

**UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI**

**Engenharia Agrícola e Ambiental**

**Northon Matheus Santana de Castro**

**QUANTIFICAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO BASEADA NA  
SUA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO  
DE UNAÍ-MG**

**Unai**

**2021**

**Northon Matheus Santana de Castro**

**QUANTIFICAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO BASEADA NA  
SUA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO  
DE UNAÍ-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Agrícola e  
Ambiental da Universidade Federal dos Vales do  
Jequitinhonha e Mucuri.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício da Silva Terra

**Unai  
2021**

**Northon Matheus Santana de Castro**

**QUANTIFICAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO BASEADA NA  
SUA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO  
DE UNAÍ-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Agrícola e  
Ambiental da Universidade Federal dos Vales do  
Jequitinhonha e Mucuri.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício da Silva Terra

Data de aprovação \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

---

Prof. Dr. Hermes Soares da Rocha  
Instituto de Ciências Agrárias - UFVJM

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Ingrid Horák Terra  
Instituto de Ciências Agrárias - UFVJM

---

Prof. Dr. Fabrício da Silva Terra  
Instituto de Ciências Agrárias - UFVJM

**Unai**  
**2021**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me concedeu a oportunidade para chegar até este momento, a Ele sou eternamente grato. Grato por cada dia, cada oportunidade, por esses seis anos de luta, dificuldades, incertezas e desafios. Agradeço aos meus pais, que sempre buscaram guiar-me pelos caminhos certos, incentivando a estudar e buscar um futuro melhor. Agradeço aos meus amigos que me ajudaram de forma direta ou indireta, obrigado por me proporcionar esse momento.

Agradeço aos meus amigos que foram comigo a campo, debaixo do sol quente, no brejo, atravessando córrego, em especial ao Jhonny Kelvin, que mesmo eu estando atolado no brejo tirou uns minutos para rir e descontraír, obrigado pela ajuda no campo, laboratório, nas análises e avaliações, enfim muito obrigado. Agradeço aos meus amigos que me apoiaram e incentivaram a chegar até aqui, especialmente agora na reta final, obrigado Hand Kelve, Vitor Gabriel, Justiniano Cardoso, Erick Toddy, Ana Lúcia, Maria Eduarda, e outros.

Sou imensamente grato ao meu orientador Prof. Dr. Fabrício Terra, pelo conhecimento repassado, a paciência para comigo nos momentos mais difíceis e a disposição em auxiliar no desenvolvimento deste, e ainda, o meu desenvolvimento pessoal e profissional, muito obrigado.

Agradeço à UFVJM/ICA-Unai, pela oportunidade e pelo auxílio na minha formação profissional como Engenheiro Agrícola e Ambiental, ainda pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho, ainda agradeço ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo fomento na realização deste Projeto de Iniciação Científica - PIBIC. Agradeço ao coordenador do curso Prof. Dr. Hermes Rocha, que nessa reta final me deu grande apoio e motivação não só a ele, mas a todos meus professores Ângelo Faceto, Ingrid Horák Terra, André Medeiros, Joicymara Xavier, Anderson Evaristo, Hellen Deckers, Denis Teixeira, Leandro Tavares, Leandro Belo, Marcelo Cordeiro, Maurício Leite, Wesley Esdras, enfim muito obrigado a todos vocês.

Enfim, agradeço a todos vocês por participarem desta etapa em minha vida.

*“ [...] eliminar o que não é essencial significa dizer não a alguém, muitas vezes, e também ir contra as expectativas sociais. Lembre-se: quando abandonamos nosso direito de escolher, os outros escolhem por nós. ”*

