

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

LEONARDO INFORSATO

**Determinação das propriedades hidráulicas do solo pelo método de
evaporação monitorada por atenuação de radiação gama**

Piracicaba
2018

LEONARDO INFORSATO

**Determinação das propriedades hidráulicas do solo pelo método de
evaporação monitorada por atenuação de radiação gama**

Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

**Dissertação apresentada ao Centro de
Energia Nuclear na Agricultura da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.**

**Área de Concentração: Energia Nuclear na
Agricultura e no Ambiente**

**Orientador: Prof. Dr. Quirijn de Jong van
Lier**

Piracicaba

2018

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Inforsato, Leonardo

Determinação das propriedades hidráulicas do solo pelo método de evaporação monitorada por atenuação de radiação gama, município de Piracicaba, São Paulo / Leonardo Inforsato; orientador Quirijn de Jong van Lier. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

63 p. : il.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Análise do solo 2. Evaporação 3. Física do solo 4. Fluxo de líquidos
5. Modelos matemáticos

CDU 631.43 : (535.241.1 + 519.233.2)

Elaborada por:

Marília Ribeiro Garcia Henyei

CRB-8/3631

Resolução CFB Nº 184 de 29 de setembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo apoio: pai, mãe e irmã.

Agradeço aos amigos de longa data pelo apoio e descontração, os amigos que fiz durante o mestrado e os amigos de laboratório.

A Clécia e Lohane, amizades que fiz durante o mestrado e vão permanecer por longo período.

A Huf pelas belas paisagens. A Amy por me guiar pela Holanda. Agradeço a Sil pelos momentos de descontração.

Agradeço ao Orientador Prof. Quirijn por auxiliar, orientar e permitir a realização deste trabalho.

Agradeço a secretaria de pós-graduação do CENA pelo auxílio e esclarecimento.

Agradeço a CAPES – PROEX pela bolsa que me permitiu realizar o trabalho de mestrado e cursar as disciplinas necessárias no programa.

Por último, agradecimento especial para a Bruna, minha companheira.

Obrigado!!!

RESUMO

INFORSATO, L. **Determinação das propriedades hidráulicas do solo pelo método de evaporação monitorada por atenuação de radiação gama**. 2018. 63 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

Modelos matemáticos são comumente utilizados no estudo da dinâmica da água no solo não-saturado. A principal equação para se quantificar esta dinâmica é a equação diferencial de Richards. Sua solução direta é impossível na maioria dos casos, necessitando de métodos numéricos, dos quais se destaca a utilização das funções de condutividade e de retenção de água de Van Genuchten – Mualem para obtenção da solução numérica. Diante disto, o objetivo deste trabalho foi apresentar um novo método para a obtenção dos parâmetros de Van Genuchten – Mualem, que utiliza a modelagem inversa de dados de teores de água medidos periodicamente e obtidos por experimento de evaporação assistido por atenuação de radiação gama, para a modelagem inversa foi utilizado o software Hydrus-1D. O método foi testado em amostras com diferentes texturas, colhidas em 11 localidades na região de Piracicaba-SP. Dos conjuntos de exemplares analisados, apenas um apresentou resultado insatisfatório, concluindo que o método é válido.

Palavras-chave: Método de Wind. Hydrus-1D. Modelagem inversa.

ABSTRACT

INFORSATO, L. **Determination of soil hydraulic properties by the evaporation method monitored by gamma ray attenuation**. 2018. 63 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

Mathematical models are commonly used in studies of water dynamics in unsaturated soil. The main equation to quantify water the dynamics is the differential Richards equation. Its analytical solution is impossible in almost all cases, requiring numerical methods, among which the Van Genuchten - Mualem water conductivity and water retention functions are frequently used to obtain the numerical solution. The objective of this work is to present a new method to obtain the Van Genuchten - Mualem parameters, using the inverse modeling of water content data measured periodically by gamma radiation attenuation in evaporating samples. Hydrus-1D software was used for the inverse modeling. The method was tested in samples with different textures, collected in 11 locations in the region of Piracicaba, state of São Paulo, Brazil. Of the sets of samples analyzed, only one presented an unsatisfactory result, concluding that the method is valid.

Keywords: Wind's method. Hydrus-1D. Inverse Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do percurso do feixe de radiação gama entre fonte e detector, passando pela amostra de solo.....	21
Figura 2 – Desenho esquemático do detector de cintilação.....	25
Figura 3 – Desenho esquemático da Câmara de pressão (a); Visão amplificada dos poros da amostra de solo na Câmara de pressão (b).	26
Figura 4 – Diagrama dos experimentos realizados para determinar propriedades do solo.....	28
Figura 5 – Esquema da mesa de atenuação de radiação gama.	31
Figura 6 – Representação esquemática do procedimento de posicionamento para medição da ARG em uma amostra. A parte (a) é referente à vista lateral, a parte (b) é referente à vista superior.....	32
Figura 7 – Fluxograma do experimento virtual realizado.....	35
Figura 8 – Curvas de retenção e de condutividade das 5 amostras do P11 camada 0-7 cm e do P9 camada 0-7 cm.	41
Figura 9 – Curvas de teor de água por tempo dos solos P9 camada 0-7 cm amostra 5 e P7 camada 0-7 cm amostra 3 em três posições verticais das amostras. “fit” refere-se ao ajuste feito pelo Hydrus-1D e “obs” aos medidos por ARG.....	42
Figura 10 – Efeito da adição e subtração de desvios padrão nas contagens de radiação gama nas cinco amostras secas do solo P9 camada 0-7 cm e suas respectivas médias.....	44
Figura 11 –Efeito da adição e subtração de desvios padrão nas contagens de radiação gama nas cinco amostras secas do solo P7 camada 0-7 cm e suas respectivas médias.....	45
Figura 12 – Sobreposição das curvas médias de amostras com diferentes desvios padrão na contagem de radiação gama nas amostras secas dos solos P9 camada 0-7 cm e P7 camada 0-7 cm.	46
Figura 13 – Curvas de retenção do solo P1, camada 0-7 cm e curvas de condutividade do solo P10, camada 30-37 cm respectivamente.....	47
Figura 14 – Curvas de retenção resultantes do experimento virtual, (a) referente ao P.I. 12 e (b) referente ao P.I. 8. O Desv x. é o multiplicador do desvio padrão nos valores aleatórios obedecendo distribuições normais.	49

- Figura 15 – Comparação entre modelagens inversas com diferentes teores de água obedecendo valores aleatórios de uma distribuição normal na simulação do experimento de evaporação com contagem de ARG. 51
- Figura 16 – Curvas de retenção obtidas pela câmara de pressão e pelo método de evaporação com ARG nos solos P7 camada 0-7 cm (P7 C1) e P2 camada 30-37 cm (P2 C2). Pontos representam valores medidos e curvas são as linhas ajustadas. 53
- Figura 17 – Potenciais matriciais obtidos pelo WP4C para 5 solos, depois de submetidos à câmara de pressão a 15 bar. C1 é referente a camada 0-7 cm e C2 referente a camada 30-37 cm. 54
- Figura 18 – Comparação em P1 camada 0-7 cm com θ_s ajustado (a), e medido (b)..... 56
- Figura 19 – Curvas de retenção obtidas por experimento de evaporação com ARG e por câmara de pressão dos solos P9 camada 0-7 cm (P9 C1), P7 camada 0-7 cm (P7 C1), e P2 camada 0-7 cm (P2 C1). Pontos representam os teores de água medidos pela câmara de pressão..... 58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas dos pontos de coleta com os respectivos usos atuais e classificação de solo.	29
Tabela 2 – Parâmetros iniciais (P.I.) das equações de Van Genuchten – Mualem utilizados na modelagem inversa do Hydrus-1D, correspondentes às classes texturais 1 a 12.....	33
Tabela 3 – Tempo de submissão das amostras aos respectivos potenciais no equipamento de tensão/pressão.	34
Tabela 4 – Características físicas das amostras de solo.	37
Tabela 5 – Resultados das contagens gama medidos em intervalo de tempo de 20 segundos.....	38
Tabela 6 – Parâmetros hidráulicos dos três solos com maiores médias no índice R^2	39
Tabela 7 – Parâmetros hidráulicos das três amostras de solo com menores médias nos índices R^2	39
Tabela 8 – Médias dos parâmetros hidráulicos das amostras de solo coletadas.....	40
Tabela 9 – Comparação das propriedades hidráulicas entre os solos com alteração na contagem de radiação gama das amostras secas para as camadas superficiais (0-7 cm) dos solos P9 e P7.	47
Tabela 10 – Valores dos parâmetros hidráulicos obtidos por modelagem inversa no experimento virtual.	50
Tabela 11 – Comparação entre os parâmetros hidráulicos obtidos por modelagem inversa com variação normal aleatória na contagem de ARG no experimento de evaporação. Valores em negrito correspondem aos originais.....	52
Tabela 12 – Maiores incrementos no índice R^2 considerando θ_s fixo na modelagem inversa.....	55
Tabela 13 – Desvios e médias do índice R^2 das propriedades hidráulicas de amostras individuais e médias das amostras.	57

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1.	Modelagem Inversa	18
2.2.	Atenuação da Radiação Gama	19
2.3.	Propagação de incertezas associadas à medição de teor de água por ARG ...	22
2.4.	Princípios dos instrumentos utilizados para medição de potencial e umidade do solo	24
2.4.1.	Detectores de Cintilação.....	24
2.4.2.	Câmara de pressão de Richards	25
2.4.3.	Psicrômetro WP4C	26
3.	MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1.	Amostragem e Caracterização de Solo	28
3.2.	Equipamento para Medição de Radiação Gama	30
3.3.	Procedimento de Medição da Atenuação da Radiação Gama	31
3.4.	Modelagem Inversa com Hydrus-1D.....	32
3.5.	Mesa de tensão e câmara de pressão.....	34
3.6.	Análise com o WP4C	35
3.7.	Experimento Virtual.....	35
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1.	Caracterização dos solos.....	37
4.2.	Contagem gama	38
4.3.	Modelagem inversa.....	38
4.4.	Inserção de desvios na contagem de radiação gama no solo seco.....	43

4.5. Experimento virtual.....	48
4.6. Retenção determinada na câmara de pressão.....	52
4.7. Utilização de θ_s fixo nas modelagens inversas.....	54
5. CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

Segundo relatório da Organização Nações Unidas de 2017, 70% de toda a água utilizada mundialmente é direcionada para o campo, sendo que em países em desenvolvimento esta fração pode chegar a 95%. Uma das metas da Organização das Nações Unidas, a de número 6, refere-se a aumentar substancialmente a eficiência do uso da água.

O estudo da dinâmica da água no solo utiliza-se de modelos físico-matemáticos para sua quantificação, necessitando de suas propriedades hidráulicas. A equação de Richards, uma equação diferencial, é o modelo analítico para este fim e combina a equação de continuidade com a de Darcy. Para chegar a uma solução da equação de Richards, necessita-se conhecer as funções hidráulicas do solo, a retenção da água $h(\theta)$, e a condutividade hidráulica $K(\theta)$. Essas relações costumam ser altamente não-lineares e necessitam de uma aproximação numérica para serem resolvidas.

Há diversas dificuldades para se obter as propriedades hidráulicas de solo. Experimentos de campo são geralmente custosos e demandam muito trabalho. Experimentos laboratoriais necessitam de tempo considerável para se obter resultados confiáveis. Dentre os métodos para se medir essas propriedades hidráulicas do solo, alguns se utilizam de medições numa amostra de solo durante a secagem por evaporação. Esse método é também referido como o método de Wind, em referência ao pesquisador que em 1969 fez um grande avanço à sua metodologia, adaptando um método iterativo e gráfico para relacionar h com θ , e então encontrar a função $K(\theta)$. A maneira mais comum de se fazer as medições pelo método de evaporação é com a utilização de tensiômetros, assim limitando à faixa de observações à faixa de seu funcionamento.

Outros métodos ou instrumentos podem ser empregados para a medição do teor de água nos experimentos de evaporação. A atenuação da radiação gama (ARG) é um deles. Utilizando-se da lei de Lambert-Beer, a medição da atenuação de um feixe mono-energético de radiação gama bem colimada pode ser convertida no teor de água. Para este fim, as fontes radioativas nucleares mais utilizadas são o ^{137}Cs e o ^{241}Am .

Juntando-se princípios do método de evaporação, medição da umidade do solo por atenuação de radiação-gama e técnicas de modelagem inversa, nessa dissertação propõe-se um novo método para a determinação das propriedades hidráulicas de amostras de solo indeformado, sem a utilização de tensiômetros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O solo é a parte mineral superior da superfície terrestre que sofreu fragmentações por ações físicas, químicas e biológicas, podendo haver recomposição por estas mesmas forças. Processos que ocorrem no solo podem ser caracterizados por modelos matemáticos em função de suas propriedades. Para o estudo da dinâmica de água no solo, as propriedades hidráulicas são importantes e interferem diretamente na relação solo – planta – água – atmosfera.

A medição direta de propriedades como teor de água (θ) ou de potencial matricial (h), no intervalo de interesse agrônomo, é relativamente fácil e bem estudado. Entretanto as medições diretas e precisas da condutividade hidráulica (K) ou difusividade (D) não-saturadas, em função do teor de água ou do potencial, são mais complexas e raras. Diversas maneiras indiretas de se determinar K ou D foram desenvolvidas, geralmente utilizando-se equações que permitam a correlação entre estes atributos. A precisão e exatidão na obtenção das propriedades medidas refletem diretamente na qualidade das propriedades derivadas, e métodos laboratoriais geralmente apresentam vantagem neste quesito por terem ambiente mais facilmente controlado.

Stolte et al. (1994) fizeram uma comparação entre seis métodos para a determinação das propriedades hidráulicas do solo, fazendo uma análise entre os resultados e precisão dos métodos. Alguns destes métodos determinam simultaneamente a K , D , θ e h , como o método de evaporação e one-step outflow, porém observa-se que novos equipamentos e técnicas podem melhorar os resultados desses mesmos métodos, como em Schindler et al. (2010), que aumenta o intervalo de medição do método de evaporação tratando o tensiômetro.

A formulação mais utilizada para descrever a relação entre K - h - θ , utilizada também neste trabalho, é o conjunto de equações de Van Genuchten (1980), com base no modelo de distribuição de poros de Mualem (1976).

$$\Theta = \left[1 + |\alpha h|^n \right]^{1/n-1} \quad (1)$$

$$K = K_{sat} \Theta^\lambda \left[1 - \left(1 - \Theta^{n/(n-1)} \right)^{1-1/n} \right]^2 \quad (2)$$

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

Sendo α (m^{-1}), n e λ , parâmetros empíricos; θ , θ_s e θ_r o teor de água, teor saturado e teor residual respectivamente, todos volumétricos ($m^3 m^{-3}$); K_{sat} a condutividade hidráulica saturada ($m s^{-1}$) e Θ o teor de água adimensional, h é o potencial total da água no solo (m).

A formulação de Van Genuchten – Mualem com seus parâmetros definidos permite resolver a equação de Richards (equação 4) por métodos numéricos. A equação de Richards é a combinação da equação de Darcy – Buckingham com a equação da continuidade, e descreve o fluxo vertical de um líquido monofásico em meio poroso, neste caso, o solo.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dz} \left[K(h) \left(\frac{dh}{dz} + 1 \right) \right] \quad (4)$$

Onde t é o tempo (s) e z é a coordenada vertical (m), muitas vezes tomada como a profundidade no solo.

2.1. Modelagem Inversa

O método laboratorial proposto por Wind (1969) fornece as propriedades hidráulicas de uma amostra de solo. É baseado em um processo iterativo que relaciona teor de água ou potencial matricial com o total de massa de água evaporada pela superfície da amostra. O teor de água ou a tensão matricial é determinada localmente por medição direta. 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, $h(\theta)$, e de condutividade $K(\theta)$ (HALBERTSMA; VEERMAN, 1994).

O modelo Hydrus-1D (SIMUNEK et al., 2013) permite fazer a otimização de parâmetros para a equação de Van Genuchten – Mualem a partir de dados observados no experimento de Evaporação. O Hydrus-1D otimiza os parâmetros

minimizando uma função objetivo, que pondera a discrepância entre os dados observados com os preditos. As condições de contorno iniciais são definidas, assim como os parâmetros iniciais são escolhidos e então um processo iterativo minimiza a função objetivo até que uma precisão desejada ocorra. Para cada passo da iteração é encontrada uma solução numérica para a equação de fluxo e depois para a função objetivo. O algoritmo de Marquardt – Levenberg (MARQUARDT, 1963) é utilizado para minimizar a função objetivo (SIMUNEK; WENDROTH; VAN GENUCHTEN, 1998).

