



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO**

**CARLOS LEVI ANASTACIO DOS SANTOS**

**ASSOCIAÇÃO ENTRE A CAPACIDADE DE CAMPO “IN SITU” E O PONTO DE  
INFLEXÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO**

**FORTALEZA**

**2018**

CARLOS LEVI ANASTACIO DOS SANTOS

ASSOCIAÇÃO ENTRE A CAPACIDADE DE CAMPO “IN SITU” E O PONTO DE  
INFLEXÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo do Solo e da Água.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior.

.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S234a Santos, Carlos Levi Anastacio dos.  
Associação entre a capacidade de campo "in situ" e o ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo / Carlos Levi Anastacio dos Santos. – 2018.  
49 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior.

1. Física do Solo. 2. Manejo de Irrigação. 3. Redistribuição de água no solo. I. Título.

CDD 631.4

---

CARLOS LEVI ANASTACIO DOS SANTOS

ASSOCIAÇÃO ENTRE A CAPACIDADE DE CAMPO “IN SITU” E O PONTO DE  
INFLEXÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo do Solo e da Água.

Aprovada em: 31 / 08 / 2018 .

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. José Carlos de Araújo Universidade  
Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Rubens Sonsol Gondim  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

À minha avó, Irene Anastácio da Silva e aos meus pais, Francisco Carlos Nascimento dos Santos e Aila Maria Anastacio dos Santos “in memoriam”.

## **AGRADECIMENTOS**

À FUNCAP, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Aos docentes e discentes do programa de pós-graduação em Ciência do Solo e do curso de Agronomia da Universidade Federal do Ceará que tanto contribuíram para minha formação profissional.

Aos funcionários administrativos lotados no Departamento de Ciências do Solo.

Aos membros da banca de avaliação desse trabalho.

À minha família e amigos pelo incentivo.

## RESUMO

A capacidade de campo é uma propriedade do solo de importância agrícola. A sua estimativa padrão é aquela realizada *in situ*, considerada trabalhosa e morosa. Em função disso, surgem métodos alternativos para estimá-la, como o uso do ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, o qual é caracterizado por uma tensão e seu respectivo conteúdo de água. O uso de uma tensão fixa para estimativa da capacidade de campo é contestado pela comunidade científica. Apesar disso, uma tensão foi adotada por Ferreira e Marcos (1983) ao proporem que o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo é um bom estimador da capacidade de campo obtida *in situ*. Não há trabalho que corrobore ou refute essa associação com base no conceito clássico de capacidade de campo definido por Veihmeyer e Hendrickson (1931). Portanto, o objetivo foi testar a hipótese de que o conteúdo de água da capacidade de campo estimada *in situ* é representado pelo ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, independentemente da condição textural e estrutural da amostra de solo da qual é obtida a curva de retenção de água no solo e do seu modelo de ajuste. Para tanto, estimativas da capacidade de campo em solo com diferentes classes texturais foram realizadas *in situ*. Nessas, foram coletadas amostras de solos com estrutura preservada e com estrutura não preservada para realização de procedimentos laboratoriais que permitiram confrontar o conteúdo de água obtido *in situ*, na condição de capacidade de campo, com aquele estimado pelo ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo obtida em laboratório sob diversas condições estruturais da amostra de solo, considerando dois modelos de ajuste – modelo de van Genuchten e modelo polinomial cúbico. Assim, os dados de conteúdo de água foram analisados em delineamento inteiramente casualizado com cinco tratamentos e cinco repetições e as médias comparadas pelo teste de Dunnett ( $p = 0,1$ ), considerando o método de campo como referência. Concluiu-se que o critério de estimativa da capacidade de campo *in situ*, o conteúdo de argila da amostra de solo, o modelo de ajuste da curva de retenção de água no solo e a condição estrutural da amostra de solo interferem na associação entre o conteúdo de água estimado no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo e a capacidade de campo obtida *in situ*.

**Palavras-chave:** Física do solo. Manejo da Irrigação. Redistribuição de água no solo.

## ABSTRACT

Field capacity is a soil property of agricultural relevance. Its standard determination is performed *in situ*. This is considered to be laborious and time-consuming. As a result, alternative methods arise to estimate it, such as the inflection point of the soil water retention curve. The use of a soil water tension for determination of field capacity is contested by the scientific community. Nevertheless, it was adopted by Ferreira and Marcos (1983), who proposed that the water content at the inflection point of the water retention curve in the soil is a good estimator of field capacity obtained *in situ*. There is no paper that supports or refutes this association based on the classic concept of Veihmeyer and Hendrickson (1931). Therefore, the aim was to test the hypothesis that the water content of the field capacity *in situ* is represented by the inflection point of the soil water retention curve, regardless of the textural and structural condition of the soil sample from the soil water retention curve and its adjustment model. For this purpose, soil field capacity was assessed for different textural classes *in situ*. In these areas, undisturbed and disturbed samples of soils were collected to perform laboratory procedures that allowed to confront the water content obtained *in situ*, at the field capacity condition, with that estimated from the inflection point of the soil water retention curve obtained in the laboratory under various structural conditions of the soil sample, considering two adjustment models - van Genuchten model and cubic polynomial model. Thus, water content data were analyzed in a completely randomized design with five treatments and five replicates and the means compared by Dunnett's test ( $p = 0.1$ ) considering the field method as a reference. I conclude that the *in situ* field capacity estimation criterion, clay content of soil sample, soil water retention curve fitting model, and structural condition of soil sample interferes at the association between water content estimated an inflection point and the field capacity obtained *in situ*.

**Keywords:** Soil physic. Irrigation schedulling. Soil water redistribution.



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>CAPACIDADE DE CAMPO</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1</b>	<b>Conceito e importância agrônômica</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2</b>	<b>Métodos de estimativa da capacidade de campo</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2.1</b>	<i>Método de estimativa in situ</i> .....	<b>10</b>
<b>2.2.2</b>	<i>Método de estimativa em laboratório</i> .....	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>Curva de retenção de água no solo e o ponto de inflexão</b> .....	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Unidades experimentais</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Amostragem</b> .....	<b>17</b>
<b>3.3</b>	<b>Procedimentos analíticos</b> .....	<b>18</b>
<b>3.3.1</b>	<i>Estimativa da capacidade de campo in situ</i> .....	<b>18</b>
<b>3.3.2</b>	<i>Preparo das amostras de solo</i> .....	<b>19</b>
<b>3.3.3</b>	<i>Estimativa da capacidade de campo em laboratório</i> .....	<b>21</b>
<b>3.3.4</b>	<i>Outras análises</i> .....	<b>22</b>
<b>3.3.4.1</b>	<i>Densidade do solo</i> .....	<b>22</b>
<b>3.3.4.2</b>	<i>Densidade de partículas</i> .....	<b>22</b>
<b>3.3.4.3</b>	<i>Porosidade do solo</i> .....	<b>22</b>
<b>3.4</b>	<b>Análise de dados</b> .....	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A capacidade de campo é conceituada, em síntese, como o máximo conteúdo de água retido em uma camada de solo na qual a lixiviação é considerada desprezível. Assim, a sua estimativa permite quantificar a capacidade de água disponível do solo e a lâmina de irrigação, por exemplo. Além disso, o seu valor é indicativo do momento ótimo para o manejo do solo, de tal modo que o seu conhecimento possibilita a implementação de práticas agrícolas que preconizam menor impacto ambiental e otimização do uso dos fatores de produção.

A estimativa da capacidade de campo *in situ* é comumente aceita na literatura, sendo considerada o método padrão. Todavia, o procedimento para a sua obtenção é moroso e operacionalmente trabalhoso. Assim, há um estímulo à busca por métodos alternativos ao padrão que contornem tais aspectos desvantajosos e que permitam sua predição.

Entre os métodos alternativos ao padrão, encontra-se o ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, proposto originalmente por Ferreira e Marcos (1983). Outros estudos, além desse, corroboram a assertiva de que o ponto de inflexão é um bom estimador da capacidade de campo (MELLO *et al.*, 2002; BARROS *et al.*, 2017).

Os autores que propuseram a associação entre o ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo e a capacidade de campo estimada *in situ* tiveram por base o uso da tensão de 6 kPa. Ou seja, suas premissas foram: 1- o conteúdo de água em 6 kPa representa a melhor estimativa da capacidade de campo obtida *in situ*, 2- o ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo ocorre com maior frequência em 6 kPa. Então, concluíram por dedução, que o ponto de inflexão constitui uma estimativa válida da capacidade de campo obtida *in situ*. Embora a conclusão seja sólida do ponto de vista lógico, a primeira premissa não é considerada verdadeira (COLMAN, 1947; SOUZA; REICHARDT, 1996; ROMANO; SANTINI, 2002; REYNOLDS, 2018), o que invalida a conclusão do ponto de vista científico.

A fim de verificar essa mesma associação, estabeleci as seguintes proposições: 1- o conteúdo de água na capacidade de campo obtida *in situ* é estimado com base do conceito proposto por Veihmeyer e Hendrickson (1931) e não por um valor de tensão predeterminado, e 2- o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo é estimado por polinômio cúbico e pelo modelo de van Genuchten em amostras de solo com distintas condições texturais e estruturais.

De tal modo, é proposta a hipótese de que o conteúdo de água obtido pela estimativa da capacidade de campo *in situ* é representado pelo ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, independente da textura e da estrutura da amostra de solo. Assim, objetiva-se

determinar em que condição estrutural e textural da amostra de solo há associação entre o conteúdo de água estimado pela capacidade de campo *in situ* com o ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo.

## **2 CAPACIDADE DE CAMPO**

### **2.1 Conceito e importância agronômica**

Capacidade de campo refere-se à quantidade de água retida no solo após o excesso ter sido drenado e após a taxa de movimento descendente de água ter diminuído substancialmente, o que ocorre entre dois ou três dias após uma chuva ou irrigação em solos permeáveis de estrutura e textura uniformes (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1931). Além desse conceito, é comum considerar, também, a capacidade de campo como o limite superior de disponibilidade de água no solo (ANDRADE; STONE, 2011).

Desse modo a obtenção do máximo valor do conteúdo de água no solo para o qual a perda de água por drenagem é insignificante ocorre sob duas condições aditivas: 1- considerando uma taxa de drenagem interna insignificante e 2- considerando o tempo em que se atinge a drenagem insignificante, a qual foi predeterminada entre 2 e 3 dias. Perceba que o elo das condições é a drenagem interna insignificante.

Assim, o principal problema em relação ao conceito refere-se aos termos empregados, pois eles não são precisos (REYNOLDS, 2018). Afinal, não há uma definição comumente aceita do que seria considerada drenagem do excesso de água ou diminuição substancial do movimento descendente de água (REICHARDT, 1988). Até mesmo o fato de se considerar capacidade de campo como o limite superior de disponibilidade de água no solo é questionável (JONG VAN LIER, 2017).

Embora haja essas dificuldades conceituais, é indiscutível a utilidade do conceito em sistemas agrícolas, sobretudo no manejo da irrigação, seja para estimar a capacidade de água disponível de um solo ou para estimar a lâmina de irrigação a ser aplicada em uma camada de solo para que não haja perda excessiva de água e nutrientes (JONG VAN LIER, 2000). Daí deriva, também, a utilidade ambiental do conceito, pois o risco de contaminação do lençol freático por fertilizantes e agroquímicos é reduzido (BRITO *et al.*, 2011).

Assim, ao considerarmos que um solo com boa qualidade física tem transmissão de fluidos e propriedades de armazenamento que permitem as proporções corretas de água, nutrientes dissolvidos e ar, tanto para o desempenho máximo das culturas quanto para mínima

degradação ambiental (TOPP *et al.*, 1997), verificamos que a capacidade de campo constitui um indicador da qualidade física do solo, além disso ela compõe outros importantes indicadores como a capacidade de aeração, capacidade de água disponível e capacidade de campo relativa (REYNOLDS *et al.*, 2008).

## 2.2 Métodos de estimativa da capacidade de campo

A estimativa da capacidade de campo pode ser obtida *in situ*, baseada no tempo de drenagem a partir da saturação ou a partir da drenagem interna considerada desprezível (REYNOLDS, 2018) ou pode ser obtida em laboratório com o uso de tensões predeterminadas (ROMANO; SANTINI, 2002), com o uso de funções de pedotransferência (NEMES; PACHEPSKY; TIMLIN, 2011) e com o uso de simulações numéricas (JONG VAN LIER; WENDROTH, 2016).

### 2.2.1 Método de estimativa *in situ*

Recomenda-se que a capacidade de campo seja estimada *in situ* (ZETTL *et al.*, 2011) e o procedimento mais comum é com base no método do perfil instantâneo (ROMANO; SANTINI, 2002). Para tanto, segundo esses autores, há de se ter uma parcela nivelada, livre de vegetação, com área maior ou igual a 12 m<sup>2</sup> e o seu entorno deve ser cercado por placas verticais ou envolto em plástico. As bordas devem exceder a superfície do solo em cerca de 20 cm, de modo a formar um dique. Feito isso, satura-se a parcela um pouco além da profundidade desejada. Atingida a saturação, o fornecimento de água na parcela é suspenso e essa é coberta para prevenir evaporação ou alguma infiltração adicional, então, medidas do conteúdo de água (de modo indireto ou pelo método termogravimétrico) são realizadas ao longo do tempo. Assim, ao plotar em um gráfico essas duas variáveis (conteúdo de água e tempo) é possível identificar uma mudança do conteúdo de água, no qual  $\frac{\partial \theta}{\partial t}$  é praticamente nula, tempo no qual considera-se a drenagem como desprezível.

Assim, é perceptível a presença de dois componentes para a definição de capacidade de campo obtida *in situ*: o tempo e a drenagem interna ou densidade de fluxo insignificante. Embora uma definição baseada no tempo seja utilizada amplamente, sua validade ainda carece de estudo (TWARAKAVI; SAKAI; ŠIMŮNEK, 2009). Acontece que o tempo considerado para que a drenagem interna atinja um valor dito desprezível é um critério subjetivo e variável entre

diversos autores e situações (CASAROLI; JONG VAN LIER, 2008).

Fatores como a textura do solo e espessura da camada de solo interferem na obtenção de um tempo que seja único (TWARAKAVI; SAKAI; ŠIMŮNEK, 2009). Além disso, a camada subjacente a escolhida para avaliação da capacidade de campo contribui para diferenças entre o tempo em que a drenagem pode ser considerada insignificante (ZETTL *et al.*, 2011).

De modo geral, o tempo recomendado para estimar a capacidade de campo é função do objetivo do estudo; para fins de irrigação é recomendado 2 a 3 dias para ter proximidade com o turno de rega adotado para as culturas, enquanto para estudo de lixiviação tempos maiores do que esses mencionados devem ser considerados (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015). Nesse caso, o mais recomendado é estimar a capacidade de campo a partir da densidade de fluxo considerada insignificante (JONG VAN LIER; WENDROTH, 2016).

É reconhecido que a drenagem não cessa completamente, desse modo a definição de fluxo desprezível torna-se subjetiva e os valores obtidos de modo direto podem diferir (REICHARDT, 1988). Mesmo assim, recomenda-se definir capacidade de campo em relação ao fluxo de água em vez de um período particular de tempo de drenagem (NACHABE, 1998). Esse autor admite que a capacidade de campo é atingida quando fluxo é de  $0,05 \text{ mm d}^{-1}$ , mas o valor de  $0,1 \text{ mm d}^{-1}$  também é recomendado (TWARAKAVI; SAKAI; ŠIMŮNEK, 2009). Valores maiores do que esses, tais como  $0,5 \text{ mm d}^{-1}$  e  $1 \text{ mm d}^{-1}$  são utilizados com a ressalva de que aquele da mesma ordem de grandeza da evapotranspiração não pode ser considerado desprezível (JONG VAN LIER, 2017).

O valor de evapotranspiração comumente assumido equivale a  $5 \text{ mm d}^{-1}$  (NACHABE, 1998), assim, para esses autores, a capacidade de campo é atingida quando a densidade de fluxo é duas ordens de magnitude menor do que a evapotranspiração média potencial, condição em que a drenagem interna é considerada desprezível. Essa condição é atingida, também, quando há uma redução de 6 a 15 vezes do valor da evapotranspiração diária (RIBEIRO, 2000).

