

Autores | Authors

Sérgio Fred Ribeiro
Andrade*
[sergiof@uesc.br]

Rafaela Costa de
Souza**
[rafaelacs_@hotmail.com]

Ramon Darwich de
Menezes***
[ramondarwich@gmail.
com]

Bruno Sena Andrade

[brunoeng.sena@gmail.
com]

PROTÓTIPO DE PERMEÂMETRO COMPUTADORIZADO DE BAIXO CUSTO PARA AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO QUÍMICA EM SOLOS

LOW-COST COMPUTERIZED PERMEAMETER PROTOTYPE FOR CHEMICAL EXPOSURE ASSESSMENT IN SOILS

Resumo: A avaliação da exposição química no solo para estudos de impactos ambientais é de extrema importância para indicar contaminações que podem afetar a qualidade dos recursos naturais. Sobre essas contaminações, podem ser considerados os parâmetros físico-hídricos definidos na Lei de Darcy, como a condutividade hidráulica saturada, a umidade do solo e a retenção hídrica, diante da pressão hidrostática e do potencial gravitacional. Em geral, é empregado um permeâmetro para determinar esses parâmetros. O custo de obtenção de um permeâmetro é alto, e a sua operação é manual e demanda dias. O objetivo deste trabalho é desenvolver um permeâmetro computadorizado de baixo custo e com resultados em menor tempo se comparado ao equipamento manual, para determinar no solo os parâmetros físico-hídricos da Lei de Darcy mencionados. Foram coletadas oito amostras de solo no aterro sanitário de Itariri, em Ilhéus/BA, e realizaram-se ensaios num permeâmetro de operação manual com colunas de PVC para carga constante, em bancada de laboratório. Depois, foi feita a comparação desses resultados com os experimentos realizados por um permeâmetro computadorizado construído para este trabalho, intitulado PComp, formado por sensores eletrônicos de umidade de solo, plataforma Arduino e software desenvolvido especificamente para esse fim. Em ambos, foi aplicada a metodologia de Klute e Dirksen (1986). Os resultados com os dois permeâmetros foram comparados com dados estimados via software Hydrus 1D. A determinação dos parâmetros físico-hídricos na comparação dos procedimentos adotados mostrou viabilidade para a continuação das pesquisas e para o desenvolvimento do PComp. Considerando os procedimentos iniciais, obteve-se aproximação em 73% dos resultados para método manual e correlação de significância estatística em 0,746 pelo teste de Pearson. O custo com o desenvolvimento do protótipo equivaleu a aproximadamente 10% dos custos de outros permeâmetros disponíveis no mercado.

Palavras-chave: permeâmetro computadorizado; condutividade hidráulica; exposição de risco.

Abstract: The assessment of chemical exposure in the soil for environmental impact studies is extremely important to indicate the contamination that can affect the quality of natural resources. Regarding this contamination, the physical-hydric parameters defined in Darcy's Law can be considered, such as saturated hydraulic conductivity, soil moisture and water retention, in the face of hydrostatic pressure and gravitational potential. In general, a permeameter is used to determine these parameters. The cost of obtaining a permeameter is high, its operation is manual and requires days. The objective of this work is to develop a computerized permeameter, of low cost and with results in less time than the manual, to determine the physical-hydric parameters in the soil mentioned in Darcy's Law. Eight soil samples collected at the Itariri sanitary landfill, in Ilhéus/BA, and tests carried out on a manual operation permeameter with PVC columns for constant loading, on a laboratory

Recebido em: 02/03/2019

Aceito em: 28/08/2020

bench. Then, there was a comparison of these results with the experiments carried out by a computerized permeameter built for this work, called PComp, formed by electronic soil moisture sensors, Arduino platform and software developed specifically for this purpose. In both, the methodology of Klute and Dirksen (1986) applied. The results with the two permeameters were compared with data estimated using the Hydrus 1D software. The determination of the physico-hydric parameters, in the comparison of the adopted procedures, showed feasibility for continuation with the research and development of PComp. Considering initial procedures, a 73% approximation of the results obtained for the manual method and a statistically significant correlation of 0.746 by the Pearson test. The cost of developing the prototype was equivalent to approximately 10% of other permeameters available on the market.

Keywords: computerized permeability; hydraulic conductivity; risk exposure.

INTRODUÇÃO

A degradação ambiental via produtos químicos da industrialização é uma realidade e, em muitos casos, os insumos e produtos finais dessa atividade contêm elementos tóxicos que prejudicam os ecossistemas e a saúde humana. A sociedade está cada vez mais preocupada com as consequências que a exposição às substâncias químicas advindas dos diversos processos industriais pode gerar à vida humana.

Entre os vários diagnósticos requisitados para os empreendimentos civis, é indispensável a avaliação da exposição e dos riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Nesses estudos, são considerados os parâmetros relativos à alteração das propriedades físicas e químicas dos compartimentos ambientais, sobretudo do solo e das águas subterrâneas, que podem afetar a qualidade dos recursos ambientais.

O processo de avaliação da exposição para os compartimentos do solo, do subsolo e das águas subterrâneas está baseado em modelos matemáticos de transporte de solutos, os quais possibilitam uma análise da infiltração do contaminante no meio poroso.

