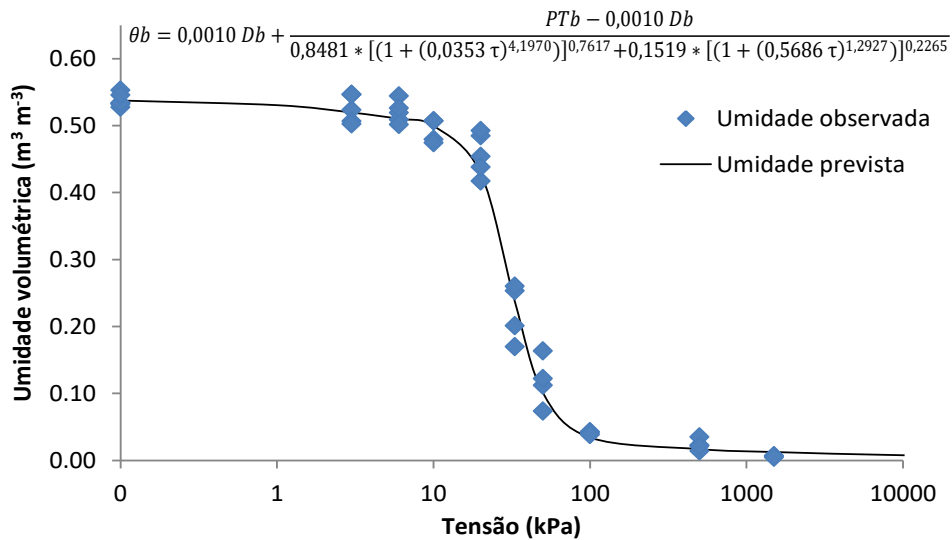


Figura 14. Curva de retenção de água dos blocos inseridos no material dos horizontes A e B de três solos coletados no município de Campos dos Goytacazes-RJ, obtida após a exclusão de *outliers* para o conjunto dos materiais de solo (solo 1: PV - Argissolo Vermelho; solo 2: CX - Cambissolo Háplico; solo 3: PA - Argissolo Amarelo). *Obs.: Na equação tem-se que: θ_b = umidade volumétrica do bloco; τ = tensão da água no bloco; D_b = densidade do bloco; e P_{T_b} = porosidade total do bloco.*

O ajuste do modelo adaptado, bimodal, permitiu reduzir desvios tanto na faixa mais úmida, em tensões abaixo de 20 kPa, quanto na faixa mais seca, em tensões acima de 50 kPa. A referida CRAb revelou que entre as tensões 10 e 100 kPa a variação da umidade relativa foi de 86,6%, permitindo concluir que a cerâmica avaliada é adequada para fabricação de sensores hídricos para essa faixa de tensão.

4.3 Calibração e validação dos sensores

Na Figura 15 são apresentados, a título de exemplo, para o sensor 13A, os resultados de tensão da água (τ) em função da leitura normatizada (L^*), obtidos durante os dois ensaios de calibração. Os valores de τ foram obtidos a partir das umidades do bloco ao longo dos ensaios, com base na curva de retenção do bloco cerâmico do referido sensor (equação 21), enquanto os valores de L^* foram obtidos a partir dos dados de amplitude e fase registrados na memória Micro SD da unidade controladora, sendo calculados pela equação 25. A Figura 15 também apresenta a relação L^* - τ ajustada com base na equação 27 (linha contínua), bem como os valores previstos com base tanto na curva de calibração específica para

o sensor 13A, obtida no outro ensaio (tracejado menor), quanto na curva geral de calibração, obtida para os seis sensores nos dois ensaios (tracejado maior).

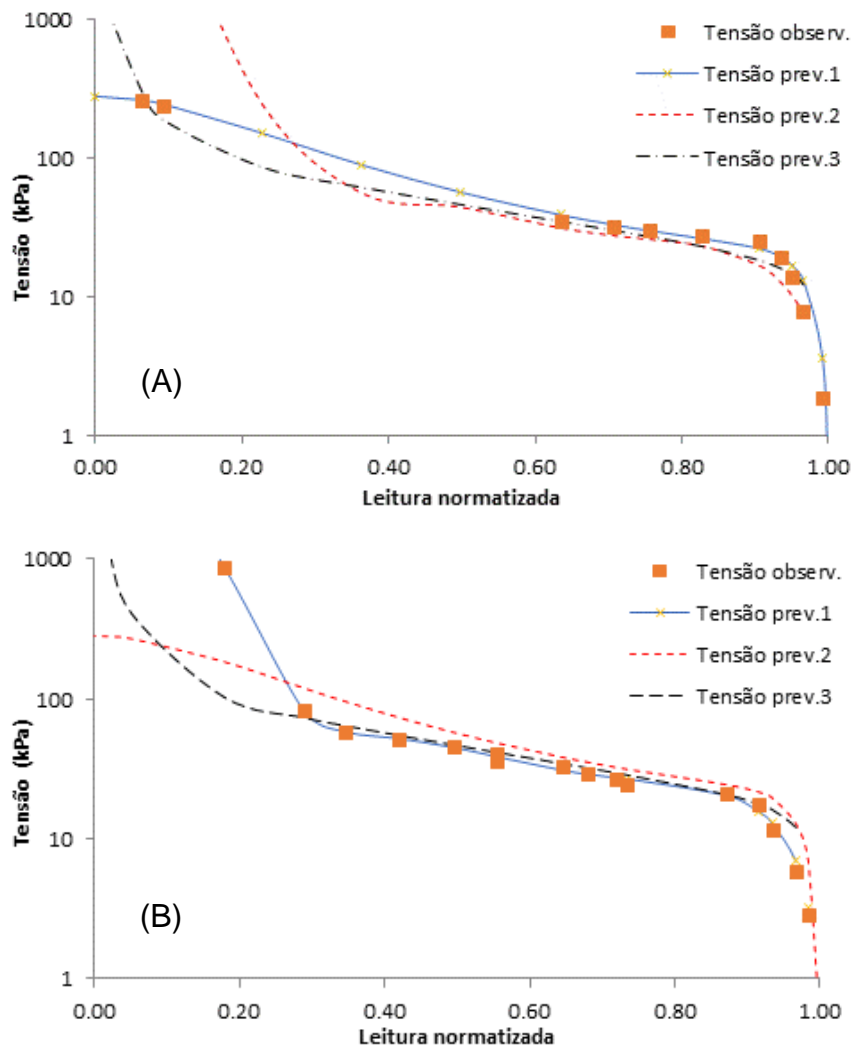


Figura 15. Tensão da água em função da leitura normalizada do sensor 13A no primeiro (A) e no segundo (B) ensaio de calibração. *Obs.:* “Tensão observ.” representa os valores de tensão da água obtidos a partir da curva de retenção do bloco cerâmico em questão, correspondentes às umidades do referido bloco medidas ao longo dos ensaios; “Tensão prev.1” representa os valores previstos a partir das equações ajustadas aos dados dos respectivos ensaios; “Tensão prev.2” representa os valores previstos a partir das equações ajustadas aos dados de ensaios adicionais; e “Tensão prev.3” representa os valores previstos com a equação ajustada ao conjunto completo de dados, obtidos no primeiro ensaio (com quatro sensores) e no segundo (com seis sensores).

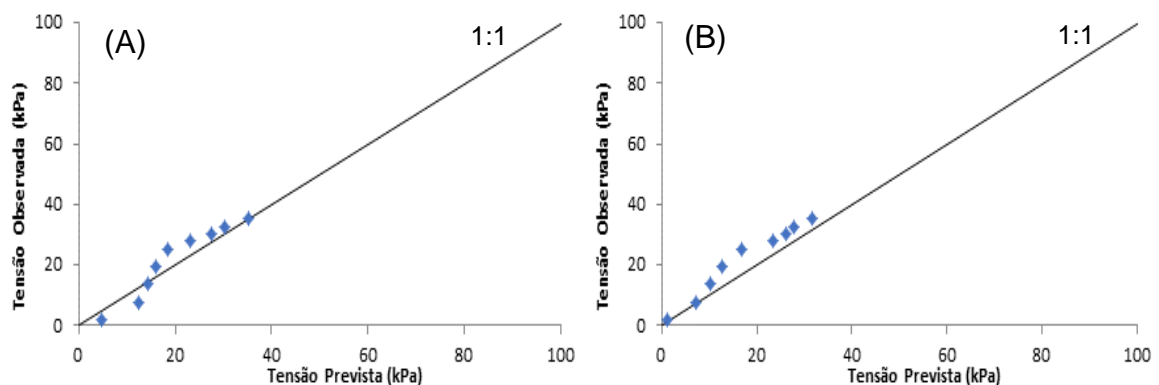
A Figura 16, além de evidenciar o bom ajuste da relação $L^*-\tau$ a partir da equação 27, permite constatar que a curva de calibração geral levou a valores

estimados de tensão mais próximos aos valores observados do que a curva de calibração específica do próprio sensor obtida no ensaio independente. Isso também ocorreu para os demais sensores submetidos a dois ensaios de calibração (13B, 14A e 14B), o que sugere que os sensores podem não apresentar curvas de calibração estáveis ao longo do tempo de seu uso.

As informações constantes na literatura deixam clara a necessidade de calibração para cada tipo de sensor existente. Gava et al. (2016) calibraram um sensor comercial de umidade da Falker, para solos de diferentes texturas, percebendo que o sensor apresenta um desvio sistemático nas leituras para os diferentes solos. Amaral et al. (2019) calibraram um equipamento TDR, em condições de laboratório e em campo, com a utilização de dois tubos de acesso, percebendo a necessidade de calibrações específicas para cada solo e tubo de acesso, ficando a viabilidade de seu uso dependente, ainda, da qualidade de sua instalação dos tubos no solo.

No processo de validação das curvas de calibração específicas para cada sensor, os valores de τ obtidos em um ensaio de calibração foram confrontados com os valores de τ estimados a partir das leituras normalizadas dos referidos sensores neste mesmo ensaio, porém usando a curva de calibração oriunda de outro ensaio.

A título de exemplo, a curva de calibração específica para o sensor 13A levou a resultados satisfatórios na faixa de tensão 0-40 kPa (Figuras 16A e 16C), estando próximos da linha 1:1, mas a partir de 40 kPa tal curva tendeu a superestimar a tensão observada (Figura 16C). Por outro lado, a curva de calibração geral levou a valores estimados de tensão mais próximos aos valores observados (próximos da linha 1:1) tanto na faixa de tensão 0-40 kPa (Figuras 16B e 16D) quanto na faixa 40-100 kPa (Figura 16D).



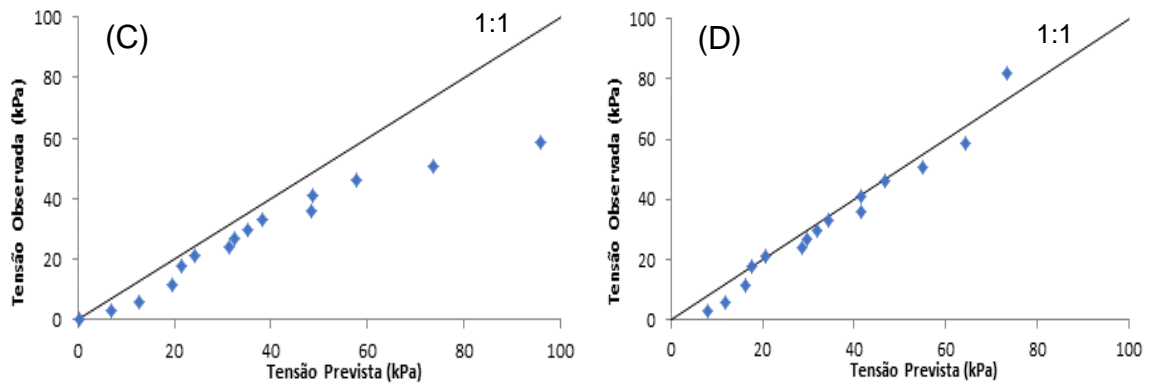


Figura 16. Gráficos de dispersão entre os valores de tensão observados no sensor 13A (obtidos com base nas umidades do bloco cerâmico em questão ao longo dos dois ensaios, a partir da curva de retenção do referido bloco) e os valores previstos a partir das equações de calibração específicas (obtidas para o próprio sensor 13A, em ensaios adicionais) e da equação de calibração geral (obtida a partir dados coletados pelos seis sensores, nos dois ensaios): (A) ensaio 1 + curva de calibração específica do ensaio 2; (B) ensaio 1 + curva de calibração geral; (C) ensaio 2 + curva de calibração específica do ensaio 1; e (D) ensaio 2 + curva de calibração geral.