2.2. Atenuação da Radiação Gama

A atenuação da radiação gama (ARG) pode ser utilizada para a medição direta de densidades e teor de água no solo. Começou a ser utilizada com sucesso na década de 50 para a medição da densidade do solo. Posteriormente, a técnica se difundiu para medição de outras propriedades, como a uniformidade de matérias, densidade de concreto ou concentração de sólidos em líquido. É considerada como uma técnica não destrutiva, permitindo medir localmente a propriedade desejada (FERRAZ; MANSELL, 1979). Utiliza-se a lei de Lambert – Beer para calcular o teor de água no solo a partir de dados da ARG. Fontes radioativas nucleares mais utilizadas são o ^{137}Cs e o ^{241}Am (TAMARI et al., 1993).

Quando um feixe colimado de radiação passa por um material homogêneo, os fótons interagem com a matéria, sofrendo absorvância ou espalhamento. A atenuação da intensidade do feixe é resultado destas interações. Em um feixe de radiação gama mono-energético bem colimado, a atenuação é proporcional à espessura do material analisado. Este coeficiente (k , m^{-1}) é a soma dos coeficientes de atenuação individuais (equação 5), sendo os mais significativos: efeito Compton, Thomson, fotoelétrico e produção de pares. Este coeficiente é geralmente expresso como a atenuação de massa, μ (m^2/kg), multiplicada pela sua densidade (ρ , kg/m^3):

$$k = \mu\rho = k_{\text{Compton}} + k_{\text{Thomson}} + k_{\text{Fotoelétrico}} + k_{\text{Pares}} + \dots \quad (5)$$

A equação de Lambert – Beer (equação 6) fornece a intensidade de fótons resultante I ($\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) de um feixe que sofre atenuação.

$$I = I_{\text{máx}} \exp[-\mu\rho x] \quad (6)$$

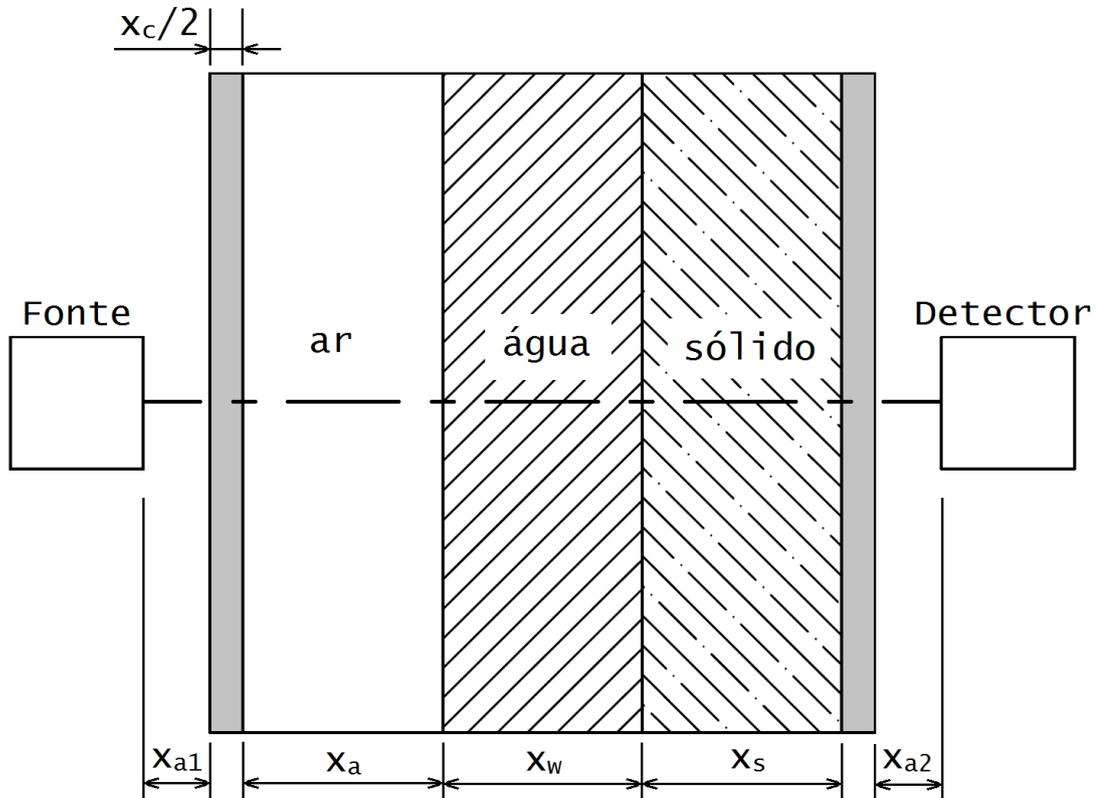
Sendo $I_{\text{máx}}$ a intensidade do feixe mono-energético colimado inicial, e x (m) a espessura do material. Em fontes de alta energia, como o ^{137}Cs pode-se desconsiderar a produção de pares, pois emitem, em grande maioria, fótons com 662 keV.

Em experimentos envolvendo amostras de solo, a atenuação do feixe de radiação acontece em quatro meios: água, ar, solo (parte sólida) e no recipiente da amostra (anel de coleta, de metal ou plástico). A atenuação de massa do ar é da mesma ordem de grandeza que a do aço e a da parte sólida do solo, porém com densidade muito menor, por isso pode-se desconsiderar a atenuação do ar, gerando erro inferior a 0,1%. A equação 6 pode ser escrita separando-se as atenuações referentes a cada um desses meios, ficando:

$$I = I_{\text{máx}} \exp[-\mu_w \rho_w x_w - \mu_c \rho_c x_c - \mu_s \rho_s x_s - \mu_a \rho_a x_a] \quad (7)$$

Sendo μ_w , μ_c , μ_s , μ_a os coeficientes de atenuação de massa da água, do anel de aço, do sólido do solo e do ar respectivamente. Os mesmos subscritos valem para as densidades ρ e espessuras x . A Figura 1 esquematiza o percurso do feixe no experimento.

Figura 1 – Representação esquemática do percurso do feixe de radiação gama entre fonte e detector, passando pela amostra de solo



Fonte: Adaptado de Ferraz e Mansell (1979).

Para se determinar o teor de água a partir da radiação gama, fazem-se duas medições da intensidade do feixe gama, uma com a amostra completamente seca (I_0 na equação 9) e outra com a mesma amostra com teor de água que se deseja medir (I na equação 8). É necessário medir com as mesmas configurações para se obter resultado de qualidade. Solos muito expansíveis em função do teor de água podem necessitar de alguma correção se maior precisão for desejada (SCHINDLER; DOERNER; MUELLER, 2015).

Segue o desenvolvimento para a equação 11, que permite o cálculo do teor de água.

$$I = I_{\text{máx}} \exp[-\mu_w \rho_w x_w - \mu_c \rho_c x_c - \mu_s \rho_s x_s - \mu_a \rho_a x_a] \quad (8)$$

$$I_0 = I_{\text{máx}} \exp[-\mu_c \rho_c x_c - \mu_s \rho_s x_s - \mu_a \rho_a x_a] \quad (9)$$

Considerando as frações volumétricas de água (teor de água), solo e ar do anel da amostra, como θ , θ_s e θ_a respectivamente, e dividindo equação 8 pela 9, obtém-se:

$$\frac{I}{I_0} = \exp[x(-\mu_w \rho_w \theta - \mu_a \rho_a \Delta\theta_a)] \quad (10)$$

Sendo x a espessura total da amostra. A partir dessa equação obtém-se a função para o teor de água (equação 11).

$$\theta = \frac{-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\mu_w \rho_w x} \quad (11)$$

O μ_w pode ser obtido na literatura, porém percebe-se divergência nos valores encontrados (FERRAZ; MANSELL, 1979; PIREZ et al., 2002), por isso pode ser medido para o equipamento. Para a atenuação por um corpo de água pura ($\theta = 1$), a equação 11 pode ser escrita como:

$$\mu_w = \frac{-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\rho_w x} \quad (12)$$

2.3. Propagação de incertezas associadas à medição de teor de água por ARG

Em condições perfeitas, as constantes da expressão 11 não carregariam incertezas significativas. Porém, mesmo em condições laboratoriais, algumas incertezas são importantes de serem discutidas. As grandezas μ , x , I_0 e I foram consideradas para esta análise, enquanto a densidade de água foi considerada constante para esta análise por apresentar baixíssima contribuição com o resultado final. Sendo assim, a incerteza aproximada padrão, σ , pode ser calculada pela equação 13, considerando as variáveis independentes entre si.

$$\sigma_\theta^2 = \left(\frac{\partial\theta}{\partial I}\right)^2 \sigma_I^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial I_0}\right)^2 \sigma_{I_0}^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial \mu_w}\right)^2 \sigma_{\mu_w}^2 \quad (13)$$

As derivadas parciais resultam em:

$$\frac{\partial \theta}{\partial I} = \frac{-1}{I \mu_w \rho_w x} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial I_0} = \frac{1}{I_0 \mu_w \rho_w x} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\mu_w \rho_w x^2} \quad (16)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \mu_w} = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\mu_w^2 \rho_w x} \quad (17)$$

O desvio de x pode ser obtido por medições dos anéis de amostra de solo, e o desvio de μ_w pode ser calculado utilizando o mesmo raciocínio aplicado para o cálculo do desvio do teor de água, com derivadas semelhantes (equação 19).

A distribuição de Poisson pode ser utilizada quando vários processos idênticos são observados. O decaimento de núcleos atômicos radioativos é uma típica situação na qual esta distribuição pode ser aplicada, desde que o tempo de meia vida do material radioativo seja muito maior que o intervalo de medição no experimento. Aproximando o desvio-padrão para a raiz do número de eventos ocorridos em uma distribuição de Poisson e considerando apenas a incerteza estatística na medição da intensidade do feixe de radiação gama, tem-se que $\sigma_I = \sqrt{I}$. Com estas considerações, a incerteza torna-se:

$$\sigma_{\theta}^2 = \left(\frac{-1}{I \mu_w \rho_w x}\right)^2 \sqrt{I}^2 + \left(\frac{1}{I_0 \mu_w \rho_w x}\right)^2 \sqrt{I_0}^2 + \left(\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\mu_w \rho_w x^2}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\mu_w^2 \rho_w x}\right)^2 \sigma_{\mu_w}^2 \quad (18)$$

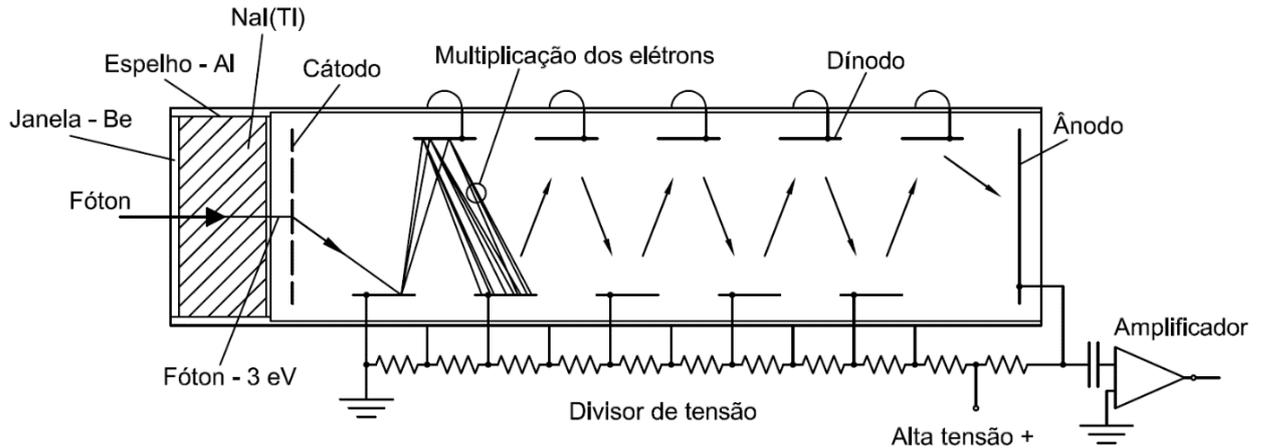
$$\sigma_{\mu_w}^2 = \left(\frac{-1}{I \rho_w x} \right)^2 \sqrt{I}^2 + \left(\frac{1}{I_0 \rho_w x} \right)^2 \sqrt{I_0}^2 + \left(\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\rho_w x^2} \right)^2 \sigma_x^2 \quad (19)$$

2.4.Princípios dos instrumentos utilizados para medição de potencial e umidade do solo

2.4.1.Detectores de Cintilação

Para se medir a intensidade do feixe de radiação gama, é utilizado um detector de cintilação, que transforma a energia dos fótons em pulsos elétricos. Este tipo de detector determina a quantidade de pulsos por um período, medindo a intensidade do feixe de radiação. Para serem eficientes é necessário um feixe com fótons de pelo menos 6 keV. A Figura 2 esquematiza o funcionamento do detector. Um fóton necessita de aproximadamente 30 eV para ejetar um elétron do iodo na camada de iodeto de sódio dopado com tálio, NaI(Tl). O elétron ejetado dissipa sua energia excitando camadas de valência. Ao receberem elétrons, os íons emitem fótons de 3 eV (410 nm), sendo que a intensidade desta luz é proporcional ao número de elétrons excitados pela radiação gama (aproximadamente energia do fóton em eV dividido por 3). O cristal de NaI(Tl) é revestido com material transparente a fótons com mais que 6 keV, porém reflete os fótons de 3 eV, direcionando-os para o cátodo (foto-cátodo). Os fótons com aproximadamente 3 eV interagem com o foto-cátodo, liberando elétrons que são acelerados para o dínodo mais próximo, a colisão libera mais elétrons e novamente sendo acelerado por outro dínodo com diferente potencial elétrico. A multiplicação dos elétrons depende da tensão entre os dínodos, sendo que o impulso elétrico é aumentado na ordem de 10^6 vezes. As incertezas nos processos acarretam em problemas na resolução do equipamento. Como exemplo, de cada 10 fótons com 3 eV que chegam no foto-cátodo, apenas 1 consegue ejetar um elétron para ser multiplicado pelos dínodos (GRIEKEN; MARKOWICZ, 2001).

Figura 2 – Desenho esquemático do detector de cintilação

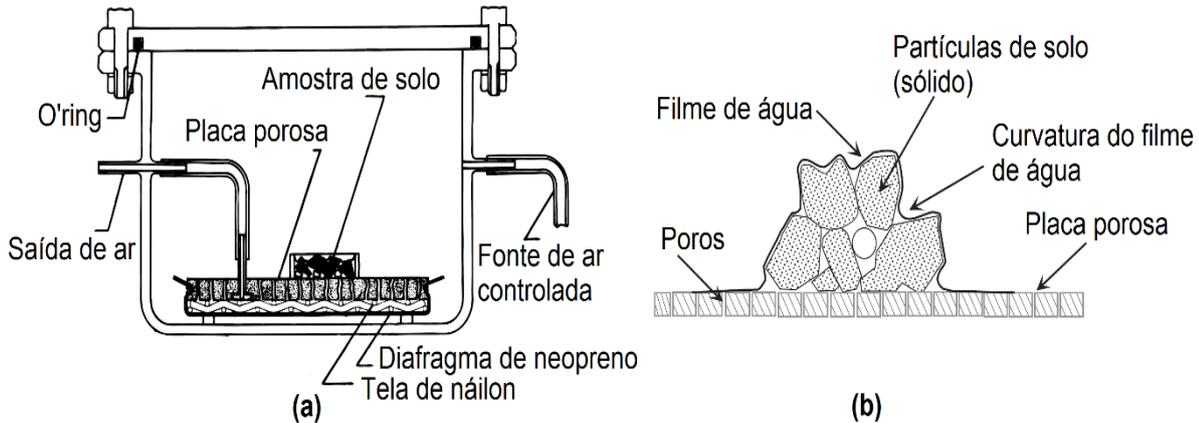


Fonte: Adaptado de Grieken e Markowicz (2001).