Nesse modelo, essas propriedades físico-hídricas são definidas através da Equação de Richards e da Lei de Darcy-Buckingham (JURY, 2004). Porém, estimar dados sobre a condutividade hidráulica saturada, ou não saturada, a textura do solo e a retenção hidráulica é particularmente complexo, em razão do grande número de variáveis e da morosidade dos procedimentos operacionais manuais (VAN GENUCHTEN, 1980).

Para a determinação desses parâmetros, geralmente se emprega o permeâmetro em campo ou em laboratório, conforme Jury (2004). O custo de obtenção de permeâmetro de carga constante ou variável decrescente é relativamente oneroso (US\$ 500,00 aproximadamente), e a operação quase sempre é manual e depende de constante interação entre um operador e o equipamento.

O presente estudo teve como objetivo desenvolver um protótipo inicial com sistema de permeâmetro em bancada de

PVC, para leitura de parâmetros por sensores eletrônicos higrométricos, com reconhecimento e análise por *software* para cálculo de dados físico-hídricos. O objetivo era que o protótipo tivesse baixo custo, com resultados em menor tempo que o permeâmetro manual, em comparação com os dados simulados pelo *software Hydrus 1D*, de Simunek *et al.* (2006), visando auxiliar a avaliação da exposição por contaminantes inorgânicos no solo e nas águas subterrâneas.

Alguns trabalhos correlatos foram encontrados na literatura, mas sem a conotação da medição das propriedades físico-hídricas num equipamento de laboratório integrando tubos de

PVC com leitura digital por sensores. Em Cernicchiaro *et al.* (2019), foi desenvolvido um dispositivo de campo para medir a taxa de estado estacionário da mudança de nível de água residual a fim de obter a retenção hidráulica e a condutividade hidráulica saturada, através do monitoramento da variação de vácuo na garrafa de Mariotte, com uso de sensores piezoelétricos.

Em Rodríguez-Juárez (2018), foi mostrado o *design*, a calibração e o teste de um dispositivo com placas Arduino, denominado Infiltrômetro Automatizado de Laboratório, para medir, sob condições controladas, a condutividade hidráulica saturada de amostras de solo alteradas ou inalteradas, buscando entender o movimento da água através de meios porosos.

No trabalho de Ottoni (2019), foi implementada uma aplicação com banco de dados para registrar a condutividade em solos tropicais brasileiros e temperados europeus, assim como para registrar a textura e a porosidade efetiva do solo para uso em medições de percolação de solutos no subterrâneo.

Em Martinez (2016), é apresentado o desenvolvimento, a montagem e o teste de um permeâmetro de parede flexível e carga constante que permite a determinação da permeabilidade em solos de baixa condutividade hidráulica. Esse permeâmetro é composto por uma câmara de confinamento de acrílico e por um sistema de aplicação de pressão em confinamento, com aplicação de contrapressão, imposição de gradien-

tes hidráulicos elevados e aquisição de dados automatizada por computadores.

Dessa forma, a justificativa para este trabalho recai na busca pela inovação da técnica de mensuração da condutividade hidráulica saturada e da retenção hídrica no solo, com o propósito de configurar um protótipo para verificar a viabilidade de aplicação a partir de um permeâmetro de carga constante composto de PVC, conectado por um computador a um sistema de sensores eletrônicos para medições automatizadas e de fácil construção.

Para tanto, como controle, foram consideradas as medições por um permeâmetro de colunas de PVC e leitura manual, conforme CETESB (2011) e Jury (2004). Foram efetuadas simulações com base nos resultados do *Hydrus 1D* (SIMUNEK *et al.*, 2006). Posteriormente, foram realizadas medições com leituras digitais por sensores conectados a um *software* especificamente desenvolvido num sistema de permeâmetro computadorizado intitulado *PComp*.

A importância da informatização para esse protótipo também está aliada à redução dos custos de produção do equipamento em comparação com outros encontrados no mercado, considerando que o *hardware* será composto por placas do tipo Arduino, como descrito em Barret (2013), sendo de fácil aquisição, e que o *software* será disponibilizado com licença para domínio público.

Como resultado, comparando-se com o equipamento de bancada tradicional, o sistema computadorizado para mensuração dos parâmetros físico-hídricos na percolação de soluto em meio poroso mostrou menor tempo de avaliação e custo reduzido de aquisição para o emprego nas atividades de suporte ao estudo e avaliação de risco ambiental.

MATERIAL E MÉTODOS

Para os procedimentos experimentais, foram coletadas amostras de solo nos arredores do aterro sanitário de Itariri, em Ilhéus/BA, em junho de 2019. Para obtenção das amostras de solo, foi utilizado um trado manual de rosca e um cavador articulado para escavação nas zonas A e B do solo.