Na Figura 17 são apresentados os resultados de tensão da água (τ) em função da leitura normalizada (L^*) obtidos durante os dois ensaios de calibração. Tal como anteriormente descrito para o caso específico do sensor 13A, os valores de τ em cada sensor foram obtidos a partir das umidades dos blocos cerâmicos ao longo dos ensaios, com base em suas curvas de retenção, enquanto os valores de L^* foram obtidos a partir dos dados de amplitude e fase registrados na memória Micro SD da unidade controladora do equipamento. Na Figura 17 também são apresentadas a relação L^* - τ ajustada para cada ensaio (linha contínua), bem como os valores previstos com base tanto na curva de calibração geral parcial, obtida no outro ensaio (tracejado menor), quanto na curva geral obtida para os seis sensores nos dois ensaios (tracejado maior).

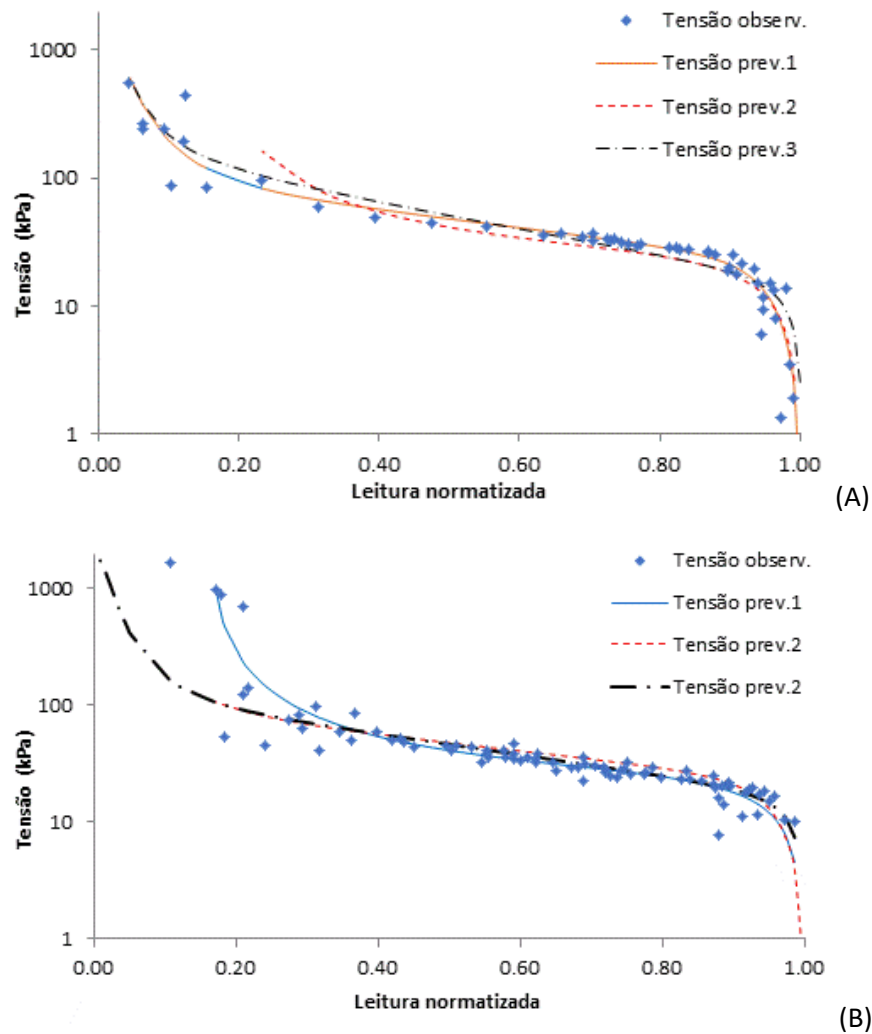


Figura 17. Tensão da água em função da leitura normalizada dos sensores 13A, 13B, 14A e 14B, no primeiro ensaio de calibração (A), e dos sensores 13A, 13B, 14A, 14B, 9A e 17A, no segundo ensaio de calibração (B). Obs.: “Tensão observ.” representa os valores de tensão da água obtidos a partir da curva de retenção dos blocos cerâmicos em questão, correspondentes às unidades dos referidos blocos medidas ao longo dos ensaios; “Tensão prev.1” representa os valores previstos a partir da equação ajustada aos dados do próprio ensaio; “Tensão prev.2” representa os valores previstos a partir da equação ajustada aos dados do ensaio adicional; e “Tensão prev.3” representa os valores previstos com a equação ajustada ao conjunto completo de dados, obtidos no primeiro ensaio (com quatro sensores) e no segundo (com seis sensores).

A Figura 17 evidencia o bom ajuste da relação $L^*-\tau$, permitindo, ainda, constatar que a curva de calibração geral levou a valores estimados de tensão mais próximos aos valores observados do que a curva de calibração geral parcial obtida no ensaio adicional. Isso novamente sugere que as curvas de calibração podem não apresentar a desejada estabilidade ao longo do tempo de uso do sensor, uma vez que a presença de dados endógenos levou a uma melhoria

perceptível da eficiência da curva de calibração em prever os valores de tensão da água.

No processo de validação dessas curvas de calibração, os valores de τ obtidos em um ensaio de calibração foram confrontados com os valores de τ estimados usando tanto a curva de calibração geral “parcial”, oriunda de outro ensaio, quanto a curva geral de calibração ampla (Figura 18).

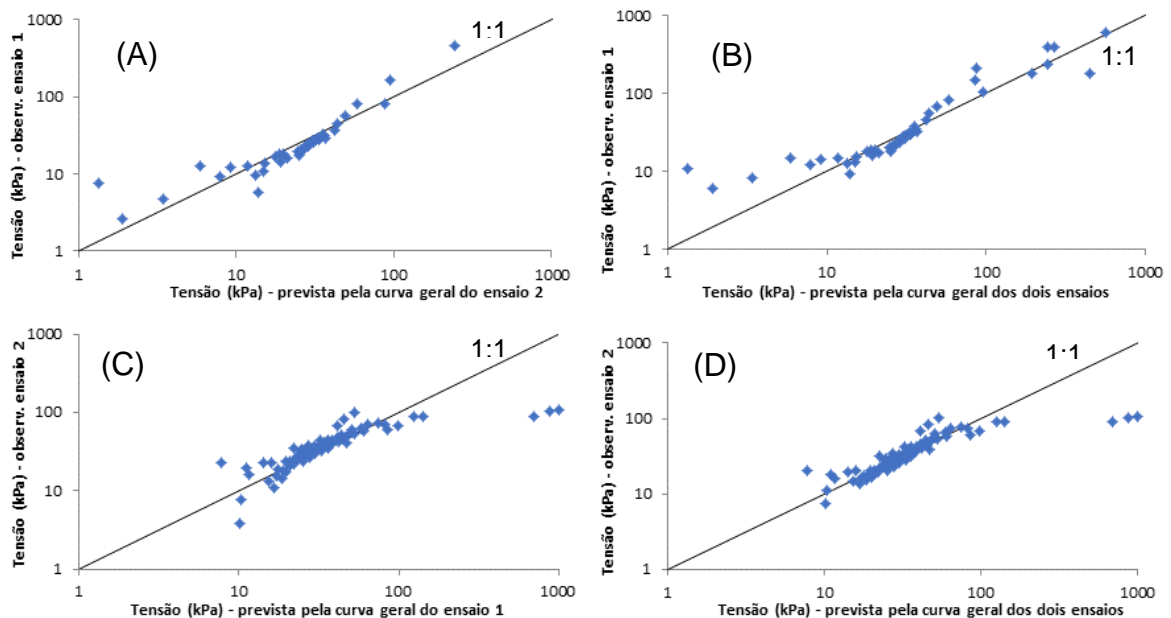


Figura 18. Gráficos de dispersão entre os valores de tensão observados nos sensores nos dois ensaios de calibração (obtidos a partir das umidades dos blocos cerâmicos em questão ao longo dos dois ensaios, com base nas curvas de retenção dos referidos blocos) e os valores previstos a partir tanto das equações de calibração gerais obtidas em ensaios adicionais quanto da equação de calibração geral obtida a partir dados coletados nos dois ensaios: (A) ensaio 1 + curva de calibração geral do ensaio 2; (B) ensaio 1 + curva de calibração geral dos dois ensaios; (C) ensaio 2 + curva de calibração geral do ensaio 1; e (D) ensaio 1 + curva de calibração geral dos dois ensaios.

De acordo com os gráficos da Figura 18, as curvas de calibração levaram a resultados satisfatórios na faixa de tensão 10-100 kPa (Figura 18), estando próximos da linha 1:1, perdendo sua eficiência preditiva para tensões tanto abaixo de 10 kPa quanto acima de 100 kPa.

Finalmente, em relação à umidade dos blocos cerâmicos dos sensores em função da leitura normalizada, pode-se verificar, a partir das Figuras 15 e 17, que:

- (i) quando os blocos dos sensores atingiram a umidade de $0,500 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, correspondente à tensão de 10 kPa (assumida como capacidade de campo), a leitura normalizada foi de cerca de 0,969;
- (ii) quando a umidade dos blocos dos sensores foi de $0,260 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, que representa a ocupação de metade da porosidade do bloco por água e correspondente à tensão de 30 kPa, a leitura normalizada dos sensores foi de cerca de 0,719;
- (iii) quando a umidade dos blocos dos sensores foi de $0,034 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, correspondente à tensão de 100, a leitura normalizada foi de cerca de 0,255; e
- (iv) quando a umidade dos blocos dos sensores foi de $0,013 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, correspondente à tensão de 1500 kPa (assumida como ponto de murcha permanente), a leitura normalizada foi de cerca de 0,020.

Tais informações reforçam que a cerâmica utilizada para a confecção dos sensores tem sua funcionalidade restrita à faixa de tensão previamente mencionada, de 0-100 kPa.

4.4 Ensaios para teste de funcionamento dos sensores

Os valores de umidade volumétrica (θ) e de tensão da água (τ) no solo durante a condução do primeiro ensaio em vasos, utilizando material do horizonte A do Argissolo Vermelho (PV), estão apresentados na Figura 19. Enquanto os valores de θ foram obtidos por pesagem dos vasos, os de τ foram tanto obtidos a partir da leitura dos tensiômetros quanto calculados com base nos valores de θ a partir da curva de retenção de água (CRA) representada pela equação 8.

A umidade variou de $0,420 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, estabelecida inicialmente, até $0,077 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, no 11º dia, quando o ciclo de secagem foi encerrado e o reumedecimento foi iniciado, estendendo-se até atingir a umidade de $0,232 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, no 21º dia.

No período inicial a tensão obtida a partir da CRA foi pouco variável, levando seis dias para que a tensão fosse de 1,1 kPa a 8,4 kPa. Neste mesmo período a umidade volumétrica inicial era de $0,420 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e foi até $0,235 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. À medida que o solo foi ficando mais seco a tensão começou a aumentar mais rapidamente, levando apenas mais cinco dias para atingir o ponto de murcha permanente (1500 kPa), com umidade de $0,118 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, totalizando 11 dias para que ocorresse a secagem.

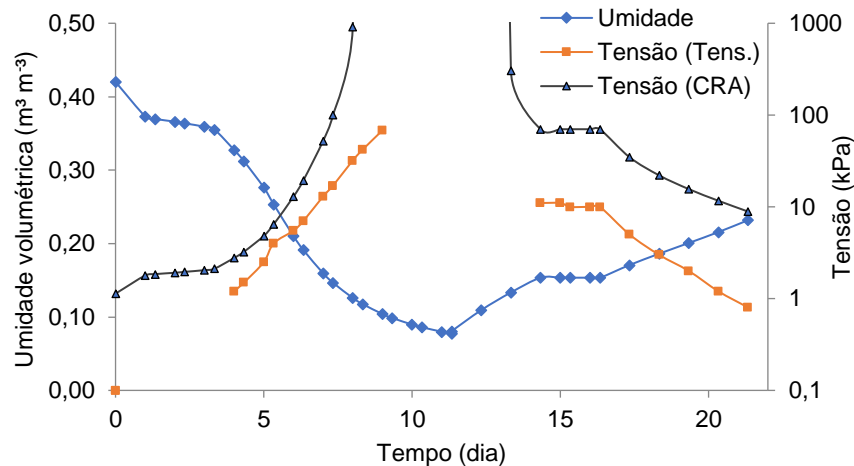


Figura 19. Umidade e tensão no ensaio do Argissolo Vermelho (PV). “Tensão (Tens.)” é a tensão obtida através do tensiômetro. “Tensão (CRA)” é a tensão obtida através da curva de retenção de água.