Greg McKeown

## RESUMO

A compreensão dos atributos físico-hídricos do solo, a saber: densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ), umidade gravimétrica ( $U_g$ ) e volumétrica ( $\Theta$ ), porosidade total ( $\alpha$ ), macroporosidade ( $Ma$ ), microporosidade ( $Mi$ ), resistência à penetração ( $RP$ ) e as frações granulométricas do solo, é de fundamental importância para o bom manejo do solo. No entanto, as mensurações desses atributos são custosas e laboriosas, demandam tempo, necessitam de amostragens indeformadas e reagentes que possibilitem a mensuração dos mesmos. As Funções de Pedotransferência (FPT) são modelos matemáticos e/ou estatísticos que estimam as propriedades físico-hídricas do solo, as quais são de difícil mensuração, por meio de atributos mais acessíveis. Neste estudo, a  $RP$  foi utilizada como um candidato à variável preditora de funções pedotransferência para a quantificação dos atributos físico-hídricos  $D_s$ ,  $\Theta$ ,  $\alpha$ ,  $Ma$  e  $Mi$ , principalmente em maiores profundidades. Foram amostrados 41 pontos na Fazenda Experimental Santa Paula, do Instituto de Ciências Agrárias – UFVJM, entre as diversas classes de solos presentes, a saber: Latossolo Vermelho, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Nitossolo Vermelho, Neossolo Litólico, Cambissolo Háplico, Plintossolo Pétrico, Plintossolo Háplico, Gleissolo Melânico e Gleissolo Háplico e mensurados os atributos físico-hídricos, em laboratório, e ainda realizado a campo, o ensaio de resistência do solo a penetração. Verificou-se a normalidade dos atributos obtidos, por meio do teste de Shapiro-Wilk, e seguido pelas transformações necessárias para a normalização dos dados. Foram gerados gráficos de dispersão utilizando pares de pontos das variáveis investigadas ( $D_s$ ,  $\Theta$ ,  $\alpha$ ,  $Ma$  e  $Mi$ ) com a  $RP$ . Notou-se que a  $RP$  não apresentou correlação satisfatória com nenhum atributo físico-hídricos que comprovasse a possibilidade de modelagem utilizando apenas uma relação linear simples. Para o desenvolvimento das FPT, foi testado o modelo de regressão múltipla polinomial de 2º ordem através do método *Stepwise*, sendo utilizada a  $U_g$ ,  $D_p$  e a porcentagem de argila como variáveis independentes, de forma associada com e sem a  $RP$ . O processo de seleção de amostras foi realizado de forma aleatória, com cinco simulações para calibração, com 70% dos dados, e teste, com 30% dos dados. Para o ajuste e validação dos modelos, foi utilizada a validação cruzada *leave-one-out*. Os coeficientes obtidos das funções com e sem a  $RP$  foram submetidos ao teste de Tukey (5% de probabilidade), evidenciando que não se diferem entre si com e sem a  $RP$ . Assim, apenas os dados de  $RP$  são insuficientes, como variáveis independentes para as FPT, sendo necessário a utilização de outras variáveis independentes ( $U_g$ ,  $D_p$  e argila) em conjunto com a  $RP$ , tornando assim eficientes na predição dos atributos investigados.

**Palavras-chave:** Funções de Pedotransferência. Regressão Múltipla. Qualidade física do solo.

## ABSTRACT

Understanding the physical and water attributes of the soil, namely: soil density ( $D_s$ ), particle density ( $D_p$ ), gravity ( $U_g$ ) and volumetric moisture ( $\Theta$ ), total porosity ( $\alpha$ ), macroporosity ( $Ma$ ), microporosity ( $Mi$ ), penetration resistance ( $RP$ ) and soil particle size fractions are of fundamental importance for good soil management. However, the measurements of these attributes are costly and laborious, require time, require undisturbed sampling and reagents that enable their measurement. Pedotransfer Functions (FPT) are mathematical and/or statistical models that estimate the physical-water properties of the soil, which are difficult to measure, through more accessible attributes. In this study,  $RP$  was used as a candidate for the predictor variable of pedotransfer functions for the quantification of physical-water attributes  $D_s$ ,  $\Theta$ ,  $\alpha$ ,  $Ma$  and  $Mi$ , mainly at greater depths. Forty-one points were sampled at the Santa Paula Experimental Farm, of the Instituto de Ciências Agrárias – UFVJM, among the various classes of soils present, namely: Latossolo Vermelho, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Nitossolo Vermelho, Neossolo Litólico, Cambissolo Háplico, Plintossolo Pétrico, Plintossolo Háplico, Gleissolo Melânico e Gleissolo Háplico and measured the physical-hydric attributes, in laboratory, and still carried out in the field, the soil resistance to penetration test. The normality of the obtained attributes was verified through the Shapiro-Wilk test, followed by the necessary transformations for data normalization. Scatter plots were generated using pairs of points of the investigated variables ( $D_s$ ,  $\Theta$ ,  $\alpha$ ,  $Ma$  and  $Mi$ ) with  $RP$ . It was noted that the  $RP$  did not present a satisfactory correlation with any physical-water attribute that would prove the possibility of modeling using only a simple linear relationship. For the development of the FPT, the 2nd order polynomial multiple regression model was tested using the Stepwise method, using the  $U_g$ ,  $D_p$  and clay percentage as independent variables, associated with and without  $RP$ . The sample selection process was carried out randomly, with five simulations for calibration, with 70% of the data, and testing, with 30% of the data. For the adjustment and validation of the models, the leave-one-out cross validation was used. The coefficients obtained from the functions with and without  $RP$  were submitted to Tukey's test (5% probability), showing that they do not differ from each other with and without  $RP$ . Thus, only the  $RP$  data are insufficient, as independent variables for the FPT, requiring the use of other independent variables ( $U_g$ ,  $D_p$  and clay) together with the  $RP$ , thus making them efficient in predicting the investigated attributes.

