

BANCADA AUTOMÁTICA PARA ENSAIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO SATURADO COM PERMEÂMETRO DE CARGA CONSTANTE

Angelo Tiago Azevedo¹, Igor Santos de Melo¹; Marcelo Miglioli¹, Marinaldo Ferreira Pinto², Conan Ayade Salvador²

¹ Graduando (a) em Engenharia Agrícola e Ambiental, Depto. de Engenharia, Instituto de Tecnologia, UFRRJ, Seropédica-RJ, Fone: (0XX21) 2682-1864. E-mail: azevedo_angelo@hotmail.com

² Eng^o Agrícola, Professor Adjunto, Depto. de Engenharia, IT/UFRRJ, Seropédica-RJ.

Apresentado no
XLVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2018
06, 07 e 08 de agosto de 2018 - Brasília - DF, Brasil

RESUMO: A obtenção da condutividade hidráulica do solo saturado exige um número amostral elevado, devido sua grande variabilidade espacial. A possibilidade da automação do ensaio em laboratório, otimizaria a execução, processamento e aquisição de dados, reduzindo a incerteza provocada por fatores humanos e o custo operacional. Objetivando essa resolução, foi proposta a construção de uma bancada semiautomática com permeâmetros de carga constante e parede lisa para ensaios em laboratório. A bancada de ensaios foi composta de dois níveis confeccionados em madeira, contendo 36 compartimentos, destinados a inserção das amostras de solo (superior) e dos coletores de água (inferior). Os coletores são tubos de PVC com diâmetro nominal de 50 mm e capacidade de armazenamento de cerca de 490 cm³, com a alocação interior de duas placas de cobre isoladas, formando o sensor capacitivo tendo a água como dielétrico. O sistema eletrônico de aquisição de dados foi composto por um microcontrolador (Arduino Nano), programado em Linguagem C/C++, responsável pela obtenção do volume em função da variação de capacitância no decorrer do ensaio e da determinação da condutividade hidráulica. Os resultados obtidos evidenciaram que não foram detectadas falhas de coleta de dados, demonstrando a eficácia do sistema de automação para o objetivo proposto.

PALAVRAS-CHAVE: instrumentação; sensor capacitivo; drenagem.

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF AUTOMATIC BENCH FOR HYDRAULIC CONDUCTIVITY TEST OF SATURATED SOIL WITH CONSTANT LOAD PERMEAMETER

ABSTRACT: Obtaining the hydraulic conductivity of the saturated soil requires a high sample number, due to its great spatial variability. The possibility of automating the test in the laboratory would optimize the execution, processing and acquisition of data, reducing the uncertainty caused by human factors and the operational cost. Aiming at this resolution, it was proposed the construction of a semiautomatic bench with constant load permeabilities and smooth wall for laboratory tests. The test stand consisted of two levels made of wood, containing 36 compartments, intended for the insertion of samples of soil (upper) and of water collectors (lower). The collectors are PVC pipes with a nominal diameter of 50 mm and a storage capacity of about 490 cm³, with the interior allocation of two insulated copper plates, forming a capacitive sensor having the water as a dielectric. The electronic data acquisition system was composed of a microcontroller (Arduino Nano), programmed in C/C++ Language, responsible for obtaining the volume as a function of the capacitance variation during the test and the determination of the hydraulic conductivity. The obtained results evidenced that no data collection failures were detected, demonstrating the effectiveness of the automation system for the proposed objective.

KEYWORDS: instrumentation; capacitive sensor; drainage.

INTRODUÇÃO

A condutividade hidráulica do solo é uma importante grandeza para estudos e práticas que venham a envolver o deslocamento da água no solo, sendo esta a responsável por representar a facilidade com que a água se movimento no perfil e atinge seu valor máximo em condição de saturação (DUARTE et al., 2015). Salienta-se que a condutividade hidráulica depende de várias características do meio físico como porosidade, textura, estrutura das partículas e também das propriedades do fluido, como viscosidade, massa específica e temperatura (FEITOSA et al., 2008). Com isso, diversos pesquisadores destacam a elevada variabilidade espacial observada nesse atributo, onerando os levantamentos de dados devido a exigência de um número maior de amostras (ALVARENGA et al., 2011; CARVALHO & LIBARDI, 2010).