Em relação à tensão medida a partir do tensiômetro, apenas no 4º dia foram obtidas valores diferentes de zero, sendo necessários, no total, nove dias para que o mesmo atingisse seu limite de funcionamento (70 kPa). A secagem rápida do solo está diretamente relacionada com o ventilador que foi acionado, ainda que em velocidade mínima, durante todo esse período.

Para a etapa de reumedecimento do solo PV foi necessária a aplicação de cerca de 30 gramas de água todas as tardes, por 10 dias, fazendo que a tensão variasse de 1500 kPa a 6,8 kPa e a umidade de $0,118 m^3 m^{-3}$ a $0,250 m^3 m^{-3}$, respectivamente (Figura 19).

No segundo ensaio, em que foi utilizado material do horizonte A do Argissolo Amarelo (PA), a dinâmica dos processos de umedecimento e secagem foi muito semelhante à do primeiro ensaio (Figura 20).

Para o solo PA, uma maior quantidade de dias foi necessária para que ocorresse a secagem, pelo fato de o ventilador ser acionado apenas durante o dia. No período da noite o ventilador foi desligado, e o vaso foi coberto com um saco plástico, a fim de evitar a evaporação do solo, e para que ocorresse uma completa distribuição da água. A umidade variou de $0,393 m^3 m^{-3}$, estabelecida inicialmente, até $0,087 m^3 m^{-3}$, no 17º dia, quando o ciclo de reumedecimento foi iniciado, estendendo-se até atingir a umidade de $0,184 m^3 m^{-3}$, no 25º dia.

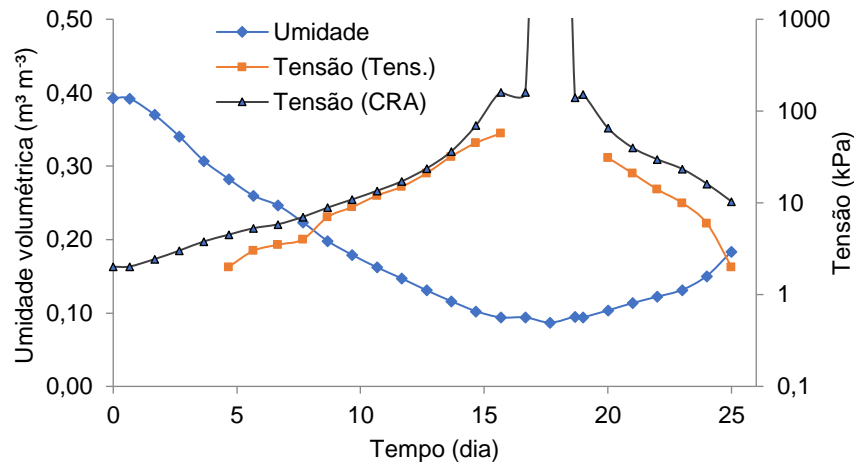


Figura 20: Umidade e tensão no ensaio do Argissolo Amarelo (PA). “Tensão (Tens.)” é a tensão obtida através do tensiômetro. “Tensão (CRA)” é a tensão obtida através da curva de retenção de água.

No período inicial, nove dias foram necessários para que a tensão obtida a partir da na CRA fosse de 2,0 kPa a 10,9 kPa. Neste mesmo período a umidade volumétrica inicial era de $0,393 m^3 m^{-3}$ e foi até $0,179 m^3 m^{-3}$. Para o solo atingir o ponto de murcha permanente foram necessários mais oito dias, apresentando a umidade de $0,087 m^3 m^{-3}$, totalizando 17 dias para que ocorresse a secagem. Quanto à tensão medida com o tensiômetro, os valores se tornaram diferentes de zero apenas no 5º dia, sendo necessários, no total, 16 dias para que seu limite de funcionamento fosse atingido.

Na etapa de reumedecimento do solo PA também foram adicionados, aproximadamente, 30 gramas de água todas as tardes, por oito dias, fazendo com que a tensão variasse de 1500 kPa a 10,3 kPa e a umidade de $0,087 m^3 m^{-3}$ a $0,184 m^3 m^{-3}$, respectivamente (Figura 21).

Na Figura 21 pode-se observar a leitura normatizada dos sensores no período de secagem dos dois solos, PV e PA. Nos dias iniciais, em que há pouca variação da tensão, os sensores tenderam a se manter estáveis, apresentando valores de leitura próximos a 1. À medida que o solo foi secando a leitura normatizada dos sensores foi diminuindo, chegando próximo a 0,2, comprovando a funcionalidade do sensor em relação à percepção ao conteúdo de água presente no solo para tensões acima de 10 kPa.

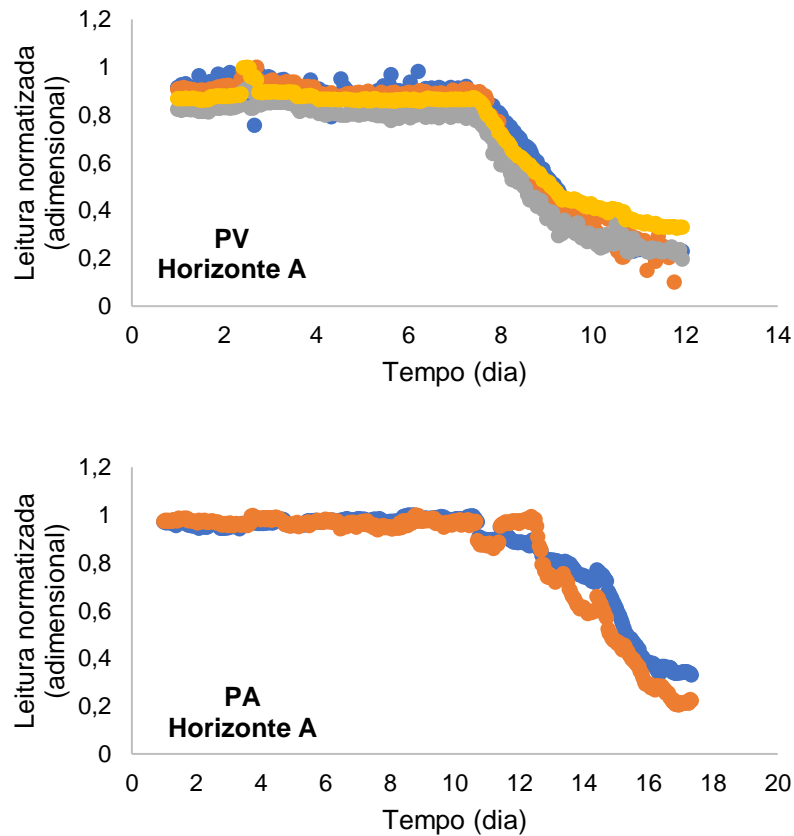


Figura 21: Leitura normalizada dos sensores no Argissolo Vermelho (PV) e no Argissolo Amarelo (PA), no período de secagem.

Processo semelhante à secagem ocorreu, só que de forma inversa, no período de umedecimento (Figura 22). No momento em que os solos estavam secos, a leitura normalizada estava em torno de 0,2. À medida que água ia sendo adicionada, a leitura ia se elevando, atingindo seu pico em torno de 1.

Silva (2015) construiu e calibrou um sensor de fluxo de seiva para o meloeiro, usando o método de dissipação térmica, percebendo que os fluxos de seiva estimados pelos sensores construídos apresentaram valores próximos da transpiração da cultura, indicando que os sensores eram adequados para a medição do fluxo de seiva. Ramos e Andrade (2016) desenvolveram e calibraram uma central de monitoramento de consumo de energia elétrica e de água utilizando o microcontrolador Arduino, concluindo que o sensor consegue fazer as medidas com a precisão requerida.

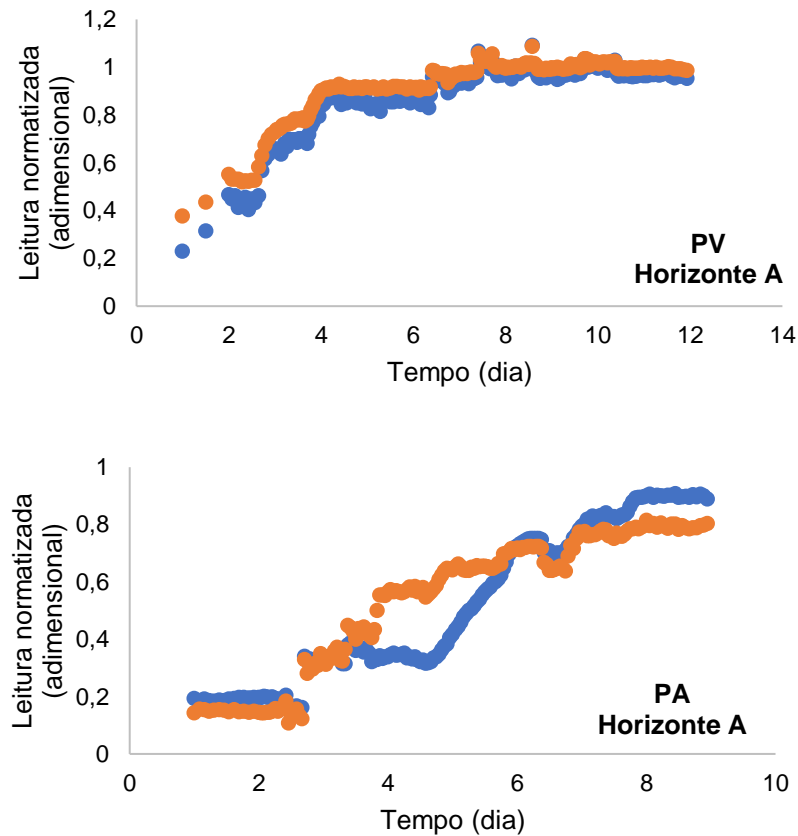


Figura 22: Leitura normalizada dos sensores no Argissolo Vermelho (PV) e no Argissolo Amarelo (PA), no período de umedecimento.

Os valores de tensão da água (τ) na fase de secagem do material do horizonte A do Argissolo Vermelho (PV), obtidos a partir das leituras normalizadas dos sensores usando as equações geral e específica anteriormente descritas, estão apresentados nas Figuras 23 e 24. Nessas Figuras constam também os valores de τ obtidos a partir da CRA e lidos no tensiômetro. Em todos os casos, como esperado, os valores de τ aumentaram com a secagem do solo.

Os resultados de tensão (τ) advindos dos sensores foram confrontados com os obtidos a partir da CRA e das leituras do tensiômetro (Figuras 25 e 26). Os sensores forneceram valores de τ semelhantes aos da CRA apenas em tensões próximas a 20 kPa, produzindo valores superestimados abaixo e subestimados acima dessa tensão (Figuras 25A e 26A). Assim, tomando como verdadeiros os valores de τ da CRA, a curva de calibração dos sensores obtida no laboratório deve ser admitida como inadequada, pois não retornou valores aceitáveis, próximos da linha 1:1. Comparativamente aos valores de τ lidos no tensiômetro, os sensores retornaram valores de τ semelhantes apenas na faixa

de tensão entre 30 e 70 kPa (limite de funcionamento do tensiômetro), produzindo valores superestimados abaixo dessa faixa (Figuras 25B e 26B). Também nesse caso, tomando como verdadeiros os valores de τ do tensiômetro, a curva de calibração dos sensores obtida no laboratório deve ser admitida como inadequada, pois retornou valores aceitáveis, próximos da linha 1:1, apenas para uma estreita faixa de tensão.