Etapas metodológicas para caracterização físico-hídrica do solo

O seguinte roteiro foi desempenhado na preparação das amostras; na determinação da caracterização da umidade residual, da densidade e da porosidade do solo; na modelagem de dados; na implementação do *software*; e na simulação da

adsorção dos metais ao solo, no propósito da consecução dos resultados:

- Preparação das amostras e ensaios laboratoriais para determinação da condutividade hidráulica saturada em permeâmetro de carga constante de bancada com colunas de PVC, conforme Jury (2004);
- Determinação da caracterização do teor de umidade residual através da umidade higroscópica (cálculo volumétrico) e da umidade saturada, com a utilização do método do balão volumétrico, conforme Donagema *et al.* (2011);
- Determinação da densidade e porosidade do solo, conforme Donagema *et al.* (2011);
- Modelagem de dados relacionais para persistência das leituras dos sensores higrômetros; obtenção de dados sobre condutividade hidráulica saturada, textura do solo e retenção hidráulica; desenvolvimento de banco de dados utilizando o sistema MySQL 5.0; e implementação de algoritmos na linguagem C# para reconhecimento da leitura, inserção e recuperação dos parâmetros por sensores conectados ao permeâmetro computadorizado;
- Simulação da adsorção dos metais ao solo através da aplicação do *software Hydrus 1D* para a estimação da concentração dos contaminantes e do tempo de exposição;
- Instalação da rede de sensores para formação do sistema de permeâmetro computadorizado;
- Determinação do coeficiente de condutividade hidráulica e retenção hídrica através de sensores eletrônicos conectados ao permeâmetro computadorizado;
- Análise dos dados apurados para verificação da viabilidade do permeâmetro construído, objetivando avaliação da exposição por contaminantes inorgânicos.

Métodos aplicados

Foi adotado o plano de amostragem de solo de acordo com Klute e Dirksen (1986), para direcionamento do processo de coleta, transporte e preparação do material para condução das etapas de análise experimentais. Na coleta de amostras de solo, foram identificadas as características de cada amostra de acordo com os pontos de coleta e as suas coordenadas longitudinais e latitudinais, como ilustrado na Tabela 1.

As amostras de solo foram preparadas para a determinação dos parâmetros físico-hídricos no Laboratório de Meios Porosos – LAMP/CTR, na Universidade Estadual de Santa

Tabela 1 – Amostras de solo de Itariri, em Ilhéus/BA, em junho de 2019

N	Código	Latitude	Longitude	Acurácia (m)	Profundidade (m)	Local
1	CTR-AA-001	14,711563 - S	39,141143 - W	5	43,0	Direita da fonte de água 1
2	CTR-AA-002	14,711524 - S	39,141136 - W	4	49,5	Esquerda da fonte de água 1
3	CTR-AA-003	14,711593 - S	39,141337 - W	6	50,0	Frente da fonte de água 1
4	CTR-AA-004	14,711632 - S	39,141276 - W	9	53,0	Direita da fonte de água 2
5	CTR-AA-005	14,711638 - S	39,141283 - W	8	50,0	Fonte de água 2
6	CTR-AA-006	14,719643 - S	39,145941 - W	11	46,0	Leito do Rio Itariri
7	CTR-AA-007	14,714928 - S	39,142939 - W	3	48,0	Córrego de xorume 1
8	CTR-AA-008	14,714908 - S	39,142984 - W	3	45,5	Córrego de xorume 2

Cruz (Ilhéus/BA). Foram seguidos os métodos de Donagema *et al.* (2011) e de Klute e Dirksen (1986).

Os ensaios manuais foram realizados numa bancada de madeira com suporte para 8 colunas de PVC (rígido), Figura 1(a), cada uma com 60 cm altura (L) e diâmetro de 100 mm, tendo uma área interna transversal de 78,54 cm². A bancada foi instalada na estrutura de um permeâmetro para cargas constantes.

Na Figura 1(b), é indicado o preenchimento do solo na coluna de PVC, que foi realizado até a altura máxima de 40 cm (de solo não saturado) (b), deixando um espaço vazio superior de 20 cm para a inserção da água (a). Na saída da coluna, foi fixado com fita adesiva um tecido (tipo morim) para retenção do solo (c), com o propósito de não permitir a livre drenagem do fluido de água. Abaixo da coluna, apoiado no orifício de suporte da coluna e fixo sobre o tecido, foi instalado um funil

para escoamento do fluxo de água (d). Por fim, embaixo da bancada, foram alocados Beckers volumétricos com 1000 ml de capacidade para coleta e medição da vazão (e).

Os ensaios realizados para a estimativa da condutividade hidráulica saturada (K_s) também permitiram a determinação de outros parâmetros físicos e hidráulicos do solo que auxiliaram no entendimento do processo de infiltração e fluxo da água. Assim, além da condutividade hidráulica saturada (cm/dia), foi possível calcular a compactação do solo (%), a vazão de água (ml/h), a retenção máxima de água (%) e a retenção mínima de água (%).

Os procedimentos abaixo foram realizados previamente, com operação manual e leitura visual direta sem aparelhos, e objetivaram a preparação e a saturação do solo com água nas

Figura 1(a) – Algumas amostras de solo em ensaios laboratoriais de bancada para colunas de PVC**Figura 1(b)** - Esquema da coluna de PVC na bancada do permeâmetro de carga constante

colunas de PVC e registros, objetivando a medição da condutividade hidráulica saturada e da retenção hidráulica. São eles:

- Preenchimento de cada coluna com solo até 50 cm de altura, sem compactar a amostra de solo;
- Preenchimento do espaço vazio da coluna com água, acima da amostra de solo na coluna, de forma suave, espalhada e devagar;
- Saturação da coluna, deixando que o volume de água percolasse no solo pela coluna até que não ocorresse mais fluxo na saída;
- Registro do volume inicial utilizado, volume de saída de água e tempo de saturação.

Após esse processo preparatório, os ensaios foram propriamente realizados com medições de 5 repetições por coluna para cada amostra, sendo elaboradas em tempos de 60 minutos.