O primeiro estudo envolvendo a dinâmica da água em um meio poroso, o qual obteve a constante de proporcionalidade, denominada posteriormente de condutividade hidráulica do solo saturado, foi desenvolvido por Henry Darcy, em 1856. Dando prosseguimento ao estudo, BUCKINGHAM (1907) apud GONÇALVES & LIBARDI, (2013) teorizou uma equação para o fluxo da água em meios porosos não saturados, obtendo-se o modelo de Darcy-Buckingham.

A aquisição direta da dessa variável pode ser feita por meio de ensaios em laboratórios ou em campo. Os métodos aplicados em campo são indicados para caracterização de áreas grandes, como em projetos de drenagem, por possibilitar a não intervenção na estrutura do solo e utilização da água do solo no ensaio. Em contraponto, os métodos de laboratório proporcionam benefícios quando comparados a métodos *in loco*, como melhores condições de controle (saturação, carga hidráulica e direção do fluxo), estudo da anisotropia hidráulica, menor tempo de ensaio e custo, minimização da ocorrência e efeito do ar aprisionado (DOURADO, 2003; MESQUITA E MORAES, 2004). Dentre os equipamentos utilizados em laboratório, o permeâmetro de carga constante e parede rígida destacam-se por serem simples e menos onerosos (GUIMARÃES, 2013).

Apesar da elevada variabilidade desse atributo, os métodos disponíveis para a sua medição não favorecem a fácil repetição dos procedimentos técnicos envolvidos, visto que são complexos e morosos, contribuindo para a elevação dos custos envolvidos (GUBIANI et al., 2010). Todavia, EGUCHI et al. (2003) ressaltam que se essa variabilidade não for devidamente observada e avaliada, impactos negativos na eficiência e eficácia de projetos, bem como os resultados de pesquisas podem ser comprometidos.

Adicionalmente, visto o elevado número de informações monitorados manualmente nesses ensaios, favorece a possibilidade de incerteza oriunda de fatores humanos. Uma alternativa para minimizar as dificuldades laborais seria a adoção de ferramentas de automação que possibilitem tornar as medições eficazes e com baixo custo. Apesar do avanço tecnológico, tornando o uso das técnicas de eletrônica e automação mais acessíveis, pouco tem sido feito para o aprimoramento e automação dos procedimentos de determinação desse parâmetro. Em laboratórios, sistemas automatizados podem assegurar estabilidade das condições de ensaio, otimização do tempo de operação, redução de falhas e imperfeições humanas, conduzindo a menor incerteza nos resultados (BOMBARDELLI et al., 2017).

Portanto, este trabalho teve como objetivo a construção de uma bancada que permita a automação parcial do ensaio de laboratório do permeâmetro de carga constante e parede rígida, para a determinação direta da condutividade hidráulica do solo saturado com a utilização de microcontroladores, a fim de otimizar tempo e recursos envolvidos.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Automação e Controle de Sistemas Agrícolas e no Laboratório de Drenagem, ambos situados no Departamento de Engenharia do Instituto de Tecnologia, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), campus Seropédica-RJ.

A bancada parcialmente automatizada foi composta por: uma estrutura física de suporte do conjunto experimental; um sistema de medição, composto basicamente por reservatório, elemento sensor e tubo de sifonagem; e, um dispositivo eletrônico, que permite a leitura do sensor, bem como, a interface para interação com o usuário (com display LCD e botões), além de cartão de memória para o armazenamento dos dados em intervalos pré-estabelecidos pelo usuário.