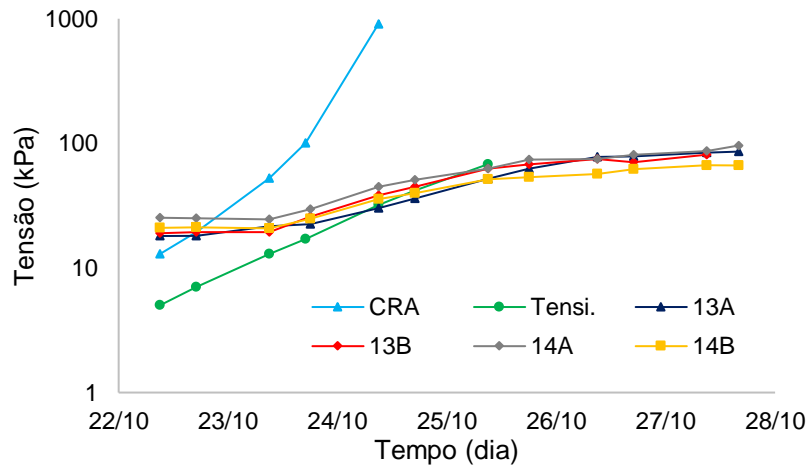


Figura 23. Tensões da água obtidas a partir dos sensores, usando curvas de calibração específicas, da CRA e do tensiômetro para o ensaio do Argissolo Vermelho (PV) na fase de secagem.

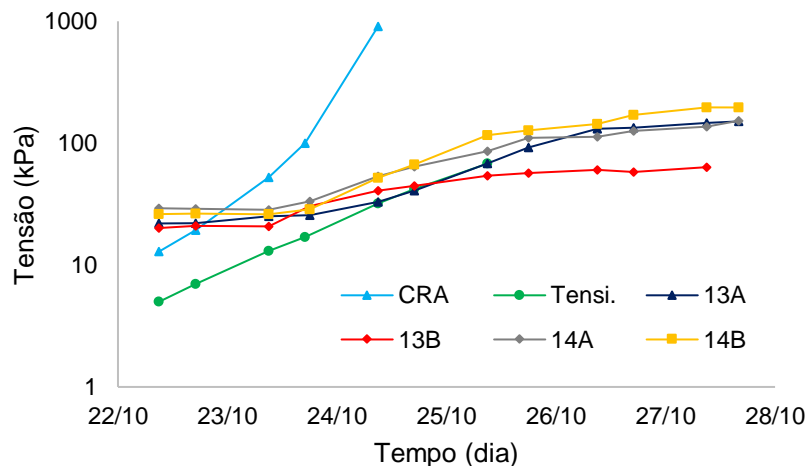


Figura 24. Tensões da água obtidas a partir dos sensores, usando a curva de calibração geral, da CRA e do tensiômetro para o ensaio do Argissolo Vermelho (PV) na fase de secagem.

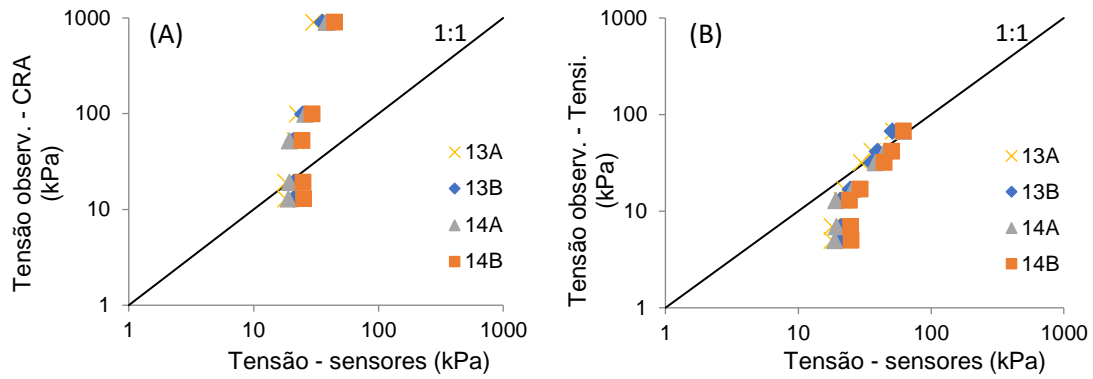


Figura 25. Relação entre as tensões obtidas pelos sensores usando equações de calibração específicas e as obtidas pela CRA (A) e pelo tensiômetro (B), no ensaio do Argissolo Vermelho (PV), na fase de secagem.

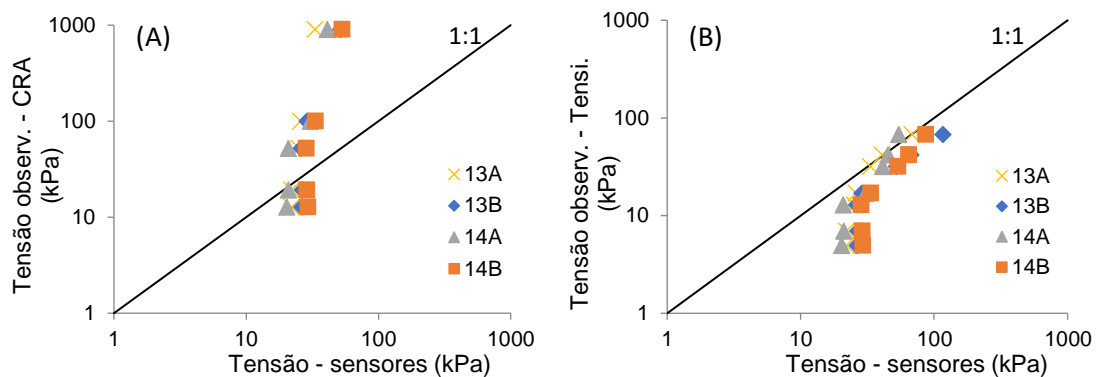


Figura 26. Relação entre as tensões obtidas pelos sensores usando a equação de calibração geral e as obtidas pela CRA (A) e pelo tensiômetro (B), no ensaio do Argissolo Vermelho (PV), na fase de secagem.

A discrepância entre os resultados obtidos com os sensores e com a CRA, principalmente, pode estar diretamente associada ao desenho do ensaio, pois enquanto o valor obtido do sensor representa o pequeno volume de solo de seu entorno, o valor obtido da CRA é reflexo da umidade média do vaso. Além disso, no manuseio do ensaio com o Argissolo Vermelho um ventilador foi acionado durante todo o período, fazendo com que a secagem ocorresse de modo mais rápido, ampliando a discrepância entre as duas formas de medição. Idealmente, a utilização de medidas tomadas em condição de equilíbrio poderia reduzir a divergência entre os valores de tensão detectados pelos sensores e os obtidos a partir da umidade média do solo no vaso. Diene (2004), ao desenvolver novos tensiômetros que permitem medição de valores elevados de sucção, percebeu que a movimentação do ar provida de um ventilador provocou uma aceleração no processo de secagem do solo, causando variação nos resultados.

Os resultados referentes à fase de secagem do ensaio com o material do horizonte A do Argissolo Amarelo (PA) na fase de secagem estão apresentados nas Figuras 27 e 28. Nessas Figuras constam os valores de tensão da água (τ) obtidos das leituras normatizadas dos sensores, usando as equações geral e específicas, obtidos a partir da CRA e lidos diretamente no tensiômetro.

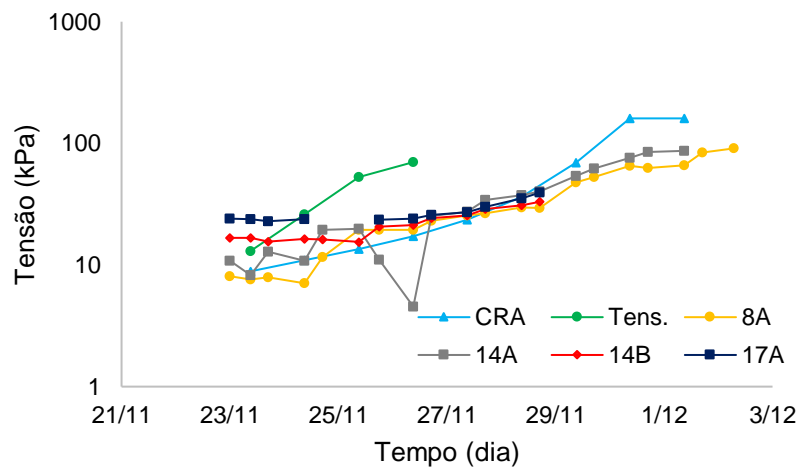


Figura 27. Tensões da água obtidas a partir dos sensores, usando curvas de calibração específicas, da CRA e do tensiômetro para o ensaio do Argissolo Amarelo (PA) na fase de secagem.

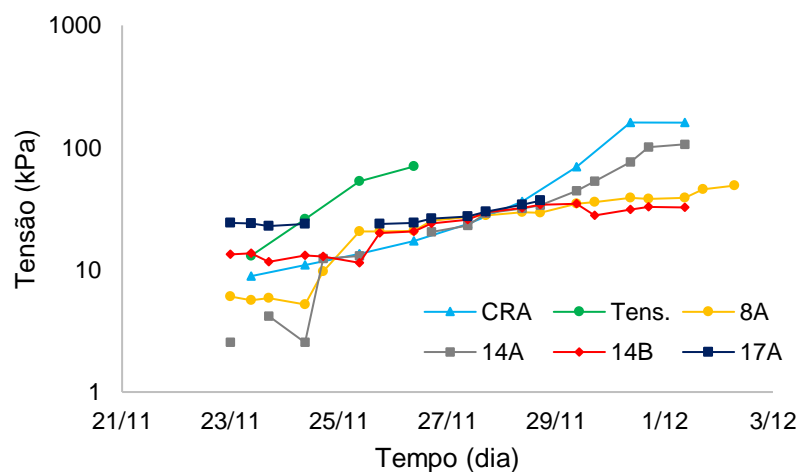


Figura 28. Tensões da água obtidas a partir dos sensores, usando a curva de calibração geral, da CRA e do tensiômetro para o ensaio do Argissolo Amarelo (PA) na fase de secagem.

Para o Argissolo Amarelo, o confronto dos resultados de tensão (τ) dos sensores com os obtidos a partir da CRA e das leituras do tensiômetro constam nas Figuras 29 e 30. Quando comparados com a tensão obtida a partir da CRA, os valores de τ advindos dos sensores apresentaram uma boa relação para

tensões abaixo de 50 kPa, passando próximos da linha 1:1, e subestimando os valores de tensão na faixa entre 50 a 150 kPa (Figuras 29A e 30A). Essa substancial melhora nos resultados obtidos para o Argissolo Amarelo, quando comparados aos do ensaio com o Argissolo Vermelho, pode ser explicada pelo fato de que durante a secagem o ventilador era desligado no período noturno, e os vasos eram cobertos com sacos plásticos. Tal alteração de procedimento permite que ocorra uma melhor distribuição da água nos vasos e, conseqüentemente, que a melhor leitura dos sensores seja feita em uma condição mais próxima do equilíbrio, reduzindo a divergência entre os valores de tensão detectados pelos sensores e a partir da umidade média do solo no vaso.

Já, quando comparados à tensão lida no tensiômetro, os valores de τ dos sensores apresentaram uma relação precária, havendo alguns poucos pontos próximos da linha 1:1 na faixa de tensão entre 10 e 20 kPa, com os sensores tendendo a subestimar os valores de tensão acima dessa faixa (Figuras 29B e 30B). Isso pode ser explicado pelo fato do Argissolo Amarelo possuir maior teor de areia quando comparado ao Argissolo Vermelho, o que faz sua condutividade hidráulica sofrer decréscimo mais acentuado com a secagem do solo e dificultar o equilíbrio hidráulico entre o solo e a cápsula porosa do tensiômetro. Segundo Hansen e Pasian (1999), em solos com maior percentual de areia tal equilíbrio é mais difícil de ser conseguido devido ao contato insuficiente da cápsula com o solo, fazendo com que possam ocorrer erros de leitura.

Em qualquer dos casos, seja tomando como verdadeiros os valores de τ obtidos da CRA, seja os lidos diretamente no tensiômetro, as curvas de calibração obtidas no laboratório para os sensores não se mostraram muito eficientes em produzir valores sistematicamente próximos à linha 1:1. Isso sugere, conforme inferido a partir dos resultados da validação cruzada apresentada no item anterior, que as curvas de calibração podem não ser estáveis ao longo do tempo, demandando a condução de estudos específicos para tal avaliação.