Os aspectos desvantajosos do método de estimativa *in situ* da capacidade de campo referem-se ao fato desse ser impraticável quando o suprimento de água é limitado (DUAN *et al.*, 2010), ou quando condições climáticas não são favoráveis, como em períodos chuvosos (NEMES; PACHEPSKY; TIMLIN, 2011). Além disso, acrescenta-se o fato de ser laborioso e demorado (MELLO *et al.*, 2002), afora as dificuldades práticas como o estabelecimento de densidade de fluxo desprezível e do tempo necessário para atingir essa densidade de fluxo. Em razão desses motivos, inúmeras estimativas da capacidade de campo em laboratório foram

propostas e a comparação entre técnicas de estimativa da capacidade de campo são frequentemente relatadas na literatura (FERREIRA; MARCOS, 1983; BELL; VAN KEULEN, 1996; RIBEIRO, 2000; ANDRADE; STONE, 2011; ASCHONITIS *et al.*, 2013)

### **2.2.2 Método de estimativa em laboratório**

Métodos de estimativa da capacidade de campo em laboratório compreendem aqueles cujas condições de contorno distinguem da ocorrida no campo. Como exemplo há o uso de funções de pedotransferência, o uso de modelagem numérica, o uso da curva de retenção de água no solo e até mesmo o uso de um ponto dela (valor de tensão predeterminado), sendo esse último o mais utilizado (CASAROLI; JONG VAN LIER, 2008), principalmente por laboratórios de rotina de análise de solo, além de ser comumente empregado em trabalhos que abordam a capacidade de água disponível do solo, indicadores de qualidade física do solo e manejo de irrigação.

Esses métodos de estimativa da capacidade de campo são considerados indiretos e recomenda-se que eles sejam fundamentados em um princípio dinâmico (MEDINA; OLIVEIRA JÚNIOR, 1987), tal como a redistribuição de água no solo.

Críticas referentes a esses métodos consistem no fato deles não representarem as condições de campo, ou não serem aplicáveis a todas as classes texturais (HANKS; HOLMES; TANNER, 1954). Apesar disso, os métodos indiretos são os mais utilizados, principalmente aquele que utiliza o valor de uma tensão predeterminada. Essa associação do conceito de capacidade de campo com a tensão de água no solo é a que gerou o maior número de trabalhos.

Entre os trabalhos que associaram a capacidade de campo com o estado de energia da água no solo, destaque-se o de Colman (1947) que assumiu a tensão de 33 kPa como medida para a capacidade de campo, valor adotado até hoje. Seus resultados evidenciam que uma tensão predeterminada não representa, de fato, a capacidade de campo. Assim, é prudente que não seja adotada como critério universal. Todavia, é comum o uso de tensões predeterminadas de modo arbitrário.

Nos solos característicos de regiões de clima tropical e úmido, esse critério, que fixa a tensão em 33 kPa, deve ser alterado para tensões menores, na faixa de 10 a 6 kPa (RUIZ; FERREIRA; PEREIRA, 2003). Segundo esses autores, a tensão de 33 kPa, que aparece com frequência na literatura, refere-se a solos típicos de regiões de clima temperado, onde há presença de argilas de maior atividade.

Na realidade, a recomendação de uso dessas tensões é condicionado à textura da

amostra, uma vez que essa imprime diferentes condições de retenção de água no solo, desse modo recomenda-se o uso de 10 kPa para solos arenosos, 30 kPa para solos de textura média e 50 kPa para solos argilosos (ROMANO; SANTINI, 2002).

Como a estrutura também influencia na propriedade de retenção de água no solo, Medina e Oliveira Júnior (1987) constataram que a tensão que proporciona a umidade mais próxima à capacidade de campo é de 10 kPa em amostras com estrutura não preservada, enquanto as demais propiciaram subestimativas do valor.

Duan *et al.* (2010) verificaram valores discrepantes ao comparar amostras de solo com diferentes condições estruturais. A capacidade de campo medida em amostras de solo com estrutura não preservada foi maior do que a medida em amostras com estrutura preservada. Embora os autores desconheçam a razão dessa discrepância, creditam o fato a alteração da estrutura da amostra de solo que favorece o aumento do número de poros com menor diâmetro, o que propicia o maior conteúdo de água para uma mesma tensão.

Recomenda-se o uso de amostras com estrutura não preservada, quando essas forem submetidas a baixas tensões, até 10 kPa, ou a altas tensões (DONAGEMA *et al.*, 2011). Contudo, os autores fazem a ressalva de que amostras com estrutura preservada apresentam resultados mais próximos das condições de campo.

Pelo exposto, verifica-se que até o momento não há consenso quanto ao valor de tensão que deva ser utilizada como representativa da capacidade de campo. É desejável encontrar algum protocolo para estimar o valor de tensão que possa ser utilizado para representar a capacidade de campo (NEMES; PACHEPSKY; TIMLIN, 2011) e para indicar a condição estrutural da amostra de solo a ser analisada.

O emprego de determinados valores de tensão da água no solo não apresentaram correlações que possam ser sistematizadas, não devendo ser adotados (SOUZA; REICHARDT, 1996). Além disso o método comum para estimar a capacidade de campo, o conteúdo de água a uma dada tensão (10 ou 33 kPa), é uma probabilidade, pois não há garantia de que nessa tensão o fluxo seja desprezível (MEYER; GEE, 1999).

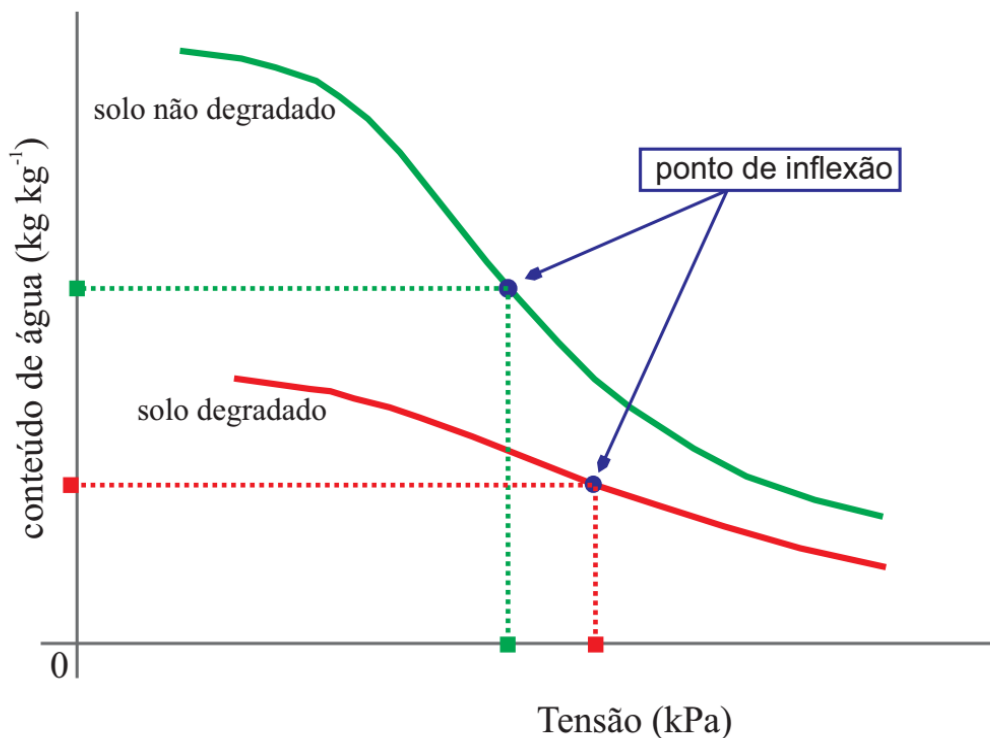
Perceba que a escolha de uma tensão predeterminada equivale a escolha de um ponto da curva de retenção de água no solo. Desse modo, estudos que lidam com a curva de retenção de água no solo são úteis para a estimativa da capacidade de campo com a vantagem de abranger qualquer valor de tensão predeterminada.

### 2.3 Curva de retenção de água no solo e o ponto de inflexão

Buckingham (1907) introduziu o conceito de potencial capilar, útil para descrever o estado de energia de água no solo, possibilitando associá-lo ao conteúdo de água no solo. Desde então, a representação gráfica da função que relaciona o potencial mátrico ou a tensão com o conteúdo de água no solo em base massa ou em base volume é definida como curva de retenção de água no solo.

Nela há uma região cuja tensão permanece mais ou menos constante, mesmo que haja uma pequena variação na umidade do solo (FERREIRA; MARCOS, 1983). É nessa região que se encontra o ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, o qual divide a curva em dois ramos que diferem quanto à relação entre tensão e conteúdo de água no solo. Esse ponto é caracterizado, primeiramente, pela sua posição no diagrama cartesiano, definida pelo conteúdo de água no ponto de inflexão e pela tensão no ponto de inflexão (DEXTER, 2004), conforme Figura 1. Além disso, esse ponto indica o conteúdo de água ótimo para o manejo satisfatório do solo (DEXTER; BIRD, 2001).

Figura 1 – Curva de retenção de água no solo de áreas distintas (degradada e não degradada) com base no trabalho de Dexter (2004), evidenciando o ponto de inflexão obtido de amostras de solo com diferentes condições estruturais



Fonte: Elaborado pelo autor.



Observe na Figura 1, que o manejo interfere na posição do ponto de inflexão. Em solos degradados há um deslocamento do ponto de inflexão para um maior valor de tensão. Esse comportamento é função da microporosidade da amostra (ALENCAR *et al.*, 2015). Assim, quanto maior a microporosidade, maior o valor da tensão no ponto de inflexão na curva de retenção de água no solo. Portanto, o ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo deve ser considerado uma propriedade e a sua fixação a um valor de tensão não é recomendada.

Apesar disso, autores como Ferreira e Marcos (1983) e Mello *et al.* (2002) admitem que o ponto de inflexão, estimado em 6 kPa, deve fornecer a melhor estimativa da capacidade de campo; todavia seus trabalhos carecem de base empírica que suporte tal conclusão.

Ferreira e Marcos (1983) sugerem que a retenção de água no solo a 6 kPa representa a melhor estimativa da capacidade de campo, com a afirmativa que há uma correlação significativa a 1% (-0,9746) entre o conteúdo de água na capacidade de campo e a tensão de 6 kPa, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Correlação de Spearman entre o conteúdo de água na capacidade de campo e as retenções no ponto de inflexão, 1/3 atm, 1/10 atm e 0,06 atm dos solos Latossolo Roxo distrófico e Regossolo

Solo	P. inflexão	1/3 atm	1/10 atm	0,06 atm
Latossolo	0,5642	-0,0513	-0,6680	-0,9746**
Regossolo	-0,6571	0,5428	0,6000	0,6000

\*\*Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Fonte: Ferreira e Marcos (1983)

Além disso, os autores constataram que o ponto de inflexão da curva característica do Latossolo Roxo Distrófico ocorre com maior frequência em 6 kPa, assim, segundo eles, seria razoável admitir que o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção constitui uma estimativa válida da capacidade de campo. Trabalhos nesse sentido, que buscam verificar a associação entre o conteúdo de água no ponto de inflexão e a capacidade de campo são escassos e até o momento não há comparação feita com a capacidade de campo estimada *in situ*, considerando o conceito clássico da capacidade de campo estabelecido por Veihmeyer e Hendrickson (1931).

Mello *et al.* (2002) concluem que o ponto de inflexão calculado por polinômio cúbico pode ser considerado um bom estimador da capacidade de campo para o Latossolo Vermelho Distrófico típico, para tanto, os autores utilizam dados na literatura cujo conteúdo de

água foi obtido pelo método da centrífuga em amostras com estrutura não preservada, entretanto suas conclusões são com base na comparação entre o conteúdo de água no ponto de inflexão e no conteúdo de água a 6 kPa, conforme Tabela 2 e não com base no valor de capacidade de campo mensurado *in situ*.

Tabela 2 – Umidades correspondentes ao ponto de inflexão (I), potencial matricial (T) em que ocorrem, umidades sob 6 kPa e teste t a 1% de probabilidade, para diferentes manejos e profundidades

Prof. (cm)	Área manejada com arado de disco			Sistema plantio direto		
	I (%)	T (kPa)	6 kPa (%)	I (%)	T (kPa)	6 kPa (%)
0-5	38,5 <sup>a</sup>	5,4	34,0 <sup>a</sup>	41,7 <sup>a</sup>	4,4	37,4 <sup>a</sup>
5-10	40,4 <sup>a</sup>	4,4	34,8 <sup>b</sup>	41,3 <sup>a</sup>	4,3	38,2 <sup>b</sup>
10-20	39,7 <sup>a</sup>	3,6	38,7 <sup>a</sup>	33,4 <sup>a</sup>	5,4	30,1 <sup>a</sup>
20-30	35,4 <sup>a</sup>	3,9	36,8 <sup>a</sup>	35,6 <sup>a</sup>	4,1	32,4 <sup>a</sup>
30-40	39,4 <sup>a</sup>	3,1	34,7 <sup>a</sup>	38,9 <sup>a</sup>	4,7	37,2 <sup>a</sup>

Fonte: Mello *et al.* (2002)

Desse modo, com base nesses estudos verifico, por dedução, que independentemente da condição estrutural da amostra de solo, amostra com estrutura preservada ou amostra com estrutura não preservada, o ponto de inflexão é um bom estimador da capacidade de campo estimada em 6 kPa.

O ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo é obtido pelo ajuste do par de dados (conteúdo de água e tensão) a um modelo matemático que descreva o fenômeno de retenção de água no solo. Em posse do modelo aplica-se a segunda derivada e ao igualar a segunda derivada do modelo a zero tem-se o ponto de inflexão (FERREIRA; MARCOS, 1983).

Ao trabalhar com o ponto de inflexão, Mello *et al.* (2002) utilizaram o modelo polinomial cúbico, contudo o modelo mais utilizado para o ajuste da curva de retenção de água é o modelo de van Genuchten (DEXTER *et al.*, 2008), assim Dexter e Bird (2001) recomendam a obtenção do ponto de inflexão por esse modelo aplicando, também, a segunda derivada e a igualando a zero. Silva *et al.* (2014) encontraram diferenças entre os conteúdos de água advindos de diferentes modelos de ajuste da curva de retenção de água no solo, a saber: modelo polinomial cúbico e modelo de van Genuchten. Então, o modelo de ajuste da curva de retenção de água no solo interfere na associação entre o conteúdo de água estimado pelo ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo e o conteúdo de água na capacidade de campo. Todavia essa hipótese não foi testada até o momento.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Unidades experimentais

As unidades experimentais referem-se às áreas delimitadas para a estimativa da capacidade de campo *in situ*, a qual ocorreu em solo com textura franco arenosa – situado no Campus do Pici, na Universidade Federal do Ceará, em Fortaleza; em solos com textura franco argilosa e argilosa – localizados na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão do Instituto Federal de Educação do Ceará – Campus do Limoeiro do Norte (Tabela 3).

Tabela 3 – Descrição das unidades experimentais quanto a granulometria com indicação da classe textural e da profundidade de coleta das amostras (Prof.)

Solo	Local	Prof.	Areia	Silte	Argila	Classe textural
		-----m-----	-----%-----			
Argissolo	Fortaleza - CE	0,25	75	11	14	Franco arenosa
Cambissolo	Limoeiro do Norte - CE	0,25	36	25	39	Franco argilosa
Cambissolo	Limoeiro do Norte - CE	0,25	32	19	49	Argilosa

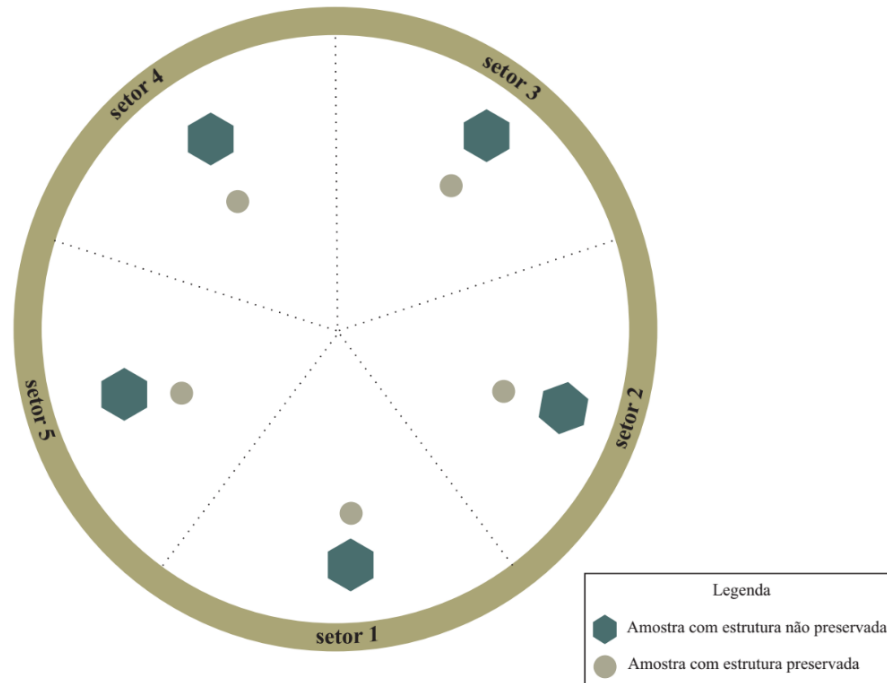
Fonte: elaborada pelo autor.