2.4.2. Câmara de pressão de Richards

A câmara de pressão de Richards, chamada apenas de câmara de pressão neste trabalho, é uma das principais maneiras laboratoriais diretas de se equilibrar a água em amostras de solo a um determinado potencial matricial h . Neste trabalho, h é expresso em unidades de comprimento (m), que representa a energia por unidade de peso ($J/N = m$). A câmara é feita para suportar alta pressão, e dentro dela se coloca uma placa de cerâmica porosa que tem seu lado inferior coberto por um diafragma flexível. Para permitir que a água que passe pela placa porosa saia da câmara sem dificuldades, encontra-se uma tela entre a placa e o diafragma, como na figura 3 (a). A Figura 3 (b) é uma visão ampliada da amostra de solo na câmara. O potencial osmótico não interfere neste método, dado que solutos atravessam livremente da amostra de solo para a placa porosa saturada.

Figura 3 – Desenho esquemático da câmara de pressão (a); Visão ampliada dos poros da amostra de solo na câmara de pressão (b)



Fonte: Manual de instrução da Soilmoisture Equipment Corp. de maio de 2008.

2.4.3. Psicrômetro WP4C

O psicrômetro WP4C, da Decagon Devices Inc., é um instrumento utilizado para medição do potencial da água, sendo que o equipamento mede a soma do potencial matricial e do osmótico. O WP4C mede a pressão de vapor de água da amostra. Inicialmente, a água da amostra a ser analisada (que pode ser líquida ou sólida) entra em equilíbrio com seu vapor dentro de uma câmara selada. O ar+vapor na câmara é resfriado e um detector óptico detecta quando gotículas de orvalho começam a se formar no espelho. Um termômetro de alta precisão registra esta temperatura e é feita a conversão para a pressão de vapor correspondente (GEE et al., 1992). O potencial da água h (m) é então calculado por:

$$h = \frac{RT}{gM} \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (20)$$

Sendo p (Pa) a pressão de vapor medida pelo sensor, p_0 (Pa) a pressão de vapor saturado à temperatura inicial da amostra de solo, R é a constante dos gases ($8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), g é a aceleração gravitacional ($9,81 \text{ m s}^{-2}$), T (K) é a temperatura e M (kg mol^{-1}) é a massa molar da água e h (J/kg) é a soma dos potenciais matricial e osmótico.

Para separar o potencial matricial e osmótico numa medição com o WP4C, o potencial osmótico ψ_{os} (MPa) pode ser estimado pela medição da condutividade elétrica, por:

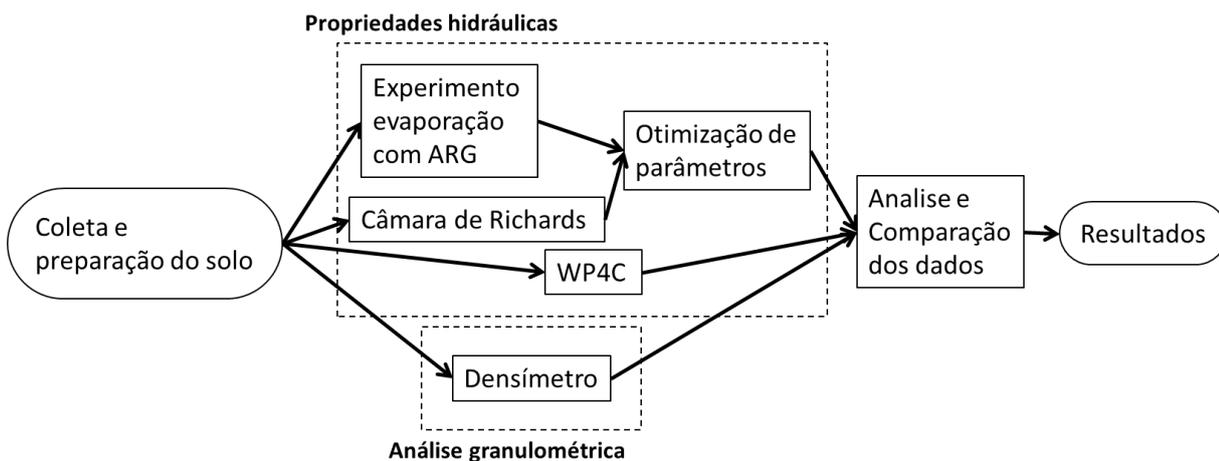
$$\psi_{os} = -0,036EC \left(\frac{\theta_s}{\theta} \right) \quad (21)$$

Sendo EC a condutividade elétrica em dS/m.

3.MATERIAL E MÉTODOS

Para testar o método de determinação das propriedades hidráulicas proposto, foram realizados experimentos e comparações com métodos conhecidos. O objeto das análises e comparações foram amostras de solos coletados na região de Piracicaba (SP) Neste capítulo, será descrito como foram realizados os experimentos para validar a método proposto para obtenção das propriedades hidráulicas do solo, bem como o material utilizado. O processo envolvendo os experimentos realizados podem ser conferidos na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama dos experimentos realizados para determinar propriedades do solo



3.1.Amostragem e Caracterização de Solo

Para testar o método de evaporação por ARG, solos de diferentes texturas foram coletados para comparar com o método tradicional de sua determinação (câmara de pressão e mesa de tensão) de se obter a curva de retenção do solo. Amostras indeformadas e deformadas foram coletadas em duas profundidades (0,00 até 0,07 m e 0,30 até 0,37 m) em 11 locais, na região de Piracicaba, SP (Brasil).

As amostras deformadas foram utilizadas para a análise granulométrica e para medições de alguns pontos da curva de retenção com o WP4C e câmara de pressão.

Os anéis com amostras de solo indeformadas utilizados na medição de atenuação da radiação gama possuíam 70 mm de altura e 74,2 mm de diâmetro interno, com paredes de aço com espessura de 1 mm. Foram utilizadas 5 réplicas por camada/solo nas medidas por ARG. Em alguns casos, amostras foram perdidas por apresentarem fissuras ou não estarem agregadas o suficiente para permitir manuseio ao prepara-las. Nestes casos utilizou-se um número menor de réplicas. Para as determinações utilizando a câmara de pressão e mesa de tensão, foram utilizados anéis com 30 mm de altura e 46,7 mm de diâmetro interno e parede de aço de 2 mm. Quatro réplicas foram utilizadas para estas medições. A classificação e localização de cada solo amostrado estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Coordenadas dos pontos de coleta com os respectivos usos atuais e classificação de solo

Tipo de solo	Ponto de coleta	Uso atual	Coordenadas geográficas	
			Sul	Oeste
1 - Neossolo Quartzarênico	P1	Pastagem bem conservada	22°34,87'	47°53,38'
	P2	Cultivo de cana-de-açúcar	22°34,89'	47°53,37'
2 - Latossolo de textura argilosa	P3	Solo nu (sem uso agrícola)	22°43,52'	47°35,15'
	P4	Cultivo de cana-de-açúcar	22°43,71'	47°33,29'
3 - Argissolo de textura média	P5	Floresta natural	22°42,93'	47°36,66'
	P6	Área de pastejo intensivo	22°42,87'	47°36,68'
4 - Latossolo de textura média	P7	Floresta natural	22°41,56'	47°38,66'
	P8	Múltiplo uso agrícola	22°41,54'	47°38,69'
5 - Neossolo Quartzarênico	P9	Cultivo de cana-de-açúcar	22°14,67'	47°43,31'
	P10	Floresta natural	22°14,66'	47°43,25'
	P11	Plantação de eucalipto	22°14,69'	47°43,40'

Para fins de caracterização dos solos, foram feitas análises granulométricas pelo método do densímetro de Bouyoucos modificado (BOUYOUCOS, 1928), de acordo com o manual da Embrapa (2011).

O método do densímetro utilizado para análise granulométrica baseia-se na separação dos sedimentos por um agente dispersor químico, NaOH e $(\text{NaPO}_3)_6$. A

fração de areia é separada por peneiramento e a fração de argila é obtida pela densidade do fluido com argila dispersa. A fração de silte é obtida por diferença.

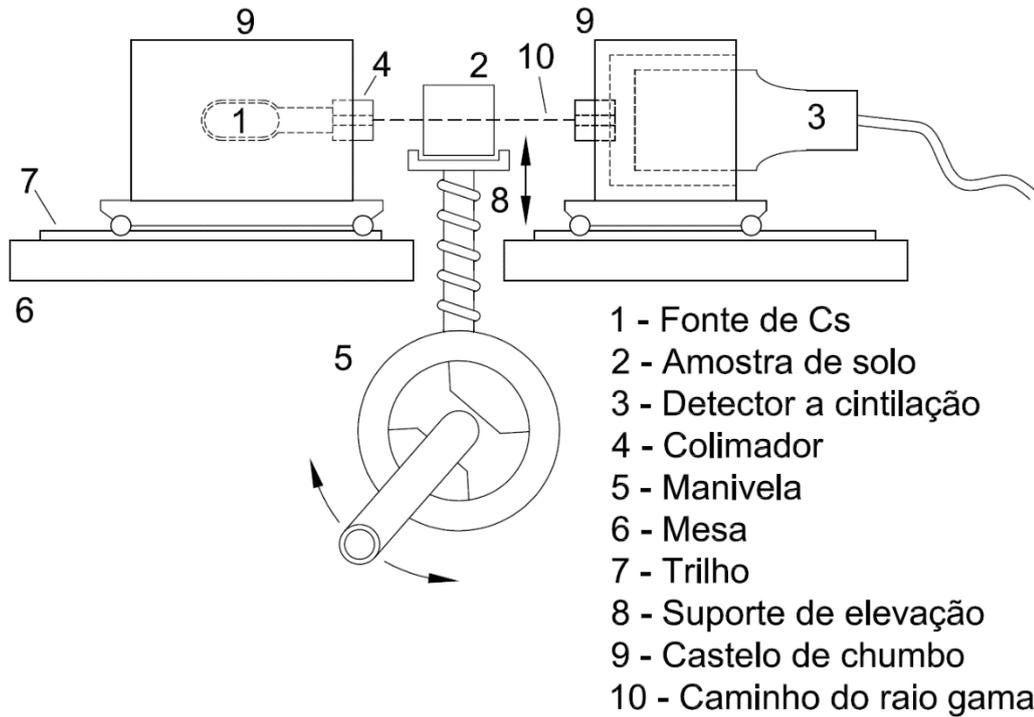
3.2. Equipamento para Medição de Radiação Gama

O experimento com radiação gama foi conduzido na sala de radiação do FISOL (Laboratório de Física do Solo), localizado no CENA (Centro de Energia Nuclear da Agricultura) da USP em Piracicaba - SP. A temperatura dentro da sala variou de 18 °C até 21 °C e foi controlada por um aparelho doméstico de ar-condicionado. A umidade relativa oscilou entre 55 % e 80 %. Os equipamentos eletrônicos utilizados para medir a ARG fazem parte de um conjunto da marca ORTEC, composto por:

- Um detector de cintilação de radiação de NaI(Tl) de 3x3 polegadas;
- Um pré-amplificador modelo 276;
- Um amplificador modelo 572;
- Uma fonte de alta tensão modelo 556;
- Um contador temporizado duplo modelo 994;
- Um analisador de canal único (SCA).

A fonte de radiação gama utilizada possui intensidade de aproximadamente 9,7 GBq (262 mCi). Um colimador circular de 4,0 mm de diâmetro foi utilizado na fonte, e um de 4,5 mm no detector. Um computador registrava os dados do contador temporizado. O detector de cintilação é blindado com castelo de chumbo para evitar a radiação de fundo. Foram feitas medições periódicas no SCA para verificar a janela de medição, resultando em 5,2 V para o valor superior e 4,2 V para o valor inferior, não variando durante o experimento. Para fontes de fótons com 661,6 keV (^{137}Cs), recomenda-se o uso de 900 V no pré-amplificador. A fonte de radiação gama é estabilizada e alinhada por um trilho, sobre uma mesa de mármore. Uma manivela regula a altura do suporte que sustenta a amostra de solo. Um esquema da mesa de medição é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Esquema da mesa de atenuação de radiação gama

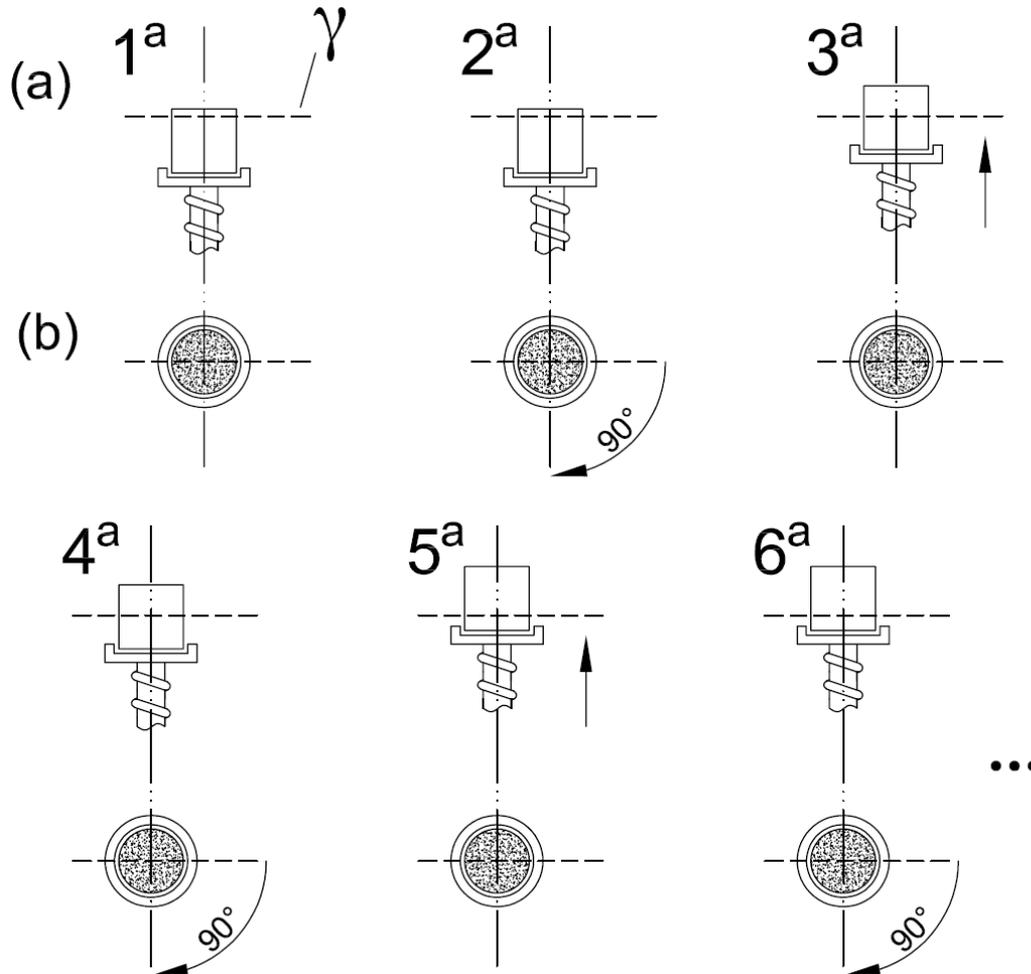


3.3.Procedimento de Medição da Atenuação da Radiação Gama

O experimento de radiação gama fornece os dados de umidade para a modelagem inversa. O teor de água a cada altura é localmente determinado pela atenuação gama, e o teor de água em toda a amostra é medida pela pesagem.

As amostras de solo foram preparadas removendo-se os excessos de material e então saturando-as com solução de CaSO_4 a $0,005 \text{ mol L}^{-1}$ (DANE; HOPMANS, 1999). Depois de saturadas, as superfícies inferiores das amostras foram fechadas. Logo após a saturação, foram feitas as primeiras pesagens das amostras, assim como a primeira contagem de radiação em cinco profundidades a partir do lado superior da amostra, 1,0 cm, 1,5 cm, 2,0 cm, 3,5 cm e 5,0 cm. Em cada profundidade foram feitas duas medições, perpendiculares entre si, para minimizar o efeito da heterogeneidade do solo (Figura 6). Estas medições foram repetidas diariamente, até que não houvesse discrepância significativa nas contagens e o processo de secagem tinha se tornado desprezível. O tempo de cada contagem foi de 20 segundos. O teor de água local de cada medição pode ser calculado pela equação 11. A Figura 6 ilustra a sequência de como as medições foram realizadas em cada altura.