Ao obter as medidas do ensaio laboratorial, foi calculada a condutividade hidráulica pela equação (1), conforme Klute e Dirksen (1986) e como descrito em Jury (2004):

$$K_s = \frac{L}{t_1} \ln \frac{(b_0 + L)}{(b_1 + L)} \quad (1)$$

Para cada amostra, o K_s é a condutividade hidráulica em cm/dia, L é a altura em cm do solo saturado, b_0 é a carga hidráulica inicial em cm, b_1 é a carga hidráulica final em cm, e t_1 é o tempo em dia na medição final após a queda da água (1 h a cada amostra).

Para determinar a retenção hidráulica (Q_r), foi necessário conhecer o fluxo hidráulico sob a coluna de solo (J_w) através das equações (2) e (3), baseadas na lei de Darcy (JURY, 2004).

$$J_w = -K_s \frac{H_2 - H_1}{z_2 - z_1} \quad (2) \quad \text{ajustada para} \quad J_w = -K_s \frac{b + L}{L} \quad (3)$$

Nas equações (2) e (3), H_2 é a altura do solo somada à altura do volume da água na coluna, em cm; H_1 é a altura inicial do volume de água na coluna; z_2 é o potencial da pressão hidrostática no topo da coluna, ou a altura total da coluna (cm); z_1 é o potencial da pressão hidrostática embaixo da coluna (cm); L é a altura em cm do solo na coluna; b é a altura do volume da água; e K_s , em cm/dia, a condutividade hidráulica que representa o sentido simbólico da percolação no solo; por isso o sinal negativo.

O Q_r foi determinado através da Equação (4), em que V representa o volume (ml) total de água na carga constante para a coluna de solo e J_w representa o fluxo hidráulico (ml).

$$Q_r = V - J_w \quad (4)$$

Simulação dos parâmetros hídricos do solo com dados do Hydrus 1D

A partir dos resultados obtidos, foi realizada uma simulação num período de 90 dias de contaminação, com base nos parâmetros da literatura constantes no banco de dados do software *Hydrus 1D*, de Radcliffe e Simunek (2010).

Essa simulação serviu para comparar com os resultados das propriedades físicas da medição com percolação de soluto no solo. Isso possibilitou verificar a consistência da aplicação numérica obtida com permeâmetro manual e simular a concentração química com metais em latossolo amarelo, predominante na área de estudo.

No *Hydrus 1D*, foram utilizadas a equação de Van Genuchten (1980), e a equação (5), equação de Darcy-Buckingham descrita em Jury (2004), com parâmetros padronizados que consideram a condutividade hidráulica saturada (K_s) como dependente dos padrões texturais do solo (potencial matricial), além de outros fatores, como teor de umidade e adensamento:

$$q = -K_s \frac{\partial h}{\partial z} + K_s \quad (5)$$

Na equação (5), q é a vazão do fluxo de água, K_s é a condutividade hidráulica saturada (cm/dia) (valor fixo e constante por tipo de solo), h é a carga hidráulica dissipada (pressão) e z é a área do solo tomada como parâmetro. A equação apresentada acima permite a definição de valores, como a velocidade de percolação da água em fluxos variados, conforme as características de textura do solo.

Ensaio com permeâmetro computadorizado

A terceira etapa foi a operacionalização dos procedimentos com leitura dos sensores de solo higrômetro. Foi montado o esquema eletrônico ilustrado na Figura 2(a), composto por 1 Arduino UNO R3, por 1 microcontrolador Atmega328p de Barret (2013) – Teensy 2.0+ e 3 Sensores de umidade do Solo (*Hygrometer*) YL-69 KDQ11, de Njoroge (2008) –, por 1 base de controle, 1 base *shield* Grove V4 analógica e digital, e por fios e cabos para as conexões.

Os sensores foram fixados com cola de silicone, com penetração de 5 mm na coluna de PVC, apresentando as seguintes localizações a partir do topo: à altura de 30 cm e posição norte

(para o sensor A0), a 40 cm e posição oeste (para o sensor A1), e a 50 cm e posição sul (para o sensor A2) – Figura 2(b).

O sensor de umidade do solo lê o conteúdo de umidade em torno do solo. Uma corrente passa entre os eletrodos através do solo, e a resistência à corrente no solo determina a umidade. Se o solo tem alta umidade, sua resistência será baixa e, portanto, mais corrente irá passar. Por outro lado, quando a umidade do solo está baixa, o módulo sensor emite um alto nível de resistência. Essa resistência está relacionada com o teor de umidade, conforme a tensão em CC, que é medida aplicando-se a lei de Ohm.

A leitura de dados do solo num tubo de PVC do permeâmetro de carga constante origina-se do sensor higrômetro que leva o sinal para o Arduino através da placa de *shield* V4, por uma voltagem que varia de 0 a 5 V e representa valores escalares entre 0 e 1023 bits, 0 correspondendo ao solo mais úmido e 1023 correspondendo ao solo mais seco. Assim, a análise e a interpretação permitiram alcançar resultados de umidade relativa do solo e, desse modo, pôde-se caracterizar quando

o solo estava em estado de retenção hidráulica segundo a variação da umidade.