A escolha das três unidades experimentais teve por base a classificação textural com a finalidade de se obter uma variação do conteúdo de argila entre elas. Desse modo, foi possível testar a hipótese em diferentes condições texturais.

#### 3.2 Amostragem

A área total de cada unidade experimental foi segmentada em cinco setores. Em cada setor, foram coletadas amostras de solo com estrutura não preservada, a 0,25 m de profundidade, para estimativa da capacidade de campo *in situ*. Ao atingir a capacidade de campo, foram obtidas para cada setor e na mesma profundidade uma amostra de solo com estrutura preservada (em cilindros metálicos com dimensão de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura) e uma amostra de 1 kg, perfazendo cinco amostras de solo com estrutura preservada e cinco amostras de solo com estrutura não preservada, conforme Figura 2.

Figura 2 – Unidade experimental setorizada com a disposição dos pontos de coleta



Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.3 Procedimentos analíticos

#### 3.3.1 Estimativa da capacidade de campo *in situ*

Para mensuração da capacidade de campo *in situ*, em cada classe textural, foi selecionada uma área circular de 12,56 m<sup>2</sup>, delimitada por uma lona plástica até a profundidade de 50 cm a fim de evitar o fluxo lateral de água (ROMANO; SANTINI, 2002).

Um dique de terra foi construído para evitar o escoamento superficial da água no momento da saturação, a qual foi verificada com o uso de tensiômetros com manômetro de mercúrio. Atingida a saturação, o fornecimento de água foi interrompido e a unidade experimental foi coberta para evitar fluxo de água na interface solo - ar, por infiltração ou evaporação.

O tempo zero de redistribuição de água no solo foi considerado no momento em que a lâmina de água drenou da superfície do solo. A partir desse momento esperaram-se duas horas para a coleta da primeira amostra – procedimento adotado em cada unidade experimental.

Utilizou-se um trado tipo rosca para a coleta de amostras com estrutura não preservada à 0,25 m de profundidade e o conteúdo de água no solo foi determinado pelo método termogravimétrico (CLARKE TOPP; FERRÉ, 2002). O momento da coleta, para determinação do conteúdo de água no solo, foi realizado nos tempos de 2, 4, 6, 8, 32, 56, 80, 104, 128, 152, 176, 186, 210, 237, 261, 285 e 333 horas, com dezoito leituras ao longo do experimento. Para a classe franco argilosa as leituras foram feitas nos tempos de 2, 4, 6, 19, 43, 68, 92, 116, 140, 164, 188, 212, 236, 260, 284, 308, 332 e 356 horas, com dezenove leituras ao longo do experimento e para a classe textural argilosa nos tempos de 2, 4, 6, 19, 43, 67, 91, 115, 139, 163, 187, 211, 235, 259, 283 e 307, perfazendo 17 leituras.

Estimado o conteúdo de água no solo com base em massa multiplicava-se o valor obtido pela densidade do solo para convertê-lo em conteúdo de água com base em volume.

O valor de drenagem insignificante é subjetivo, então para evitar qualquer viés que confirme a hipótese, foram selecionados os valores mais recorrentes na literatura, com base no conceito estabelecido por Veihmeyer e Hendrickson (1931), abrangendo além do tempo (2 a 3 dias) valores de densidade de fluxo considerados insignificantes, aqueles em que o fluxo é menor do que a ordem de grandeza da evapotranspiração,  $5 \text{ mm d}^{-1}$  (REICHARDT, 1988). Assim, utilizaram-se os valores de (0,05; 0,1; 0,5 e  $1 \text{ mm d}^{-1}$ ).

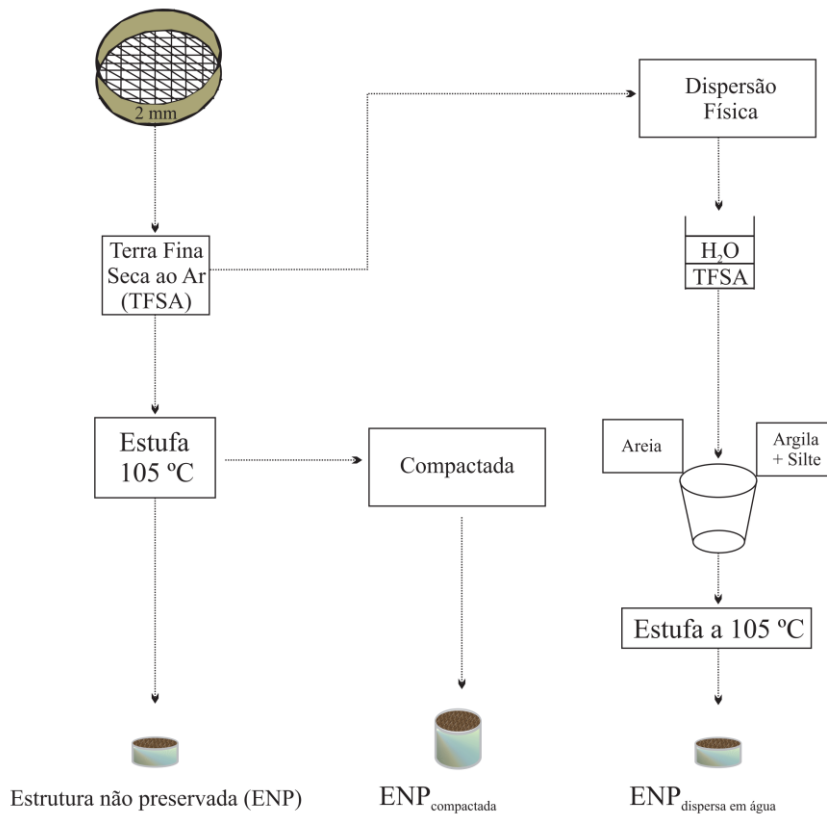
### ***3.3.2 Preparo das amostras de solo***

Amostras de solo com estrutura não preservada obtidas nas unidades experimentais foram tamisadas em peneira com abertura da malha de 2 mm de diâmetro. Parte do material foi seco em estufa a  $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e em seguida, a massa de 20 g foi vertida de uma única vez em cilindros metálicos (dimensões de 2,5 cm de altura por 2,5 cm de diâmetro) compondo, assim, amostras com estrutura não preservadas (ENP).

A outra parte do material seco em estufa a  $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$  foi acondicionada de modo fracionado, com o uso de prensa mecânica, em cilindros metálicos (dimensões de 5 cm de altura por 5 cm de diâmetro), ou seja, dividia-se o volume total do cilindro por três e em seguida estabelecia-se a densidade de solo que cada fração deveria ter, então, a massa de solo utilizada para compor cada fração era determinada multiplicando a densidade de solo desejada pelo volume disponível do cilindro. Desse modo eram obtidas as amostras com estrutura não preservada compactadas (ENP<sub>compactada</sub>). Salienta-se que o valor da densidade do solo de amostras compactadas equivalem ao valor de densidade máxima estabelecida a partir de ensaio proctor normal.

A outra parte do material tamisado foi submetida a dispersão física, similar ao que ocorre para determinação do conteúdo de argila dispersa em água. Nessa ocasião, coletou-se a fração areia e a fração argila e silte. Em seguida, esse material foi levado à estufa a 45 °C para evaporação da água, então coletou-se argila e silte que, ao serem submetidas a essa temperatura, ficaram sob aspecto de finas placas, as quais foram processadas a partir de almofariz. Por fim, esse material e a fração areia, já separada, foram levados à estufa a 105 °C e ao atingirem massa constante foram homogeneizadas em proporções que respeitassem a análise granulométrica original para então serem vertidas de uma única vez em cilindros metálicos (dimensões de 2,5 cm de altura por 2,5 cm de diâmetro), assim compondo amostras com estrutura não preservada dispersas em água ( $ENP_{\text{dispersa em água}}$ ) – conforme Figura 3.

Figura 3 – Esquema para composição de corpos de prova com estrutura não preservada



Fonte: elaborada pelo autor.

Objetivou-se, com esses tratamentos, alterar a estrutura da amostra sem alterar a distribuição de partículas primárias, preservando a sua classificação granulométrica original. Após a montagem, as amostras foram utilizadas para a construção da curva de retenção de água no solo e ao serem ajustadas pelo modelo de Van Genuchten e pelo modelo polinomial cúbico, estimou-se o conteúdo de água no ponto de inflexão.

Em síntese, foram obtidas amostras com estrutura preservada (EP), amostras com estrutura não preservada (ENP), amostras com estrutura não preservada e dispersa em água (ENP<sub>dispersa em água</sub>) e amostras com estrutura não preservada e compactada (ENP<sub>compactada</sub>).

### 3.3.3 Estimativa da capacidade de campo em laboratório

Estimou-se o conteúdo de água na capacidade de campo a no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo obtido para cada condição estrutural: amostras com estrutura preservada (EP), amostras com estrutura não preservada (ENP), amostras com estrutura não preservada e dispersa em água (ENP<sub>dispersa em água</sub>) e amostras com estrutura não preservada e compactada (ENP<sub>compactada</sub>).

Todas as amostras de solo foram submetidas a baixas tensões (0, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa) em mesa de tensão e a altas tensões (33, 100, 700 e 1500 kPa) na câmara de Richards (DANE; HOPMANS, 2002). Obtido o equilíbrio entre o conteúdo de água base massa da amostra de solo e a tensão aplicada, realizou-se o ajuste dos dados de acordo com o modelo matemático proposto por Van Genuchten (1980), pela Equação 1:

$$u = u_r + \frac{u_s - u_r}{[1 + (\alpha |\Psi_m|)^n]^m} \quad (1)$$

em que  $u$  corresponde ao conteúdo de água ( $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $u_r$  e  $u_s$  são, respectivamente, os conteúdos de água residual e de saturação ( $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $\Psi_m$  o potencial mátrico da água no solo ou a tensão (kPa),  $\alpha$  um escalonador do  $\Psi_m$ ;  $m$  e  $n$  são parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva. Os dados foram ajustados a essa equação com o auxílio do programa Table Curve 2D, versão 5.01, sendo as variáveis  $u_r$  e  $u_s$  fixadas com valores, respectivamente, de conteúdo de água no solo correspondente à tensão de 1500 kPa e com o conteúdo de água na saturação, considerado igual à porosidade do solo, após ter seu valor convertido para base massa, ambos mensurados em laboratório. O ajuste dos parâmetros  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  ocorreu sem dependência do parâmetro  $m$  com o  $n$ .

O conteúdo de água no ponto de inflexão,  $u_{inf}$ , foi estimado como o conteúdo de água gravimétrico obtido a pelos parâmetros da equação de van Genuchten (1980), considerando  $\Psi_m$  em logaritmo neperiano, conforme equação a seguir estabelecida por Dexter (2001).

$$u_{inf} = (u_s - u_r) \left[ 1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} + u_r \quad (2)$$

A Equação 2 é obtida aplicando-se a segunda derivada à Equação 1 e igualando o resultado a zero. Outro modo de estimar o ponto de inflexão aqui trabalhado foi pelo modelo polinomial cúbico (MELLO *et al.*, 2002), considerando a, b, c e d parâmetros de ajuste do modelo, o potencial mátrico,  $\Psi_m$ , como o logaritmo decimal em centímetro de coluna de água e o conteúdo de água base massa, u, conforme Equação 3.

$$\log_{10}(\Psi_m) = a + bu + cu^2 + du^3 \quad (3)$$

Assim, o conteúdo de água no ponto de inflexão,  $u_{inf}$ , foi obtido, conforme Equação 4, que é resultante da segunda derivada da Equação 3 quando igualada a zero.

$$u_{inf} = -c/3d \quad (4)$$

### 3.3.4 Outras análises

#### 3.3.4.1 Densidade do solo

Foi determinada em amostras com estrutura preservada, coletadas em cilindros de volume conhecido, e secas a 105°C até massa constante (GROSSMAN; REINSCH, 2002).

#### 3.3.4.2 Densidade de partículas

Foi obtida pelo método do balão volumétrico, cujo princípio é determinar o volume de álcool utilizado para completar um balão volumétrico de 50 mL que contenha 20 g de terra fina seca em estufa (FLINT; FLINT, 2002a).

#### 3.3.4.3 Porosidade do solo

Foi calculada pela densidade do solo e de partículas, de acordo com a Equação 5

$$P_t = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \quad (5)$$



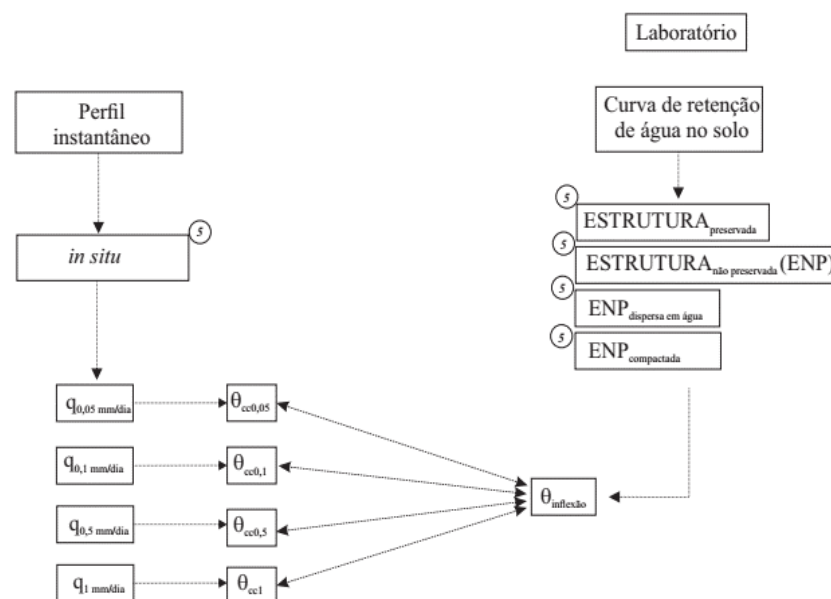
sendo  $P_t$  a porosidade total ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\rho_s$  a densidade do solo e  $\rho_p$  a densidade de partículas,  $\text{kg m}^{-3}$  (FLINT; FLINT, 2002b).

### 3.4 Análise de dados

A estimativa da capacidade de campo inclui quatro componentes: 1- a densidade de fluxo, 2- o tempo de drenagem a partir da saturação da amostra de solo, 3- o conteúdo de água na zona de drenagem e 4- profundidade da zona de drenagem (REYNOLDS, 2018). Desses componentes, os dois primeiros são fundamentais para o estabelecimento do conceito de capacidade de campo estimada *in situ* (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949), enquanto os dois últimos componentes são trabalhados independentemente da escolha do componente 1 ou 2. Assim, os resultados e discussão terão por base a capacidade de campo estimada *in situ* por dois critérios, a serem analisados separadamente: a densidade de fluxo e o tempo de drenagem a partir da saturação da amostra de solo.

Os dados experimentais foram analisados para cada classe textural, considerando o delineamento inteiramente casualizado e a seguinte situação: perfil instantâneo simulado *in situ*, considerando diferentes valores para drenagem insignificante, em contraste com amostras em diferentes condições estruturais (Figura 4).