**Keywords:** Pedotransference functions. Multiple Regression. Soil physical quality.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	OBJETIVOS	10
2.1.	Objetivo Geral	10
2.2.	Objetivos Específicos	10
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	11
3.1.	Atributos físico-hídricos	11
3.2.	Funções de Pedotransferência	13
4.	METODOLOGIA	14
4.1.	Caracterização da área de estudo	14
4.2.	Procedimento metodológico	15
4.2.1.	Amostragem	15
4.2.2.	Análise laboratorial	16
4.2.2.1.	<i>Densidades de solo e partícula</i>	16
4.2.2.2.	<i>Umidade gravimétrica e volumétrica</i>	17
4.2.2.3.	<i>Porosidade total, macroporosidade e microporosidade</i>	18
4.2.2.4.	<i>Resistência à penetração</i>	19
4.2.2.5.	<i>Caracterização da análise dos dados</i>	19
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1.	Caracterização físico-hídrica das amostras	22
5.2.	Modelagem dos atributos e desempenho das FPT	29
6.	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42
	APÊNDICE A	48
	APÊNDICE B	53



## 1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o sistema solo-planta tem se intensificado cada vez mais frente às atividades agrícolas. O conhecimento dos atributos físico-hídricos do solo bem como suas interações com o meio é de fundamental importância para as atividades agrícolas e afins (LIBARDI, 2012; COSTA E SOARES, 2021). Se não manejado adequadamente o solo, poderá acarretar por exemplo, aumento da erosão, o que pode levar à perda do solo e de seus nutrientes, ainda no desenvolvimento deficitário das raízes, trazendo reflexos negativos de produtividade agrícola (HARTEMINK E MCBRATNEY, 2008, PRADO *et al.*, 2010).

Vários processos conduzem à degradação e afetam o estado de preservação dos solos, onde a sua capacidade de sustentar e produzir biomassa é reduzida. Seus nutrientes e matéria orgânica são perdidos, sua acidez e compactação aumentam, tendo, como consequência, diminuição de macroporos e aumento de sua densidade, caracterizando assim solos com maiores índices de resistência à penetração (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990). A qualidade física dos solos agrícolas comporta-se, portanto, como um conjunto complexo entre os atributos físico-hídricos que se correlacionam entre si, e ainda reflete a sua habilidade para suportar cargas, proporcionar a movimentação e retenção de água e soluções e ainda a aeração do solo (ARSHAD *et al.*, 1996; MICHELON *et al.*, 2010). No entanto, a quantificação e mensuração destes atributos físico-hídricos, segundo Michelin *et al.* (2010), são laboriosos e demandam amostragens indeformadas e muito tempo para a sua realização, principalmente se forem realizadas amostragens em profundidade.

Frente a esta problemática, tem sido desenvolvida as Funções de Pedotransferência (FTP), que segundo Bouma (1989), fazem o uso de atributos do solo de obtenção simples e custo acessível para gerar outros atributos de difícil mensuração ou obtenção mais cara. As FPT são modelos matemáticos/estatísticos preditivos obtidos de forma empírica, a partir de regressões ou outros modelos matemáticos, ou de forma físico-empírica, a partir de princípios físicos, que transformam dados existentes e disponíveis em dados necessários e requeridos (BUDIMAN *et al.*, 2003). A maior parte da aplicação das FPT está relacionada às estimativas dos atributos hidráulicos dos solos (OTTONI *et al.*, 2018).

Dentre os atributos do solo, a sua resistência à penetração é um atributo físico de fácil mensuração e quantificação, sendo desta forma, um candidato à variável preditora das FPT. Segundo Stolf (2011) e Reichert *et al.* (2000), a resistência à penetração mensura a