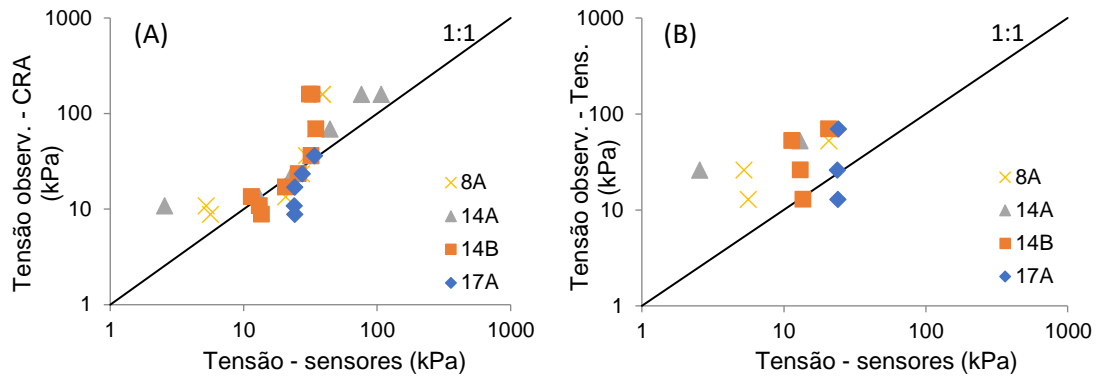


Figura 29. Relação entre as tensões obtidas pelos sensores usando equações de calibração específicas e as obtidas pela CRA (A) e pelo tensiômetro (B), no ensaio do Argissolo Amarelo (PA), na fase de secagem.

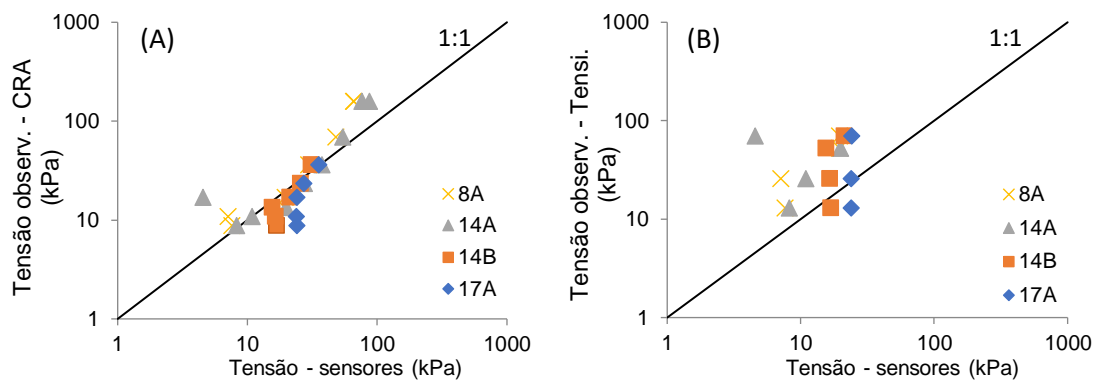


Figura 30. Relação entre as tensões obtidas pelos sensores usando a equação geral e as obtidas pela CRA (A) e pelo tensiômetro (B) no ensaio do Argissolo Amarelo (PA), na fase de secagem.

Por outro lado, tanto no ensaio com o Argissolo Vermelho quanto no ensaio com o Argissolo Amarelo, a comparação dos resultados obtidos usando as equações específicas com os obtidos usando uma equação geral não evidenciou diferenças perceptíveis. Embora ambas as opções possam ser utilizadas, tal resultado sugere que a leitura normalizada pode ser convertida em tensão da água a partir da equação geral, o que facilita o uso dos sensores.

Na fase de umedecimento, os valores de tensão da água (τ) para o material do horizonte A do Argissolo Vermelho (PV), tanto obtidos a partir das leituras normalizadas dos sensores, usando as equações geral e específicas, quanto obtidos a partir da CRA, estão apresentados nas Figuras 31 e 32. Nessas, como esperado, os valores de τ diminuíram com o umedecimento do solo. Quanto ao tensiômetro, embora tenha sido acionado quando a umidade do solo estava alta o suficiente para viabilizar seu funcionamento, seus dados não puderam ser utilizados, pois não foram compatíveis (crescentes) com o aumento da umidade.

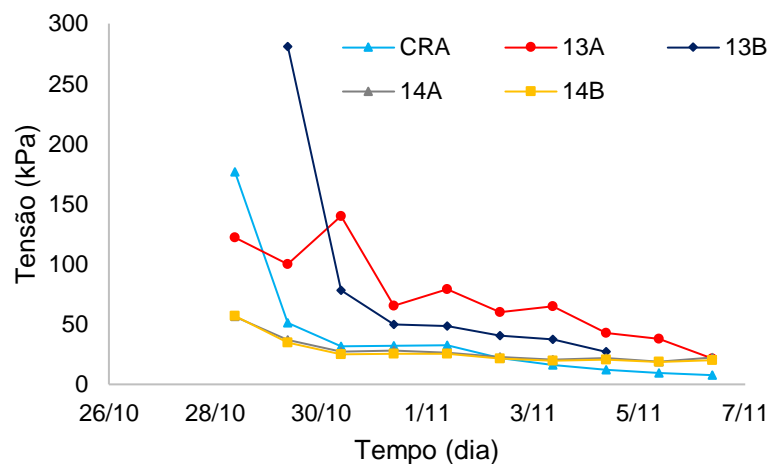


Figura 31. Tensões da água obtidas a partir dos sensores, usando curvas de calibração específicas, e da CRA, para o ensaio do Argissolo Vermelho (PV), na fase de umedecimento.

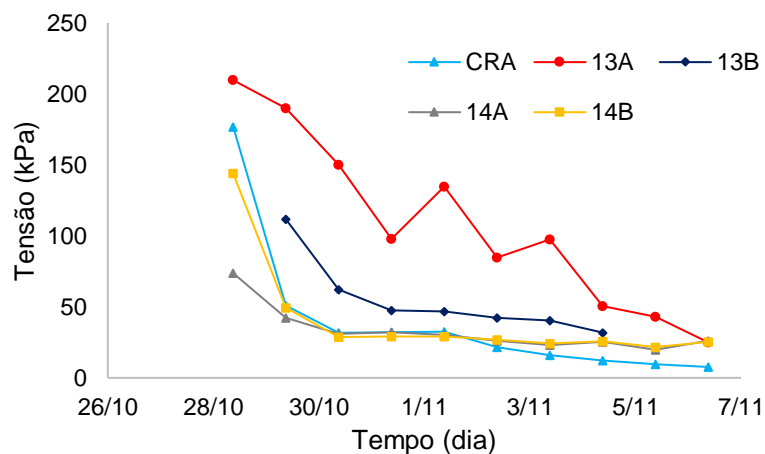


Figura 32. Tensões da água obtidas a partir dos sensores, usando a curva de calibração geral, e da CRA, para o ensaio do Argissolo Vermelho (PV), na fase de umedecimento.

Os resultados de tensão obtidos pelos sensores foram confrontados com as tensões da CRA do Argissolo Vermelho, podendo-se verificar que os sensores 14A e 14B apresentaram uma boa relação, estando próximos à linha 1:1, enquanto os sensores 13A e 13B mostraram-se mais divergentes, afastados da linha 1:1 (Figura 33). Os resultados foram semelhantes tanto utilizando a equação geral como a equação específica. Ainda que possam ser considerados insatisfatórios, tais resultados da fase de umedecimento refletem uma melhora significativa em relação aos resultados obtidos na fase de secagem. Isso deve estar associado ao fato de que nesta etapa os vasos foram tampados, impedindo

que a água adicionada fosse em parte perdida por evaporação e permitindo sua melhor distribuição no solo e, assim, facilitando a leitura dos sensores. Ressalte-se que essa melhora ocorreu a despeito de eventuais contribuições à discrepância entre tais dados que poderiam decorrer do fenômeno de histerese entre os processos de umedecimento, imposto nessa etapa aos vasos, e o de secagem, adotado para a confecção da CRA.

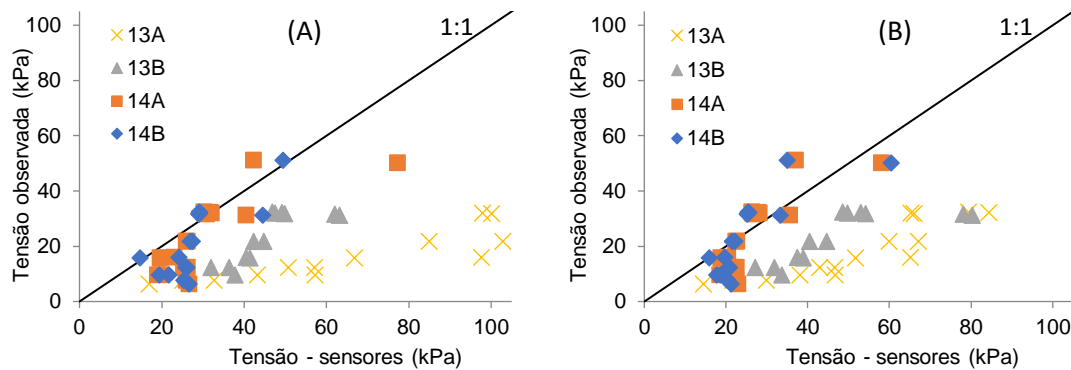


Figura 33. Relação entre as tensões obtidas pelos sensores, usando as equações específicas (A) e a geral (B), e as tensões obtidas pela CRA no ensaio do Argissolo Vermelho (PV) na fase de umedecimento.

Já para o material do horizonte A do Argissolo Amarelo (PA), também na fase de umedecimento, os valores de tensão da água (τ) obtidos a partir tanto das leituras normatizadas dos sensores, usando as equações geral e específicas, quanto da CRA, estão apresentados nas Figuras 34 e 35.

Quando comparados os resultados dos sensores com os obtidos da CRA do Argissolo Amarelo, pôde-se verificar que para tensões abaixo de 50 kPa os valores apresentaram uma boa relação, passando próximos da linha 1:1 (Figura 36). Para a faixa de tensão entre 50 e 150 kPa, por outro lado, os sensores tenderam a produzir valores que subestimam a tensão admitida como verdadeira, advinda da CRA. De modo semelhante à fase de secagem, tais constatações se aplicam tanto aos dados obtidos com as equações específicas quanto aos obtidos com a equação geral.

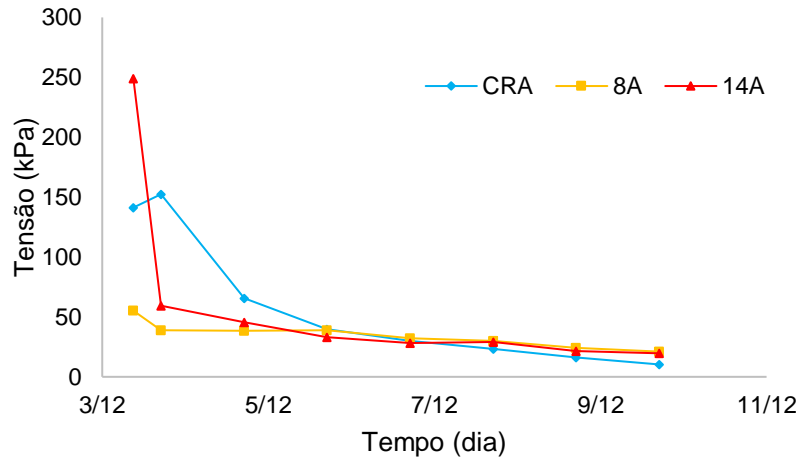


Figura 34. Tensões da água obtidas a partir dos sensores, usando curvas de calibração específicas, e da CRA, para o ensaio do Argissolo Amarelo (PA), na fase de umedecimento.

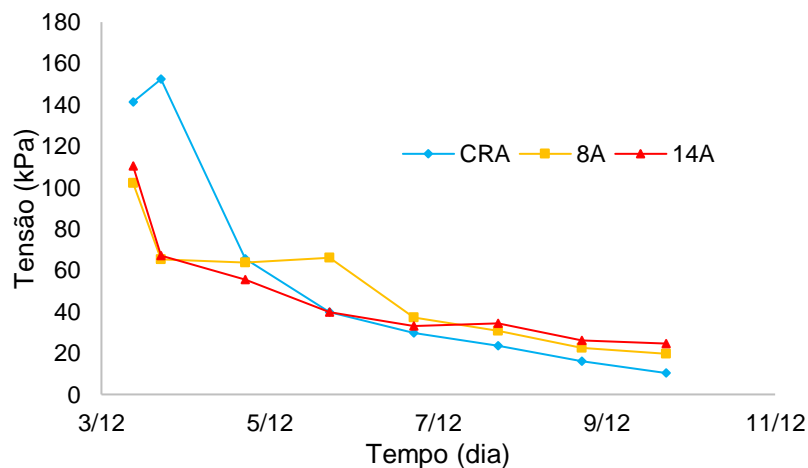


Figura 35. Tensões da água obtidas a partir dos sensores, usando a curva de calibração geral, e da CRA, para o ensaio do Argissolo Amarelo (PA) na fase de umedecimento.