Figura 4 – Esquema para teste da hipótese com o número de repetições por tratamento



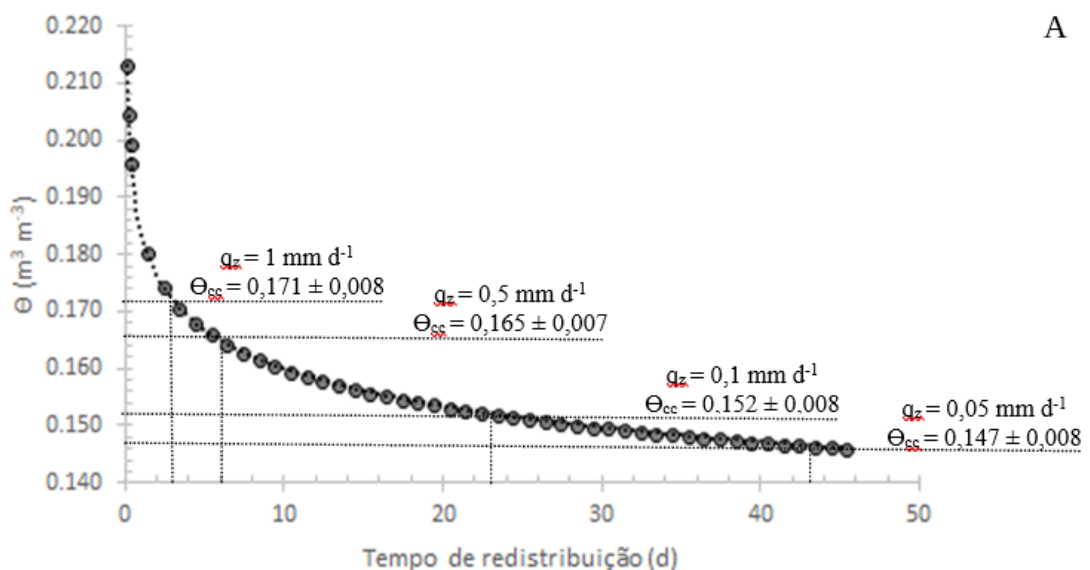
Fonte: elaborada pelo autor.

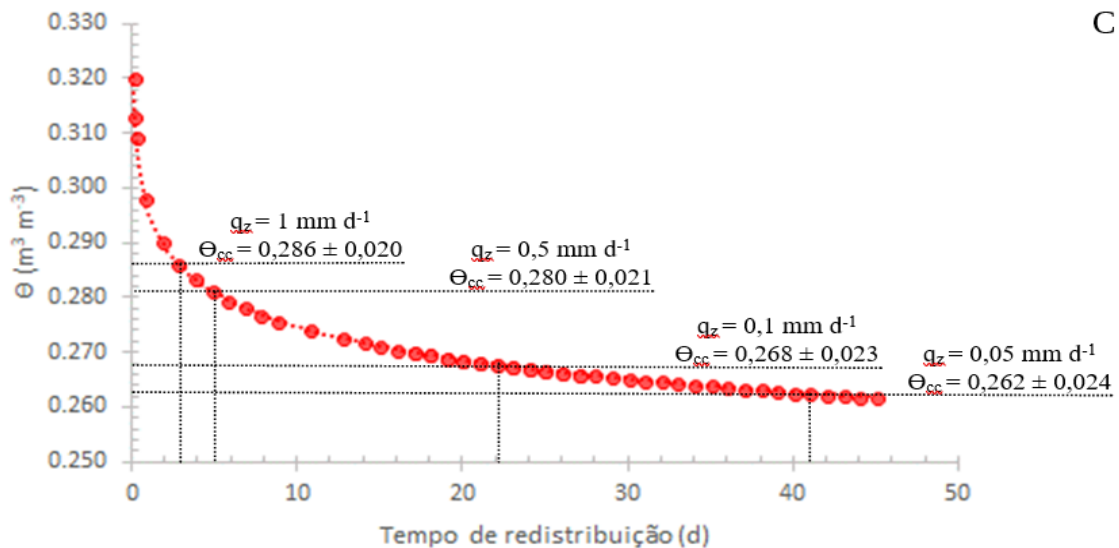
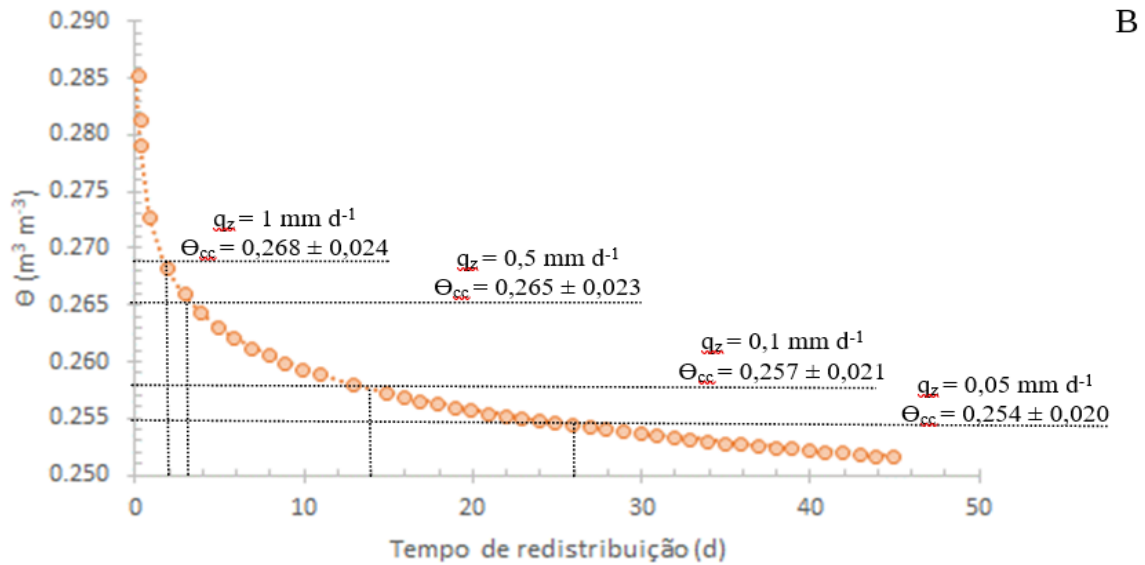
Em cada situação, qualquer tratamento era composto por cinco repetições. Foram aplicados testes de normalidade, teste de análise de variância e utilizado o teste de Dunnett a 10% de probabilidade para comparação entre as médias do conteúdo de água na capacidade de campo obtida em cada tratamento, tendo por tratamento referência os valores obtidos *in situ*.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em cada classe textural observe o conteúdo de água no solo e o tempo necessário para que a água se redistribua a partir da saturação da amostra de solo e alcance a densidade de fluxo estabelecida previamente (Gráfico 1). Note que o tempo de redistribuição de água no solo requerido para que se atinja a capacidade de campo é maior quanto menor for a densidade de fluxo e que para o mesmo tempo de redistribuição de água no solo ou para a mesma densidade de fluxo preestabelecida é obtido um valor diferente do conteúdo de água na capacidade de campo dependente da classe textural do solo (Gráfico 1). Assim, fica evidente, a dificuldade de se chegar a um valor único para o conteúdo de água na capacidade de campo.

Gráfico 1 – Conteúdo de água em base volume em função do tempo de redistribuição de água no solo a partir da saturação da amostra de solo para as classes texturais franco arenosa (A), franco argilosa (B) e argilosa (C), estimada *in situ*





Fonte: elaborada pelo autor.

O conceito de capacidade de campo proposto por Viehmeyer e Hendrickson (1949) estabelece um período de 2 a 3 dias para a estimativa da capacidade de campo *in situ*. Portanto, a densidade de fluxo de  $1 \text{ mm d}^{-1}$  se enquadra no conceito, independentemente da classe textural do solo. Contudo, o mesmo não ocorre para a densidade de fluxo de  $0,5 \text{ mm d}^{-1}$ , a rigor (Gráfico 1). Para essa, a conformidade ao conceito foi evidente apenas para solos com textura franco argilosa.

Com base no exposto, ao se estimar a capacidade de campo em função do tempo de redistribuição de água no solo com base no conceito estabelecido por Viehmeyer e Hendrickson (1949) é prudente a escolha de valores da densidade de fluxo maiores ou iguais a  $1 \text{ mm d}^{-1}$ ,

considerando que por vezes o tempo necessário para atingir o conteúdo de água na capacidade de campo para uma densidade de fluxo de  $0,5 \text{ mm d}^{-1}$  foi maior do que 3 dias.

O critério do tempo de redistribuição de água no solo também varia em função do conteúdo de argila, assim para um mesmo valor de densidade de fluxo, quanto maior o conteúdo de argila maior será o tempo necessário para atingir a condição de capacidade de campo, isso é mais evidente para baixos valores de densidade de fluxo (Gráfico 1).

Nesse estudo, essa percepção é evidente quando se observa a variação entre solos com textura franco argilosa (39% de argila) e argilosa (49% de argila) do que solos com textura arenosa (19% de argila) e argilosa (49%), por exemplo. Acontece que a redistribuição de água no solo é dependente das condições de contorno e camadas de impedimento findam por limitar a taxa de conteúdo de água pelo tempo. Por isso é demasiadamente arriscado associar o conteúdo de água na capacidade de campo em função do tempo de drenagem com valores fixos de potencial mátrico para determinação de capacidade de campo em amostras de solo, pois essas podem apresentar condições de contorno não representativas do campo. Não se trata de afirmar que o método empregado em laboratório é estático e o outro, empregado em campo, é dinâmico, pois ambos acabam por estabelecer um valor que tende para uma condição estacionária do sistema, trata-se apenas de condições de contorno diferentes.

Outro critério que integra o conceito de capacidade de campo estabelecido per Viehmeyer e Hendrickson (1949), além do tempo de drenagem a partir da saturação da amostra de solo, é a densidade de fluxo insignificante, caracterizada pela variação de conteúdo de água ao longo do tempo em uma determinada profundidade.

Quanto menor a densidade de fluxo, um maior número de dias é requerido para se atingir o conteúdo de água na capacidade de campo (TWARAKAVI; SAKAI; ŠIMŮNEK, 2009) em torno de oito vezes para cada aumento unitário da ordem de grandeza da densidade de fluxo (Gráfico 1). Assim, há uma incongruência no conceito de capacidade de campo estabelecido, pois valores menores de densidade de fluxo ( $0,1 \text{ mm d}^{-1}$  e  $0,05 \text{ mm d}^{-1}$ ) não se adequam ao critério de tempo de 2 a 3 dias (Gráfico 1).

Para os baixos valores de densidade de fluxo trabalhados aqui ( $0,1 \text{ mm d}^{-1}$  e  $0,05 \text{ mm d}^{-1}$ ) a variação do conteúdo de água ao longo do tempo equivale a  $0,0004 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  e  $0,0002 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ , respectivamente.

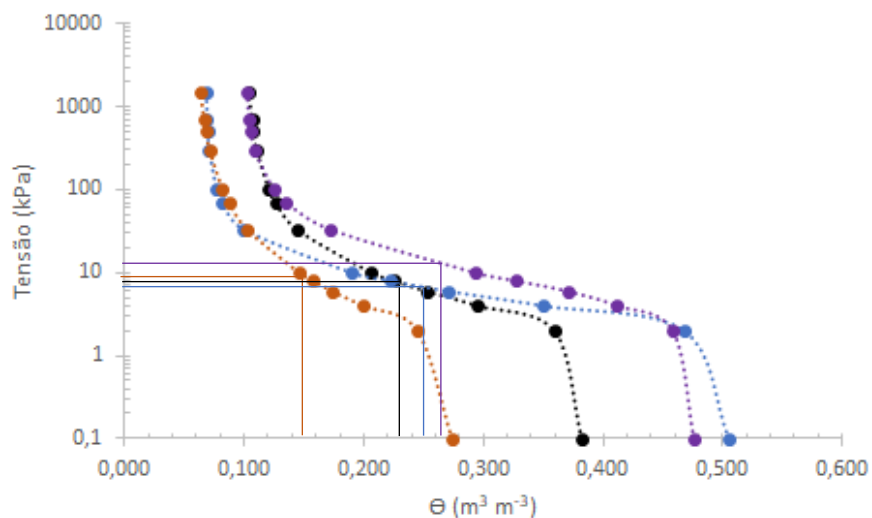
Alguns autores consideram o valor de drenagem insignificante como  $0,0017 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ , com base no conceito de que os valores do conteúdo de água ao longo do tempo formam uma assíntota. Todavia como a tangente desse ângulo é zero, o que implicaria em ausência de drenagem, adota-se o valor de  $179,9^\circ$  para o ângulo, o que corresponde a  $0,0017 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$

(ALVES; BELONI; JUNQUEIRA JÚNIOR, 2012). Então, valores abaixo desse podem seguramente ser considerados insignificantes, de tal modo que sob esse viés matemático o conceito perde sua subjetividade ao definir o que seria considerado densidade de fluxo insignificante.

Apesar desse adendo, o conceito ainda apresenta incongruências, pois não se verifica, a partir desse estudo, a possibilidade de atingir um valor de densidade de fluxo insignificante, segundo o viés matemático aqui apresentado, e que atenda também ao critério do tempo de drenagem a partir da saturação da amostra. por esse motivo realizo comparações do conteúdo de água na capacidade de campo estimada *in situ* com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo, considerando duas situações: densidade de fluxo insignificante ( $0,1 \text{ mm d}^{-1}$  e  $0,05 \text{ mm d}^{-1}$ ) e tempo de drenagem a partir da saturação da amostra ( $1 \text{ mm d}^{-1}$  e  $0,5 \text{ mm d}^{-1}$ ).

A curva de retenção de água no solo é uma representação gráfica da relação entre o potencial mátrico (ou tensão) e o conteúdo de água (base massa ou base volume). O seu formato é alterado em função da estrutura da amostra de solo e da sua composição granulométrica. Assim, observe que, a depender da condição estrutural da amostra, há uma variação na forma da curva de retenção de água do solo, independentemente da textura do solo (Gráficos 2, 3, 4, 5, 6 e 7).

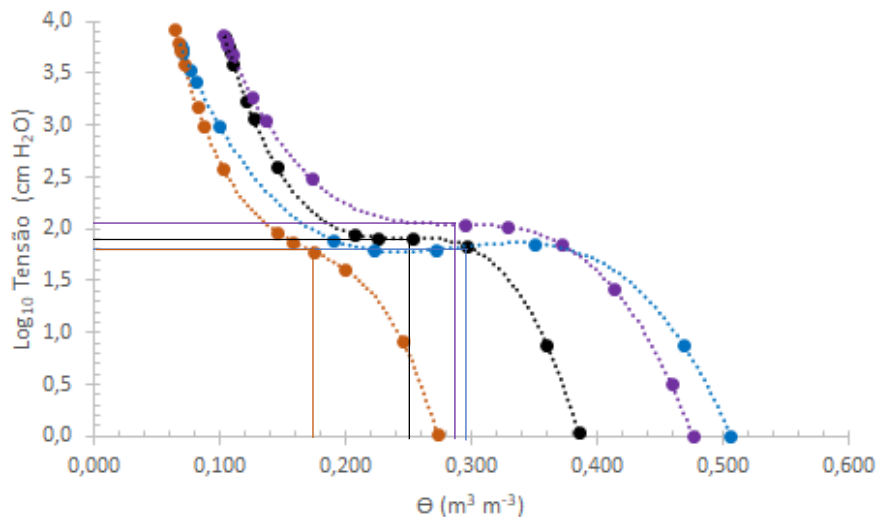
Gráfico 2 – Curva de retenção de água no solo ajustada pelo modelo de van Genuchten, para a classe textural franco arenosa, considerando amostras com estrutura preservada (EP) - ●, amostras com estrutura não preservada (ENP) - ●, amostras com estrutura não preservada dispersa em água (ENP-disp) - ● e amostras com estrutura compactada (ENP-comp) - ●. A intersecção das linhas contínuas indica o ponto de inflexão da respectiva curva de retenção de água no solo



Condição estrutural	Densidade do solo ( $\rho_s$ ) kg dm <sup>-3</sup>	Conteúdo de água no ponto de inflexão ( $\Theta_i$ ) m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	Tensão no ponto de inflexão ( $h_i$ ) kPa
EP	1,61	0,231 ± 0,015	8
ENP	1,29	0,256 ± 0,015	7
ENP-disp	1,37	0,265 ± 0,050	14
ENP-comp	1,89	0,150 ± 0,003	9

Fonte: elaborada pelo autor.