Fez-se o uso de um suporte para a bancada semiautomática, o qual foi construído em madeira, com dimensões de 79 x 44 x 135 cm, contendo dois níveis de compartimentos: o superior destinado a locação das amostras de solo a fim de serem analisadas; e, o inferior para a fixação de provetas de leitura automática do volume de água que percola da amostra no nível superior, no decorrer do ensaio. Cada nível de compartimento foi feito com placa de madeira, contendo 36 orifícios com 5,2 cm de diâmetro para alocação das amostras e das provetas. A distância entre os níveis superior e inferior podem ser reguladas manualmente em até 45 cm, sendo o nível inferior posicionado ergonomicamente a 88,5 cm acima do solo.

O sistema de medição contou com proveta automática, a qual foi confeccionada com materiais de baixo custo e de disponibilidade facilitada, sendo composta basicamente por um recipiente (tubo de policloreto de vinila (PVC), diâmetro interno de 49,3 mm, comprimento útil de 20 cm proporcionando uma capacidade útil de armazenamento de cerca de 350 cm³) que receberá a água percolada; de um sensor capacitivo no interior do recipiente, visando a mensuração do volume coletado em determinado intervalo de tempo; um cap na base inferior do recipiente de coleta; um sifão para proceder ao esvaziamento da proveta quando o nível máximo de detenção for atingido; e, de fios de cobre para a conexão do elemento sensor com o dispositivo eletrônico responsável pela aquisição do sinal analógico, e pelo processamento e armazenamento dos dados.

O sensor capacitivo idealizado foi construído com duas placas planas de fenolite, com face simples de cobre, espessura de 2 mm e largura de 40 mm. As placas de cobre foram alocadas no interior do tubo de forma a manter o paralelismo entre as faces em contato com a água coletada (Figura 1). Neste caso, as placas de cobre funcionam como placas do capacitor devidamente isoladas e a água, como dielétrico (CARNEIRO et al., 1997), de tal modo que a capacitância varia com o nível de água, conforme a Equação 1 apresentada por CANAFISTULA (2013).

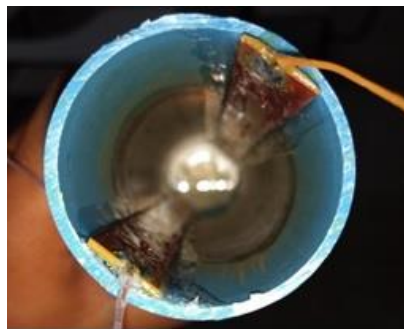


FIGURA 1. Detalhe das placas planas de cobre no interior da proveta de leitura automática utilizada na bancada.

$$C = \frac{\varepsilon A}{4\pi d} \quad (1)$$

em que,

C - capacitância, pF;

ε - constante dielétrica do material entre as placas, pF cm⁻¹;

A - área da placa plana, cm²; e,

d - distância entre as placas planas, cm.

Segundo o princípio capacitivo, conforme o coletor é abastecido com a água proveniente da amostra, seu dielétrico ganha massa e volume aumentando o tamanho do capacitor, aumentando diretamente a sua capacitância. A variação quantitativa do dielétrico deve-se à alteração do volume do material no interior do recipiente de coleta e entre as placas do capacitor, uma vez que a constante dielétrica da água é notadamente superior ao do ar atmosférico. O capacitor construído foi conectado ao microcontrolador por uma porta de 5V e uma porta analógica de dreno, onde a capacitância é o valor obtido após o capacitor armazenar 63% da energia máxima que o mesmo suporta. Sendo assim, a medida de volume se torna proporcional a medida de capacitância.

A calibração do sensor capacitivo foi realizada com a adição de volumes crescentes de água. A resposta analógica do sensor foi avaliada na faixa de volume de 0 a 350 mL, com incrementos a cada 10 mL. Foi procedida 10 repetições para cada ponto de medida.

Os valores de capacitância obtidos nos testes de calibração foram convertidos em frequência, com a utilização de um circuito integrado NE555, e mensurados em um osciloscópio (Tektronix, modelo 2205), com a finalidade de se avaliar, se os valores obtidos estavam corretos ou tinham interferência externa (ruídos). Na Figura 2 é possível observar a aquisição da resposta em frequência com o uso do osciloscópio para a comparação com o valor obtido pelo circuito integrado NE555.