Comparativamente aos resultados obtidos para o horizonte A do Argissolo Amarelo na fase de secagem (Figuras 29A e 30A), nos resultados da fase de umedecimento mostram maior proximidade da linha 1:1. Essa ligeira melhora pode estar relacionada ao fato de que o tempo de fechamento do vaso para a redistribuição da água era menor no caso anterior, de até 16 horas, enquanto no presente caso esse tempo era menor, de até 24 h. Isso permite, como consequência, que a leitura dos sensores seja feita em uma condição mais próxima do equilíbrio, reduzindo a divergência entre os valores de tensão detectados pelos sensores e os obtidos pela CRA a partir da umidade média do solo no vaso.

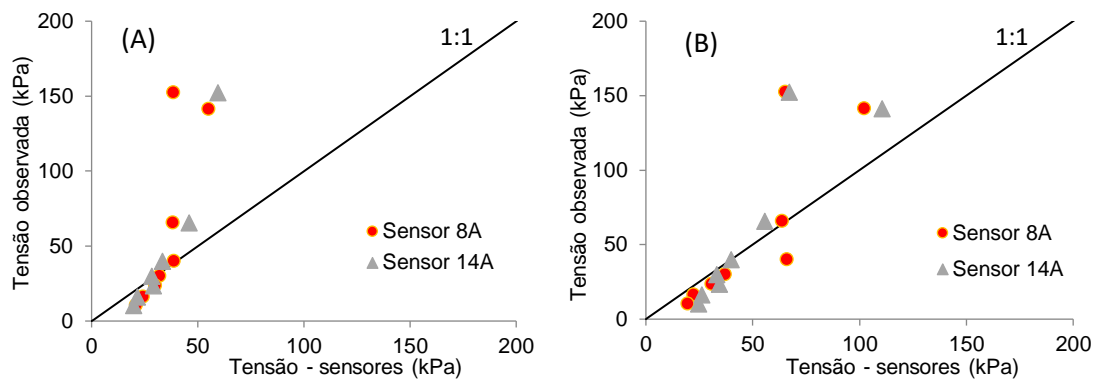


Figura 36. Relação entre as tensões obtidas pelos sensores, usando as equações específicas (A) e a geral (B), e as tensões obtidas pela CRA no ensaio do Argissolo Amarelo (PA) na fase de umedecimento.

Apesar de, em alguns casos, os sensores produzirem valores de tensão próximos aos obtidos com a CRA e/ou com o tensiômetro, no contexto geral os resultados não foram satisfatórios. Diante disto, buscou-se obter curvas de calibração mais funcionais a partir dos dados do próprio ensaio. Assim, nas Figuras 37 e 40 estão apresentadas essas novas curvas de calibração, obtidas para cada sensor, e o gráfico de dispersão entre as tensões obtidas pelos sensores e a tensão da CRA, para os dois ensaios, tanto na secagem como no umedecimento.

Comparando-se os gráficos de dispersão produzidos usando as curvas de calibração produzidas previamente aos ensaios e os produzidos usando as curvas de calibração produzidas durante os ensaios, representativos das mesmas situações, dois a dois (Figura 25A x Figura 37B; Figura 29A x Figura 38B; Figura 33A x Figura 39B; e Figura 36A x Figura 40B), verifica-se que houve melhora expressiva da capacidade dos sensores para produzir valores de tensão da água mais condizentes com os calculados pela CRA. Todavia, pode-se verificar que para o Argissolo Amarelo a melhora na previsão das tensões foi mais expressiva, possivelmente por esse solo possuir uma maior quantidade de dados na faixa sensível dos sensores tanto na secagem como no umedecimento. Entretanto, para o Argissolo Vermelho, em particular na fase de secagem, apesar da citada melhora, este solo ainda continuou apresentando valores discrepantes e isso provavelmente ocorreu pelo fato de possuir poucos dados na faixa em que o sensor se mostra sensível. Uma das soluções para a resolução desse problema

seria a utilização de uma pedra porosa que possua uma maior faixa de medição, abrangendo valores abaixo de 10 kPa e acima de 100 kPa.

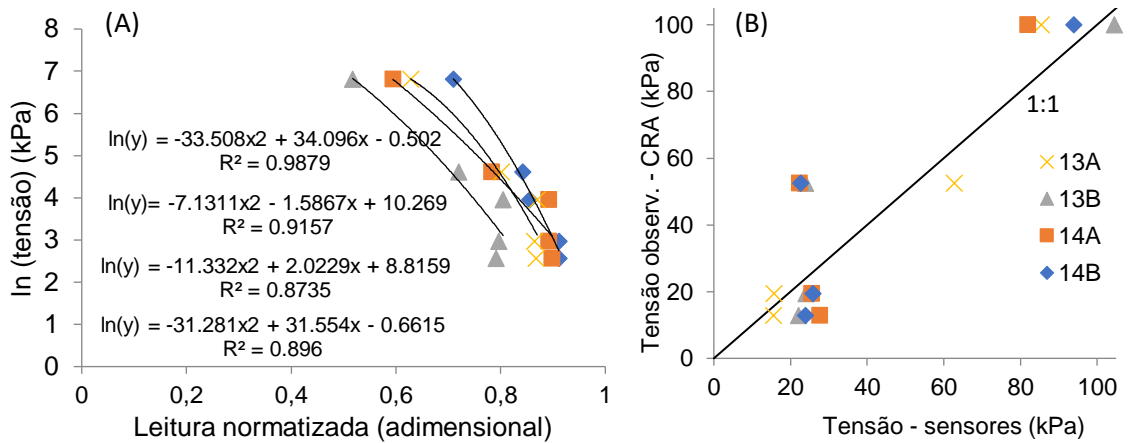


Figura 37. (A) Curvas de calibração obtidas a partir dos dados do próprio ensaio do Argissolo Vermelho, na fase de secagem, para os sensores 13A, 13B, 14A, 14B; e (B) Relação entre as tensões obtidas pelos sensores, usando as equações específicas, e as tensões obtidas pela CRA.

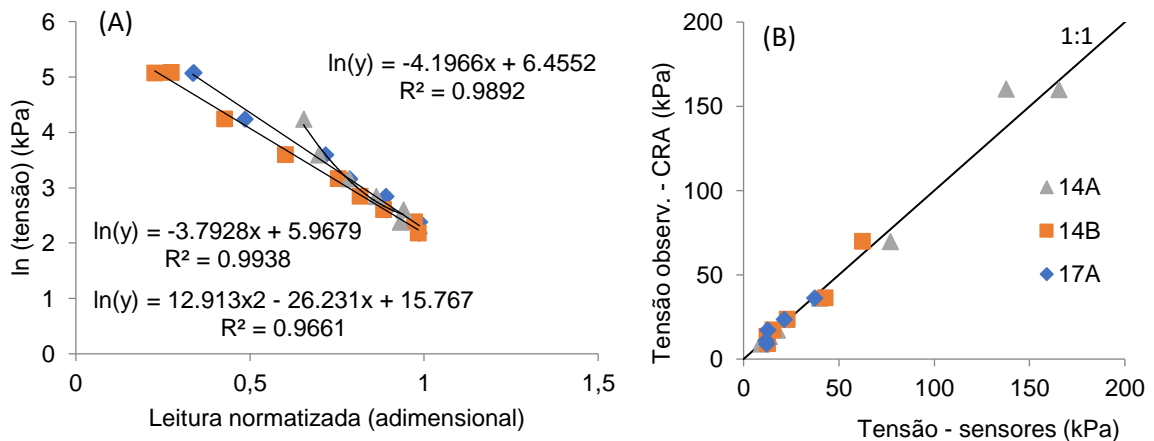


Figura 38. (A) Curvas de calibração obtidas a partir dos dados do próprio ensaio do Argissolo Amarelo, na fase de secagem, para os sensores 14A, 14B e 17A; e (B) Relação entre as tensões obtidas pelos sensores, usando as equações específicas, e as tensões obtidas pela CRA.

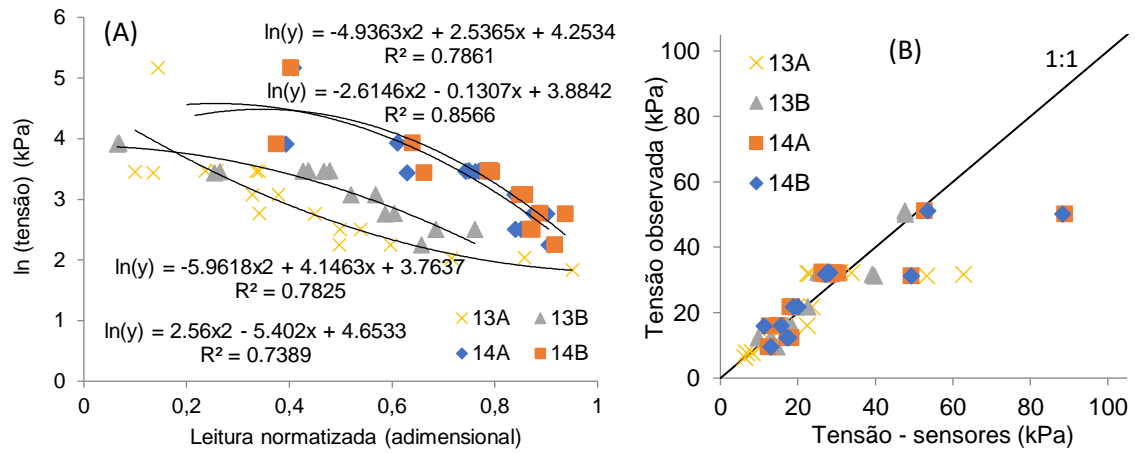


Figura 39. (A) Curvas de calibração obtidas a partir dos dados do próprio ensaio do Argissolo Vermelho, na fase de umedecimento, para os sensores 13A, 13B, 14A, 14B; e (B) Relação entre as tensões obtidas pelos sensores, usando as equações específicas, e as tensões obtidas pela CRA.

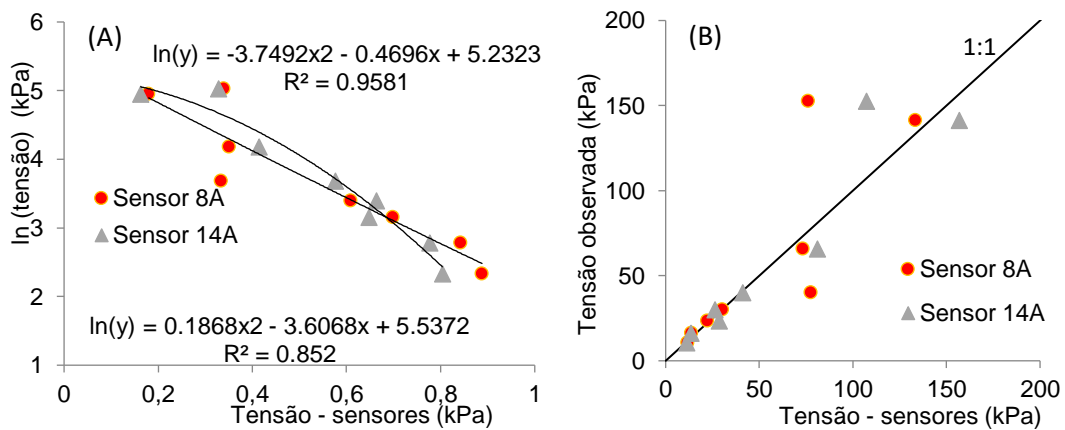


Figura 40. (A) Curvas de calibração obtidas a partir dos dados do próprio ensaio do Argissolo Amarelo, na fase de umedecimento, para os sensores 8A, 14A; e (B) Relação entre as tensões obtidas pelos sensores, usando as equações específicas, e as tensões obtidas pela CRA.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