Figura 6 – Representação esquemática do procedimento de posicionamento para medição da ARG em uma amostra. A parte (a) é referente à vista lateral, a parte (b) é referente à vista superior



Para a medição de I_0 (contagem da radiação na amostra seca), no final do período das leituras, as amostras foram colocadas em uma estufa a 105 °C por dois dias, e então realizando o procedimento para as contagens.

3.4. Modelagem Inversa com Hydrus-1D

O software Hydrus-1D (SIMUNEK et al., 2013) foi utilizado para realizar a modelagem inversa, encontrando os parâmetros das equações de Van Genuchten – Mualem para as funções de retenção e de condutividade (equações 1 e 2). Como condição de contorno, considerou-se a saída de água apenas pela superfície, por evaporação. As medições de umidade locais (obtida pela atenuação da

radiação) e a perda de água por evaporação (obtida pelas pesagens) em cada período são, portanto, resultados experimentais. O perfil do potencial matricial inicial é determinado pela altura da lâmina de água ao redor da amostra no fim da saturação, sendo medido 30 mm abaixo da superfície. Parâmetros como *time step* e critérios de iteração foram utilizados conforme recomendações pelo software Hydrus-1D.

Pela forma iterativa utilizada no software para realizar a modelagem inversa (Marquardt – Levenberg), os resultados do procedimento numérico podem variar em função dos parâmetros iniciais fornecidos. Para considerar as diferentes possibilidades de valores iniciais, as simulações inversas foram feitas com parâmetros iniciais correspondentes às 12 texturas de solos disponíveis na biblioteca do Hydrus-1D. Espera-se que algum destes parâmetros forneçam boas estimativas iniciais para as modelagens inversas. Na Tabela 2, os parâmetros iniciais são representados pela sigla P.I. e estabeleceu-se um número para cada classe textural para futura referência.

Tabela 2 – Parâmetros iniciais (P.I.) das equações de Van Genuchten – Mualem utilizados na modelagem inversa do Hydrus-1D, correspondentes às classes texturais 1 a 12

ID	Classe textural	θ_r (m ³ /m ³)	θ_s	α (1/cm)	n	K_s (cm/h)	λ
1	Sand	0,045	0,43	0,145	2,68	29,70	0,5
2	Loamy Sand	0,057	0,41	0,124	2,28	14,59	0,5
3	Sandy Loam	0,065	0,41	0,075	1,89	4,42	0,5
4	Loam	0,078	0,43	0,036	1,56	1,04	0,5
5	Silt	0,034	0,46	0,016	1,37	0,25	0,5
6	Silt Loam	0,067	0,45	0,020	1,41	0,45	0,5
7	Sandy Clay Loam	0,100	0,39	0,059	1,48	1,31	0,5
8	Clay Loam	0,095	0,41	0,019	1,31	0,26	0,5
9	Silty Clay Loam	0,089	0,43	0,010	1,23	0,07	0,5
10	Sandy Clay	0,100	0,38	0,027	1,23	0,12	0,5
11	Silty Clay	0,070	0,36	0,005	1,09	0,02	0,5
12	Clay	0,068	0,38	0,008	1,09	0,20	0,5

Pela equação 11, a medição da ARG do solo seco influencia em todos os cálculos de umidade daquela amostra. Por isso foram feitas também modelagens inversas considerando um desvio padrão para mais e para menos da medição de

radiação do solo seco. Para comparar os resultados com adição ou subtração de um desvio padrão, foi calculado o RMSD (raiz do desvio quadrático médio) para as curvas de retenção, $\theta(h)$, e para as curvas de condutividade $K(h)$. Para este cálculo, foram utilizados 46 pontos de potenciais entre 1 e 10^5 cm, distribuídos uniformemente em escala logarítmica.

Ainda, ao invés de estimar θ_s como parâmetro, foram também feitas modelagens inversas fixando θ_s no valor obtido pela câmara de pressão. Os valores obtidos foram inseridos nos arquivos de entrada do Hydrus-1D e foi realizado novamente o processo de simulações com os 12 parâmetros iniciais disponíveis no Hydrus-1D.

Dentre as variações dos parâmetros iniciais, os resultados com maiores R^2 e menores RMSE (raiz do erro quadrático médio) foram selecionados para cada amostra. Para se encontrar um valor médio dos diferentes anéis de amostras do mesmo solo foi utilizado o software RETC (VAN GENUCHTEN; LEIJ; YATES, 1991). Para os cálculos de umidade pela ARG, geração de arquivos de entrada do Hydrus-1D e do RETC, execução do Hydrus-1D e RETC em sequência, foram elaborados programas em linguagem Python 3.

3.5. Mesa de tensão e câmara de pressão

Para se determinar a curva de retenção pelo método laboratorial padrão, as respectivas amostras indeformadas foram preparadas e submetidas à mesa de tensão e câmara de pressão. A tabela abaixo indica a quantidade de dias que as amostras foram submetidas aos potenciais, até serem consideradas em estado de equilíbrio com a mesa ou câmara, e então tiveram sua umidade medida através de pesagem.

Tabela 3 – Tempo de submissão das amostras aos respectivos potenciais no equipamento de tensão/pressão

	Mesa de tensão		Câmara de pressão					
Tempo (dias)	2	2	5	7	10	12	15	25
Potencial (m)	0,1	0,2	0,6	1,0	3,3	10,0	30,0	150,0

Todas as amostras foram saturadas antes de serem submetidas aos respectivos potenciais. As umidades volumétricas foram obtidas por pesagem, volume do anel e densidade do solo da amostra indeformada em análise. As amostras foram consideradas secas após dois dias em uma estufa à 105 °C. Em sequência, o programa RETC foi utilizado para otimizar os parâmetros da curva de retenção.

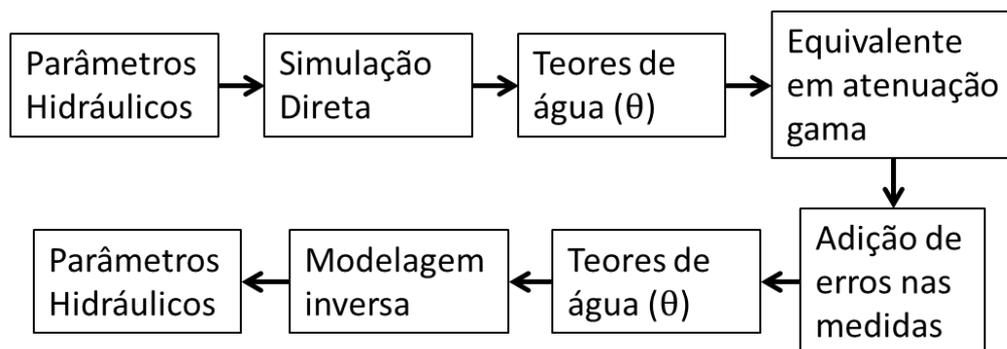
3.6. Análise com o WP4C

Para as análises de amostras mais secas no WP4C, foram utilizados solos deformados de 5 amostras, inicialmente saturados e submetidos a câmara de pressão. Para se comparar a confiabilidade da câmara de pressão a 15 bar, foram variados os períodos das amostras na câmara, e então foi feita a medição com o WP4C. Das 5 amostras, 3 são da superfície (pontos de coleta 2, 3 e 5), e 2 são de 30 cm de profundidade (pontos de coleta 4 e 8) e todas as amostras foram submetidas a 2, 3, 4, 6 e 8 semanas na câmara de pressão.

3.7. Experimento Virtual

Para se entender como o erro estatístico e o impacto dos diferentes parâmetros iniciais inseridos no Hydrus-1D (Tabela 2) modificam os resultados, foi feito um experimento virtual. A Figura 7 mostra o fluxograma do experimento virtual realizado.

Figura 7 – Fluxograma do experimento virtual realizado



Partindo de parâmetros iniciais de Van Genuchten – Mualem conhecidos, o conjunto 12 da Tabela 2, foi realizada uma simulação direta pelo Hydrus-1D para gerar dados de entrada simulando um experimento de evaporação similar ao realizado. Dos valores fornecidos pelo Hydrus-1D, foram gerados valores de contagem de radiação gama na mesma ordem de grandeza dos medidos experimentalmente, considerando-se 50.000 contagens por 20 segundos para as medições secas.

Para incorporar erros a estes valores, variações foram inseridas obedecendo uma distribuição normal aleatória. O desvio padrão desta distribuição foi calculado pelas raízes da contagem da radiação gama calculada. Foram consideradas alguns casos, multiplicando-se o desvio padrão por 1, 2, 3 e 5 vezes. Depois, calcularam-se os valores de teor de água novamente e com eles foram feitas modelagens inversas. Para a modelagem inversa, foram considerados duas possibilidades de parâmetros iniciais, o 12 (Clay), e um valor ligeiramente diferente, o 8 (Clay Loam) da Tabela 2.

Um segundo experimento virtual semelhante foi realizado, mantendo-se um desvio padrão na inserção do erro na contagem gama. Foram gerados diferentes valores de teores de água obedecendo as mesmas regras do experimento anterior, então os dados foram inseridos no Hydrus-1D e as modelagens inversas foram realizadas novamente. O objetivo desta variante é analisar a repetibilidade na etapa de modelagem inversa. Nesta etapa foi utilizado os parâmetros iniciais do Silt, conjunto 5 da Tabela 2.

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1.Caracterização dos solos

Os resultados das análises físicas das amostras encontram-se na Tabela 4. Os 11 locais de amostragem foram identificados pelas siglas P1 a P11

Tabela 4 – Características físicas das amostras de solo

Local	Camada (cm)	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Dens. solo (g/cm ³)	Dens. partícula (g/cm ³)	Poros totais (m ³ /m ³)	Micro-poros (m ³ /m ³)	Macro-poros (m ³ /m ³)
P1	0-7	88,6	8,8	2,7	1,620	2,726	40,6	34,4	6,2
	30-37	85,7	11,3	3,1	1,618	2,656	39,1	24,8	14,3
P2	0-7	83,5	13,8	2,7	1,466	2,268	35,3	20,8	14,5
	30-37	83,5	15,0	1,5	1,472	2,273	35,2	20,6	14,6
P3	0-7	20,4	62,9	16,7	1,286	2,310	44,1	37,7	6,5
	30-37	22,1	65,4	12,5	1,325	2,321	42,9	36,9	6,0
P4	0-7	18,2	69,2	12,7	1,247	2,228	44,1	36,6	7,4
	30-37	14,0	75,5	10,6	1,151	2,001	42,4	33,9	8,6
P5	0-7	48,2	40,6	11,3	1,436	2,445	41,2	34,9	6,3
	30-37	50,9	43,0	6,1	1,599	2,601	38,5	31,5	7,0
P6	0-7	42,8	48,1	9,2	1,679	2,677	37,3	33,7	3,5
	30-37	38,8	53,1	8,1	1,699	2,643	35,7	32,6	3,1
P7	0-7	23,3	69,1	7,6	1,302	2,354	44,6	38,3	6,3
	30-37	27,9	66,7	5,5	1,273	2,301	44,7	38,1	6,6
P8	0-7	20,2	75,3	4,5	1,510	2,728	44,7	41,1	3,7
	30-37	16,7	79,4	3,8	1,523	2,837	46,4	42,6	3,7
P9	0-7	85,6	11,3	3,1	1,680	2,629	36,1	31,2	4,8
	30-37	84,5	12,6	2,9	1,726	2,658	35,1	25,8	9,3
P10	0-7	84,7	11,4	4,0	1,306	2,275	42,6	24,7	17,9
	30-37	85,0	12,6	2,4	1,547	2,475	37,5	23,5	14,0
P11	0-7	85,6	11,3	3,1	1,515	2,401	36,9	22,7	14,2
	30-37	86,2	12,6	1,3	1,564	2,410	35,1	21,8	13,3

Para a distinção entre micro e macroporosidade foi adotado o potencial matricial de 60 cm (equivalente a um diâmetro de poro de 50 µm).

4.2. Contagem gama

De todas as contagens de radiação gama, a maior observada foi 75991 em 20 segundos, e a menor foi 33470 no mesmo intervalo de tempo. As contagens utilizadas para a medição de teores de água não são elevadas para que o tempo morto (aproximadamente $5 \cdot 10^{-6}$ segundos) inflija erro relevante na medição de teor de água e também não são baixas para que a radiação de fundo (para qual se registrou até 1011 contagens por minuto) aumente significativamente o erro, sendo que a radiação de fundo contada é considerada nos cálculos dos teores de água. Os resultados das medições são expressos na tabela a seguir.

Tabela 5 – Resultados das contagens gama medidos em intervalo de tempo de 20 segundos

	Contagem gama	Contagem de radiação de fundo
Média	45656,0	253,6
σ	5237,2	24,1
Máxima	75991	337
Mínima	33470	195

4.3. Modelagem inversa

Com base nas contagens de radiação gama medidas foram calculados os teores de água. Os teores de água em função da posição na amostra e do tempo foram inseridos no Hydrus-1D para a realização da modelagem inversa de cada amostra de solo, como mencionado no capítulo anterior. Dos resultados obtidos pela modelagem inversa, os que obtiveram maiores índices R^2 e menores RMSE foram selecionados de cada amostra de solo. Não se obteve diferença significativa na seleção por RMSE ou R^2 .

Dentre os resultados selecionados, os três com maiores índices R^2 e os três com menores índices foram separados e os atributos hidráulicos apresentados nas Tabelas 6 e 7, onde P.I. é a estimativa inicial dos parâmetros de Van Genuchten – Mualem para a modelagem inversa no Hydrus-1D, correspondente à Tabela 2. A sigla de cada solo é formada pelo local de coleta (P), pela camada (profundidade de cada amostra, de 0-7 cm ou de 30-37 cm) e pela réplica (A).

Foi escolhido o R^2 como parâmetro principal de comparação por ser adimensional, enquanto que com RMSE obteve-se resultados muito similares quanto a comparação.

Tabela 6 – Parâmetros hidráulicos dos três solos com maiores médias no índice R^2

Solo	Camada (cm)	Amostra	P.I.	R^2	RMSE	θ_r (m^3/m^3)	θ_s (m^3/m^3)	α (1/cm)	n	K_s (cm/h)	λ
P1	30-37	1	2	0,971	0,015	0,000	0,313	0,32	1,65	29,00	0,00
		2	3	0,965	0,016	0,000	0,292	0,31	1,93	39,25	0,00
		3	7	0,973	0,015	0,000	0,314	0,20	1,93	4,84	0,00
		4	1	0,960	0,018	0,000	0,318	0,31	1,92	13,74	0,00
		5	3	0,967	0,015	0,000	0,301	0,32	1,88	15,59	0,03
P2	30-37	1	1	0,980	0,013	0,000	0,346	0,27	1,53	112,00	0,03
		2	1	0,980	0,015	0,000	0,367	0,23	1,54	92,26	0,03
		3	1	0,982	0,014	0,000	0,347	0,19	1,60	25,18	0,00
		4	1	0,986	0,012	0,000	0,331	0,18	1,48	102,72	0,01
		5	1	0,986	0,013	0,000	0,365	0,24	1,64	26,00	0,01
P11	30-37	1	2	0,957	0,019	0,000	0,382	1,02	1,43	132,94	0,12
		2	3	0,963	0,018	0,000	0,398	0,90	1,40	106,11	0,00
		3	2	0,966	0,019	0,002	0,427	1,15	1,37	434,30	0,00
		4	3	0,974	0,019	0,000	0,436	0,99	1,37	793,24	0,00

Tabela 7 – Parâmetros hidráulicos das três amostras de solo com menores médias nos índices R^2

Solo	Camada (cm)	Amostra	P I	R^2	RMSE	θ_r (m^3/m^3)	θ_s (m^3/m^3)	α (1/cm)	n	K_s (cm/h)	λ
P4	30-37	1	10	0,924	0,023	0,000	0,36	0,07	3,34	0,03	0,00
		2	8	0,886	0,029	0,000	0,368	0,12	2,10	0,09	0,02
		3	2	0,856	0,035	0,001	0,405	0,16	1,50	0,86	0,00
		4	6	0,910	0,029	0,001	0,391	0,07	1,47	0,74	0,11
		5	2	0,863	0,035	0,000	0,383	0,02	3,00	0,04	0,88
P7	30-37	1	10	0,895	0,029	0,000	0,393	0,07	1,78	0,27	0,06
		2	11	0,896	0,030	0,000	0,384	0,03	2,57	0,04	0,00
		3	7	0,775	0,052	0,000	0,434	0,02	1,61	0,11	0,00
		4	5	0,878	0,031	0,000	0,361	0,06	2,41	0,15	0,01
		5	9	0,859	0,033	0,000	0,363	0,06	2,58	0,07	0,03
P8	30-37	1	7	0,830	0,034	0,000	0,405	0,49	1,30	13,87	0,00
		2	1	0,828	0,035	0,000	0,391	0,62	1,33	44,25	0,24
		3	6	0,882	0,029	0,004	0,386	0,23	1,42	2,33	0,07
		4	9	0,857	0,031	0,000	0,355	0,10	1,84	0,10	0,01
		5	8	0,813	0,032	0,000	0,347	0,07	1,39	0,25	0,01

Observa-se um valor elevado para o K_s , variando bastante em alguns anéis do mesmo solo. Alguns dos valores não podem corresponder com o real valor da condutividade saturada, pois são consequência de extrapolação. Como mostrado por Ippisch, Vogel e Bastian (2006), uma característica natural do próprio modelo da curva de condutividade de Van Genuchten – Mualem é uma elevada diferença de outros modelos na região próxima à saturação, quando comparada as condutividades relativas.