FIGURA 2. Comprovação da frequência obtida pelo circuito integrado NE555 com o uso de um osciloscópio.

O dispositivo eletrônico é composto por um microcontrolador Arduino Nano versão 3.0, responsável principalmente pela aquisição e processamento. Optou-se por montar o circuito eletrônico utilizando o microcontrolador Arduino por ser uma plataforma de hardware de código fonte aberta com comunicação serial, USB, de baixo custo, software livre e de operação facilitada (KAMOGAWA & MIRANDA, 2013). O microcontrolador foi ligado a um multiplexador analógico de 16 canais, possibilitando otimizar o número de portas utilizadas na aquisição de dados. Adicionalmente, o sistema foi munido de um módulo RTC para a obtenção de data e hora atualizadas, um módulo DHT 22, para a aferição da temperatura e umidade relativa do ar ambiente. O armazenamento das informações coletadas em cada ensaio foi realizado por um cartão de memória SD. A interface de comunicação com o usuário composta basicamente por 2 botões para o acionamento de rotinas e inserção de dados, e display LCD. Quando necessária, a comunicação serial entre o microcontrolador e um microcomputador foi realizada via cabo USB.

O software embarcado no microcontrolador possibilita a interação com o usuário, onde o mesmo pode definir as condições de realização e o encerramento do ensaio. O usuário então deve fornecer o intervalo entre medições, as quais podem alterar com a classe textural e estrutural do solo amostrado, e o desvio permitido para que o mesmo seja encerrado. Além disso, o usuário pode também inserir limites máximos de temperatura ou amplitude térmica para execução dos ensaios.

Uma vez iniciado o ensaio, o circuito eletrônico tomará dados de volume percolado no intervalo de tempo selecionado pelo usuário, até que os critérios técnicos que indicam o fim do ensaio sejam atendidos, uma vez que esse é encerrado quando o volume percolado se torna constante no tempo (DUARTE et al., 2015). Entretanto, o usuário pode avaliar e inserir o desvio considerado aceitável e o nível de exatidão pretendido, com base no objetivo final do ensaio realizado. Uma vez determinado o fim do ensaio na i -ésima amostra de solo, indica-se o valor da condutividade hidráulica do solo saturado em $m\ d^{-1}$, e encerra a aquisição de dados da i -ésima proveta de medição automática. Na Figura 3 visualiza-se o fluxograma do sistema de aquisição e controle desenvolvido.

Na rotina de controle também foi selecionada as variáveis para compor o relatório, no formato de arquivo “.txt”, destinado ao cartão de memória. O formulário foi composto por: número da amostra, data e hora da aquisição, temperatura e umidade relativa ambiente, intervalo entre leituras, desvio aceitável de encerramento do ensaio, e a condutividade do solo saturado ($m\ d^{-1}$).

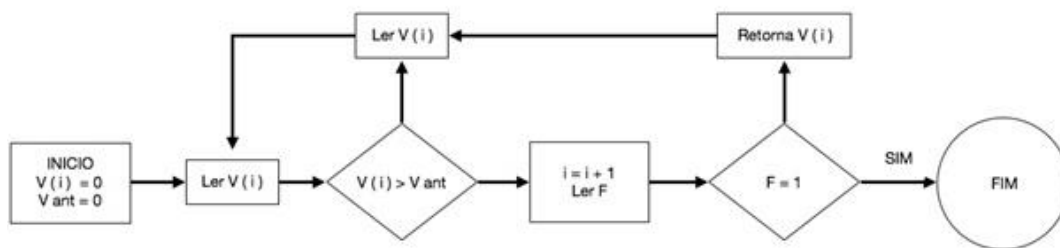


FIGURA 3. Fluxograma do procedimento para leitura e armazenamento dos dados de volume de água percolado na proveta automática. V(i): volume de água percolado referente ao coletor “i”, mL; Vant: volume de água percolada da leitura imediatamente anterior à leitura atual, mL; F: valor lógico que indica que a última leitura foi realizada.