capacidade do solo de suportar forças sem apresentar falhas por ruptura, fragmentação ou fluxo, ou seja, mede a tensão máxima que o solo suporta. A mensuração da resistência à penetração pode ser feita em laboratório, com o uso de penetrógrafos, ou a campo, com o uso de penetrômetro de impacto, por exemplo (VEIGA *et al.*, 2007). A estrutura do solo será estável se a tensão aplicada for menor que a resistência na zona de falha, sendo assim, a resistência à penetração dependente dos teores de água do solo e das suas densidades, granulometria, mineralogia e porosidade (LIMA *et al.*, 2006). Sendo desta forma, a RP um excelente candidato à variável preditora para o desenvolvimento de FPT. Portanto, a utilização de FPT baseadas em dados de campo de RP para a quantificação de alguns dos atributos físico-hídricos dos solos, poderá facilitar a obtenção destes valores, principalmente, em profundidades.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Desenvolver um conjunto de funções de pedotransferência, utilizando dados de campo de resistência do solo à penetração no solo, para modelar e quantificar os seus seguintes atributos físico-hídrico dependentes de amostras indeformadas:  $D_s$ ,  $\Theta$ ,  $\alpha$ ,  $M_a$  e  $M_i$ .

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Testar a eficiência do modelo/ algoritmo de regressão polinomial de 2º ordem (simples e múltipla);
- Avaliar a qualidade das funções de pedotransferência quando modeladas utilizando apenas a resistência à penetração, estratificando os valores de umidade gravimétrica;
- Avaliar a qualidade das funções de pedotransferência quando modeladas utilizando outros atributos do solo associados à sua resistência à penetração, a saber:  $U_g$ ,  $D_p$ , porcentagem de argila.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. Atributos físico-hídricos

O solo é composto por material natural mineral e/ou orgânico, sólido e poroso. A fração sólida possui constituição mineral, originada da rocha matriz, e/ou orgânica, provida da deposição e decomposição de material orgânico no solo. Na fração porosa, parte onde não ocorre a matriz do solo, existe a presença de ar e água. Segundo Libardi (2012), a fração porosa é caracterizada por cavidades com diferentes formas e tamanhos, sendo regida principalmente pelo rearranjo das partículas sólidas do solo, o qual pode ser modificado por meio de práticas agrícolas, podendo degradar ou melhorar esta fração.

Existe um consenso de que as relações entre desenvolvimento de plantas e qualidade física de solo são proporcionalmente diretas, uma vez que, se o solo apresentar uma boa qualidade física, a planta terá condições adequadas para seu desenvolvimento (RAUBER, 2019; NEBEL, 2009). Neste sentido, a qualidade física dos solos comporta-se como o resultado de uma complexa interação entre atributos físicos e hídricos que se correlacionam. Em outras palavras, a boa qualidade física de um solo está diretamente ligada à dinâmica que existe entre determinados atributos, tais como:  $U_g$ ,  $\Theta$ ,  $D_s$ ,  $D_p$ ,  $\alpha$ ,  $M_a$ ,  $M_i$  e a RP (BUDIMAN *et al.*, 2003).

A umidade do solo caracteriza-se como sendo o teor de água contida em uma amostra de solo. A compreensão de como ela é retida, armazenada e de como varia ao longo do tempo no solo torna-se imprescindível para fins agrícolas e hidrológicos (COELHO FILHO, 2011). A capacidade que o solo possui de reter água está ligada às suas características granulométricas, mineralógicas e estruturais, as quais podem ser explicadas devido às forças capilares e de adsorção (LIBARDI, 2012). Para a determinação da umidade no solo, é viável a utilização de métodos diretos com base gravimétrica ou volumétrica (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Bernardo (2006) apresenta algumas possibilidades de determinação da umidade por métodos indiretos relacionados com outras características e propriedades do solo, como o uso de tensiômetro, sonda de nêutrons e reflectometria no domínio do tempo (*Time Domain Reflectometry* -TDR).

A DS tem sido utilizada como um indicador da sua qualidade física, onde altos valores indicam baixa porosidade e evidências de compactação, que podem causar restrições ao crescimento radicular e redução na movimentação do ar e água através do solo (FERREIRA,

2010). A determinação da DS permite avaliar outras questões como a drenagem, porosidade, permeabilidade ao ar e da água e o armazenamento de água (LEPSCH, 2011). No caso da DP, como principais aplicações pode-se destacar a sua importância para o cálculo da porosidade total do solo, cálculo do tempo de sedimentação e transporte de partículas minerais em cursos d'água e reservatórios (FERREIRA, 2010). A utilização das DS e DP têm sido amplamente utilizadas como candidatas a variáveis preditoras em funções de pedotransferência para mensuração dos atributos físico-hídricos do solo (OLIVEIRA, 2002; SILVA *et al.*, 2008)

A  $\alpha$  do solo refere-se ao espaço poroso presente na matriz do solo, determinada diretamente pela divisão entre o volume de poros e o volume total do solo. Segundo Ranzani (1969), a porosidade do solo quase nunca estará abaixo de 30% e dificilmente acima de 60%, salvo no caso de solos orgânicos ou turfosos, onde a porosidade total pode chegar em até 80 % do volume (LOPES, 2018). A boa distribuição do sistema poroso é um fator primordial para questões químicas, físicas e biológicas do solo, ainda, influência na capacidade de armazenamento e drenagem da água e na capacidade de desenvolvimento radicular das plantas (ROUBER, 2019).