A tensão da água no solo é um importante indicador da disponibilidade de água para as plantas. O trabalho apresentou como objetivo desenvolver e calibrar um sensor da tensão de água no solo cuja medição se baseia na dissipação de calor em uma matriz porosa em contato com o solo, dando subsídios para suprir a demanda de possíveis usuários por um produto acessível e de baixo custo. A partir do trabalho foi possível concluir que:

- Os blocos cerâmicos usados para a confecção dos sensores estabeleceram íntimo equilíbrio hidráulico com os solos avaliados, pois sua presença no interior das amostras não promoveu alterações nas curvas de retenção de água (CRA);
- O Cambissolo Háplico não forneceu dados apropriados para a obtenção da CRA dos blocos;
- As CRA dos blocos obtidas nos Argissolos revelaram que entre as tensões 10 e 100 kPa houve uma variação de umidade relativa de 88,6%, permitindo concluir que a cerâmica avaliada é adequada para fabricação de sensores hídricos para essa faixa de tensão;

- Foi possível detectar a mudança no conteúdo de água pela leitura normalizada do sensor, e converter em tensão pelo modelo de calibração.
- Os resultados mostraram que o equipamento é sensível às variações de conteúdo de água nos solos, permitindo que a tensão da água seja estimada a partir da leitura normalizada do sensor. No entanto, as curvas de calibração obtidas previamente produziram valores de tensão divergentes em relação tanto aos medidos com o tensiômetro quanto aos obtidos a partir da CRA.
- Novas curvas de calibração foram estimadas a partir dos dados coletados nos próprios ensaios de validação, o que evidencia a necessidade de novos estudos, seja para que a obtenção de curvas de calibração funcionais e estáveis, seja para a readequação de aspectos construtivos do sensor proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, F., Javaux, M., Vanclooster, M., Feyen, J. (2012) Estimating hysteresis in the soil water retention curve from monolith experiments. *Geoderma*, 189-190:480-490. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.06.013>
- Abellana, J.V., Pachepskyb, Y., Gonzalo Martinezc, G. (2018) Obtaining soil hydraulic parameters from soil water content data assimilation under different climatic/soil conditions. *Catena*, 163:311-320.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998) *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome, IT: FAO. 328p. (FAO. Irrigation and Drainage Papers, 56).
- Al Majou, H., Bruand, A., Duval, O., Cousin, I. (2008) Prediction of soil water retention properties after stratification by combining texture, bulk density and the type of horizon. *Soil Use Manage*, 24:383-391.
- Alvarenga, C.C.; Mello, C.R de; Mello, J.M. de; Silva, A.M. da; Curi, N. (2012) Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQSRA) na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, 36 (5):1608-1619.
- Amaral, C.O., Araújo, M.S.P., Sousa, E.F., Oliveira, F.G., Marciano, C.R. (2019) calibração de equipamento de TDR em condições de laboratório e campo para dois tipos de tubos de acesso. *Revista Engenharia na Agricultura*, 27 (6):574-582. <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i6.8091>.

- Andersson, S., Wiklert, P. (1972) Om de vattenhållande egenskaperna hos svenska jordarter (Water-holding properties of Swedish soils). *Grundförbättring*, 25:53-143.
- Andrade, C.L.T., Coelho, E.F., Couto, L., Silva, E.L. (1998) Parâmetros de solo-água para a engenharia de irrigação e ambiental. *In: Congresso brasileiro de engenharia agrícola*, 27., Poços de Caldas. Lavras: UFLA-SBEA, p. 1-45.
- Andrade, C.L.T., Borges júnior, J.C.F., Couto, L. (2008) Características físico-hídricas e dinâmica de água no solo. *In: Albuquerque, P.E.P., Durães, F.O.M. (Ed.). Uso e manejo de irrigação*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 71-149.
- Arduino (2021) Arduino Home Page. Disponível em: <<https://www.arduino.cc>> Acesso em: 17 de junho 2021.
- Arya, L.M., Paris, J.F. (1981) A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 45:1023-1030.
- Assouline, S., Or, D. (2014) The concept of field capacity revisited: Defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. *Water Resources Research*, 50:4787-4802. <https://doi.org/10.1002/2014WR015475>
- Azevedo, P.V.; Sousa, I.F.; Silva, B.B.; Silva, V.P.R. (2006) Water-use efficiency of dwarf-green coconut (*Cocos nucifera* L.) orchards in northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, 84:259-264.
- Bernardo, S., Soares, A.A., Mantovani, E.C. (2006) *Manual de irrigação*. 8.ed. Viçosa: Ed. UFV. 625p.
- Beutler, A.N., Centurion, J.F., Souza Z.M., Andrioli, I., Roque, C.G. (2002) Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, 26:829-834. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000300029>
- Bloodworth, M.E., Page J.B. (1957) Use of thermister for the measurement of soil moisture and temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 21:11-15.
- Blume, T. et al. (2009) Use soil moisture dynamics and patterns at different spatio-temporal scales for the investigation of subsurface flow processes. *Hydrology and Earth System Sciences*. 13:1215-1234
- Burdine, N.T. (1953) Relative permeability calculations from pore size distribution data. *J Petrol Technol*. 5:71-78. <https://doi.org/10.2118/225-G>
- Calbo, A.G., Silva, W.L.C. (2005) *Sistema Irrigas para manejo de irrigação: fundamentos, aplicações e desenvolvimentos*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Hortaliças, Brasília. 174p.

- Calbo, A.G., Silva, W.L.C. (2006) Gaseous irrigation control system: descriptions and physical tests for performance assessment. *Bragantia*, 65 (3):501-510.
- Calbo, A.G., Silva, H.R., Marouelli, W.A., Silva, W.L.C. (2008) Manejo de irrigação com sensores de cápsula porosa permeados por ar – Irrigas *In: Taller internacional red riegos cyted*, Florianópolis. Cyted: procisur. 12 p. 1 CD-ROM.
- Campbell, G.S., Mulla, D.J. (1990) Measurement of soil water content and potential. *In: Stewart, B. A., Nielsen, D.R. (Ed.). Irrigation of agricultural crops*. Madison: ASA: CSSA: SSSA. p. 127-142.
- Campos, J.H.B.C.; Silva, V. de P.R. da; Azevedo, P.V. de; Borges, C.J.R.; Soares, J.M.; Moura, M.S.B.; Silva, B.B. da (2008) Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12:150-156.
- Carlesso, R. (1995) Absorção de água pelas plantas: Água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. *Ci. Rural*, 25:183-188.
- Corradini, C. (2014) Soil moisture in the development of hydrological processes and its determination at different spatial scales. *J. Hydrol.* 516:1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.051>.
- Couto, L., Sans, L.M.A. (2002) *Características físico-hídricas e disponibilidade de água no solo*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. (Circular técnica, 21).
- Dally, J.W., William, F.R., McConnell, K.G. (1993) *Instrumentation for engineering measurements*. 2 nd ed. New York: John Wiley. 584p.
- deJager, J.M., Charles-Edward, J. (1969) Thermal conductivity probe for soil-moisture determinations. *Journal of Experimental Botany*, 20:46-51.
- Diene, A.A. (2004) *Desenvolvimento de tensiômetros para sucção elevada, ensaiados em lisímetros de laboratório*. Tese de doutorado. UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- Diene, A.A., Mahler, C.F. (2007). Um instrumento para medida de potencial matricial nos solos sem ocorrência de cavitação. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1261-1270.
- Durner, W. (1994) Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30:211-223. <https://doi.org/10.1029/93WR02676>
- Durner, W., Or, D. (2006) Soil Water potential measurement. *Encycl. Hydrol. Sci.* 1089-1102. <https://doi.org/10.1002/0470848944>.

- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997) - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual e Métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 212p.
- Evelt, S.R. (2007) Soil water and monitoring technology. *In: Lascano, R.J., Sojka, R.E. (Ed.). Irrigation of agricultural crops*. 2nd ed. Madison: ASA: CSSA: SSSA. p. 25-84.
- Falleiros, M.C. (1994) *Medida da umidade do solo com sonda de nêutrons*. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Autarquia associada à Universidade de São Paulo, 131p.
- Feng, X., Vico, G., Porporato, A. (2012) On the effects of seasonality on soil water balance and plant growth. *Water Resources Research*. 48:W05543.
- Fredlund, D.G. (1992) Background, theory, and research related to the use of thermal conductivity sensors for matric suction measurement. *In: TOPP, G.C. (Ed.). Advances in measurements of soil physical properties: bringing theory into practice*. Madison: Soil Science Society of America. p.249-261.
- Freire, A.G., Alencar, T.L., Chaves, A.F., Nascimento, I.V., Júnior, R.N.A., Van Lierd, Q.G., Mota, J.C.A. (2018) Comparison of devices for measuring soil matric potential and effects on soil hydraulic functions and related parameters. *Agricultural Water Management*. 209:134-141. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.008>
- Freitas Júnior, E., Silva, E.M. (1984) Uso da centrífuga para a determinação da curva de retenção de água do solo, em uma única operação. *Pesq. Agropec. Bras.*, 19:1423-1428.
- Gaiser, T., Graef, F., Cordeiro, J.C. (2000) Water retention characteristics of soils with contrasting clay mineral composition in semi-arid tropical regions. *Aust. J. Soil Res.*, 38:523-526.
- Garcia, R.F., Queiroz, D.M. de, Miyagaki, O.H., Pinto, F. de A. de C. (2003) Programa computacional para aquisição de dados para avaliação de máquinas agrícolas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7 (2):375-381.
- Garcia, G.M., Pachepsky, Y.A., Vereecken, H. (2014) Effect of soil hydraulic properties on the relationship between the spatial mean and variability of soil moisture. *J. Hydrol.*, 516:154-160.
- Gava, R., da Silva, E.E., Baio, F.H.R. (2016) Calibração de sensor eletrônico de umidade em diferentes texturas de solo. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, 10 (2):154-162.
- Ghanbarian, B., Taslimitehrani, V., Dong, G., Pachepsky, Y.A. (2015) Sample dimensions effect on prediction of soil water retention curve and saturated hydraulic conductivity. *J Hydrol*. 528:127-137. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.024>

- Grohmann, F., Medina, H.P. (1962) Características de umidade dos principais solos do estado de São Paulo. *Bragantia*. 21:285-295. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051962000100018>
- Halbertsma, J.M., Veerman, G.J. (1994) *A new calculation procedure and simple set-up for the evaporation method to determine soil hydraulic functions*. Wageningen: DLO Winand Staring Centre. (Report, 88).
- Hansen, R.C., Pasian, C.C. (1999) Using tensiometers for precision microirrigation of container-grown roses. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, St Joseph, 15:483-490.
- Hasler, N.; Avissar, R. (2007) What controls evapotranspiration in the Amazon basin? *Journal of hydrometeorology*, 8:380-395.
- Heermann, D.F., Martin, D.L., Jackson, R.D., Stegman, E.C. (1990) Irrigation scheduling controls and techniques. In: Stewart, B.A., Nielsen, D.R. (Ed.). *Irrigation of agricultural crops*. Madison: ASA: CSSA: SSSA. p. 509-535. (Agronomy, 30).
- Hillel, D. (2003) *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press, Massachusetts, U.S.A, 494p.
- Hohmann, M. (1997) Soil freezing — the concept of soil water potential. State of the art. *Cold Regions Science & Technology* 25 (2):101-110.
- Hunt, A.G. (2013) Ewing RP, Horton R. What's wrong with soil physics? *Soil Sci Soc Am J*. 77:1877-1887. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.01.0020>
- Irrrometer. (1979) WaterMark Soil Moisture Sensors. Palmyrita Ave, Riverside, CA 92507, 1425.
- Johnston, C.N. (1942) Water permeable jacketed thermal radiators as indicators of field capacity and permanent wilting percentage in soils. *Soil Sci*. 54:123-126.
- Jong van Lier, Q. (2000) Índices de disponibilidade de água para as plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v.1, p.95-106.
- Jong van Lier, Q. (2020) *Física do solo - baseada em processos*. Piracicaba: O autor. 413p.
- Jorge, R.F., Corá, J.E., Barbosa, J.C. (2010) Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um latossolo vermelho eutrófico sob sistema de semeadura direta. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1831-1840.