O estado do solo e as faixas de valores de saídas foram:

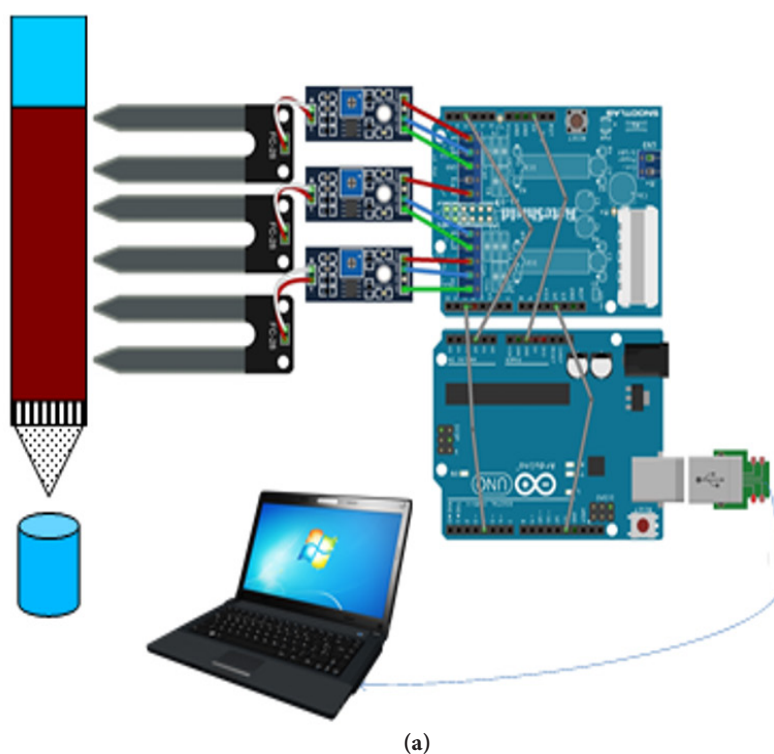
- de 0 a 500, umidade excessiva (solo encharcado);
- de 500 a 800, umidade normal (solo úmido);
- de 800 a 1023, umidade escassa (solo seco).

Houve necessidade da conversão dos dados originados dos sensores, invertendo-se os valores para adequação em série crescente, iniciando-se pelo solo seco em zero até o solo totalmente encharcado, correspondendo a 1023 bits. Essa operação permitiu a real representação do cálculo proporcional da umidade.

Os sensores foram calibrados de acordo com as especificações do fabricante e de acordo com Jimenez (2018). Posteriormente, considerando a equação (6), foi realizada uma análise pelo método direto em uma das amostras (CTR-AA-002). O resultado foi considerado favorável, apresentando valores aproximados em 85% dos resultados alcançados na fase de calibração dos sensores, tanto para o solo seco como para o solo saturado.

Figura 2(a) – Esquema de montagem do circuito sensores-arduino-computador (*PComp*)

Figura 2(b) - Imagem do circuito sensores-arduino-computador



$$\theta = \frac{V_w}{V_T} \tag{6}$$

Na equação (6), θ é a umidade no solo, V_w é o volume de água, e V_T é o volume total (volume de solo + volume de água).

Para a captação dos dados eletrônicos, empregou-se o sistema de permeâmetro computadorizado acoplado a uma coluna de PVC, e foi realizada a saturação da amostra de acordo com o procedimento manual descrito. Após esse procedimento, foi realizada a percolação de água em carga constante e feita a leitura dos dados a cada 15 segundos por 30 minutos, anotando-se o fluxo de água sob o efluente da coluna para cada amostra de solo.

Foi determinado um valor de incerteza nas medições, considerando possíveis problemas de leitura dos sensores em razão da qualidade de fabricação e da diversificação textural nos solos (DAMASCENO *et al.*, 2009). O método empregado foi o conhecido “Incerteza do Tipo A”, de Bisquerria *et al.*, (2009), em que a incerteza padrão $\mu(x_i)$ é obtida pela estimativa da variância da média s^2/n e conhecida a partir de uma série de amostras repetidas. O desvio-padrão estimado $\mu = s/\sqrt{n}$ é

denominado de medida de incerteza, em que n é o número de medidas, e s , o desvio-padrão correspondente às n leituras.

Na Tabela 2(a), observam-se 7 leituras, sendo as duas primeiras colunas retiradas da especificação do fabricante, para solo tipo *loamy* (SANTANA *et al.*, 2003), e as duas seguintes uma média das leituras dos sensores do *PComp*. A Tabela 2(b) mostra o desvio-padrão calculado pelo *software* SPSS, v. 18.

O cálculo para incerteza foi determinado, na leitura do sensor, desta forma:

$$\mu = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{24,515}{\sqrt{8}} = \frac{24,515}{2,828} = 8,669: \cong 9 \text{ bits.}$$

Por fim, foi realizada a comparação entre a retenção hidráulica apurada pelo procedimento manual (Q_r) e a retenção hidráulica apurada pelo sistema de permeâmetro computadorizado ($Q_{r(PComp)}$).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dos ensaios com procedimentos manuais com todas as amostras, obteve-se, pelo método de Klute e Dirksen (1986),

Tabela 2(a) – Valores médios nas leituras das amostras de solo

N. Amostra	Água/solo (cm³)	Sensor fabricante (<i>loamy</i>)	Água/solo (cm³)	Sensor <i>PComp</i> (<i>loamy</i>)
1	0	1021	9	925
2	40	680	18	825
3	65	504	28	793
4	79	215	40	594
5	111	203	46	345
6	135	191	54	317
7	165	180	73	311
8	176	175	76	308

Tabela 2(b) – Avaliação da incerteza nas medições em desvio-padrão

	Estatística Descritiva			
	Q. Amostras	Média	Erro-padrão	Desvio-padrão
Água – solo (cm³)	8	96,37	22,775	60,257
Sensor fabricante	8	396,12	117,208	310,104
Água – solo <i>PComp</i> (cm³)	8	43	9,266	24,515
Sensor <i>PComp</i>	8	552,25	104,876	277,475

o coeficiente médio de condutividade hidráulica (K_s), em cm/dia, e a retenção hidráulica (Q_r) média, em ml. Os resultados foram registrados na Tabela 3 e depois aplicados na fase de modelagem numérica para avaliação da exposição.