O ensaio para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado foi realizado conforme a metodologia aplicada a permeâmetro de carga constante (EMBRAPA, 1997). O nível da carga hidráulica sobre as amostras de solo foi mantido constante com o auxílio de frasco de Mariotte. A Equação 2 foi aplicada no cálculo da variável estudada (DUARTE et al., 2015):

$$K_o = \frac{Q \cdot L}{A \cdot (L + H)} \quad (2)$$

em que,

K_o - condutividade hidráulica do solo saturado, $m \cdot d^{-1}$;

Q - vazão coletada estabilizada, $m^3 \cdot d^{-1}$;

H - carga hidráulica sobre a amostra de solo, m;

L - altura da amostra de solo, m; e,

A - seção transversal do cilindro contendo a amostra de solo, m^2 .

Realizou-se a concepção final do protótipo contendo somente uma proveta de medição automática, responsável pela mensuração da condutividade hidráulica saturada de uma amostra de solo (solo arenoso), com o intuito de se proceder o ensaio em laboratório (Figura 4). Nesta etapa, o intuito foi de avaliar o funcionamento do sistema de automação, como também da rotina de controle implementada. Com isso, foi possível verificar falhas de funcionamento do protótipo e propor ajustes. Salienta-se que no presente momento está em execução a confecção das demais provetas automáticas, do sistema de coleta de água sifonada, e, de um aplicativo supervisorio para a realização dos testes finais da bancada proposta.



FIGURA 4. Ensaio em laboratório, para uma única amostra, com uma proveta automática e dispositivo eletrônico para avaliação da performance do sistema de coleta, armazenamento de dados, e rotina de controle.

Pode ser constatado na Tabela 1, por meio do desvio padrão e do coeficiente de variação (CV) dos dados obtidos na calibração do sensor capacitivo, que a maior variabilidade dos dados foi para volumes de 10 mL, obtendo-se CV de 0,51%, respectivamente. Com o aumento do volume interno ocorre uma redução da variabilidade observada, e em alguns casos o CV atingiu o valor de 0,01%. Dessa maneira, a variabilidade obtida foi considerada satisfatória para os fins pretendidos.

Esta variabilidade inicial deve-se, entre outros motivos, a possibilidade de haver resíduos líquidos presentes em pontos diferenciados das placas do sensor capacitivo, bem como algumas imperfeições constatadas no material isolante na superfície das mesmas.

Observou-se também que em amostras extremamente arenosas, como a avaliada na etapa de avaliação do sistema de automação implementado, com condutividade hidráulica alta, a velocidade com que a água percola da amostra e chega a proveta coletora gera grandes perturbações no fluido em repouso, originando variações de leitura pelo sensor capacitivo, as quais tem efeito reduzido em grandes volumes armazenados no coletor. Com isso, recomenda-se que, ao se realizar o ensaio com o suporte de bancada desenvolvido para esse trabalho, deve-se minimizar a distância entre a placa superior e a placa inferior, ou seja, entre a amostra de solo avaliada e a proveta coletora de medição automática.

Adicionalmente, verificou-se que a presença de objetos que trabalham com transmissão de dados em radio frequência, como o caso de smartphones, localizados a menos de 20 cm de distância do sensor capacitivo, pode gerar perturbações no sinal de saída do mesmo, podendo comprometer o nível de exatidão que se pretende garantir na execução do ensaio com o permeâmetro de carga constante.

Após a realização do ensaio avaliar o funcionamento do sistema de automação, como também da rotina de controle implementada pode-se afirmar que o dispositivo eletrônico desenvolvido para a automação parcial da bancada foi capaz de realizar a aquisição, monitoramento, processamento e armazenamento dos dados do volume percolado no intervalo de tempo de medida pré-estabelecido pelo usuário. Não foi verificado ruídos ou falhas no sistema idealizado, o qual está apto para o prosseguimento das avaliações, porém com a bancada contendo as demais amostras de solo. Os resultados obtidos evidenciaram a eficácia do sistema de automação para o objetivo proposto.