- Klar, A.E. (1984) *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. São Paulo: Nobel, 408p.
- Klein V.A., Libardi P.L. (2000) Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. *Cienc Rural*. 30:959-964. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782000000600006>
- Klein, V.A. (2008) *Física do Solo* – Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo. 212p.
- Klute A. (1986) Water retention: laboratory methods. *In*: Klute, A. (Ed.) *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2 ed. Pt.1. Madison: *American Society of Agronomy, Soil Society of America*. p. 635-662.
- Köeppen, W. (1948) *Climatologia: com um estúdio de los climas de la tierra*. New Jersey: *Climatology*, 104p.
- Kool, J.B., Parker, J.C. (1987) Development and evaluation of closed form expressions for hysteretic soil hydraulic-properties. *Water Resources Research* 23:105-114.
- Leite, F.P., Barros, N.F., Novais, R.F., Sans, L.M.A., Fabres, A.S. (1999) Relações hídricas em povoamento de eucalipto com diferentes densidades populacionais. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:9-16.
- Letey, J. (1985) Relationship between soil physical proprieties and crop productions. *Advances in Soil Science*, 1:277-294.
- Libardi, P.L. (2010) Água no solo. *In*: Jong van Lier, Q. (Org.). *Física do solo*. Viçosa: *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, p.103-152.
- Marouelli, W.A., Guimarães, T.G. (2006) *Irrigação na cultura da batata*. Itapetininga: Associação Brasileira da Batata: Embrapa Hortaliças, 66 p.
- McRoberts, M. (2011) *Arduíno Básico*. Novatec Editora. São Paulo: Novatec.
- Michelon, C.J., Carlesso, R., Petry, M. T., David, G., Santa, C.D. (2007) Qualidade física de solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, 37 (5):1308-1315
- Moraes, S.O., Libardi, P.L., Dourado Neto, D. (1993) Problemas metodológicos na obtenção da curva de retenção da água pelo solo. *Sci Agric*. 50:383-392. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161993000300010>
- Moraes, J.G.; Marciano, C.R.; Amaral, C.O.; Sousa, E.F. de; Marinho, C.S. (2015) Balanço hídrico e coeficiente de cultura da laranja 'Folha Murcha' no Noroeste Fluminense. *Revista Ciência Agronômica*, 46:241-249.

- Mualem, Y. (1976) A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour Res.* 12:513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>.
- Munoz-Carpena, R., Regalado, C.M., Alvarez-Benedi, J., Bartoli, F. (2002) Field evaluation of the new philipdunne permeameter for mensuring saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci.* 167:9-24. <https://doi.org/10.1097/00010694-200201000-00002>
- Murphy, T.A. (1996) *Sensing the elements: moisture sensors and weather stations*. Souwacs.com, Aug.
- Naime, J.M., Vaz, C.M.P., Macedo, A. (2001) Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray attenuation. *Computers and Electronics in Agriculture*, Amsterdam, 31 (3):295-304.
- Naime, J.M., Shinya, V.T., Vaz, C.M.P. (2004) Programa para estimativa indireta da curva de retenção da água no solo. In: *Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água*, 15. Santa Maria, RS. Anais. Santa Maria: UFSM.
- Navathe, S.B; Elmasri, R. (2004) *Fundamentals of Database Systems*. 4th ed, Pearson Education, Inc.
- Odhiambo, J. J.O., Bomke, A.A. (2007) Cover crop effects on spring soil water content and the implications for cover crop management in south coastal British Columbia. *Agric. Water Manag.*, 88:92-98, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.09.001>.
- Oliveira, I.A. de; Lima, J.R. de S.; Silva, I. de F. da; Antonino, A.C.D.; Gouveia Neto, G. da C.; Lira, C.A.B. de O. (2009) Balanço de energia em mamona cultivada em condições de sequeiro no Brejo Paraibano. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 4 (2):185-191.
- Pereira, F.R., Moura Neto, F.D. (2007) *Uma introdução prática à automação e controle*. Editora: EdUERJ, 78-79 p.
- Péries, X.E., Enciso, J.M. (2009) Interpretation of Watermark Sensor Readings in Specific Soil 279 Types. *Subtropical Plant Science*, 61:6-14.
- Phene, J.C., Hoffman, G.C., Rawlins, S.L. (1971) Measuring soil matric potential in situ by heat dissipation within a porous body: I. Theory and sensor construction. *Soil Science Society of America. Proceedings*.
- Phene, C.J., Reginato, R.J., Itier, B., Tanner, B.R. (1992) Sensing irrigations needs. In: Hoffman, G.J., Howell, T.A., Solomon, K.H. (Ed.). *Irrigation of agricultural lands*. Madison: ASAE. p. 207-261.
- Pinto JR, O.B., Vourlitis, G.L., Sanches, L. Dalmagro, H.J. Lobo, F.A. Nogueira, J.S. (2013) Transpiração pelo método da sonda de dissipação térmica em

- floresta de transição Amazônica-Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 17 (3):268-274.
- Ramos, M.C., Andrade, V.S. (2016) Desenvolvimento, construção e calibração de uma central de monitoramento de consumo de energia elétrica e de água utilizando o microcontrolador arduino. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 2 (1):39-50, jan./abr.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Saxton, K.E. (1982) Estimation of soil water properties. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 25:1316-1320.
- Reece, C.F. (1996) Evaluation of a Line Heat Dissipation Sensor for Measuring Soil Matric Potential. *Soil Science Society of America Journal*, 60:1022-1028.
- Reichardt, K. (1988) Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216.
- Reichert, J.M., Albuquerque, J.A., Kaiser, D.R., Reinert, D.J., Urach, F.L., Carlesso, R. (2009) Estimation of water retention and availability for Rio Grande do Sul soils. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:1547-1560.
- Rekika, D., Caron, J., Rancourt, G.T., Lafond, J.A., Gumiere, S.J., Jenni, S., Gosselin, A. (2014) Optimal Irrigation for Onion and Celery Production and Spinach Seed Germination in Histosols. *Agronomy Journal*, 106 (2):981-994. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0235>.
- Ritchie, J.T. Burnett, E., Henderson, R.C. (1972) Dryland evaporative flux in a subhumid climate. 3 - Soil water influences. *Agron. J.*, 64:168-173.
- Rodriguez-Iturbe, I., Porporato, A. (2004) *Ecohydrology of Water Controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics*. Cambridge University Press.
- Rosário, J.M. (2005) *Princípios de Mecatrônica*. São Paulo, SP. Editora: Pearson Prentice Hall, 368p.
- Sanders, D.C. (1997) *Vegetable crop irrigation*. Raleigh: North Carolina Cooperative Extension Service. 6p. (Horticulture Information Leaflet, 33-E).
- Santos, L.R., Melchades, F.G., Biscaro, E., Ferrari, A., Boschi, A.O. (2010) Avaliação de Caulim Sedimentar do Estado do Pará como Matéria-Prima para o Setor Cerâmico. Parte I. Caracterização Físico-Química. *Cerâmica Industrial*, 15 (5-6):19-24.
- Shaw, B., Baver, L.D. (1939) Heat conductivity as an index of soil moisture. *J. Am. Soc. Agron.* 31:886-889.
- Shepherd, A., McGinn, S.M. (2003) Assessment of climate change on the Canadian Prairies from downscaled GCM data. *Atmos. - Ocean*, 41:301-316, <https://doi.org/10.3137/ao.410404>.

- Shwetha, P., Varija, K. (2015) Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils. *Aquatic Procedia* 4:1142-1149. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.02.145>
- Silva, E.M. (1980) *A test of the independent domain theory for predicting moisture hysteretic paths*. Davis, University of California. 165p. (Dissertação de Mestrado)
- Silva, E. M., Azevedo, J.A., Guerra, A. F., Figuerêdo, S.F., Andeade, L.M., Antonini, J.C.A. (1999) *Manejo de irrigação por tensiometria para culturas de grãos na região do Cerrado*. Planaltina: Embrapa Cerrados. 60p. (Circular Técnica, 6).
- Silva, E.M., Lima, J.E.F.W., Azevedo, J.A., Rodrigues, L.N. (2006) Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41:323-330.
- Silva, N.K.C. (2015) *Construção, calibração e validação de sensores de dissipação térmica para o fluxo de seiva em meloeiro*. Dissertação de mestrado. UFLA. Lavras, MG.
- Smajstrla, A.G, Harrison, D.S. (1998) *Tensiometers for soil moisture measurement and irrigation scheduling*. Florida: University of Florida. 6p.
- Smajstrla, A.G., Pitts, D.J. (1997) *Tensiometer service, testing and calibration*. Gainesville: University of Florida. 5p. (Bulletin, 319).
- Solone, R., Bittelli, M., Tomei, F., Morari, F. (2012) Errors in water retention curves determined with pressure plates: effects on the soil water balance. *J Hydrol.* 470-471:65-74. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.017>
- Sorrenti, G., Ventura, M., Toselli, M. (2016) Effect of biochar on nutrient retention and nectarine tree performance: a three-year field trial. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 179, 336-346.
- Sousa, E.F., Santolin, M.A., Do, F.C. (2020) Estimation of steady water flux density in a porous medium by Fourier analysis of temperature variations in a cyclic heat pulse system. In: Hölttä, T., Salmon, Y. Proceedings of the "11st International Workshop on Sap Flow". Juupajoki (Finland) 07-11 October 2019. *Acta Horticulturae*. 1300:187-192.
- Sousa, V.F., Marouelli, W.A., Coelho, E.F., Pinto, J.M., Coelho Filho, M.A. (2014) *Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças*. Brasília, DF: Embrapa. 2. ed.
- Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G. (2017) *Manual de métodos de análise de solos*. 3.ed. rev. e ampl. Brasília (DF): Embrapa. 573p.

- Teuling, A.J., Lehner, I., Kirchner, J.W., Seneviratne, S.I. (2010) Catchments as simple dynamic systems: experience from a Swiss prealpine catchment. *Water Resou. Res.* 46:W10502. <https://doi.org/10.1029/2009WR008777>.
- van der Ploeg, M.J., Gooren, H.P.A., Bakker, G., Hoogendam, C.W., Huiskes, C., Koopal, L.K., Kruidhof, H., de Rooij, G.H. (2010) Polymer tensiometers with ceramic cones: direct observations of matric pressures in drying soils. *Hydrology and Earth System Sciences.* 14:1787-1799
- van Genuchten M, T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J.* 44:892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Van Iersel, M.W., Chappell, M., Lea-Cox, J.D. (2013) Sensors for improved efficiency of irrigation in greenhouse and nursery production. *Hort Technology* 23 (6):735-746.
- Vaz, C.M.P., Naime, J.M., Macedo, A. (1999) Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation. *Soil Science, Baltimore*, 164 (6):403-410.
- Veihmeyer, F.J., Hendrickson, A. H. (1931) The Moisture Equivalent as a Measure of the Field Capacity of Soils. *Soil Science*, 32 (3):181-194. <https://doi.org/10.1097/00010694-193109000-00003>
- Venturin, A.Z. (2016) *Coeficiente de estresse hídrico para o cafeeiro Conilon baseado na determinação do fluxo de seiva*. Dissertação mestrado. UENF. Campos dos Goytacazes, RJ.
- Villa Nova, N.A., Bacchi, O.O.S., Reichardt, K. (1996) Potencial da água no sistema solo-planta estimado através da fase de vapor. *Sci. Agric.* 53 (1):194-198.
- Vinhal-Freitas, I.C., Corrêa, G.F., Wendling, B., Bobul'skác, L., Ferreira, A.S. (2017) Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. *Ecological Indicators*, 74:182-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.020>
- Whalley, W.R., Jenkins, M., Attenborough, K. (2012) The velocity of shear waves in unsaturated soil. *Soil and Tillage Research*, 125:30-37
- Wind, G.P. (1969) *Capillary conductivity data estimated by a simple method*. In: *Wageningen symposium*. Proceedings; water in the unsaturated zone. Birmingham, UK: UNESCO; IASH. p. 181-191.
- Xing, X., Kang, D., Ma, X. (2017a) Differences in loam water retention and shrinkage behavior: effects of various types and concentrations of salt ions. *Soil Tillage Res.* 167:61-72.

- Xing, X., Li, Y., Ma, X. (2017b) Effects on infiltration and evaporation when adding rapeseed-oil residue or wheat straw to a loam soil. *Water* 9:700. <http://dx.doi.org/10.3390/w9090700>
- Young, M.H., Sisson, J.B. (2002) Tensiometry. In: Methods of soil analysis, Part 4, Physical Methods, Dane JH, Topp GC (Eds.), SSSA Book Series No. 5, *Soil Science Society of America*: Madison. p.575-608.