Na Figura 3(a), está ilustrado o gráfico com o fluxo do soluto na zona A (zona superficial do solo), no qual se pode observar uma curva acentuada até o décimo dia de percolação do solo, chegando a uma nivelção de aproximadamente 0,01347 mol/cm² de contaminantes inorgânicos presentes na amostra. Para os 80 dias restantes, o comportamento da curva foi linear, considerando o total de 90 dias do evento simulado.

Essa simulação foi realizada com dados de concentração química catalogados no *Hydrus 1D*, que serviram de parâmetro para a indicação do comportamento da concentração química no meio diante da percolação do soluto no solo.

A Figura 3(b) mostra a relação entre a condutividade hidráulica (K_s) e o teor de umidade do solo (retenção hidráulica) (θ_r). A partir da retenção hidráulica média superior a 1,2 cm³/cm³, observa-se o aumento da condutividade hidráulica satu-

rada, elevando-se rapidamente quando chega a 100 cm/dia, o que, presume-se, aumenta a concentração dos contaminantes no solo pelo incremento da lixiviação do soluto e pelo possível aumento da retenção de água pelo solo.

Percebeu-se que os comportamentos e os valores das curvas, nos dois gráficos analisados, estão relativamente sendo complementados e se encontram dentro do padrão do tipo de solo considerado em Leij (1996).

Pelas concentrações avaliadas de metais gerais no solo, esses resultados indicaram provável presença de risco moderado ou alto, considerando a duração e a frequência da exposição no período avaliado e os dados referenciais no *Hydrus 1D*.

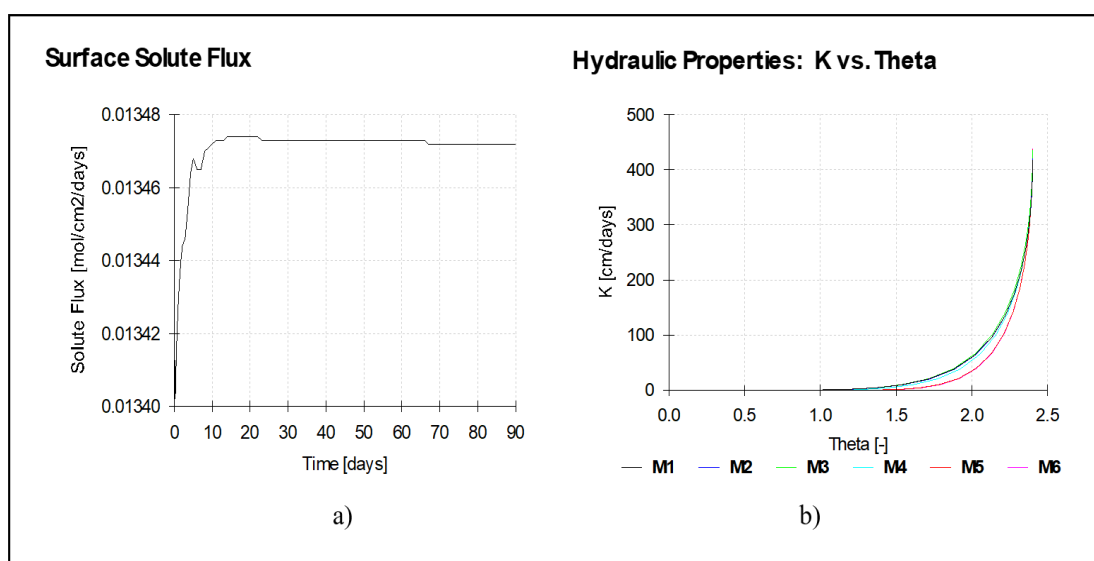
Os resultados obtidos dos experimentos físicos no solo, realizados com ensaios manuais pela metodologia de Klute e Dirksen (1986), permitiram a comparação com os resultados encontrados pelo emprego do sistema de permeâmetro computadorizado. Isso facilitou os ensaios de calibração do modelo

Tabela 3 – Valores resultantes das amostras de solo

Amostra	B_0 (cm)	T (dias)	Q (ml)	K_s (cm d ⁻¹)
CTR-AA-001	22	0,042	412	417,53
CTR-AA-002	22	0,042	432	419,83
CTR-AA-003	23	0,042	422	435,14
CTR-AA-004	23	0,042 </td <td>560</td> <td>427,12</td>	560	427,12
CTR-AA-005	23	0,042	590	430,41
CTR-AA-006	23	0,042	980	436,39
CTR-AA-007	24	0,042	100	438,64
CTR-AA-008	21	0,042	410	411,87

Figura 3(a) – Lixiviação da concentração de contaminantes inorgânicos no solo em simulação, por 90 dias

Figura 3(b) – Relação entre condutividade hidráulica e retenção hidráulica saturada



eletrônico e da modelagem numérica para a verificação do desempenho operacional do novo sistema.