Gráfico 3 – Curva de retenção de água no solo ajustada pelo modelo polinomial cúbico, para a classe textural franco arenosa, considerando amostras com estrutura preservada (EP) - ●, amostras com estrutura não preservada (ENP) - ●, amostras com estrutura não preservada dispersa em água (ENP-disp) - ● e amostras com estrutura compactada (ENP-comp) - ●. A intersecção das linhas contínuas indica o ponto de inflexão da respectiva curva de retenção de água no solo

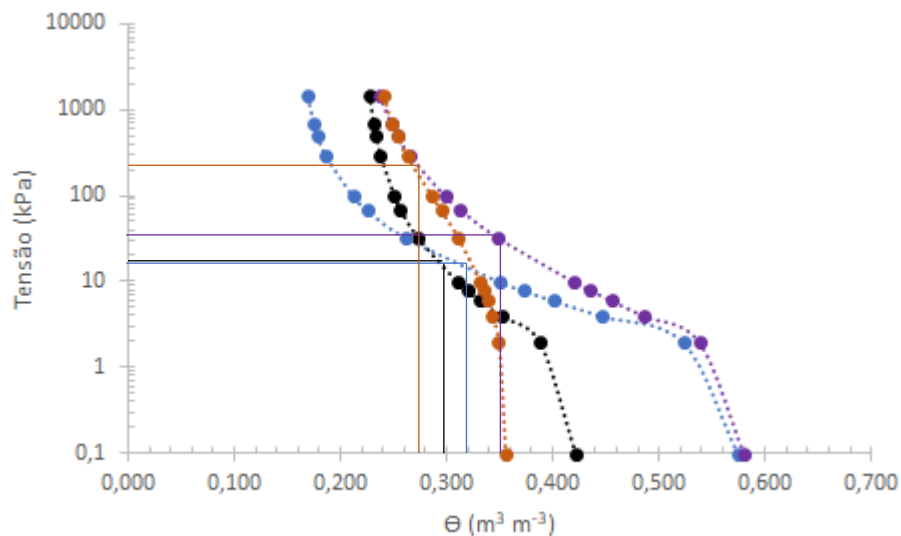


Condição estrutural	Densidade do solo ( $\rho_s$ ) kg dm <sup>-3</sup>	Conteúdo de água no ponto de inflexão ( $\Theta_i$ ) m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	Tensão no ponto de inflexão ( $h_i$ ) cm H <sub>2</sub> O
EP	1,61	0,245 ± 0,011	1,9
ENP	1,29	0,291 ± 0,004	1,8
ENP-disp	1,37	0,285 ± 0,007	2,0
ENP-comp	1,89	0,172 ± 0,005	1,8

Fonte: elaborada pelo autor.

Tome as amostras com estrutura preservada (EP) como referência e observe que a alteração da estrutura da amostra, por processo de tamisamento (ENP) ou por dispersão das suas partículas (ENP-disp), proporciona um maior conteúdo de água no ponto de inflexão, independentemente da classe textural do solo (Gráficos 2, 3, 4, 5, 6 e 7). Enquanto isso, o processo de compactação da amostra (ENP-comp) as leva a manifestar um menor conteúdo de água no ponto de inflexão para as classes texturais franco arenosa e franco argilosa (Gráficos 2, 3, 4 e 5). Esse comportamento não ocorreu para amostras argilosas (Gráfico 6 e 7), pois o processo de compactação nelas não foi suficiente para que de fato atingissem a densidade máxima, conforme o ensaio proctor normal, de  $1,7 \text{ kg dm}^{-3}$ .

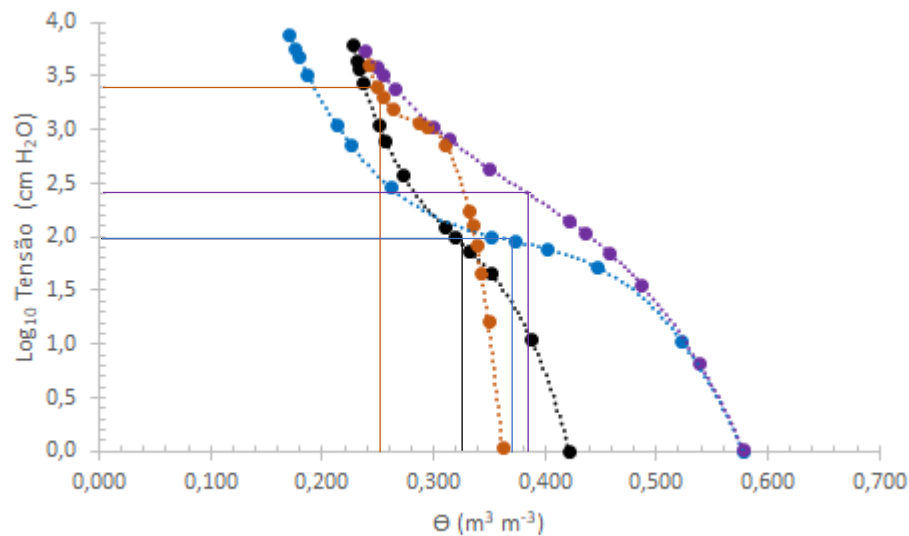
Gráfico 4 – Curva de retenção de água no solo ajustada pelo modelo de van Genuchten, para a classe textural franco argilosa, considerando amostras com estrutura preservada (EP) - ●, amostras com estrutura não preservada (ENP) - ●, amostras com estrutura não preservada dispersa em água (ENP-disp) - ● e amostras com estrutura compactada (ENP-comp) - ●. A intersecção das linhas contínuas indica o ponto de inflexão da respectiva curva de retenção de água no solo



Condição estrutural	Densidade do solo ( $\rho_s$ ) $\text{kg dm}^{-3}$	Conteúdo de água no ponto de inflexão ( $\Theta_i$ ) $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	Tensão no ponto de inflexão ( $h_i$ ) kPa
EP	1,48	$0,295 \pm 0,007$	15
ENP	1,09	$0,318 \pm 0,003$	14
ENP-disp	1,08	$0,349 \pm 0,001$	32
ENP-comp	1,65	$0,276 \pm 0,002$	121

Fonte: elaborada pelo autor.

Gráfico 5 – Curva de retenção de água no solo ajustada pelo modelo polinomial cúbico, para a classe textural franco argilosa, considerando amostras com estrutura preservada (EP) - ●, amostras com estrutura não preservada (ENP) - ●, amostras com estrutura não preservada dispersa em água (ENP-disp) - ● e amostras com estrutura compactada (ENP-comp) - ●. A intersecção das linhas contínuas indica o ponto de inflexão da respectiva curva de retenção de água no solo



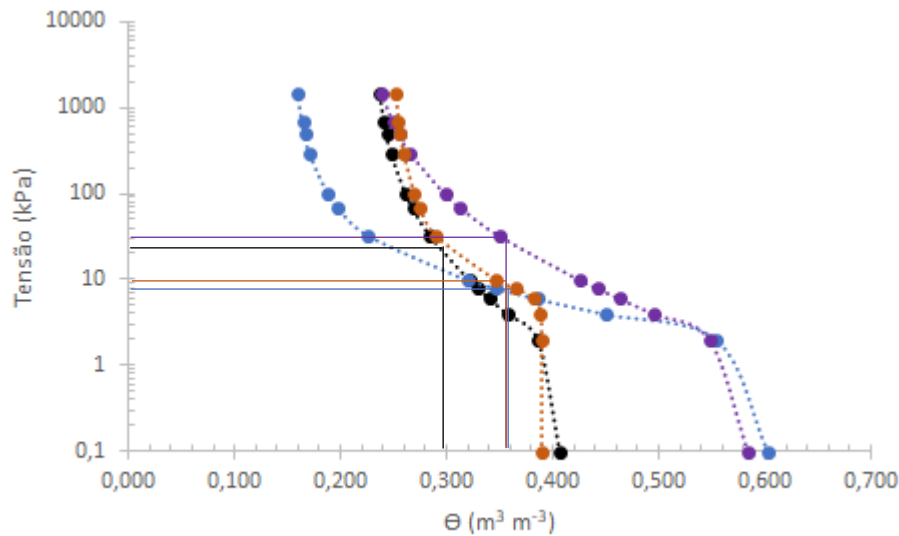
Condição estrutural	Densidade do solo ( $\rho_s$ ) $\text{kg dm}^{-3}$	Conteúdo de água no ponto de inflexão ( $\Theta_i$ ) $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	Tensão no ponto de inflexão ( $h_i$ ) $\text{cm H}_2\text{O}$
EP	1,48	$0,323 \pm 0,008$	2,0
ENP	1,09	$0,373 \pm 0,003$	2,0
ENP-disp	1,08	$0,380 \pm 0,005$	2,4
ENP-comp	1,65	$0,251 \pm 0,083$	3,4

Fonte: elaborada pelo autor.

Considere que amostras submetidas à compactação apresentam maior quantidade de microporos (SILVA; BARROS; COSTA, 2006) e que o aumento na microporosidade desloca o ponto de inflexão para um maior valor de tensão de água no solo (ALENCAR *et al.*, 2015). Assim, as amostras de solo que atingiram o valor de densidade máxima proporcionam menor conteúdo de água no solo (Gráficos 2, 3, 4 e 5) e, conseqüentemente, maior valor de tensão da água no ponto de inflexão. Desse modo, o ponto de inflexão não deve ser associado a um valor fixo de tensão, como comumente é feito (MELLO *et al.*, 2002).



Gráfico 6 – Curva de retenção de água no solo ajustada pelo modelo de van Genuchten, para a classe textural argilosa, considerando amostras com estrutura preservada (EP) - ●, amostras com estrutura não preservada (ENP) - ●, amostras com estrutura não preservada dispersa em água (ENP-disp) - ● e amostras com estrutura compactada (ENP-comp) - ●. A intersecção das linhas contínuas indica o ponto de inflexão da respectiva curva de retenção de água no solo

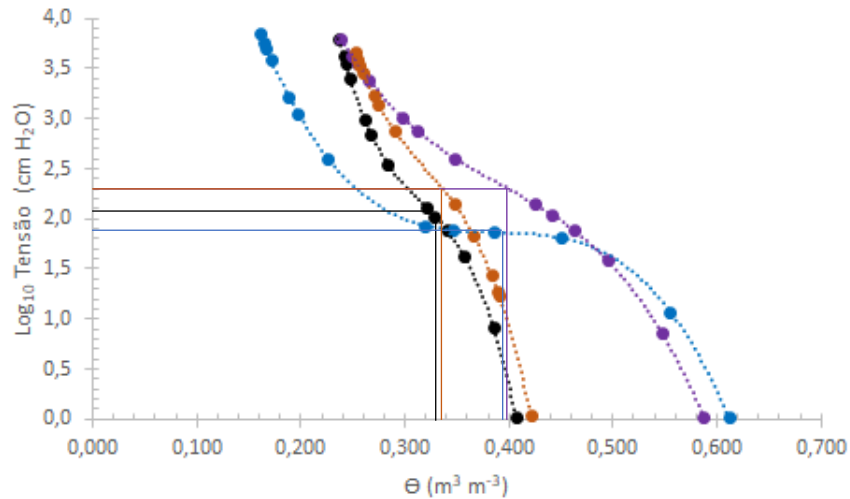


Condição estrutural	Densidade do solo ( $\rho_s$ ) kg dm <sup>-3</sup>	Conteúdo de água no ponto de inflexão ( $\Theta_i$ ) m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	Tensão no ponto de inflexão ( $h_i$ ) kPa
EP	1,53	0,296 ± 0,008	21
ENP	1,02	0,356 ± 0,010	7
ENP-disp	1,07	0,355 ± 0,005	30
ENP-comp	1,58	0,355 ± 0,005	9

Fonte: elaborada pelo autor.

Portanto, independente da classe textural, o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo varia conforme a condição estrutural da amostra. Além desse fator, o modelo utilizado para estimar o conteúdo de água no ponto de inflexão (van Genuchten ou polinomial cúbico) também propicia valores distintos de conteúdo de água (SILVA *et al.*, 2014), independentemente da sua classe textural (Gráficos 2, 3, 4, 5, 6 e 7).

Gráfico 7 – Curva de retenção de água no solo ajustada pelo modelo polinomial cúbico, para a classe textural argilosa, considerando amostras com estrutura preservada (EP) - ●, amostras com estrutura não preservada (ENP) - ●, amostras com estrutura não preservada dispersa em água (ENP-disp) - ● e amostras com estrutura compactada (ENP-comp) - ●. A intersecção das linhas contínuas indica o ponto de inflexão da respectiva curva de retenção de água no solo



Condição estrutural	Densidade do solo ( $\rho_s$ ) kg dm <sup>-3</sup>	Conteúdo de água no ponto de inflexão ( $\Theta_i$ ) m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	Tensão no ponto de inflexão ( $h_i$ ) cm H <sub>2</sub> O
EP	1,53	0,317 ± 0,008	2,1
ENP	1,02	0,390 ± 0,015	1,9
ENP-disp	1,07	0,393 ± 0,005	2,3
ENP-comp	1,58	0,334 ± 0,023	2,3

Fonte: elaborada pelo autor.

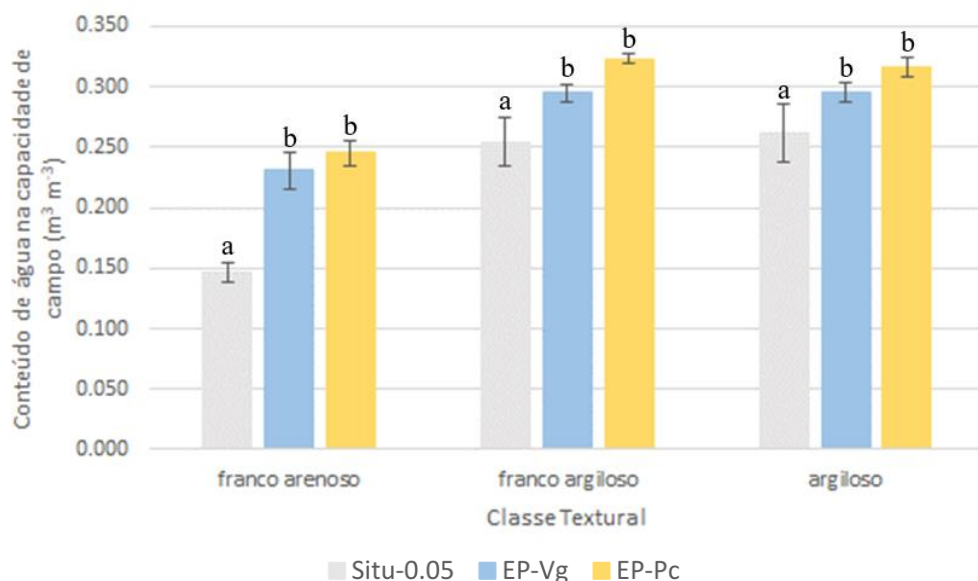
Observe que o valor do conteúdo de água base volume obtido no ponto de inflexão estimado por modelo polinomial cúbico é maior do que aquele estimado pelo modelo de van Genuchten (Gráficos 2, 3, 4, 5, 6 e 7). Esse resultado é o inverso do reportado por Silva *et al.*, (2014) que utilizaram amostras de solo com estrutura preservada e textura argilosa. Acontece que esses autores estimaram os parâmetros da equação de van Genuchten considerando o conteúdo de água base volume, o que difere da metodologia aqui adotada, a qual recomenda o uso do conteúdo de água base massa para estimar os parâmetros da equação e só então transformar o conteúdo de água base massa para base volume (DEXTER, 2004). O fato é que o modelo utilizado proporciona diferença no conteúdo de água no solo estimado no ponto de inflexão.

O conteúdo de água obtido no ponto de inflexão é considerado como uma razoável estimativa da capacidade de campo para solos com textura franco arenosa e argilosa (FERREIRA; MARCOS, 1983). Esses autores chegaram a essa conclusão ao estudarem a correlação entre o conteúdo de água estimado *in situ*, considerando o tempo de drenagem (2 a 3 dias) como critério, e o conteúdo de água no ponto de inflexão estimado por polinômio cúbico de amostras de solo com estrutura preservada. Acontece que a interpretação dos autores foi equivocada, uma vez que os coeficientes de correlação linear obtidos não foram significativos (0,5642 para o solo com textura argilosa e -0,6571 para o solo com textura franco arenosa).

A abordagem de se considerar a densidade de fluxo desprezível como critério para estimar a capacidade de campo *in situ*, até então, não fora trabalhada com o intuito de verificar a associação dela como o conteúdo de água estimado pelo ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo.

O conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura preservada difere e superestima o conteúdo de água na capacidade de campo estimada *in situ*, independentemente da classe textural do solo considerando o critério de densidade de fluxo insignificante: 0,05 mm d<sup>-1</sup> e 0,1 mm d<sup>-1</sup> (Gráficos 8 e 9). Assim para essa abordagem, não há associação entre essas variáveis.