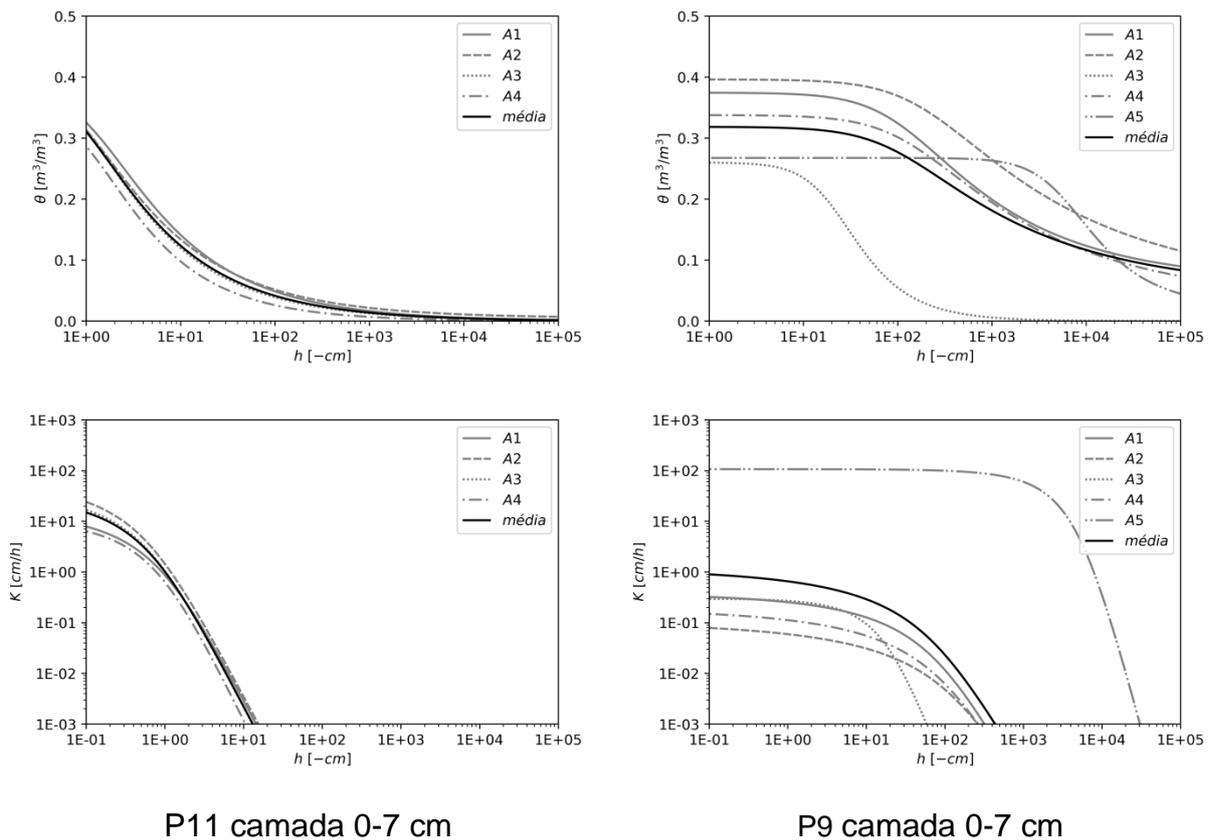
Para encontrar o valor médio dos parâmetros em cada camada de cada solo, foi utilizado o programa RETC com os valores das réplicas de mesmo solo. A Tabela 8 apresenta os resultados da modelagem inversa para as duas camadas dos locais coletados.

Tabela 8 – Médias dos parâmetros hidráulicos das amostras de solo coletadas

Solo	Camada (cm)	R^2	θ_r (m^3/m^3)	θ_s (m^3/m^3)	α (1/cm)	n	K_s (cm/h)	λ
P1	0-7	0,891	0,000	0,290	0,01	2,215	0,10	0,70
	30-37	0,990	0,000	0,308	0,29	1,838	17,12	0,06
P2	0-7	0,459	0,000	0,316	0,01	1,355	0,84	1,19
	30-37	0,986	0,000	0,351	0,22	1,552	61,10	0,04
P3	0-7	0,809	0,000	0,404	0,01	2,286	0,01	1,96
	30-37	0,854	0,000	0,423	0,02	2,244	0,02	0,75
P4	0-7	0,797	0,000	0,389	0,03	1,982	0,04	0,72
	30-37	0,816	0,000	0,377	0,07	1,747	0,26	1,56
P5	0-7	0,972	0,000	0,333	0,02	1,775	0,02	0,17
	30-37	0,881	0,000	0,319	0,04	1,507	0,08	0,31
P6	0-7	0,940	0,000	0,339	0,02	2,179	0,03	0,56
	30-37	0,759	0,000	0,342	0,03	1,825	0,07	1,30
P7	0-7	0,918	0,000	0,389	0,05	1,894	0,15	0,61
	30-37	0,947	0,000	0,378	0,08	1,964	0,16	0,31
P8	0-7	0,955	0,000	0,352	0,02	1,482	0,05	0,27
	30-37	0,963	0,000	0,367	0,20	1,397	1,81	0,27
P9	0-7	0,428	0,050	0,319	0,01	1,299	1,19	6,00
	30-37	0,864	0,000	0,316	0,13	1,298	3,98	1,17
P10	0-7	0,975	0,034	0,398	0,52	1,462	56,85	0,05
	30-37	0,974	0,026	0,392	0,95	1,452	945,21	0,03
P11	0-7	0,993	0,000	0,406	1,19	1,477	36,09	0,08
	30-37	0,985	0,000	0,412	1,03	1,388	252,95	6,00

Na Figura 8 comparam-se resultados do solo P11 camada 0-7 cm, com o R^2 mais alto, com o P9 camada 0-7 cm, R^2 mais baixo, obtidos pelo RETC.

Figura 8 – Curvas de retenção e de condutividade das 5 amostras do P11 camada 0-7 cm e do P9 camada 0-7 cm



P11 camada 0-7 cm

P9 camada 0-7 cm

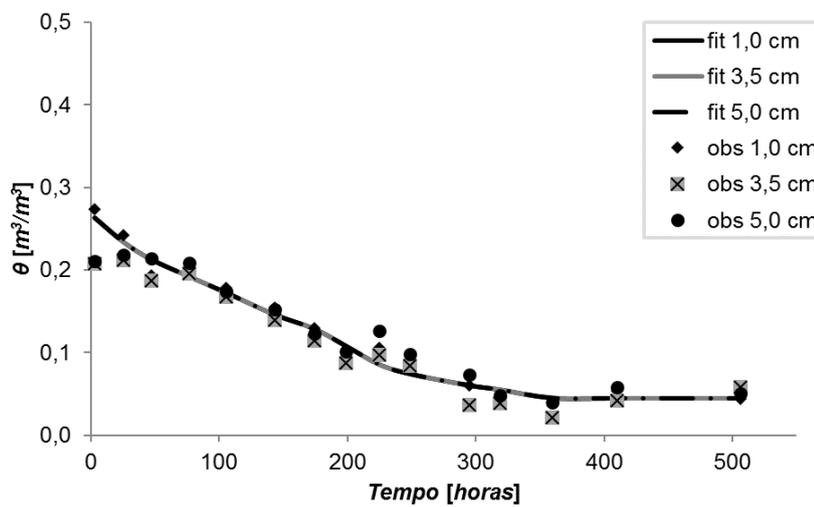
Percebe-se grande variação entre as amostras nas curvas de retenção do solo P9 camada 0-7 cm, em que algumas das curvas obtidas pela modelagem inversa não aparentaram resultado satisfatório, como a amostra A5.

Um dos resultados da modelagem inversa fornecidos pelo Hydrus-1D, o limite de 95% de confiança, auxilia na confiança do resultado. Um elevado intervalo entre o valor mínimo e máximo afirma que a modelagem não é sensível ao parâmetro. Na amostra A5 do solo P9 (camada 0-7 cm), os valores dos parâmetros de Van Genuchten – Mualem K_s , λ e n , apresentaram elevado intervalo de confiança, ou seja, o resultado não é confiável, mesmo com índice R^2 elevado (0,9348).

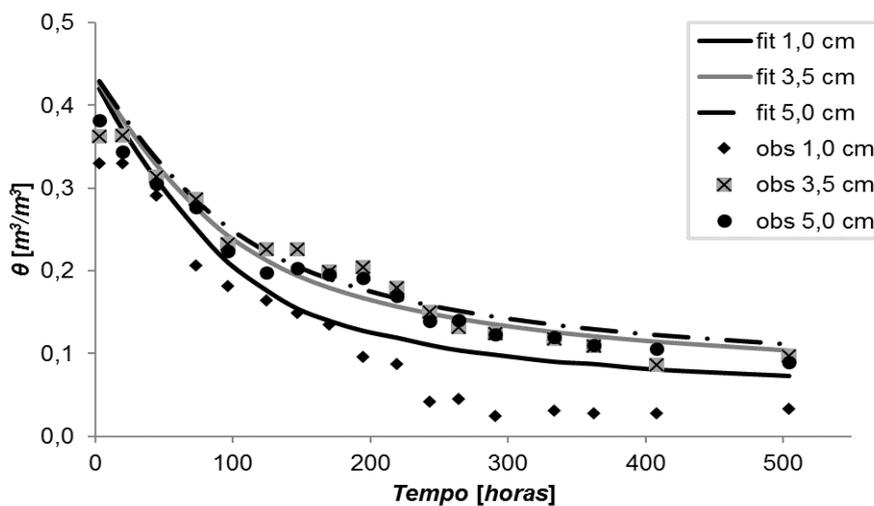
A Figura 9 relaciona os teores de água medidos e os ajustados pelo Hydrus-1D em função do tempo em três profundidades, 1,0, 3,5 e 5,0 cm. Duas amostras

foram selecionadas para essa demonstração, a amostra 5 do solo P9, camada 0-7 cm e a amostra 3 do solo P7, camada 0-7 cm. Os experimentos de evaporação duraram 20 dias em média, porém o tempo do experimento pode variar bastante com umidade relativa do ar e a temperatura. Algumas variantes do experimento de evaporação utilizam ventilador para aumentar a velocidade de evaporação, ou um tecido na superfície da amostra para diminuí-la, como em Schindler e Müller (2006).

Figura 9 – Curvas de teor de água por tempo dos solos P9 camada 0-7 cm amostra 5 e P7 camada 0-7 cm amostra 3 em três posições verticais das amostras. “fit” refere-se ao ajuste feito pelo Hydrus-1D e “obs” aos medidos por ARG



P9 camada 0-7 cm, amostra 5



P7 camada 0-7 cm, amostra 3

No solo P9 camada 0-7 cm amostra 5, não houve discrepância relevante no teor de água nas profundidades, os valores ajustados foram ficaram semelhantes entre as camadas. Sem uma diferença relevante não há como calcular o fluxo entre as camadas com precisão, e por consequência não há como obter bons resultados na simulação inversa. O mesmo se repete para as outras amostras do mesmo solo.

Na Figura 9, o solo P7 camada 0-7 cm amostra 3 apresenta discrepância elevada entre os valores medidos e o ajustado. Ao considerar propriedades hidráulicas constantes no perfil, uma interpolação mais precisa não foi possível. A diferença entre teores de água nas camadas não foi condizente entre si e com a água evaporada em toda a amostra (incoerência entre os teores de água medidos por ARG e os calculados pela evaporação através do peso). Solos com grande heterogeneidade podem aumentar essa discrepância e por consequência o erro, refletindo maiores RMSE e menores índices R^2 .

Como visto na Figura 6, o processo de medição da ARG utilizou apenas duas direções perpendiculares do feixe de radiação gama para determinação do teor de água em cada altura da amostra. Por considerar a amostra homogênea quanto as propriedades hidráulicas, uma fissura ou pequeno cascalho no caminho do raio gama pode atrapalhar na determinação do teor de água local, influenciando na resposta da modelagem (alta heterogeneidade na amostra).

4.4. Inserção de desvios na contagem de radiação gama no solo seco

Como especificado no item Material e Métodos, a mesma contagem de radiação gama do solo seco é utilizada para o cálculo do teor de água em todas as leituras da mesma amostra. Para se entender a magnitude que erros nesta medição no solo seco podem ocasionar, foram feitas as modelagens inversas considerando adição e subtração de um desvio estatístico na contagem da radiação gama. As Figuras 10 e 11 mostram os resultados para as amostras do solo P9 camada 0-7 cm e P7 camada 0-7 cm respectivamente. Foram escolhidos estes dois solos por apresentarem resultados de ajuste de qualidade divergente, o P9 relativamente ruim e o P7 razoável, permitindo avaliar a robustez da metodologia.

O mesmo procedimento para obtenção dos parâmetros hidráulicos foi utilizado, ou seja, foram feitas modelagens inversas iniciando com P.I. (Tabela 2) de todos os solos da base de dados do Hydrus-1D, selecionando-se os parâmetros hidráulicos com o maior R^2 e menor RMSE.