CONCLUSÕES

A automação e instrumentação de ensaios laboratoriais permite otimização do tempo e redução de custos para a realização dos mesmos, reduzindo ainda a interferência humana em erros de leitura, escrita e transcrição de dados para o meio digital, com este intuito a bancada automática para ensaio de aquisição de condutividade hidráulica do solo saturado tem potencial para implantação, visto sua eficiência em aquisição e processamento de dados a baixo custo.

Pode-se concluir que a construção da bancada possibilitou a automação parcial do ensaio de laboratório com permeâmetro de carga constante e parede rígida, permitindo a aquisição, processamento e armazenamento de dados de maneira eficaz, sendo o sensor capacitivo adequado para a proposta de automação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) e a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pela concessão da bolsa de iniciação científica pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Tecnológica e de Inovação (PIBITI) e pela estrutura cedida para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS:

- ALVARENGA, C.C.; MELLO, C.R.de; MELLO, J.M.de; VIOLA, M.R. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturado do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.1745-1757, 2011.
- BUCKINGHAM, E. *Studies on the movement of soil moisture*. Washington. s.l.:USDA. 1907.

BOMBARDELLI, W.W.A.; CAMARGO, A.P.; LAVANHOLI, R.; ARAUJO, A.C.S.; TALAMINI JUNIOR, V.; FRIZZONE, J.A. Projeto e validação de uma bancada para ensaios de perda de carga localizada. *Revista Irriga*, Edição Especial, Irriga & Inovagri, p. 1-10, 2017.

CANAFISTULA, F.J.F. *Desenvolvimento, implementação e avaliação de uma estação agrometeorológica automática e sensores ambientais*. 2013. 138p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

CARNEIRO, C.J.G.; LIRA, C.A.B.O.; MENDES SOBRINHO, J.A.; ANTONINO, A.C.D.; MELLO, F.L.V. Sensor capacitivo para medição do nível de água. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.32, n.6, p.617-620, 1997.

CARVALHO, L.A.; LIBARDI, P.L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho Amarelo, não saturado, utilizando-se sonda de nêutrons. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v.32, n.1, p.153-159, 2010.

DOURADO, K.A. *Condutividade hidráulica de materiais de baixa permeabilidade: desenvolvimento, construção e teste de um sistema de medida*. 2003. 110 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

DUARTE, S.N.; SILVA, E.F.F.; MIRANDA, J.H.de; MEDEIROS, J.F.de; COSTA, R.N.T.; GHEYI, H.R. *Fundamentos de drenagem agrícola*. Ed. INCTSal: Fortaleza-CE. 1ª Ed. 2015. 338 p.

EGUCHI, E.S.; SILVA, E.L. & OLIVEIRA, M.S. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e da taxa de infiltração básica determinadas in situ. *Ciência e Agrotecnologia*, v.23, p. 1607-1613, 2003

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA -EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FEITOSA, F.A.C.; Manoel Filho, J.; Feitosa, E.C.; Dmetrio, J.G.A. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3ª Edição Revisada e Ampliada. s.l.: CPRM Serviço Geológico Nacional. 2008.

GONÇALVES, A.D.M.D.A.; LIBARDI, P.L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.37, p.1174-1184. 2013.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; GELAIN, N.S.; MINELLA, J.P.G. Permeâmetro de carga decrescente associado a programa computacional para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.993-997, 2010.

GUIMARÃES, L.M. *Determinação das propriedades hidráulicas em solos não saturados utilizando uma centrífuga de pequenas dimensões*. 2013. 135 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

KAMOGAWA, M.Y.; MIRANDA, J.C. Uso de hardware de código fonte aberto “arduino” para acionamento de dispositivo solenoide em sistemas de análises em fluxo. *Química Nova*, v.36, n.8, p.1232-1235, 2013.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.34, n.3, p.963-969, 2004.