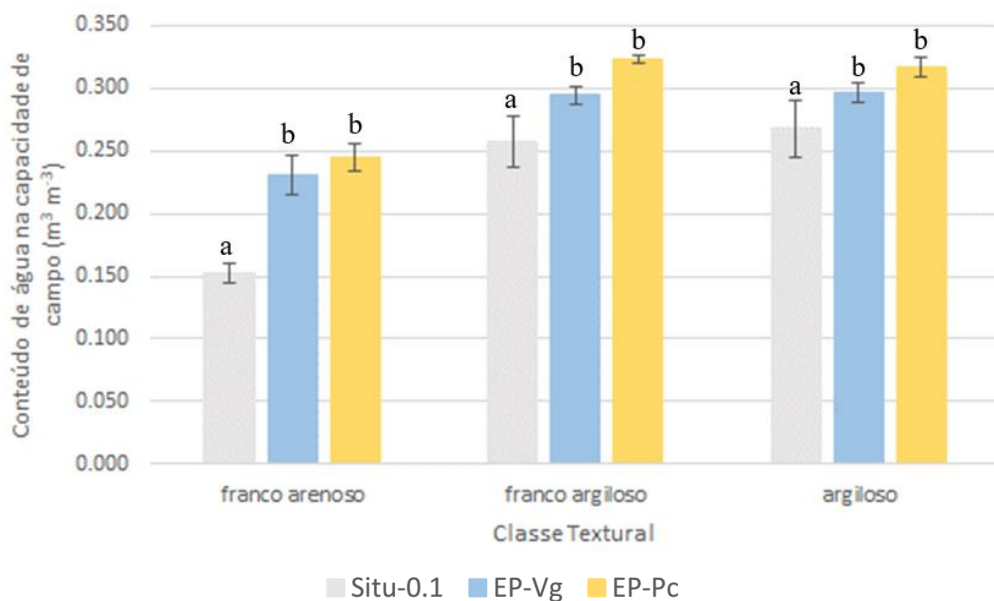
Gráfico 8 – Conteúdo de água na capacidade de campo estimada *in situ* para uma densidade de fluxo de 0,05 mm d<sup>-1</sup> (Situ-0,05) em contraste com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura preservada, ajustadas pelo modelo de van Genuchten (EP-Vg) ou por polinômio cúbico (EP-Pc) para as distintas classes texturais. Médias seguidas pela mesma letra, em cada classe textural, não diferem pelo teste de Dunnett ( $p < 0,10$ )



Fonte: elaborada pelo autor.

O modelo escolhido para ajuste da curva de retenção de água no solo promove valores diferentes de conteúdo de água ao se obter o ponto de inflexão (SILVA *et al.*, 2014). Sob essa perspectiva também não há associação entre o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo e a capacidade de campo estimada *in situ* com base na densidade de fluxo insignificante (Gráficos 8 e 9).

Gráfico 9 – Conteúdo de água na capacidade de campo estimada *in situ* para uma densidade de fluxo de  $0,1 \text{ mm d}^{-1}$  (Situ-0,1) em contraste com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura preservada, ajustadas pelo modelo de van Genuchten (EP-Vg) ou por polinomial cúbica (EP-Pc) para as distintas classes texturais. Médias seguidas pela mesma letra, em cada classe textural, não diferem pelo teste de Dunnett ( $p < 0,10$ )



Fonte: elaborada pelo autor.

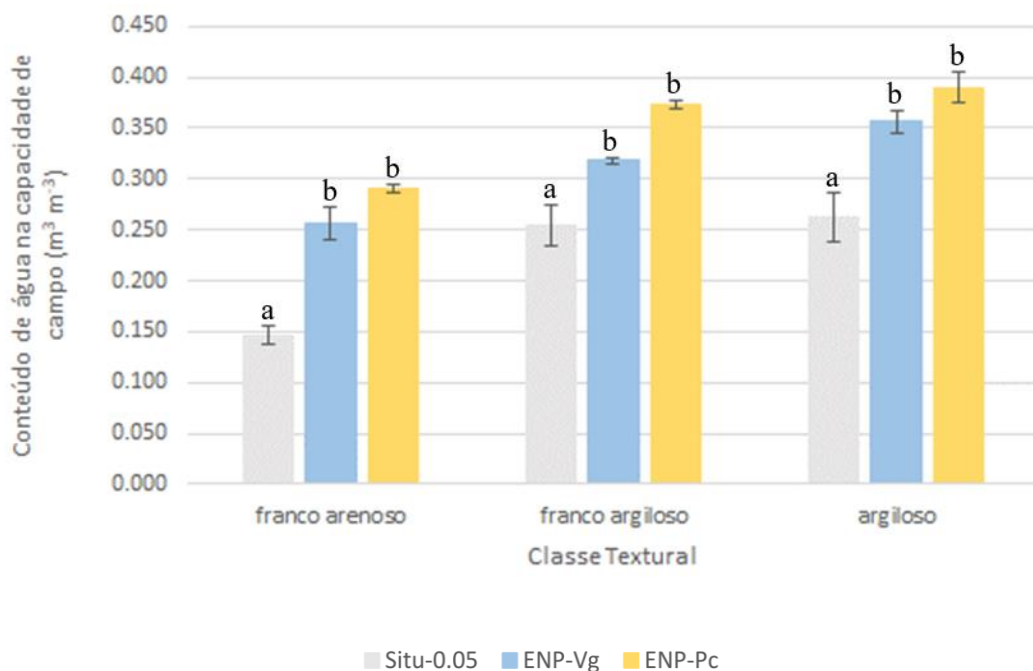
Assim, ao considerar que a taxa de movimento descendente da água tenha decrescido acentuadamente atingindo a densidade de fluxo de  $0,05 \text{ mm d}^{-1}$  e  $0,1 \text{ mm d}^{-1}$  que equivale a uma variação do conteúdo de água de  $0,0002 \text{ m}^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  e  $0,0004 \text{ m}^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ , respectivamente, o conteúdo de água na capacidade de campo estimada *in situ* não se associa com o conteúdo de água estimada no ponto de inflexão da curva de retenção de água do solo de amostras com estrutura preservada, independentemente do modelo de ajuste da curva de retenção de água no solo e da classe textural da amostra.

Em laboratórios de rotina de análise de solo, geralmente, as amostras são trabalhadas sem a preocupação de se manter a estrutura preservada. É comum, portanto, o uso de amostras com estrutura não preservada para determinação da curva de retenção de água no solo (DONAGEMA *et al.*, 2011).

Desse modo, apresento a seguir o conteúdo de água no ponto de inflexão proveniente de amostras com estrutura não preservada estimado pela equação de van Genuchten ou de polinômio cúbico, em diferentes classes texturais, considerando as densidades de fluxo insignificante - 0,05 mm d<sup>-1</sup> e 0,1 mm d<sup>-1</sup> (Gráficos 7 e 8).

O conteúdo de água obtido no ponto de inflexão estimado por polinômio cúbico é um bom estimador da capacidade de campo de solos com textura argilosa (MELLO *et al.*, 2002). Esses autores produziram a curva de retenção de água no solo pelo método da centrífuga, portanto, obtiveram essa conclusão com o uso de amostras de solo com estrutura não preservada.

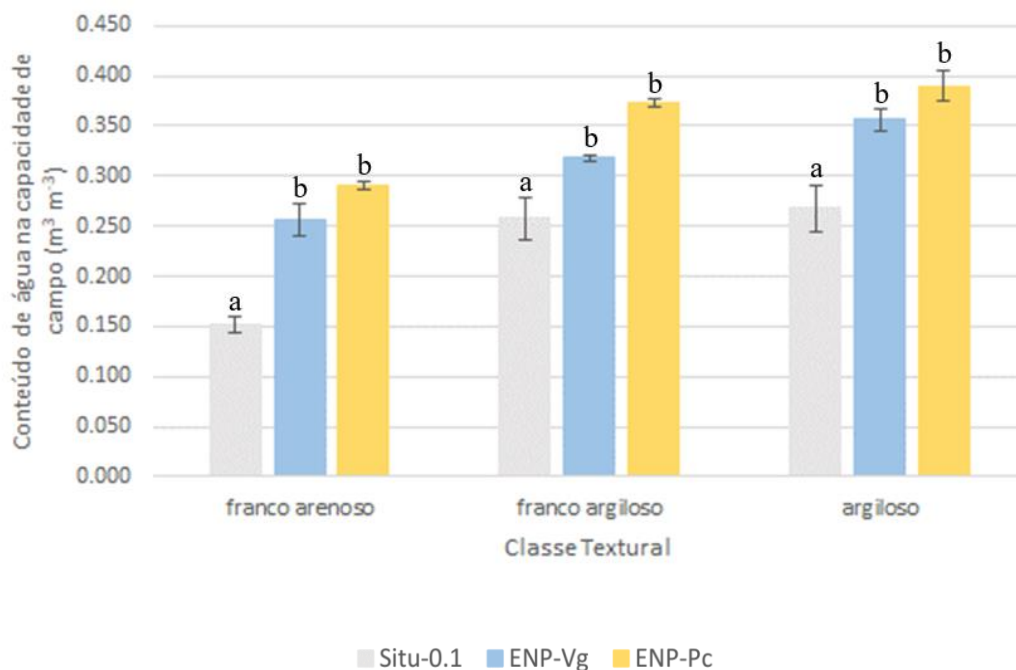
Gráfico 10 – Conteúdo de água na capacidade de campo estimada pelo método padrão *in situ* para uma densidade de fluxo de 0,05 mm d<sup>-1</sup> (Situ-0,05) em contraste com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura não preservada, ajustadas pelo modelo de van Genuchten (ENP-Vg) ou por polinomial cúbica (ENP-Pc) para as distintas classes texturais. Médias seguidas pela mesma letra, em cada classe textural, não diferem pelo teste de Dunnett ( $p < 0,10$ )



Fonte: elaborada pelo autor.

Os resultados aqui apresentados os contrariam. Observe que o conteúdo de água estimado no ponto de inflexão de amostras com estrutura não preservada, independente do modelo pelo qual é estimado e independentemente da classe textural, difere do conteúdo de água na capacidade de campo estimada *in situ*, considerando a densidade de fluxo insignificante (Gráficos 10 e 11).

Gráfico 11 – Conteúdo de água na capacidade de campo estimada pelo método padrão *in situ* para uma densidade de fluxo de  $0,1 \text{ mm d}^{-1}$  (Situ-0,1) em contraste com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura não preservada, ajustadas pelo modelo de van Genuchten (ENP-Vg) ou por polinomial cúbica (ENP-Pc) para as distintas classes texturais. Médias seguidas pela mesma letra, em cada classe textural, não diferem pelo teste de Dunnett ( $p < 0,10$ )



Fonte: elaborada pelo autor.

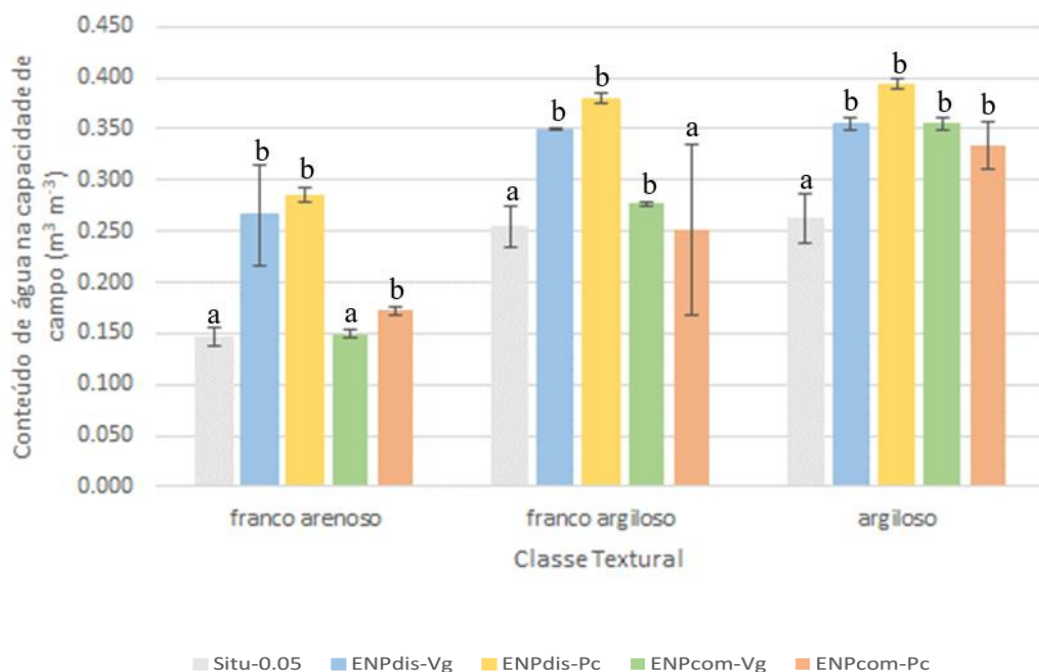
O motivo da divergência de resultados é em parte justificada pelo fato de Mello *et al.*, (2002) utilizarem como critério de estimativa da capacidade de campo *in situ* o conteúdo de água em 6 kPa e não a densidade de fluxo considerada insignificante. O uso de um valor fixo de tensão de água no solo é questionável, pois não há um consenso quanto ao valor mais apropriado (ASSOULINE; OR, 2014).

O procedimento de alterar a estrutura do solo pela deposição da terra fina (partículas menores ou iguais a 2 mm selecionadas por tamisação) nos cilindros proporcionou um novo arranjo das partículas primárias, de tal modo que a parte úmida da curva de retenção de água no solo, correspondente ao intervalo de 0 até 33 kPa, foi a mais afetada (Gráficos 2, 3, 4, 5, 6 e

7). Perceba que o formato da curva resultante desse procedimento indica uma melhora na condição estrutural dessas amostras de solo se a compararmos com as demais, amostras com estrutura preservada ou amostras submetidas ao processo de compactação.

Ou seja, a maior retenção de água na faixa de tensão de 0 a 33 kPa, representa uma melhora estrutural da amostra de solo como consequência da menor densidade do solo, maior porosidade total e uma maior variação de tamanho de poros (MACHADO; TORMENA, 2008), de tal modo que para uma mesma tensão nessa faixa ( 0 a 33 kPa) o conteúdo de água em amostras de solo com estrutura não preservada é superior as demais amostras com condições estruturais distintas, em função disso, o conteúdo de água no ponto de inflexão também será maior.

Gráfico 12 – Conteúdo de água na capacidade de campo estimada pelo método padrão *in situ* para uma densidade de fluxo de  $0,05 \text{ mm d}^{-1}$  (Situ-0,05) em contraste com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura não preservada submetidas a dispersão (ENPdis) ou a compactação (ENPcom), ajustadas pelo modelo de van Genuchten (Vg) ou por polinomial cúbica (Pc) para as distintas classes texturais. Médias seguidas pela mesma letra, em cada classe textural, não diferem pelo teste de Dunnett ( $p < 0,10$ )



Fonte: elaborada pelo autor.