Figura 10 – Efeito da adição e subtração de desvios padrão nas contagens de radiação gama nas cinco amostras secas do solo P9 camada 0-7 cm e suas respectivas médias

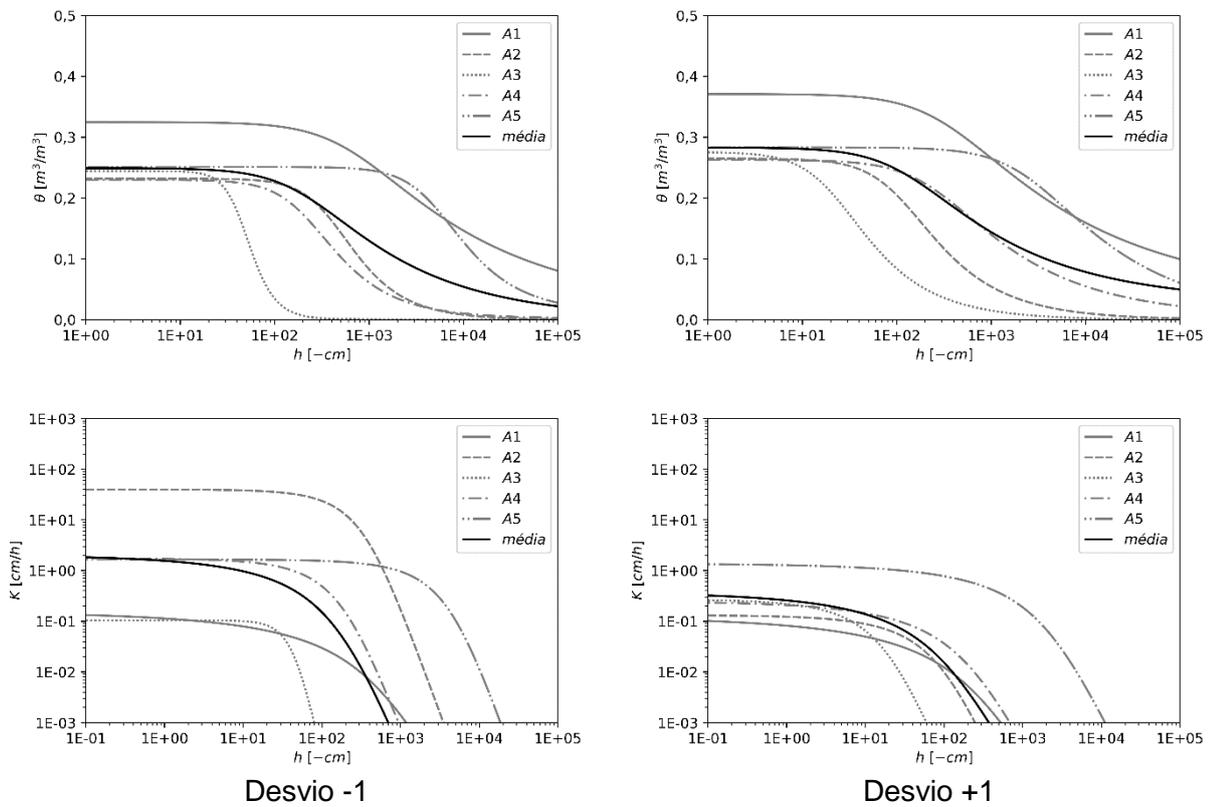
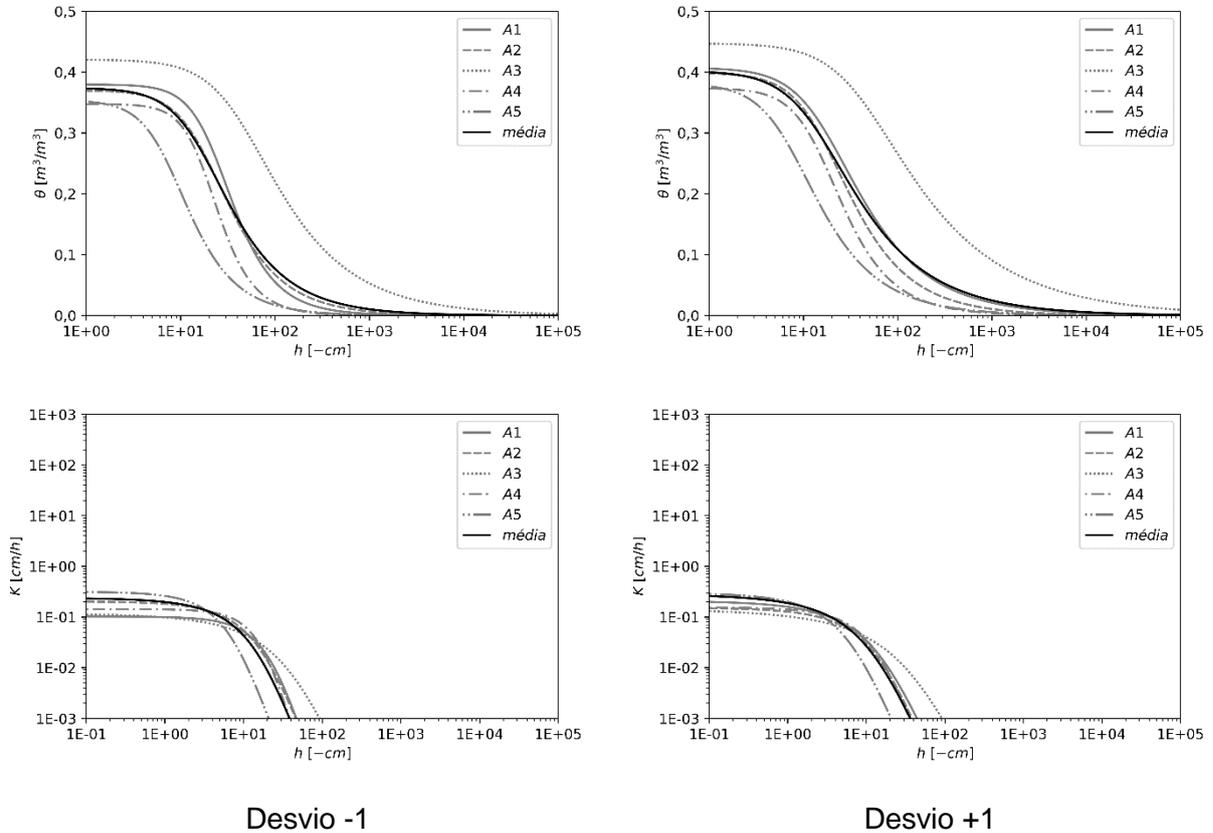
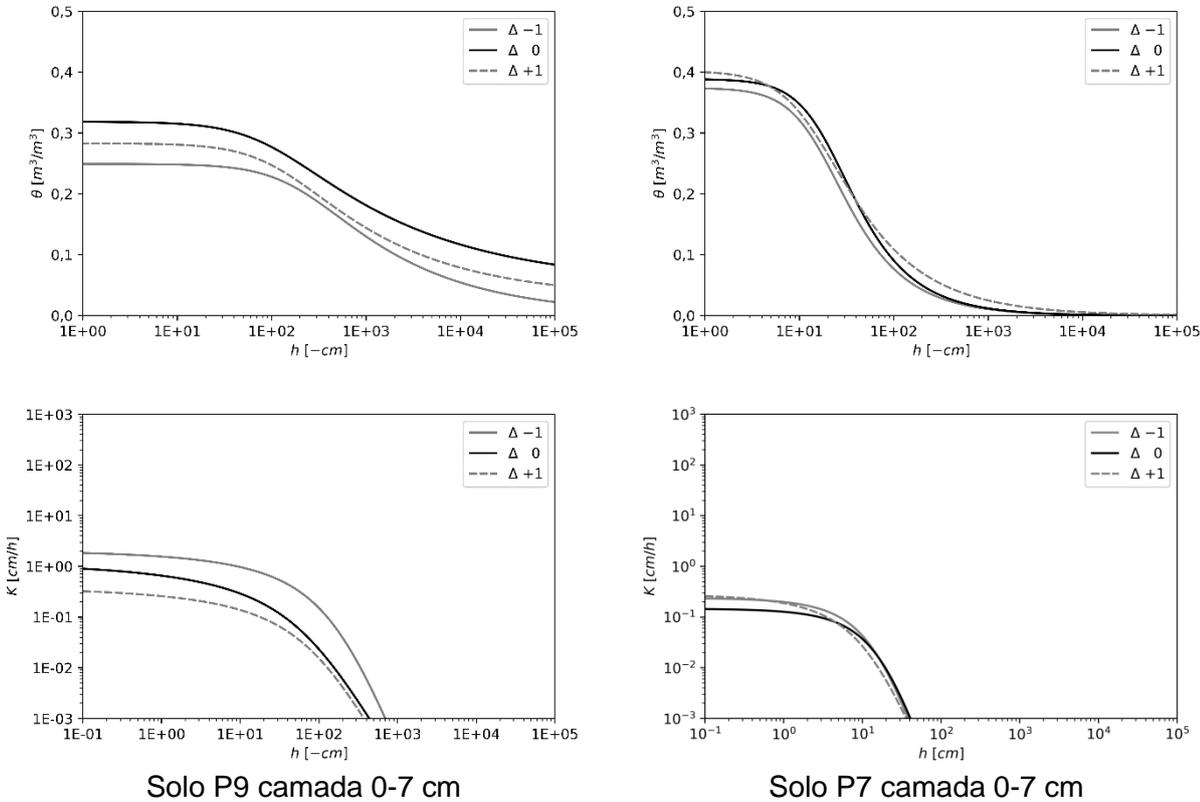


Figura 11 – Efeito da adição e subtração de desvios padrão nas contagens de radiação gama nas cinco amostras secas do solo P7 camada 0-7 cm e suas respectivas médias



Analisando as imagens percebe-se que o método não é muito sensível à variação de um desvio para mais ou menos na contagem de radiação gama na medição seca e a diferença causou pouco impacto no resultado final. A determinação de perda total na amostra, determinado pelo peso, acaba corrigindo o erro inserido na modelagem.

Figura 12 – Sobreposição das curvas médias de amostras com diferentes desvios padrão na contagem de radiação gama nas amostras secas dos solos P9 camada 0-7 cm e P7 camada 0-7 cm



De maneira geral, para todos os solos foram obtidas curvas semelhantes, porém não foi possível se estabelecer um padrão na variação entre os diferentes solos. A Tabela 9 mostra a mesma comparação em valores dos parâmetros hidráulicos encontrados. O R^2 é referente à diferença entre os valores observados e a curva plotada. O RMSD é calculado com base na diferença entre a curva média e a curva com inserção de um desvio padrão na contagem de radiação gama nas amostras secas.

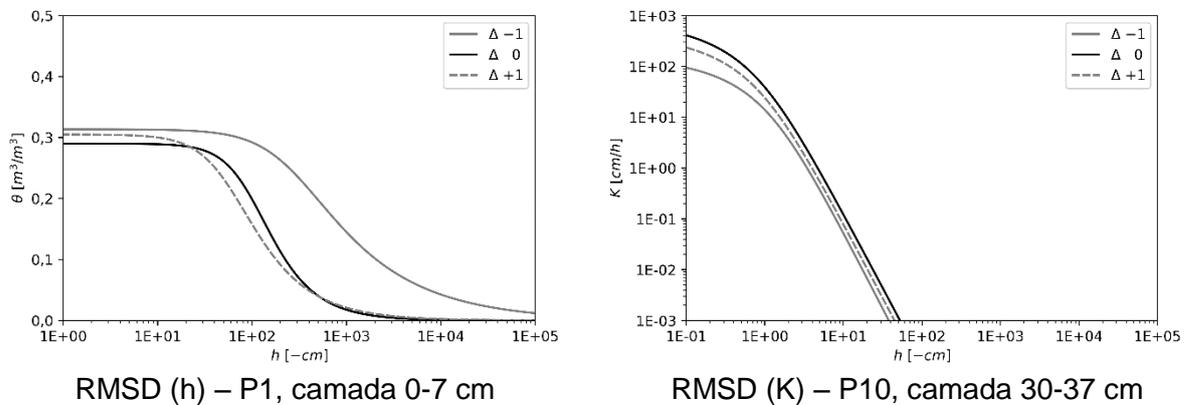
O $RMSD(h)$ e o $RMSD(K)$ são as raízes da diferença quadrática média da curva de retenção e da curva de condutividade, respectivamente, calculadas em relação à curva média sem alteração.

Tabela 9 – Comparação das propriedades hidráulicas entre os solos com alteração na contagem de radiação gama das amostras secas para as camadas superficiais (0-7 cm) dos solos P9 e P7

Curva	Solo	R ²	θ_r	θ_s	α (1/cm)	n	K _s (cm/h)	λ	RMSD(h)	RMSD(K)
$\Delta -1$		0,410	0,000	0,249	0,01	1,39	2,04	2,73	0,075	3,029
$\Delta 0$	P9	0,430	0,050	0,319	0,01	1,30	1,19	0,00		
$\Delta +1$		0,620	0,028	0,283	0,01	1,37	0,38	0,00	0,078	1,629
$\Delta -1$		0,920	0,000	0,374	0,06	1,87	0,24	0,63	0,012	0,011
$\Delta 0$	P7	0,920	0,000	0,389	0,05	1,89	0,15	0,61		
$\Delta +1$		0,940	0,000	0,402	0,07	1,65	0,28	0,42	0,011	0,009

A curva com maior RMSD(h) (0,0848) foi a do solo P1 camada 0-7 cm, com desvio -1, e a com maior RMSD(K) (3,6892) foi a do solo P10 camada 30-37 cm com desvio -1.

Figura 13 – Curvas de retenção do solo P1, camada 0-7 cm e curvas de condutividade do solo P10, camada 30-37 cm respectivamente



RMSD (h) – P1, camada 0-7 cm

RMSD (K) – P10, camada 30-37 cm

Quanto às curvas de retenção da Figura 13, elas representam médias entre as amostras no solo P1 camada 0-7 cm, e o maior RMSD foi entre $\Delta -1$ e $\Delta 0$. As amostras que geraram a curva $\Delta -1$ tiveram muitos valores negativos nos teores de água locais, os fornecidos pelo experimento de evaporação com ARG. Isto pode ocorrer quando, ao subtrair um desvio padrão da contagem, o valor da contagem seca ficou menor que a contagem úmida, gerando valores negativos de teores de água.

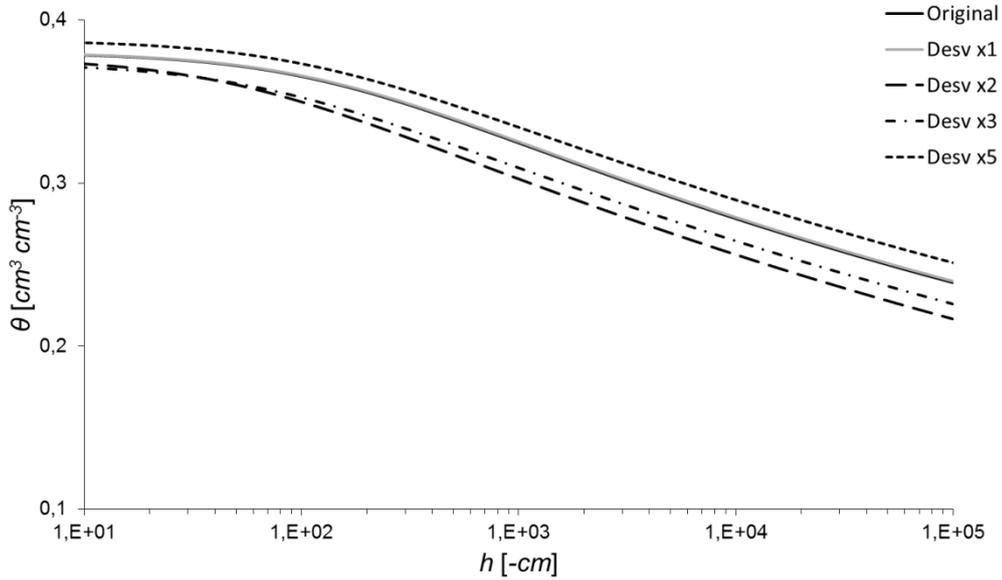
Não é possível fazer simulações de fluxo com teores de água negativos. Para minimizar a função objetivo, o Hydrus-1D considera curvas $\theta(t)$ interpoladas com valores positivos. Forçar o Hydrus-1D a fazê-lo resultou em elevar as curvas de condutividade e retenção e minimizou o potencial na superfície. Mesmo com estas considerações, os índices R^2 e RMSE tiveram pequena alteração. É importante mencionar que os valores negativos ficaram próximos de zero.

Quanto às curvas de condutividade da Figura 13, a curva $\Delta -1$ obteve o maior RMSD. Como o solo possui alto teor de areia (85%), a curva de retenção deste solo apresenta queda acentuada de teor de água em potenciais próximos à saturação. Percebe-se que as condutividades ficaram muito elevadas e incertas próximas a saturação. O limite de 95% confiança do Hydrus-1D apresentou elevada discrepância entre os limites superiores e inferiores de K_s , mostrando que este parâmetro não é sensível nestas condições. Pode ser que o solo não foi saturado de maneira correta devido à baixa capacidade de retenção de água do solo, ou que se tenha perdido muita água entre a preparação após saturação e a primeira medição. A principal razão para a incerteza no valor de K_s deste solo é a amostra não estar devidamente saturada na primeira medição, e em consequência obteve-se elevado RMSD (k). A medição de teor de água na primeira medição em uma das amostras deste solo é 0,25 e o θ_s estimado foi 0,38 com intervalo estreito no limite de 95% de confiança, ou seja, o solo não estava saturado no começo do experimento.