A  $\alpha$  pode ser categorizada em dois grupos conforme o tamanho e a distribuição da fração sólida, a saber: Mi e Ma. A Mi é formada por poros onde o diâmetro efetivo é menor do que 0,05 mm, sendo esta responsável pela retenção e movimento da água por capilaridade. A Ma, por sua vez, ocorre quando os poros forem maiores que 0,05 mm, sendo responsável pela drenagem da água gravitacional, difusão de gases, hábitat de fungos, raízes e alguns insetos (REINERT; REICHERT, 2006; LIER, 2016). Inclusive, a Ma tem sido considerada um ótimo indicador da degradação do solo, em detrimento da densidade, devido a sua relação com a compactação, onde valores abaixo de 10 % são críticos para a aeração do solo e movimentação interna da água (HAKANSSON; LIPIEC, 2000; STOLF *et al.*, 2011). Segundo Rubismar Stolf (2011), a macroporosidade (Ma) e a microporosidade (Mi) são utilizadas como importantes indicadores de aeração do solo, funcionamento hidrodinâmico do solo e ainda indicador de compactação do solo. A macroporosidade é um dos maiores indicadores de degradação do solo, devido à sua relação direta com a compactação e DS (HAKANSSIN & LIPIEC, 2000; CENTURION *et al.*, 2007).

Por sua vez, a resistência do solo à penetração é um dos atributos que está diretamente relacionado com os demais mencionados acima (LETEY, 1985), sendo altamente dependente do conteúdo de água do solo, da sua densidade, granulometria, mineralogia, estrutura, porosidade e do seu conteúdo de matéria orgânica e sistema de manejo utilizado

(BRAIDA *et al.*, 2007; Veiga *et al.*, 2007). Imhoff (2000) descreve que a relação entre os atributos físico-hídricos pode ser descrita por meio de um gráfico de RP, a qual é utilizada para verificar a condição estrutural do solo e o efeito da compactação nas condições físicas do solo (REICHERT *et al.*, 2000). Este atributo é de fácil mensuração onde seus dados podem ser obtidos a campo com o uso de penetrômetros (STOLF, 1991; MOLIN *et al.*, 2012; LIMA, 2019).

### 3.2. Funções de Pedotransferência

As FPT foram introduzidas a primeira vez por Bouma (1989) e são caracterizadas como regressões (simples ou múltiplas); utilizam como variáveis independentes informações básicas de fácil mensuração, que são transformadas em outras informações que possivelmente seriam mais laboriosas e cara de se obter. Sendo assim, as FPT têm por objetivo estimar atributos do solo a partir de outros atributos. Segundo Nascimento (2015), grande parte das FPT têm sido geradas para estimar atributos hidráulicos do solo. No entanto, Budiman *et al.* (2003) evidenciou a utilização destas para a predição de classes e atributos do solo. Já Benittes *et al.* (2006) avaliaram FPT para mensuração da densidade do solo. Ao desenvolver uma FPT, há a necessidade de se determinar dois fatores primordiais, evitando assim, o mau uso do conceito de pedotransferência: eficiência e incerteza. A eficiência está ligada ao fato de que os preditores da FPT devem ser mais fáceis de mensurar do que as informações que se deseja prever; e a incerteza pode ser devida à modelagem e aos dados de entrada, sendo que os dados a serem utilizados na modelagem devem apresentar a maior homogeneidade possível e a menor variância (Budiman *et al.*, 2003).

Segundo Costa (2012), as FPT são agrupadas em quatro grupos: a) FPT de classes, as quais predizem propriedades com base na classe à qual pertence; b) FPT contínuas que predizem propriedades dos solos como uma função contínua das variáveis medidas; c) FPT pontuais que predizem propriedades em pontos específicos e d) FPT paramétricas que predizem por meio de propriedades disponíveis em propriedades não disponíveis (investigadas). Este último grupo engloba as funções que estimam os parâmetros empíricos e os classificam como pontuais em diferentes condições e situações (Budiman *et al.*, 2003). Ao modelar uma FPT, deve-se ter em mente que a relação entre as variáveis deve ser a mais linear possível e deve-se evitar variáveis predictoras que apresentem um alto coeficiente de relação entre si (RIBEIRO JR, 2001). Segundo Nascimento (2015), as variáveis predictoras a serem escolhidas devem ser