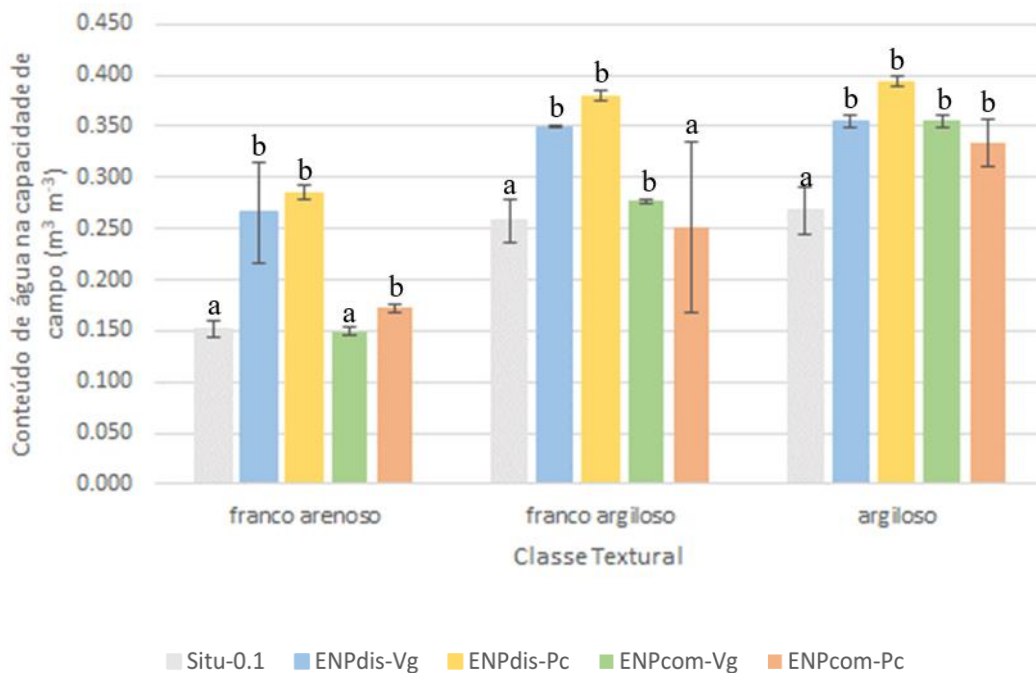
A estimativa do conteúdo de água no ponto de inflexão oriundo de amostras com estrutura não preservada que tiveram suas partículas primárias dispersas ou sua estrutura compactada e a posterior análise da associação com o conteúdo de água na capacidade de campo

*in situ*, até então, não foi verificada. Assim, apresento os resultados auferidos pelo teste de Dunnett, considerando como tratamento padrão o conteúdo de água na capacidade de campo estimada *in situ* sob o critério de densidade de fluxo insignificante, conforme Gráficos 12 e 13.

Observe que amostras de solo com estrutura não preservada que tiveram suas partículas dispersas superestimam e diferem do conteúdo de água na capacidade de campo *in situ* estimada pelo critério de densidade de fluxo insignificante, enquanto as amostras compactadas não manifestaram um padrão que não dependa da textura do solo (Gráficos 12 e 13).

Desse modo, não há um padrão de associação da capacidade de campo estimada *in situ* com o conteúdo de água no ponto de inflexão estimado pela equação de van Genuchten ou por polinômio cúbico, considerando a dispersão ou a compactação das amostras de solo (Gráficos 12 e 13).

Gráfico 13 – Conteúdo de água na capacidade de campo estimada pelo método padrão *in situ* para uma densidade de fluxo de  $0,1 \text{ mm d}^{-1}$  (Situ-0,1) em contraste com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura não preservada submetidas a dispersão (ENPdis) ou a compactação (ENPcom), ajustadas pelo modelo de van Genuchten (Vg) ou por polinomial cúbica (Pc) para as distintas classes texturais. Médias seguidas pela mesma letra, em cada classe textural, não diferem pelo teste de Dunnett ( $p < 0,10$ )



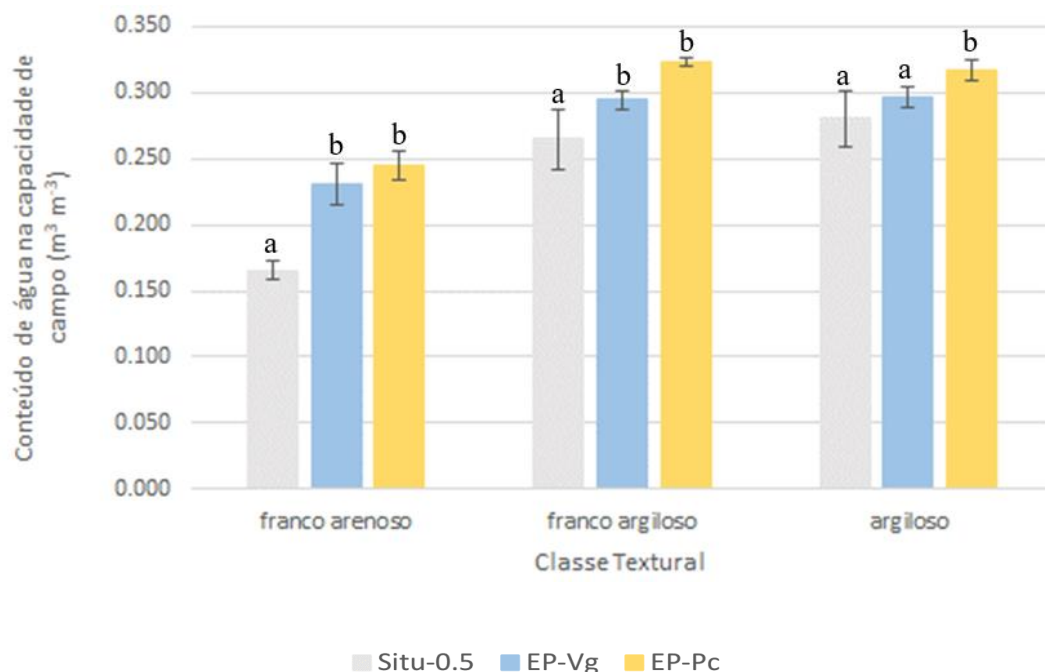
Fonte: elaborada pelo autor.



Em síntese, ao considerar como critério de estimativa da capacidade de campo *in situ* a densidade de fluxo insignificante, observe que, independentemente da condição estrutural das amostras e da classe textural a que elas pertencem, que não há uma associação com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo estimado pelo modelo de van Genuchten ou polinômio cúbico.

Agora considere como critério padrão para estimativa da capacidade de campo *in situ* o tempo de drenagem a partir da saturação da amostra ( $1 \text{ mm d}^{-1}$  e  $0,5 \text{ mm d}^{-1}$ ). Foi sob esse viés que Ferreira e Marcos (1983) afirmaram que o conteúdo de água obtido no ponto de inflexão por polinômio cúbico representa uma estimativa razoável da capacidade de campo. Essa observação não é corroborada pelos resultados, independentemente da classe textural do solo, considerando o modelo polinomial cúbico (Gráfico 14).

Gráfico 14 – Conteúdo de água na capacidade de campo estimada pelo método padrão *in situ* para uma densidade de fluxo de  $0,5 \text{ mm d}^{-1}$  (Situ-0,5) em contraste com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura preservada, ajustadas pelo modelo de van Genuchten (EP-Vg) ou por polinomial cúbica (EP-Pc) para as distintas classes texturais. Médias seguidas pela mesma letra, em cada classe textural, não diferem pelo teste de Dunnett ( $p < 0,10$ )



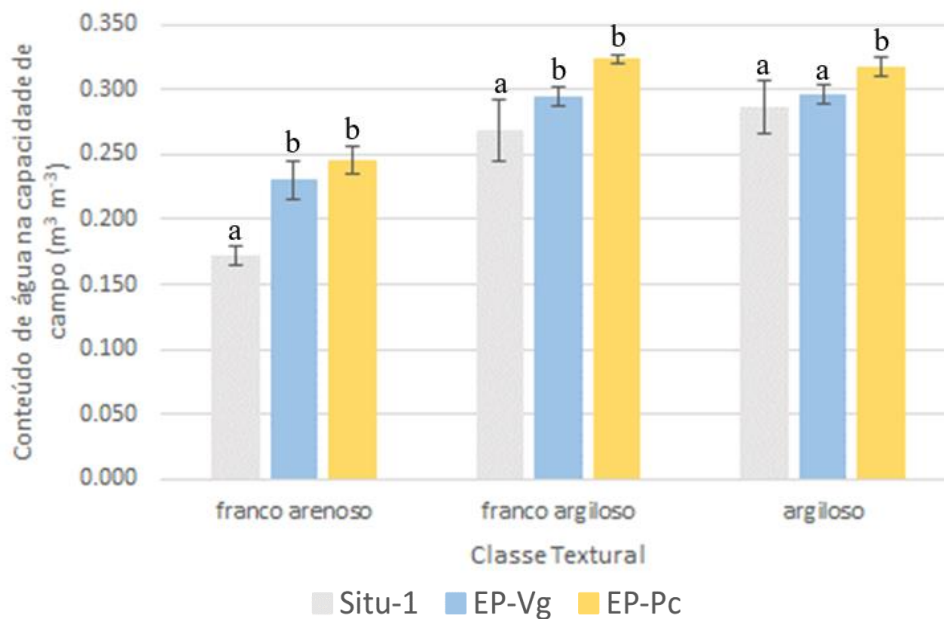
Fonte: elaborada pelo autor.

Todavia, para a classe textural argilosa, considerando o modelo de van Genuchten, há associação entre o conteúdo de água no ponto de inflexão com a capacidade de campo estimada *in situ* ( $p = 0,013$ ), conforme o Gráfico 14. Esse mesmo comportamento ocorre

também ao considerar a densidade de fluxo de  $1 \text{ mm d}^{-1}$  ( $p = 0,42$ ), conforme Gráfico 15. Assim, ao considerarmos como critério para a estimativa da capacidade de campo *in situ* a densidade de fluxo em função do tempo de drenagem a partir da saturação da amostra de solo, obtemos associação com o conteúdo de água estimado no ponto de inflexão pelo modelo de van Genuchten.

Em solos com alto conteúdo de argila, o ponto de inflexão é considerado como um bom estimador da capacidade de campo (BARROS *et al.*, 2017). Esses autores não deixam claro o critério da estimativa da capacidade de campo *in situ*, mas o resultado aqui obtido corrobora os seus.

Gráfico 15 – Conteúdo de água na capacidade de campo estimada pelo método padrão *in situ* para uma densidade de fluxo de  $1 \text{ mm d}^{-1}$  (Situ-1) em contraste com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura preservada, ajustadas pelo modelo de van Genuchten (EP-Vg) ou por polinomial cúbica (EP-Pc) para as distintas classes texturais. Médias seguidas pela mesma letra, em cada classe textural, não diferem pelo teste de Dunnett ( $p < 0,10$ )



Fonte: elaborada pelo autor.

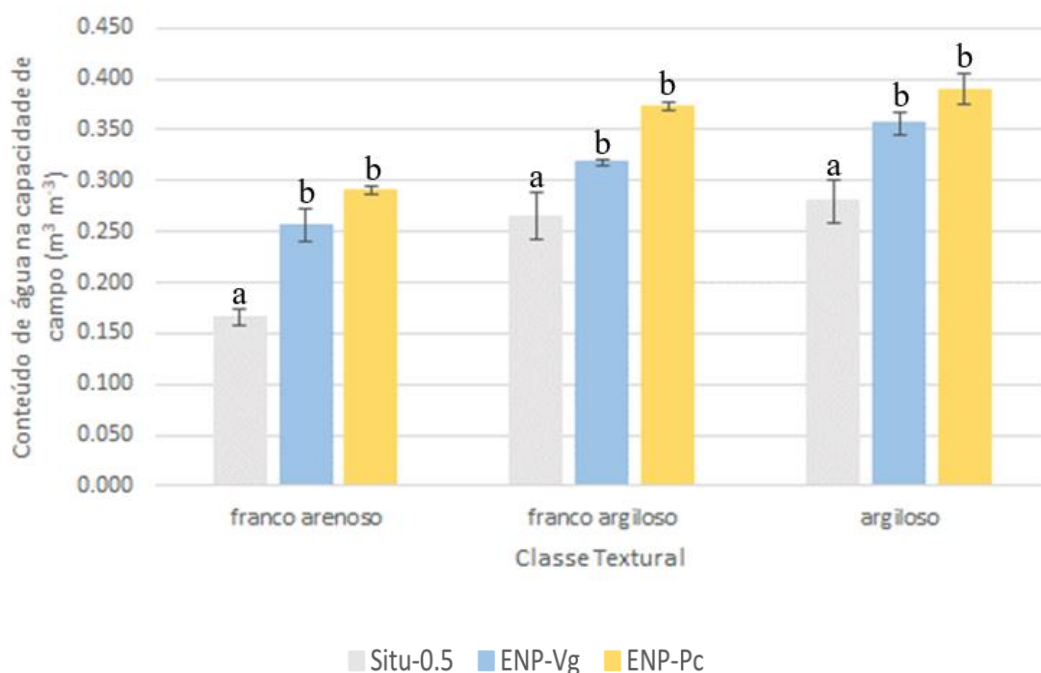
A textura da amostra de solo influencia o seu sistema poroso, o qual é composto de macroporos e microporos. De tal forma que um maior o conteúdo de argila resulta em uma baixa quantidade de macroporos e elevada quantidade de microporos. Essa condição favorece que o ponto de inflexão seja deslocado para uma tensão maior, o que proporciona uma redução do conteúdo de água nesse ponto (ALENCAR *et al.*, 2015). Essa mesma condição textural e estrutural da amostra de solo propicia uma menor variação do conteúdo de água ao longo do

tempo, logo para valores de densidade de fluxo obtidos após 2 ou 3 dias da saturação do perfil, obteremos um valor maior do conteúdo de água. Então, a microporosidade da amostra de solo em conjunto com o alto conteúdo de argila representa os atributos físicos do solo responsáveis pela associação do conteúdo de água da capacidade de campo obtida *in situ* e o ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo.

Essa situação foi peculiar para amostra de solo com alto conteúdo de argila (49 %) e estrutura preservada, considerando que a capacidade de campo obtida *in situ* teve por critério o tempo de drenagem a partir da saturação da amostra, o que equivale a valores de densidade de fluxo de  $1 \text{ mm d}^{-1}$  e  $0,5 \text{ mm d}^{-1}$ .

O uso de amostras com estrutura não preservada superestima e difere da capacidade de campo estimada *in situ*, independentemente da classe textural ou do modelo (van Genuchten ou polinômio cúbico) que estima o ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo (Gráficos 16 e 17).

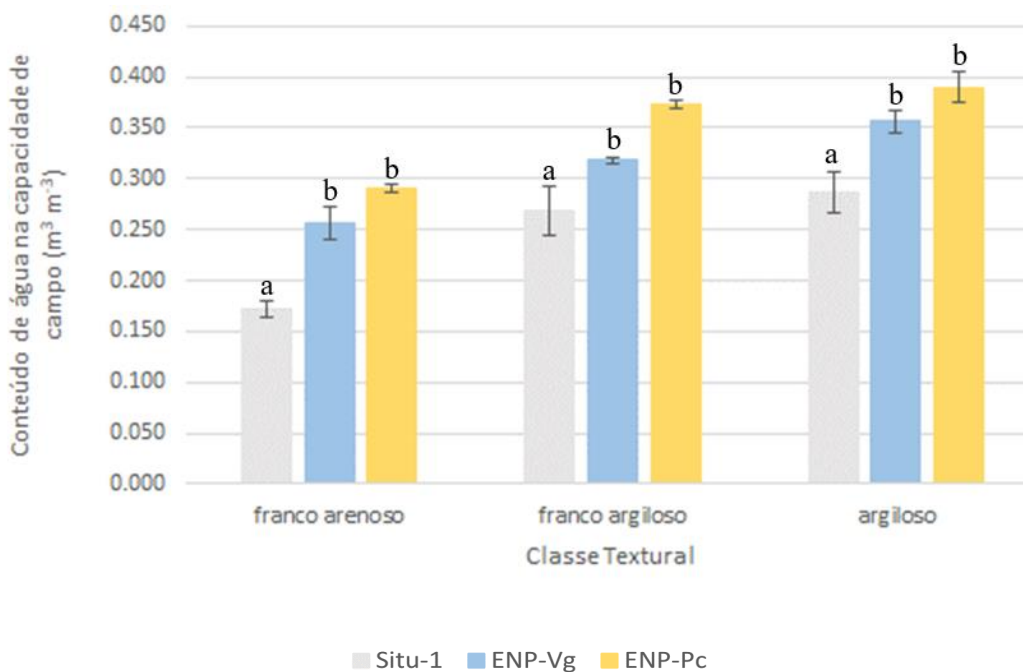
Gráfico 16 – Conteúdo de água na capacidade de campo estimada pelo método padrão *in situ* para uma densidade de fluxo de  $0,5 \text{ mm d}^{-1}$  (Situ-0,5) em contraste com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura não preservada, ajustadas pelo modelo de van Genuchten (ENP-Vg) ou por polinomial cúbica (ENP-Pc) para as distintas classes texturais. Médias seguidas pela mesma letra, em cada classe textural, não diferem pelo teste de Dunnett ( $p < 0,10$ )



Fonte: elaborada pelo autor.