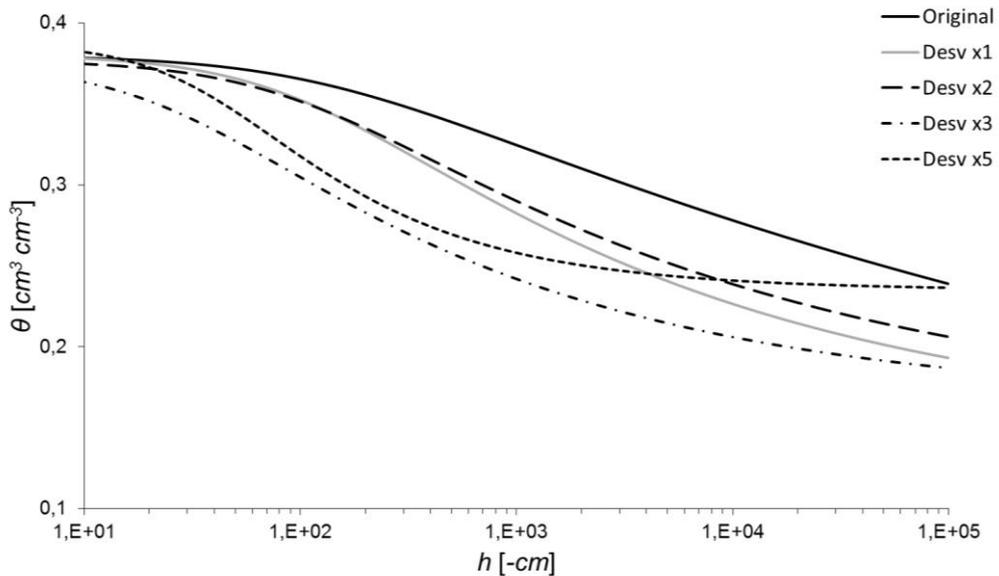
4.5. Experimento virtual

A Figura 14 mostra as curvas de retenção do experimento virtual realizado como descrito no item Material e Métodos.

Figura 14 – Curvas de retenção resultantes do experimento virtual, (a) referente ao P.I. 12 e (b) referente ao P.I. 8. O Desv x. é o multiplicador do desvio padrão nos valores aleatórios obedecendo distribuições normais



(a)



(b)

A imagem mostra a necessidade de baixo erro quando interpolando vários parâmetros de Van Genuchten – Mualem. Se o erro é relativamente baixo, o algoritmo de Marquardt – Levenberg reduz a função objetivo obtendo soluções próximas às exatas, mesmo com medições apenas de teores de água. Se o erro for elevado e o P.I. muito diferente do exato, o algoritmo tem maior probabilidade de

reduzir a função objetivo com parâmetros não correspondentes com os verdadeiros, por encontrar localmente parâmetros otimizados. As curvas com três e cinco vezes o desvio apresentaram erros próximos nos dois cenários, mesmo representando visivelmente solos com características diferentes na curva de retenção. No experimento virtual realizado para o cenário com P.I. 8 e “Desv x5”, o limite de 95% de confiança apresenta intervalo significativamente maior que o cenário com P.I. 12 e mesmas condições, principalmente nos parâmetros n , α e λ de Van Genuchten – Mualem, significando na prática que estes valores não são determinados com confiança.

O erro estatístico pode ser estimado, mas o erro sistemático não. Erros tão elevados não são esperados no experimento real de evaporação com ARG. Se erros elevados forem inevitáveis por outros fatores, recomenda-se fazer ajustes de menos parâmetros, ou a utilização de modelos com menos graus de liberdade, como Brooks – Corey (BROOKS; COREY, 1964) por exemplo. A Tabela 10 mostra os resultados em valores, onde Desv. x é referente ao valor pelo qual que o desvio foi multiplicado.

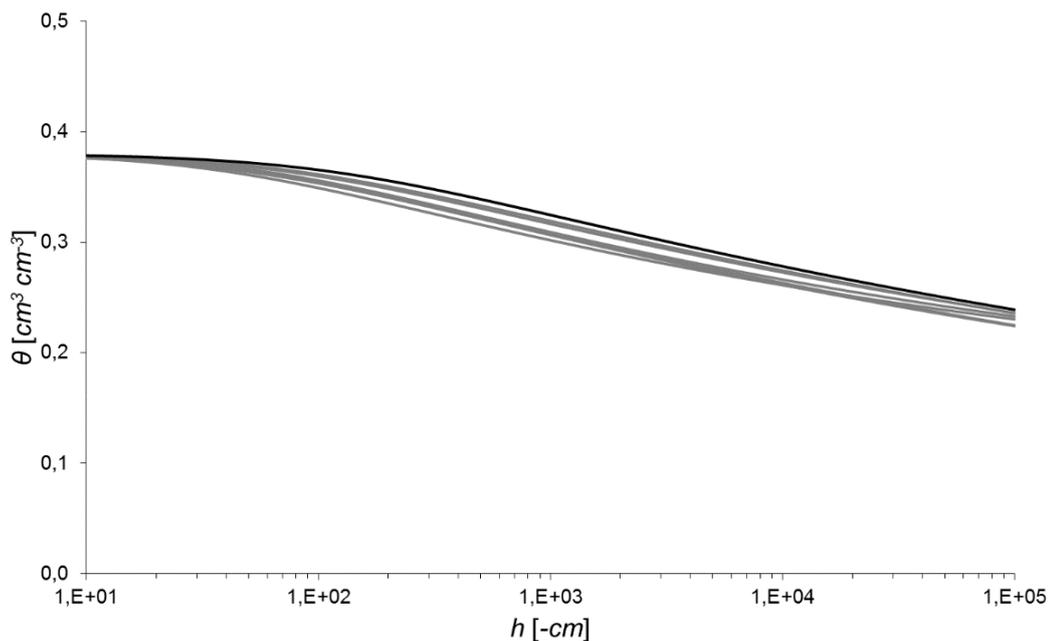
Tabela 10 – Valores dos parâmetros hidráulicos obtidos por modelagem inversa no experimento virtual

P.I.	Desv. x	θ_r	θ_s	α (1/cm)	n	K_s (cm/h)	λ	R^2	RMSE
Original		0,07	0,38	$8,00 \cdot 10^{-3}$	1,09	$2,00 \cdot 10^{-1}$	0,50		
12	1	0,07	0,38	$7,83 \cdot 10^{-3}$	1,09	$1,94 \cdot 10^{-1}$	0,57	0,913	0,0159
	2	0,01	0,38	$1,87 \cdot 10^{-2}$	1,08	$4,18 \cdot 10^{-1}$	1,17	0,726	0,0282
	3	0,02	0,37	$1,40 \cdot 10^{-2}$	1,07	$3,24 \cdot 10^{-1}$	0,78	0,507	0,0379
	5	0,06	0,39	$8,55 \cdot 10^{-3}$	1,08	$3,44 \cdot 10^{-1}$	0,50	0,316	0,0446
8	1	0,15	0,38	$9,60 \cdot 10^{-3}$	1,23	$7,02 \cdot 10^{-2}$	3,48	0,913	0,0159
	2	0,15	0,38	$1,01 \cdot 10^{-2}$	1,21	$4,14 \cdot 10^{-2}$	1,70	0,726	0,0282
	3	0,17	0,38	$3,90 \cdot 10^{-2}$	1,27	$1,25 \cdot 10^{-1}$	2,52	0,509	0,0378
	5	0,24	0,39	$2,49 \cdot 10^{-2}$	1,59	$4,13 \cdot 10^{-2}$	1,05	0,317	0,0446

Os valores de Desv. x1 apresentam diferenças apenas na terceira casa decimal, tanto para o R^2 quanto para o RMSE sendo compatíveis com os erros experimentais. O comportamento desta curva representou bem a original.

Em uma segunda etapa do experimento virtual, como descrito no capítulo anterior, foi realizado uma variante deste experimento para avaliar a repetibilidade da etapa de modelagem inversa. Na Figura 15, a curva formada pelos parâmetros iniciais originais é a preta, e as cinzas são curvas de simulações inversa com os mesmos valores dos parâmetros iniciais *Silt* (P.I. 5) da Tabela 2, com diferentes valores de teores de água gerados como descrito no capítulo anterior.

Figura 15 – Comparação entre modelagens inversas com diferentes teores de água obedecendo valores aleatórios de uma distribuição normal na simulação do experimento de evaporação com contagem de ARG



Percebe-se uma tendência em reduzir os teores de água na curva, proveniente dos parâmetros iniciais utilizados.

A Tabela 11 apresenta 6 resultados da segunda etapa do experimento virtual, os mesmos dados que geraram a Figura 15. Os parâmetros iniciais para modelagem inversa são os mesmos em todos os 6 casos (*Silt*, P.I. 5 da Tabela 2) e teores de água com base em uma distribuição normal aleatória inserida na simulação do

experimento de evaporação por ARG. Os valores de R^2 obtidos nessa etapa do experimento virtual foram coerentes com os obtidos no experimento real feito com radiação gama.

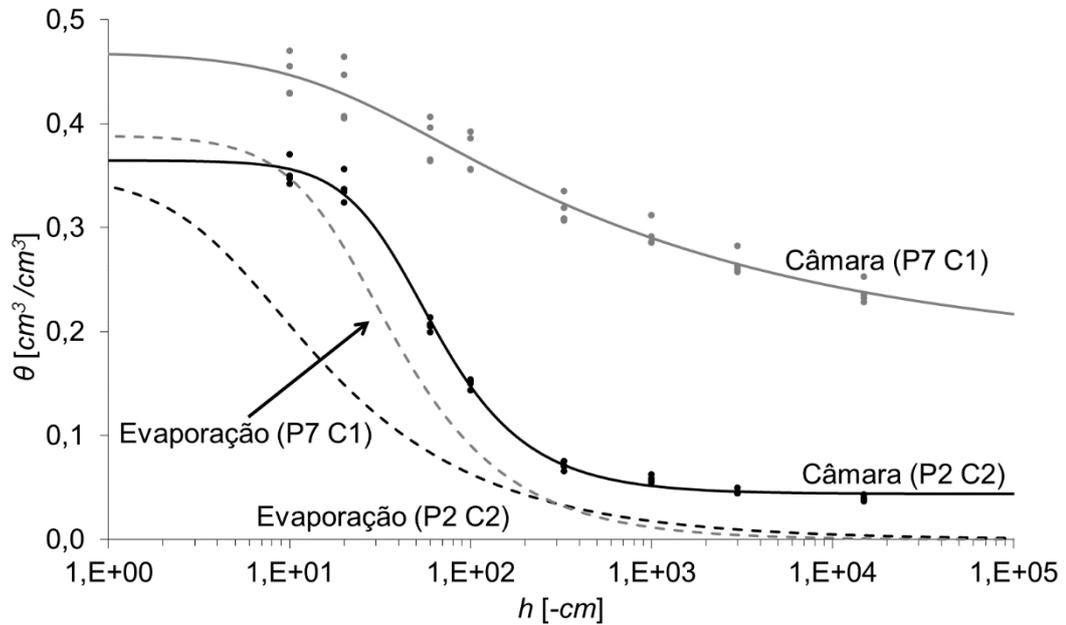
Tabela 11 – Comparação entre os parâmetros hidráulicos obtidos por modelagem inversa com variação normal aleatória na contagem de ARG no experimento de evaporação. Valores em negrito correspondem aos originais

Realização	θ_r (m ³ /m ³)	θ_s	α (1/cm)	n	K_s (cm/h)	λ	R^2
Original	0,068	0,380	0,0080	1,090	0,200	0,500	
1	0,029	0,381	0,0125	1,075	0,408	0,019	0,9307
2	0,136	0,381	0,0232	1,123	0,302	0,072	0,9127
3	0,127	0,381	0,0159	1,118	0,241	0,085	0,9220
4	0,060	0,381	0,0188	1,089	0,399	0,090	0,9150
5	0,018	0,380	0,0194	1,074	0,594	0,303	0,9242
6	0,075	0,380	0,0131	1,089	0,323	0,045	0,9290

4.6.Retenção determinada na câmara de pressão

A determinação da retenção na câmara de pressão resultou em curvas de retenção diferentes dos resultados encontrados pelo experimento de evaporação com ARG. Para solos argilosos, a diferença foi maior, principalmente na zona mais seca (potenciais mais negativos). Na Figura 16 comparam-se dois solos, P2 camada 30-37 cm (arenoso) e P7 camada 0-7 cm (argiloso) quanto às suas curvas de retenção obtidas pelo experimento de evaporação com ARG e na câmara de pressão.

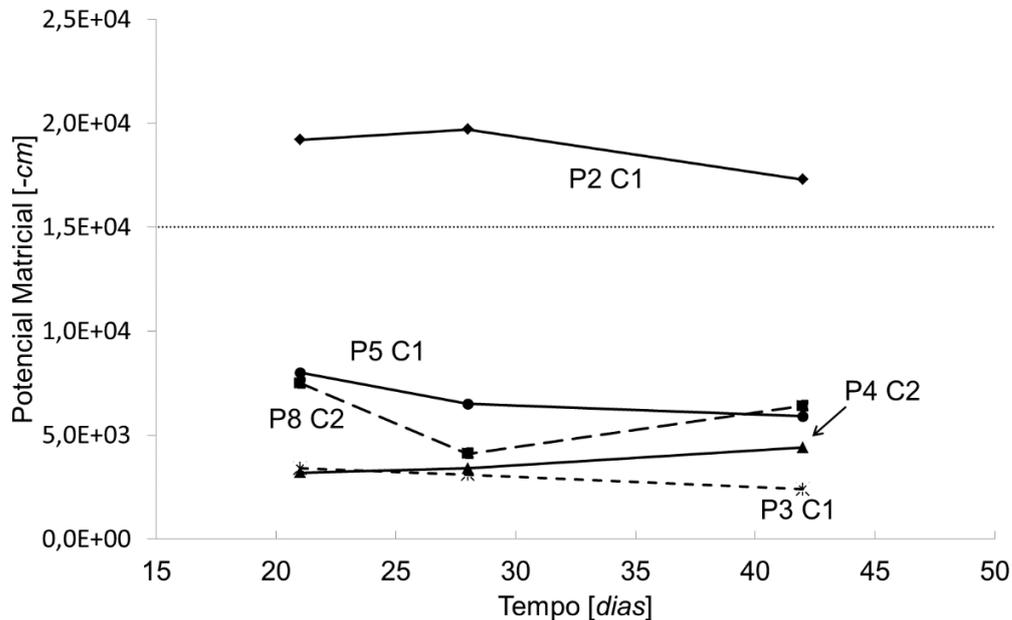
Figura 16 – Curvas de retenção obtidas pela câmara de pressão e pelo método de evaporação com ARG nos solos P7 camada 0-7 cm (P7 C1) e P2 camada 30-37 cm (P2 C2). Pontos representam valores medidos e curvas são as linhas ajustadas



A curva mais arenosa, a P2 camada 30-37 cm (com 84% areia), apresentou resultado mais semelhante, com variações significativas em θ_r e α . De maneira geral os valores obtidos de θ_r foram muito elevados quando obtidos pela câmara de pressão se comparados com os obtidos pelo método de evaporação assistido por ARG.

Para avaliar a confiabilidade dos teores de água obtidos pelo método de equilíbrio de tensão através da câmara de pressão, alguns resultados foram comparados com o equipamento WP4C, como descrito no capítulo anterior. A Figura 17 mostra os resultados, onde o eixo com escala em dias refere-se ao número de dias que a amostra permaneceu na câmara de pressão submetida a pressão de 15 bar. Os solos argilosos não conseguiram alcançar -150 m e não apresentaram tendências para isso. Dúvidas quanto à exatidão do equilíbrio na câmara de pressão aparecem na literatura desde a década de 60 (SOLONE et al., 2012).

Figura 17 – Potenciais matriciais obtidos pelo WP4C para 5 solos, depois de submetidos à câmara de pressão a 15 bar. C1 é referente a camada 0-7 cm e C2 referente a camada 30-37 cm



A pressão osmótica foi estimada pela equação 21, medindo-se a resistividade das amostras e os teores de água. Os resultados obtidos foram todos menores que a margem de erro do WP4C fornecido pelo fabricante nesta faixa de operação (0,05 MPa), por isso foram desconsideradas as interferências da pressão osmótica.

4.7. Utilização de θ_s fixo nas modelagens inversas

As curvas de retenção obtidas pela câmara de pressão não puderam ser utilizadas na modelagem inversa pelos motivos apresentados no tópico anterior. Para reduzir o número de parâmetros estimados pela modelagem inversa, utilizaram-se os valores de θ_s obtidos pela câmara de pressão.

Obteve-se pouca variação nos R^2 e RMSE nas simulações com parâmetros das amostras individuais. O mesmo acontece com as médias das repetições de cada solo. Analisando apenas estes índices, obteve-se leve aumento no índice R^2 e

leve diminuição no RMSE. Porém, em alguns dos solos obteve-se maior variação, e na Tabela 12 mostram-se os solos com maiores aumentos no índice R^2 dos resultados médios dos solos.