Esse sistema foi viabilizado por um *software* utilizado para recebimento dos dados originados da leitura dos sensores através do *shield* e Arduino, via porta serial, que contém um método que contempla uma estrutura de repetição com *delay* ajustado pelo usuário e recebe, por parâmetro, o número do pino analógico do tipo inteiro e retorna o dado interpretado sobre a umidade, que varia entre 0 e 1023 bits.

O *software* foi programado em linguagem C#, na plataforma .Net versão 4.0, utilizando o MS Visual Studio 2017 (MICROSOFT, 2020).

Dos resultados das medições com os procedimentos manuais e com o sistema de permeâmetro computadorizado (*PComp*), foram feitas comparações entre a retenção hidráulica obtida pelos dois métodos. A Tabela 4 ilustra esses resultados contendo os parâmetros hídricos levantados, como o coeficiente hidráulico medido em cm/dia (K_s), o fluxo hídrico após efluente de percolação, em ml (J_w), e a retenção hidráulica na coluna de solo, em ml (Q_r). O principal parâmetro comparado para fins de verificação do desempenho operacional do *PComp* foi a retenção hidráulica, que corresponde ao nível de umidade no solo.

Observa-se que, na amostra CTR008, ocorreram os menores níveis de retenção hidráulica ($Q_r = 1067,52$ ml e $Q_{r(PComp)} = 556,72$ ml) para os dois procedimentos, e o menor fluxo hídrico para o procedimento manual apurado ($J_w = 633,65$ ml). Portanto, houve o mesmo padrão de comportamento hídrico no solo. Esse comportamento é coerente com o tipo de

solo da amostra, mais argiloso e, portanto, com nível maior de saturação e com mais contaminação.

Para os maiores níveis de retenção hidráulica, houve comportamento idêntico. Obteve-se, nas amostras CTR003 e CTR006, por procedimento manual, os seguintes valores para Q_r (ml), respectivamente: 1139,37 e 1145,88. Para as amostras CTR003, CTR004 e CTR006, foram apurados, pelo *PComp*, os seguintes valores para $Q_{r(PComp)}$ (ml), respectivamente: 958,22, 1028,82 e 898,06,

Pela comparação proporcional entre os valores de retenção hidráulica nos dois métodos, a menor aproximação do resultado pelo *PComp* para o resultado pelo procedimento manual foi da amostra CTR008, com 52,15%, e a maior aproximação ocorreu na amostra CTR004, com 93,26%. A média na comparação para esse parâmetro em todas as amostras resultou em 73,06%, o que significa que o método apurado pelo *PComp* apresenta coerência na aproximação com o resultado apurado pelo procedimento manual, indicando viabilidade na continuação da pesquisa e no aperfeiçoamento do sistema ora proposto.

Por outro lado, a menor aproximação entre os valores apurados está na amostra CTR008, com a proporção de 52,15%. Mesmo considerando que houve um possível nível alto de incerteza nos procedimentos adotados, o resultado de 52,15% na comparação com o método manual já indica que há viabilidade para a determinação da retenção hidráulica pelo *PComp*. Sabe-se, porém, que os fatores incidentes na incerteza precisam ser conhecidos e reparados.

Para verificação dos dados coletados pelo permeâmetro manual e pelo *PComp*, foi testada a técnica estatística de *Pearson*, como descrito em Bisquerria (2009), e o grau de correlação

Tabela 4 – Comparação de resultados pelos procedimentos manuais e pelo *PComp*

RETENÇÃO HIDRÁULICA / Amostra:	CTR001	CTR002	CTR003	CTR004	CTR005	CTR006	CTR007	CTR008	Média
L – Altura inicial do solo (cm)	38	38	37	37	37	37	36	39	37,375
B0 – Altura do volume da água (cm)	22	22	23	23	23	23	24	21	22,625
K_s (cm/d)	417,53	419,83	435,14	427,12	430,41	436,39	438,64	411,87	427,12
J_w (ml)	659,26	662,88	705,63	692,62	697,96	707,66	731,07	633,65	686,34
V (ml)	1735,73	1751,44	1845,00	1795,77	1814,27	1853,54	1869,25	1701,17	1795,77
Q_r (ml)	1076,47	1088,56	1139,37	1103,15	1116,31	1145,88	1138,18	1067,52	1109,43
Leitura do sensor	583	514	412	674	529	453	461	638	533,00
Conversão dos dados do sensor	440	509	611	349	494	570	562	385	490,00
Umidade (%)	43,01	49,76	59,73	65,88	48,29	55,72	54,94	37,63	51,87
Q_r sensor (ml)	746,55	871,44	1101,95	1183,14	876,10	1032,76	1026,90	640,23	934,88

Tabela 5 – Correlação de *Pearson* para retenção hidráulica

Técnicas de comparação		Q _r	Q _{r(PComp)}
Q _r	<i>Pearson</i> , Correlação	1	0,746*
	Sig. (2-tailed)		0,033
	N	8	8
Q _{r(PComp)}	<i>Pearson</i> , Correlação	0,746*	1
	Sig. (2-tailed)	0,033	
	N	8	8

* A correlação é significativa em 0.05 (2-tailed).

entre as variáveis de retenção hidráulica (Q_r e $Q_{r(PComp)}$), com o objetivo de conhecer a viabilidade de utilização do procedimento pelo permeâmetro computadorizado e o grau de significância dos dados apurados. Conforme indicado na Tabela 5, o teste *Pearson* foi calculado pelo pacote estatístico SPSS, v. 18, obtendo-se a análise correlacional em 0,746, com significância em 0,033 para um nível de confiança de 95%.