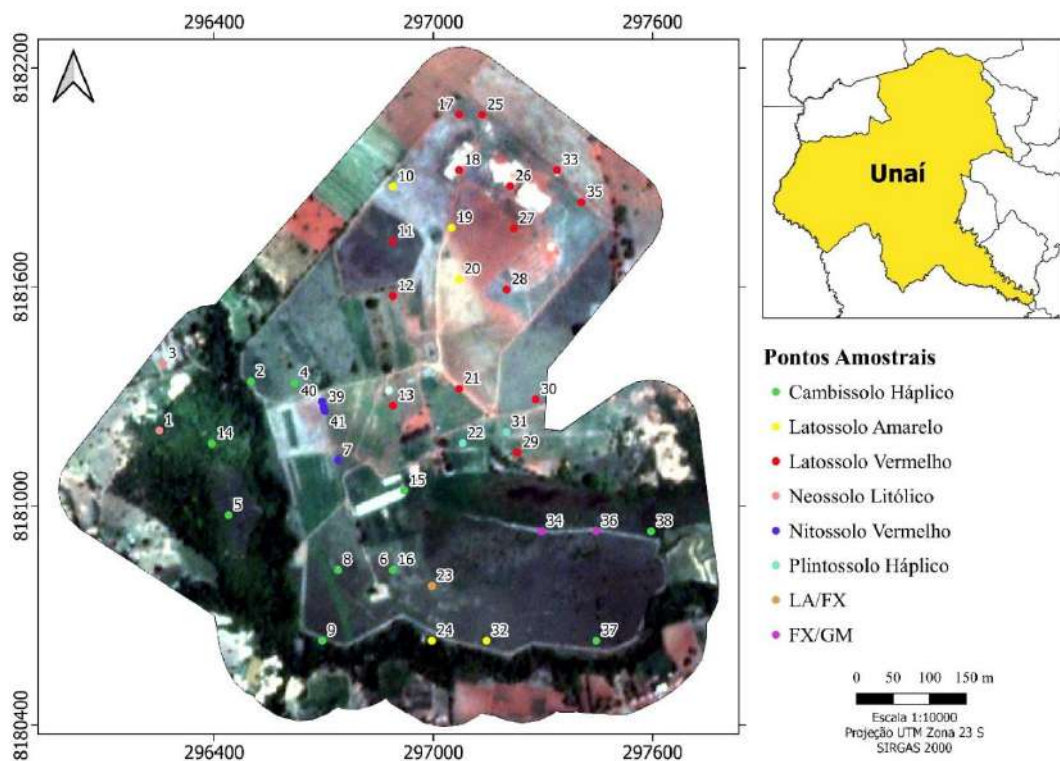
analisadas atentamente e deve-se ter um conhecimento de quais variáveis independentes pode associar de forma mais forte com a variável investigada (dependente).

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo correspondeu à Fazenda Experimental Santa Paula (FESP), pertencente ao Instituto de Ciências Agrárias (ICA), da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). A FESP está inserida no município de Unaí - Minas Gerais, apresentando uma área total de 132 hectares e situa-se entre as latitudes  $-16,45^{\circ}$  e  $-16,43^{\circ}$  Sul e longitudes  $-46,91^{\circ}$  e  $-46,89^{\circ}$  Oeste (datum WGS 84) (Figura 1). Segundo Naime *et al.* (2014) o município de Unaí está no Vão da unidade geomorfológica das Cristas de Unaí, com predominância de Latossolos Vermelhos de textura argilosa sob vegetação de Cerrado em áreas mais aplainadas e nas áreas de relevo mais ondulado a montanhoso, têm como solos predominantes Cambissolos e Neossolos Litólicos sob vegetação de Campo Cerrado.

Figura 1: Mapa de localização da área do estudo Fazenda Experimental Santa Paula – FESP.



LA/FX: Latossolo Amarelo/Plintossolo Háptico; FX/GM: Plintossolo Háptico/Gleissolo Melânico.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

A região apresenta um clima do tipo tropical com estação seca de inverno (Aw) de acordo com a classificação de Köppen (NAIME *et al.*, 2014). O regime de precipitação, cuja média anual do total acumulado varia entre 1400 e 1500 mm, divide-se em um período chuvoso de outubro a março (de 770 a 810 mm) e outro período seco de maio a setembro (de 5 a 49 mm). As médias anuais de temperatura e umidade relativa apresentam uma variação de 21 °C a 23 °C e 65 % a 72 %, respectivamente. O relevo caracteriza-se como plano e suave ondulado, com altitude média de 612 metros e declividades variado entre 0,08 – 16%.