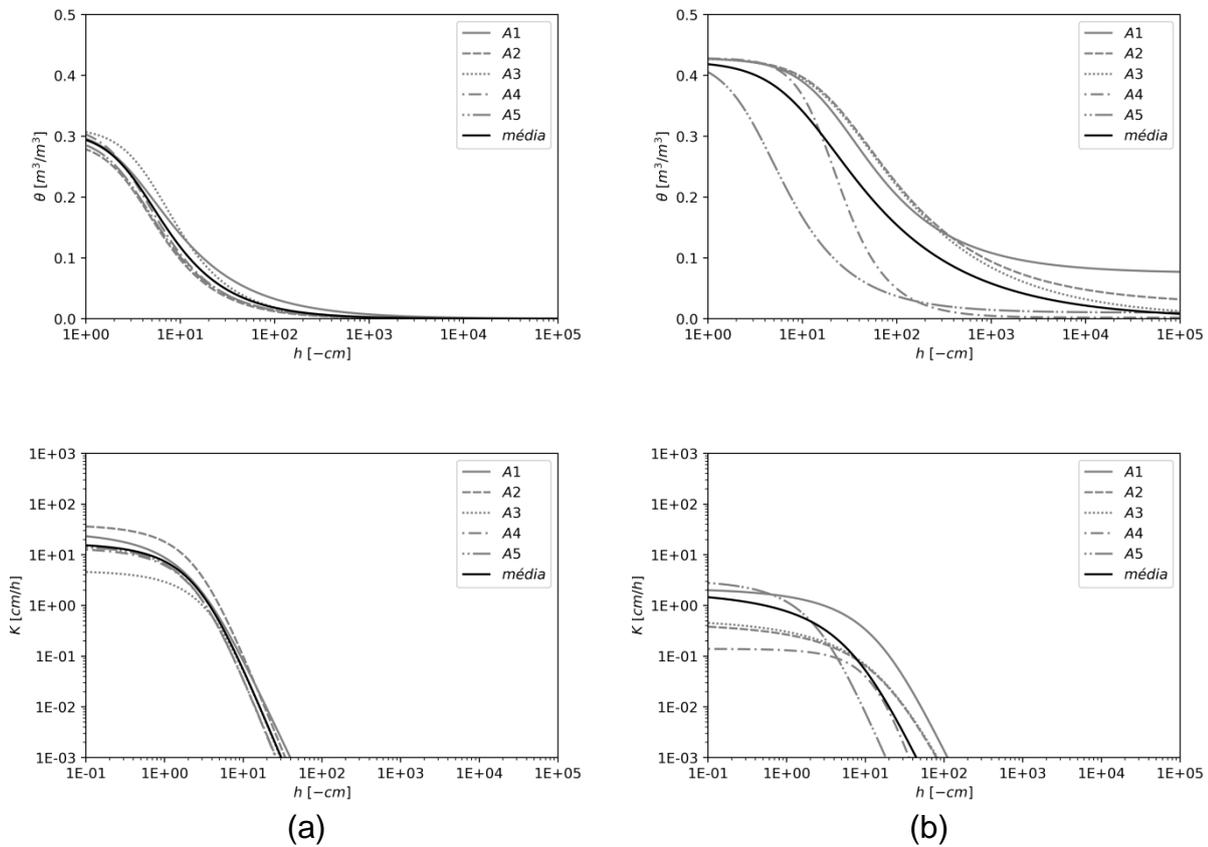
Tabela 12 – Maiores incrementos no índice R^2 considerando θ_s fixo na modelagem inversa

Solo	Camada (cm)	R^2 com θ_s Ajustado	R^2 com θ_s Medido
P9	0-7	0,4275	0,8917
P2	0-7	0,4590	0,8014
P6	30-37	0,7591	0,9651
P3	0-7	0,8088	0,9583
P4	0-7	0,7972	0,9443
P4	30-37	0,8157	0,9422

Não só o incremento no R^2 , mas o limite de 95% de confiança também apresentou bons resultados, com exceção do P9 camada 0-7 cm. Neste solo, mesmo com elevado R^2 na média das amostras, as amostras apresentaram elevados intervalos nos limites de 95% de confiança.

O solo P1 camada 0-7 cm foi o que apresentou maior queda no índice R^2 ao não ajustar o θ_s nas curvas das amostras, como mostra Figura 18. O R^2 da curva média foi de 0,9896 para 0,8779.

Figura 18 – Comparação em P1 camada 0-7 cm com θ_s ajustado (a), e medido (b)



O parâmetro θ_s é proveniente das amostras da câmara de pressão, sendo que para todas as amostras de cada camada/solo utilizou-se o mesmo θ_s . Espera-se que esta característica melhore os resultados médios, por ser um parâmetro medido e não ajustado.

A Tabela 13 apresenta as médias e desvios do índice R^2 com e sem o ajuste em θ_s . As médias e desvios são referentes aos índices R^2 dos parâmetros hidráulicos modelados pelas amostras individuais e as curvas médias de cada solo calculado pelo RETC.

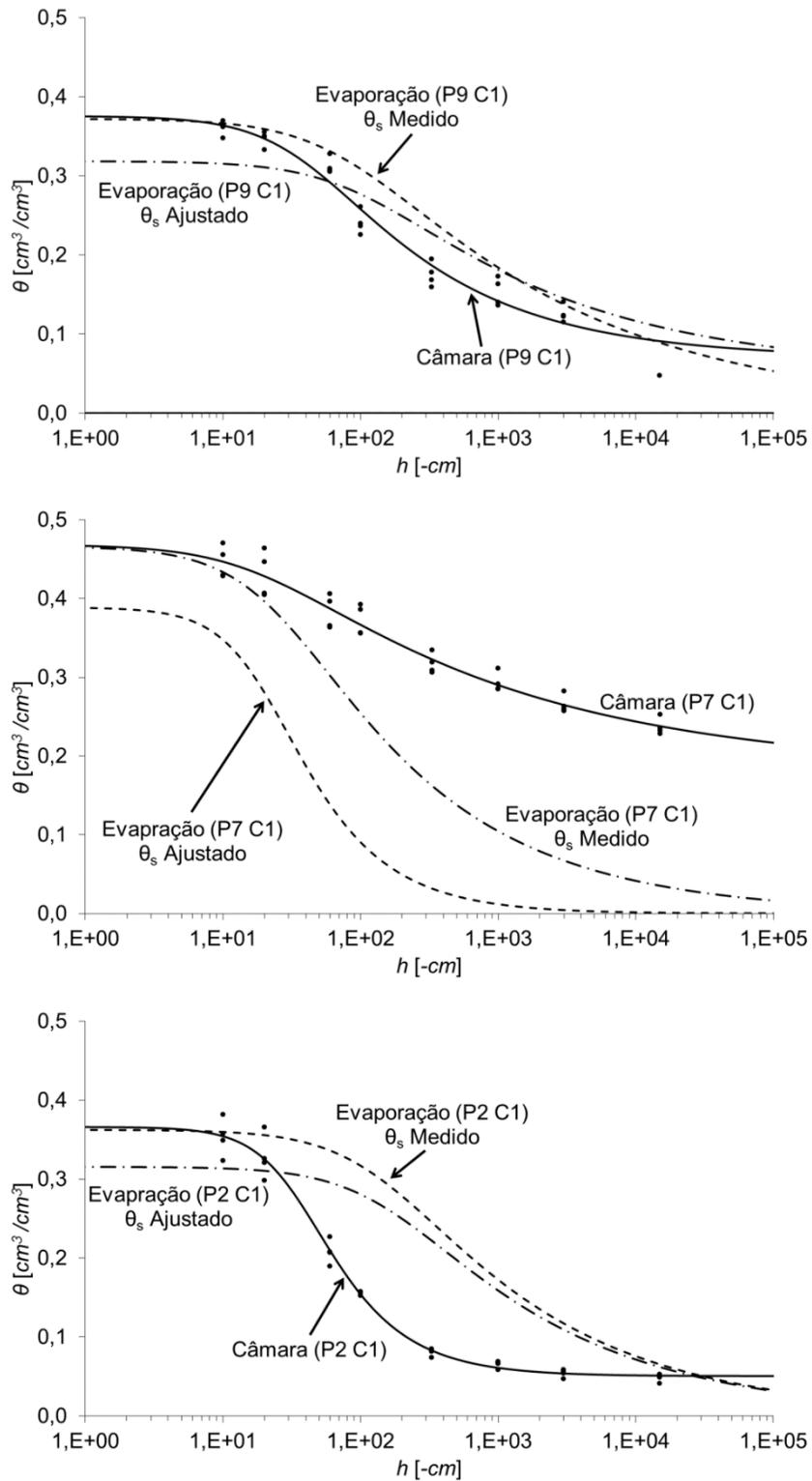
Tabela 13 – Desvios e médias do índice R^2 das propriedades hidráulicas de amostras individuais e médias das amostras

	θ_s Ajustado		θ_s Medido	
	Amostras	Média	Amostras	Média
Média	0,9246	0,8801	0,9232	0,9028
Desvio	0,0451	0,1443	0,0459	0,1055

Com a inserção do teor de água saturado, obteve-se leve queda do índice R^2 nas amostras individuais, porém relativo aumento no índice R^2 das médias ao se utilizar o θ_s medido.

A Figura 19 mostra os resultados dos solos P9 camada 0-7 cm, P7 camada 0-7 cm, P2 camada 0-7 cm, comparando as curvas de retenção da câmara de pressão, com as curvas de retenção obtidas pelo experimento de evaporação com ARG com θ_s ajustado e com θ_s medido por peso e câmara de pressão.

Figura 19 – Curvas de retenção obtidas por experimento de evaporação com ARG e por câmara de pressão dos solos P9 camada 0-7 cm (P9 C1), P7 camada 0-7 cm (P7 C1), e P2 camada 0-7 cm (P2 C1). Pontos representam os teores de água medidos pela câmara de pressão



As curvas de retenção médias do solo P9 camada 0-7 cm são próximas, graficamente. No entanto, os parâmetros de Van Genuchten – Mualem não podem ser acreditados pelo experimento de evaporação com ARG, pois o limite de 95% de confiança apresentou resultados muito elevados na maioria das amostras, tanto com θ_s ajustado e medido. A tendência visualizada graficamente não pode ser assegurada pelos resultados do Hydrus-1D, e este foi o pior resultado obtido.

As curvas de retenção médias do solo P7 camada 0-7 cm apresentam resultados confiáveis. As curvas de retenção obtidas por câmara de pressão ficaram acima das curvas de retenção obtidas pelo experimento de evaporação com ARG, este comportamento ocorreu na maioria dos casos.

O solo P2 foi o único que apresentou a curva de retenção obtida pela câmara de pressão com teores de água maiores que as das curvas obtidas com o experimento de evaporação com ARG. Os resultados do Hydrus-1D permitem acreditar no resultado. O solo P2 camada 0-7 cm foi o segundo com menor R^2 , maior apenas que o P9 camada 0-7 cm. Este solo é arenoso e em comparação com o WP4C apresentou resultado próximo ao esperado (similar a câmara de pressão). As curvas de retenção obtidas pela câmara de pressão e pelo experimento de evaporação com ARG no solo P2, em ambas as camadas, foram as que mais se aproximaram.

5.CONCLUSÕES

Os resultados mostram que o método proposto (evaporação monitorada por atenuação de radiação-gama) apresenta bom potencial para a determinação das propriedades hidráulicas do solo. Mesmo sem medir diretamente os potenciais ao longo do processo de secagem, obtiveram-se resultados confiáveis.

Aparentemente, a câmara de pressão não fornece resultados confiáveis nas altas tensões; somente para os solos arenosos os resultados foram semelhantes aos medidos com o WP4C próximo a -150 m.

Mesmo sem a utilização da câmara de pressão para medição dos potenciais, os resultados da curva de retenção foram confiáveis. O limite de 95% de confiança do Hydrus-1D mostra-se importante para a averiguação da confiança nos resultados da modelagem inversa. A análise do RMSE e do R^2 apenas, não foi suficiente quando se ajustam os 6 parâmetros de Van Genuchten – Mualem.

Os parâmetros ajustados da curva de condutividade hidráulica obtiveram valores precisos, com exceção de K_s . A condutividade saturada apresenta elevado erro-padrão. Outros modelos mais sensíveis a este parâmetro devem apresentar melhores resultados. Os parâmetros, λ e n , podem ser determinados pelo método com confiança.

Os parâmetros iniciais no processo iterativo da modelagem inversa refletem no resultado final; algoritmos mais modernos como o NSGA-2 (LE BOURGEOIS, et al., 2016) talvez possam minimizar esse problema, porém a um maior custo computacional.

Sugestões para pesquisas futuras incluem:

- Automação da modelagem inversa no experimento de evaporação com ARG, através de limitação no aceite do intervalo do limite de 95% de confiança;
- Comparação com métodos disponíveis no mercado, como o HYPROP;

- Utilização do WP4C para determinação de pontos na curva de retenção próximos ao potencial de -150 m;
- Otimização dos intervalos de tempo de medição das contagens de ARG durante o experimento de evaporação;
- Utilização de papéis permeáveis na superfície das amostras para diminuir o tempo de evaporação, o que pode aumentar a precisão do método.

REFERÊNCIAS

- BOUYOUCOS, G. J. Making a mechanical analysis of soil in fifteen minutes. **Soil Science**, Baltimore, v. 25, n. 6, p. 473–480, 1928.
- BROOKS, R. H.; COREY, A T. **Hydraulic properties of porous media**. Fort Collins, CO: Colorado State University, 1964. 37 p. (Hydrology Papers, 3).
- DANE, J. H.; HOPMANS, J. W. Water retention and storage. In: DANE, J. H.; CLARKE, T. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 4: Physical methods. Madison: SSSA, 1999. p. 671–720.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.
- FERRAZ, E. S. B.; MANSELL, R. S. **Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods**. Gainesville: University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences, 1979.
- GEE, G. W. et al. Rapid measurement of low soil water potentials using a water activity meter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 1068–1070, 1992.
- GRIEKEN, R. E. V.; MARKOWICZ, A. A. **Handbook of X-ray spectrometry**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 1016 p.
- HALBERTSMA, J. M.; VEERMAN, G. J. **A new calculation procedure and simple set-up for the evaporation method to determine soil hydraulic functions**. Wageningen: DLO Winand Staring Centre, 1994. (Report, 88).
- IPPISCH, O.; VOGEL, H. J.; BASTIAN, P. Validity limits for the van Genuchten-Mualem model and implications for parameter estimation and numerical simulation. **Advances in Water Resources**, Southampton, NY, v. 29, n. 12, p. 1780–1789, 2006.
- LE BOURGEOIS, O. et al. Inverse modeling of soil water content to estimate the hydraulic properties of a shallow soil and the associated weathered bedrock. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 541, p. 116–126, 2016.
- MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, Philadelphia, v. 11, n. 2, p. 431–441, 1963.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 12, n. 3, p. 513–522, 1976.
- PIRES, L. F. et al. Gamma-ray computed tomography to characterize soil surface sealing. **Applied Radiation and Isotopes**, Oxford, v. 57, n. 3, p. 375–380, 2002.

SCHINDLER, U.; MÜLLER, L. Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 169, n. 5, p. 623–629, 2006.

SCHINDLER, U.; DOERNER, J.; MUELLER, L. Simplified method for quantifying the hydraulic properties of shrinking soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 178, n. 1, p. 136–145, 2015.

SCHINDLER, U. et al. The evaporation method: Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 173, n. 4, p. 563–572, 2010.

ŠIMŮNEK, J.; WENDROTH, O.; VAN GENUCHTEN, M. T. Parameter estimation analysis of the evaporation method for determining soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 4, p. 894–905, 1998.

ŠIMŮNEK, J. et al. **The HYDRUS-1D** - Software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Riverside, CA: University of California, Department of Environmental Sciences, 2013.

SOLONE, R. et al. Errors in water retention curves determined with pressure plates: Effects on the soil water balance. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 470–471, p. 65–74, 2012.

STOLTE, J. et al. Comparison of six methods to determine unsaturated soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1596–1603, 1994.

TAMARI, S. et al. A simple method for determining soil hydraulic properties in the laboratory. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 3, p. 642–651, 1993.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-897, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. Ada, OH: USEPA, Office of Research and Development, 1991. 93 p.

WIND, G. P. Capillary conductivity data estimated by a simple method. In: WAGENINGEN SYMPOSIUM, 1996, Wageningen. **Proceedings; water in the unsaturated zone**. Birmingham, UK: UNESCO; IASH, 1969. p. 181–191.