CONCLUSÃO

A comparação com os procedimentos realizados mostrou viabilidade para a continuação das pesquisas e para o desenvolvimento do permeâmetro computadorizado, embora seja preciso considerar que foram procedimentos iniciais no nível de aproximação entre os procedimentos manuais e o procedimento computadorizado, chegando-se aproximadamente a 73% na comparação.

Os ensaios com o *Hydrus 1D* puderam validar os parâmetros físicos de condutividade hidráulica e de retenção hidráulica, parâmetros importantes para analisar a contaminação química de inorgânicos, atingindo o objetivo da pesquisa.

O sistema eletrônico e o *software* desenvolvidos mostraram-se satisfatórios nos ensaios com as amostras de solo saturado, possibilitando condições para outras calibrações em momentos futuros.

O *PComp* desenvolvido mostrou-se viável mesmo nos primeiros ensaios, indicando ser uma alternativa econômica para a utilização em projetos acadêmicos e práticos. O custo com o desenvolvimento do protótipo equivaleu a aproximadamente 10% do permeâmetro em bancada com colunas de PVC para carga constante e variável.

REFERÊNCIAS

BARRETT, Steven F. Arduino microcontroller processing for everyone! *Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems*, v. 8,

n. 4, p. 1-513, 2013.

BISQUERRA, Rafael; SARRIERA, Jorge C.; MATÍNEZ, Francesc. **Introdução à estatística**: enfoque informático com o pacote estatístico SPSS. Bookman Editora, 2009.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; ANA – Agência Nacional de Águas. **Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras**: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes de líquidos. Brasília, 2011.

CERNICCHIARO, G.; BARMAK, R.; TEIXEIRA, W. G. Digital interface device for field soil hydraulic conductivity measurement. *Journal of Hydrology*, v. 576, p. 58-64, 2019.

DAMASCENO, Jailton Carreteiro; ANTONIO, João; DE OLIVEIRA, Sérgio Pinheiro. Avaliação de dados de medição – Guia para a expressão de incerteza de medição. **INMETRO**, 2008.

DOCK-NASCIMENTO, Diana Borges *et al.* Precisão de métodos de estimativa do peso e altura na avaliação do estado nutricional de pacientes com câncer. *Rev Bras Nutr Clin*, v. 21, n. 2, p. 111-116, 2006.

DONAGEMA, Guilherme Kangussú *et al.* Manual de métodos de análise de solo. **Embrapa Solos-Documentos (INFOTECA-E)**, 2011.

JIMÉNEZ, Anabel de los Ángeles Calva. **Calibração do sensor de umidade do solo modelo YL-69 para manejo da irrigação**. 2018. 51 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

JURY, William A.; HORTON, Robert. **Soil physics**, 6th ed, edit. John Wiley & Sons Inc. 2004.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. **Methods of soil analysis**: part 1 – physical and

mineralogical methods, n. methodsofsoilan1, p. 687-734, 1986.

LEIJ, Feike J. **The UNSODA unsaturated soil hydraulic database: user's manual.** National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 1996.

MARTÍNEZ URIBE, Cristina. **Projeto e construção de um permeâmetro de parede flexível e carga constante.** 2016, 114 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2016.

MICROSOFT TRADEMARK. Visual Studio Professional. Disponível em: <https://www.visualstudio.com/pt-br/downloads/>. Acesso em: jan. 2020.

NJOROGE, Kimani Paul. Microcontroller-Based Irrigation System. **BSc in Electrical and Information Engineering.** Nairobi: University of Nairobi, 2008.

RADCLIFFE, David Elliott; SIMŮNEK, Jiří. **Soil physics with HYDRUS: Modeling and applications.** Boca Raton, FL: CRC press, 2010.

OTTONI, Marta Vasconcelos *et al.* Funções de pedotransferência para condutividade hidráulica saturada usando um banco de dados com solos de clima temperado e tropical. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1345-1358, 2019.

RODRÍGUEZ-JUÁREZ, Pedro *et al.* Automated Laboratory Infiltrometer to Estimate Saturated Hydraulic Conductivity Using an Arduino Microcontroller Board. **Water**, v. 10, n. 12, p. 1867, 2018.

SANTANA, S. de *et al.* Zoneamento agroecológico do município de Ilhéus, Bahia, Brasil. **Boletim Técnico** – Ceplac-Cepec, n. 186, 2003.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; SEJNA, M. The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 4.0x, Hydrus Series 3, **Technical manual**, version, v. 1, p. 241, 2006.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

CURRÍCULOS

* Doutor em Ciências Ambientais. Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC/DCET. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2756638501081370>

** Bacharel em Engenharia de Produção. Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC/DCET. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5082218062358291>

*** Graduando em Ciência da Computação. Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC/DCET. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2510824092604238>

**** Bacharel em Engenharia Civil. Faculdade Madre Thais (FMT). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2624191032319838>