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS; SANTOS *et al.*, 2018) os solos presentes da área de estudo compreendem: Latossolo Vermelho, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Nitossolo Vermelho, Neossolo Litólico, Cambissolo Háplico, Plintossolo Pétrico, Plintossolo Háplico, Gleissolo Melânico e Gleissolo Háplico (CAMPOS, 2019; CASTRO, 2019). Segundo Campos (2011), o material de origem destes solos, de maneira geral, é constituído por Argilitos, Siltitos, Quartzos-Arenitos e Filitos.

## **4.2. Procedimento metodológico**

### **4.2.1. Amostragem**

A metodologia adotada no presente estudo consistiu na espacialização de 41 pontos de amostragem, e a coleta de amostras indeformadas nos pontos que foram espacializados, na tentativa de representar as diferentes classes de solos, usos e coberturas que ocorrem (Figura 1). As amostragens foram realizadas em 6 datas diferentes, sendo coletados os pontos 17, 18, 25, 26, 27, 33, 35, 39, 40 e 41 no dia 05/04/2019; pontos 9, 19, 20, 21, 28, 29 no dia 12/04/2019; os pontos 1, 2, 3, 4, 14, 15, 22, 30, 31 no dia 26/04/2019; os pontos 5, 10, 11, 12, 24, 32 no dia 19/04/2020; os pontos 6, 7, 8, 13, 16 no dia 03/10/2020 e finalizando as amostragens com os pontos 23, 34, 36, 37, 38 no dia 22/04/2021.

A realização da amostragem ocorreu em duas etapas, sendo primeiramente coletadas amostras indeformadas, conforme descrito no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (TEIXEIRA *et al.*, 2017), com o uso de um anel volumétrico a uma profundidade de 0-20 cm, tomando o devido cuidado para não realizar a compactação do solo no interior do anel volumétrico durante a coleta. Após a retirada da amostra, a mesma foi envolvida com papel

filme e numerada conforme o ponto coletado. A segunda etapa foi realizada o ensaio de resistência à penetração até 20 cm de profundidade, conforme preconizado por Stolf (1991), cujos dados foram obtidos a campo no momento e no mesmo local das amostragens indeformadas, com um penetrômetro de impacto modelo Stolf.

#### 4.2.2. Análise laboratorial e Caracterização dos Dados

As análises dos atributos físico-hídricos do solo, a saber:  $U_g$ ,  $\Theta$ ,  $D_s$ ,  $D_p$ ,  $\alpha$ ,  $M_a$ ,  $M_i$  e granulometria, foram executadas no Laboratório Multidisciplinar de Engenharia (ICA-UFVJM, Campus de Unaí), conforme descrito no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (TEIXEIRA et al., 2017). A cor do solo foi identificada por meio da carta de cores de Munsell. A análise granulométrica consiste na ruptura dos agregados do solo e a individualização das partículas minerais constituintes do solo, por meio de uma solução dispersante de NaOH e agitação mecânica, através da qual ocorre uma formação suspensa estabilizada das partículas desagregadas, que são fracionadas (areia, silte, argila) por meio do peneiramento conforme descrito por Teixeira *et al.* (2017). Com as frações granulométricas definidas foi possível obter a textura do ponto amostral por meio do triângulo textural (SANTOS *et al.*, 2015).

##### 4.2.2.1. Densidades de solo e partícula

A densidade do solo ( $D_s$ ) visa medir a densidade média de um volume de solo conhecido, a qual está diretamente relacionada com outras características e propriedades físico-hídricas do solo. A determinação foi obtida pela massa do solo seco após secagem em estufa, a temperatura de 105 °C durante 24 horas, e o volume do anel volumétrico. A  $D_s$  é determinada pela razão entre a massa de solo seco contida no anel volumétrico e o volume do referido recipiente, conforme mostra a Equação 1:

$$D_s = \frac{m_s}{V} \quad (1)$$

Onde:



$D_s$  – densidade do solo, em  $\text{kg dm}^{-3}$  (equivalente a  $\text{g cm}^{-3}$ )

$m_s$  – massa da amostra de solo seco a  $105\text{ }^\circ\text{C}$  até peso constante, em g