Independentemente do valor de densidade de fluxo considerado ( $0,05 \text{ mm d}^{-1}$ ,  $0,1 \text{ mm d}^{-1}$ ,  $0,5 \text{ mm d}^{-1}$  e  $1 \text{ mm d}^{-1}$ ) não há associação de amostras com estrutura não preservada com a capacidade de campo estimada *in situ* (Gráficos 10, 11, 16 e 17). Portanto, não é recomendado utilizar amostras de terra fina (partículas menores ou iguais a 2 mm de diâmetro, obtidas por tamisação) para estimativa da capacidade de campo pelo ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo.

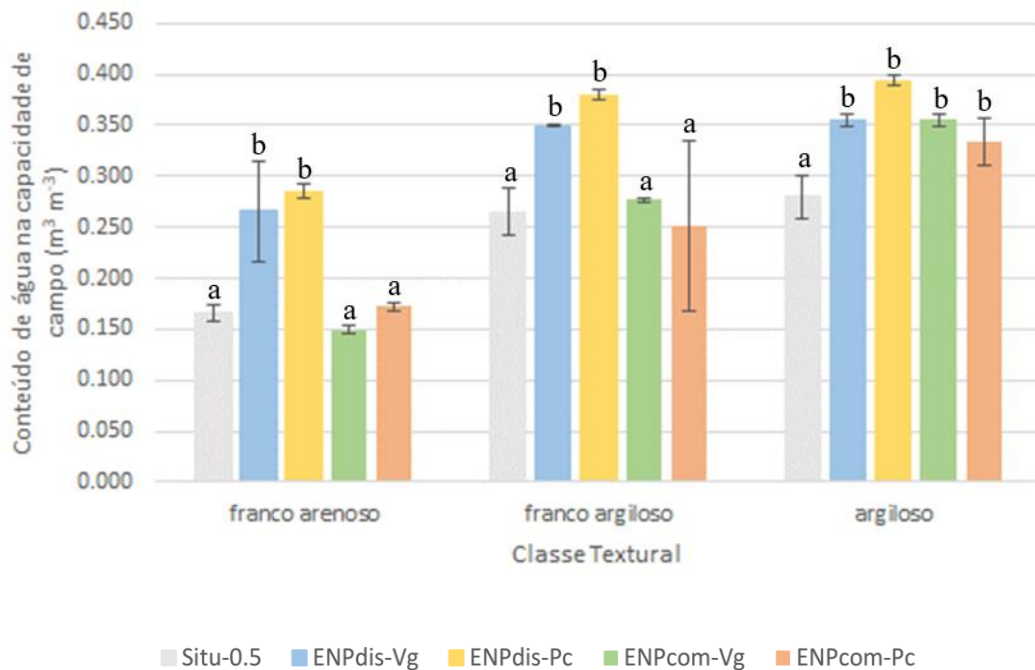
Gráfico 17 – Conteúdo de água na capacidade de campo estimada pelo método padrão *in situ* para uma densidade de fluxo de  $1 \text{ mm d}^{-1}$  (Situ-1) em contraste com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura não preservada, ajustadas pelo modelo de van Genuchten (ENP-Vg) ou por polinomial cúbica (ENP-Pc) para as distintas classes texturais. Médias seguidas pela mesma letra, em cada classe textural, não diferem pelo teste de Dunnett ( $p < 0,10$ )



Fonte: elaborada pelo autor.

O mesmo comportamento descrito acima é aplicado para amostras com estrutura não preservada que tiveram suas partículas primárias dispersas (Gráficos 18 e 19), conforme esses, não há associação da capacidade de campo obtida *in situ*, independentemente do valor de densidade de fluxo considerado ( $0,05 \text{ mm d}^{-1}$ ;  $0,1 \text{ mm d}^{-1}$ ;  $0,5 \text{ mm d}^{-1}$  e  $1 \text{ mm d}^{-1}$ ), conforme Gráficos 12, 13, 18 e 19.

Gráfico 18 – Conteúdo de água na capacidade de campo estimada pelo método padrão *in situ* para uma densidade de fluxo de  $0,5 \text{ mm d}^{-1}$  (Situ-0,1) em contraste com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura não preservada submetidas a dispersão ou a compactação, ajustadas pelo modelo de van Genuchten (ENP-Vg) ou por polinomial cúbica (ENP-Pc) para as distintas classes texturais. Médias seguidas pela mesma letra, em cada classe textural, não diferem pelo teste de Dunnett ( $p < 0,10$ )



Fonte: elaborada pelo autor.

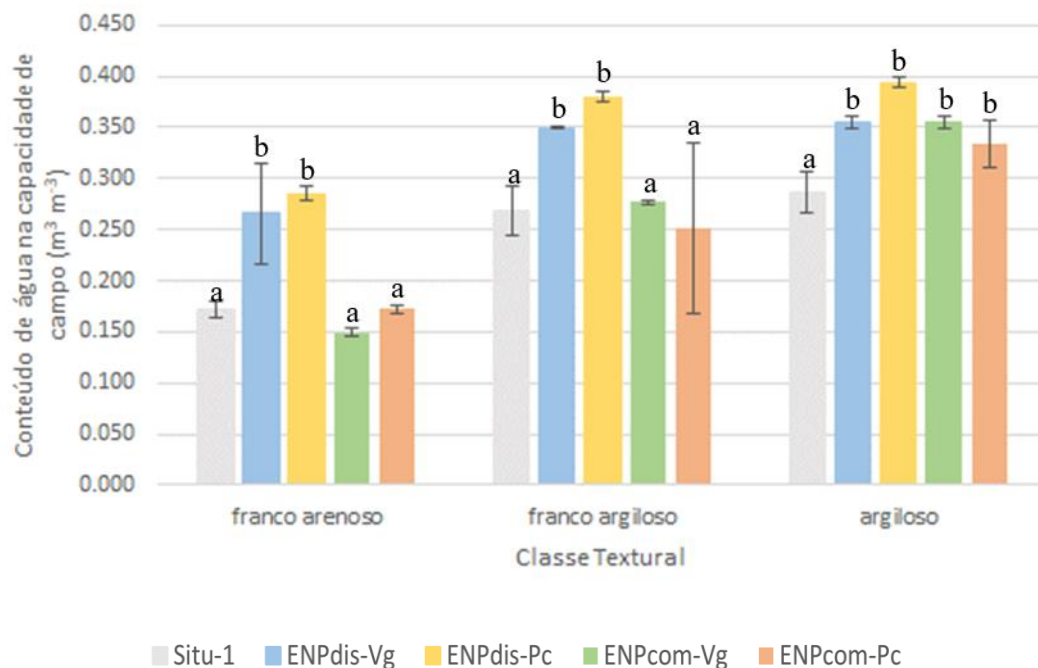
A associação do conteúdo de água entre o ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo e a capacidade de campo estimada *in situ* existe para amostras com estrutura não preservada submetidas ao processo de compactação para uma condição de densidade máxima (Gráficos 18 e 19). Esse comportamento foi evidenciado apenas para os valores maiores de densidade de fluxo ( $0,5 \text{ mm d}^{-1}$  e  $1 \text{ mm d}^{-1}$ ).

Perceba que a associação anteriormente relatada não se manifestou em solos com textura argilosa (Gráficos 18 e 19). Acontece que o preparo de corpos de prova para essa classe textural foi ineficiente, pois as amostras não atingiram o valor de densidade preestabelecido a partir do ensaio de proctor normal.

Amostras que são submetidas a compactação com o objetivo de se atingir a densidade máxima apresentam maior quantidade de microporos. Esse fato reforça que a microporosidade da amostra de solo é o atributo físico responsável pela associação entre o ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo e conteúdo de água na capacidade de

campo obtida *in situ*, considerando o critério do tempo de drenagem, o que equivale a densidade de fluxo de  $(1 \text{ mm d}^{-1}$  e  $0,5 \text{ mm d}^{-1}$ )

Gráfico 19 – Conteúdo de água na capacidade de campo estimada pelo método padrão *in situ* para uma densidade de fluxo de  $1 \text{ mm d}^{-1}$  (Situ-1) em contraste com o conteúdo de água no ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo de amostras com estrutura não preservada submetidas a dispersão ou a compactação, ajustadas pelo modelo de van Genuchten (ENP-Vg) ou por polinomial cúbica (ENP-Pc) para as distintas classes texturais. Médias seguidas pela mesma letra, em cada classe textural, não diferem pelo teste de Dunnett ( $p < 0,10$ )



Fonte: elaborada pelo autor.

## 5 CONCLUSÕES

O critério de estimativa da capacidade de campo *in situ*, o conteúdo de argila e o modelo de ajuste da curva de retenção de água no solo interferem na associação entre o conteúdo de água estimado no ponto de inflexão de amostras com estrutura preservada e a capacidade de campo estimada *in situ*.

Não há associação entre o conteúdo de água obtido no ponto de inflexão de amostra de solo com estrutura preservada, independentemente do modelo pelo qual ele é estimado, com a capacidade de campo estimada *in situ* sob o critério de densidade de fluxo desprezível.

Há associação entre o conteúdo de água obtido no ponto de inflexão de amostra de solo argiloso, com estrutura preservada, estimado pelo modelo de van Genuchten, com a capacidade de campo estimada *in situ* sob o critério de tempo de drenagem.

Amostras submetidas aos procedimentos de laboratório de análise de rotina de solo para obtenção da curva de retenção de água no solo não manifestam associação entre o conteúdo de água estimado pelo ponto de inflexão e a capacidade de campo estimada *in situ*, independentemente do modelo de ajuste da curva, da classe textural da amostra e do critério para estimativa da capacidade de campo *in situ*.

O processo de compactação da amostra, que permite atingir a condição de densidade máxima, promove a associação entre o conteúdo de água estimado no ponto de inflexão com a capacidade de campo estimada *in situ* sob o critério de tempo de drenagem, independentemente da classe textural do solo ou do modelo de ajuste da curva de retenção de água no solo.

## REFERÊNCIAS

- ALENCAR, T. L. de; CHAVES, A. F.; SANTOS, C. L. A. dos; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Atributos físicos de um cambissolo cultivado e tratado com biofertilizante na chapada do apodi, Ceará. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 3, p. 737–749, 2015.
- ALVES, G. J.; BELONI, A. A. P.; JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. Utilização de correlação de método de campo e regressão linear a fim de estimar a capacidade de campo para um Latossolo Vermelho Distrófico Típico das regiões do cerrado sul mineiro. **Profiscientia**, n. 7, 2012.
- ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 111–116, 2011.
- ASCHONITIS, V. G.; ANTONOPOULOS, V. Z.; LEKAKIS, E. H.; LITSKAS, V. D.; KOTSOPOULOS, S. a.; KARAMOUZIS, D. N. Estimation of field capacity for aggregated soils using changes of the water retention curve under the effects of compaction. **European Journal of Soil Science**, v. 64, n. 5, p. 688–698, 2013.
- ASSOULINE, S.; OR, D. The concept of field capacity revisited: Defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. **Water Resources Research**, v. 50, p. 4787–4802, 2014.
- BARROS, T. H.; FARIAS, A. J.; DE ALMEIDA, A. M.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; COELHO, R. D. Field Capacity estimation from the inflection point of the soil moisture retention curve. *In: IV INOVAGRI - Institute International Meeting*, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: 2017.
- BELL, M. A.; VAN KEULEN, H. Effect of soil disturbance on pedotransfer function development for field capacity. **Soil Technology**, v. 8, n. 4, p. 321–329, 1996.
- BRITO, A. S. ; LIBARDI, P. I. ; MOTA, J. C. A. ; MORAES, S. O. Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 1939–1948, 2011.
- BUCKINGHAM, E. Studies on the movement of soil moisture. **USDA Bureau of soils**, v. 38, p. 61, 1907.
- CASAROLI, D.; JONG VAN LIER, Q. de. Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 59–66, 2008.
- CLARKE TOPP, G.; FERRÉ, P. A. Thermogravimetric using conectiving oven-drying. *In: DANE, J. H.; CLARKE TOPP, G. (Ed.). Methods of soil analysis*. Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 2002. p. 422–423.
- COLMAN, E. A. A laboratory procedure for determining the field capacity of soils. **Soil science**, v. 63, n. 4, p.



277–284, 1947.

DANE, J. H.; HOPMANS, J. W. Water Retention and Storage. In: DANE, J. H.; CLARKE TOPP, G. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 2002. p. 671–720.

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

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil and Tillage Research**, v. 57, n. 4, p. 203–212, 2001.

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A.; RICHARD, G.; RESZKOWSKA, A. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoderma**, v. 143, n. 3–4, p. 243–253, 2008.

DONAGEMA, G. K.; VILAS BOAS DE CAMPO, D.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (ed.). **Manual de métodos e análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

DUAN, X.; XIE, Y.; LIU, G.; GAO, X.; LU, H. Field capacity in black soil region, Northeast China. **Chinese Geographical Science**, v. 20, n. 5, p. 406–413, 2010.

FERREIRA, M. M.; MARCOS, Z. Z. Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico e regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. **Ciência e Prática**, v. 7, n. 1, p. 96–101, 1983.

FLINT, A. L.; FLINT, L. E. Particle density. In: DANE, J. H.; CLARKE TOPP, G. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 2002a. p. 229–240.

FLINT, L. E.; FLINT, A. L. Porosity. In: DANE, J. H.; CLARKE TOPP, G. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 2002b. p. 241–254.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; CLARKE TOPP, G. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 2002. p. 201–228.

HANKS, R. J.; HOLMES, W. E.; TANNER, C. B. Field Capacity Approximation Based on the Moisture-Transmitting Properties of the Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 18, n. 3, p. 252, 1954.

JONG VAN LIER, Q. de. Field capacity, a valid upper limit of crop available water? **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 214–220, 2017.

JONG VAN LIER, Q. de; WENDROTH, O. Reexamination of the Field Capacity Concept in a Brazilian Oxisol.

**Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 2, p. 264, 2016.

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

MACHADO, J.; TORMENA, C. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 495–502, 2008.

MEDINA, B. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C. Relações entre capacidade de campo determinada in situ e em laboratório em Latossolo Amarelo muito argiloso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, n. 2, p. 91–95, 1987.

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

MEYER, P. D.; GEE, G. W. Flux-based estimation of field capacity. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 125, n. 7, p. 595–599, 1999.

NACHABE, M. H. Refining the definition of field capacity in the literature. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce**, v. 124, n. 4, p. 230–232, 1998.

NEMES, A.; PACHEPSKY, Y. a.; TIMLIN, D. J. Toward Improving Global Estimates of Field Soil Water Capacity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 3, p. 807, 2011.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo: com problemas resolvidos**. 2. ed. revisada e ampliada. Curitiba, 474p. 2015.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 12, p. 211–216, 1988.

REYNOLDS, W. D. An analytic description of field capacity and its application in crop production. **Geoderma**, v. 326, p. 56–67, 2018.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; TAN, C. S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, v. 146, n. 3–4, p. 466–474, 2008.

RIBEIRO, F. V. M. **Comparação entre a capacidade de campo obtida in situ e por métodos de laboratório em três solos do Estado do Ceará**. Fortaleza, 2000.42f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo),

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.

ROMANO, N.; SANTINI, A. Field. In: DANE, J. H.; CLARKE TOPP, G. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 2002. p. 721–738.

RUIZ, H. A.; FERREIRA, G. B.; PEREIRA, J. B. M. Estimativa da capacidade de campo de Latossolos e Neossolos Quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 1, p. 389–393, 2003.

SILVA, B. M.; SILVA, É. A. da; OLIVEIRA, G. C. de; FERREIRA, M. M.; SERAFIM, M. E. Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 464–475, 2014.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 842–847, 2006.

SOUZA, L.; REICHARDT, K. Estimativas da capacidade de campo. **Revista brasileira de ciência do solo**, n. 20, p. 183–189, 1996.

TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D.; COOK, F. J.; KIRBY, J. M.; CARTER, M. R. Chapter 2 Physical attributes of soil quality. **Developments in Soil Science**, v. 25, n. C, p. 21–58, 1997.

TWARAKAVI, N. K. C.; SAKAI, M.; ŠIMŮNEK, J. An objective analysis of the dynamic nature of field capacity. **Water Resources Research**, v. 45, n. 10, p. 1–9, 7 out. 2009.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 8, n. 44, p. 892–898, 1980.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. **Soil Science**, v. 32, n. 3, p. 181–193, 1931.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of Measuring Field Capacity and Wilting Percentages of Soils. **Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 75–94, 1949.

ZETTL, J.; LEE BARBOUR, S.; HUANG, M.; SI, B.; LESKIW, L. A. Influence of textural layering on field capacity of coarse soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 91, n. 2, p. 133–147, 2011.