$V$  – volume do cilindro, em  $\text{cm}^3$

Já a densidade de partícula ( $D_p$ ) visa medir a densidade média da composição mineralógica e orgânica das partículas presentes numa amostra de solo. Esta medida está relacionada com o volume efetivo que ocupa a matéria sólida, sendo desconsiderado o espaço poroso. A determinação da  $D_p$  consiste na obtenção da massa do solo seco após secagem em estufa, a temperatura de  $105\text{ }^\circ\text{C}$  durante 24 horas, e o seu volume, que é determinado pela diferença do líquido necessário para completar um dado recipiente (50 mL) previamente calibrado vazio e o volume necessário para completar o volume do mesmo recipiente contendo a amostra seca de solo. A  $D_p$  é obtida pela razão entre a massa de solo seco e a diferença entre o volume total aferido no recipiente e o volume utilizado para completar o recipiente com a amostra, conforme mostra a Equação 2:

$$D_p = \frac{m_s}{(V_t - V_u)} \quad (2)$$

Onde:

$D_p$  – densidade da partícula, em  $\text{kg dm}^{-3}$  (equivalente a  $\text{g cm}^{-3}$ )

$m_s$  – massa da amostra de solo seco a  $105\text{ }^\circ\text{C}$  até peso constante, em g

$V_t$  – volume total aferido do recipiente, em mL

$V_u$  – volume utilizado para completar o recipiente de 50 mL com a amostra de solo, em mL

#### 4.2.2.2. Umidade gravimétrica e volumétrica

A mensuração da umidade, segundo Teixeira *et al.* (2017), consiste na retirada de uma amostra de solo indeformada por meio de um cilindro com dimensões conhecidas, posteriormente pesado e levado à estufa, que por diferença de massas se determina a massa de água presente na amostra. A umidade gravimétrica (Equação 3) caracteriza-se como o conteúdo de água presente na amostra em determinado momento e local. Já a volumétrica (Equação 4) é o volume de água contido em um determinado volume de solo.

$$Ug = \frac{mu - ms}{ms} \quad (3)$$

Onde:

Ug – umidade em base gravimétrica, em g g<sup>-1</sup>

mu – massa da amostra úmida, em g

ms – massa da amostra seca, em g.

$$\theta = UgDs100 \quad (4)$$

Onde:

Θ- umidade em base volumétrica, em porcentagem (%)

Ug – umidade em base gravimétrica, em g g<sup>-1</sup>

Ds – densidade do solo, em g cm<sup>-3</sup>

#### 4.2.2.3. Porosidade total, macroporosidade e microporosidade

A porosidade total ( $\alpha$ ) corresponde a fração do volume total de um solo que pode ser ocupado por água e/ou ar. A determinação da  $\alpha$  das amostras de solo foi calculada através da Equação 5.

$$\alpha = \left(1 - \frac{Ds}{Dp}\right) 100 \quad (5)$$

Onde:

$\alpha$  – porosidade total em %, (equivalente a cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>)

Dp – densidade de partículas sólidas do solo, em g cm<sup>-3</sup>

Ds – densidade do solo, em g cm<sup>-3</sup>

Os valores de Ma e Mi foram determinados a partir das equações 6 e 7, respectivamente, conforme estabelecido por Stolf *et al.* (2011).

$$Ma = 0,693 - 0,465Ds + 0,212areia \quad (6)$$

Onde:

Ma – macroporosidade  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

Ds – densidade do solo, em  $\text{g cm}^{-3}$

areia – porcentagem da fração areia (%)

$$Mi = 0,337 + 0,120Ds - 0,294areia \quad (7)$$

Onde:

Mi – microporosidade  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

Ds – densidade do solo, em  $\text{g cm}^{-3}$

areia – porcentagem da fração areia (%)

#### 4.2.2.4. Resistência à penetração

Para a resistência à penetração, a metodologia utilizada foi a desenvolvida por Stolf (1991), cujos dados serão obtidos a campo no momento e mesmo local das amostragens com um penetrômetro de impacto modelo Stolf. A transformação dos dados de impacto em resistência dinâmica do solo foi realizada através da Equação 8. Com os valores em MPa foi realizado uma média ponderada correlacionando a resistência à penetração em MPa com a profundidade penetrada, ainda, para cada ponto amostrado foi obtido o perfil da RP.

$$RP = 5,6 + 6,89N \quad (8)$$

Onde:

RP – resistência a penetração,  $\text{kgf cm}^{-2}$

N – números de impactos necessários para uma determinada penetração ( $\text{imp dm}^{-1}$ )

#### 4.2.2.5. Caracterização da análise dos dados

Para todos os atributos físico-hídricos investigados (obtidos a campo, laboratório e calculados), foi realizada uma análise estatística descritiva e exploratória por meio da

linguagem R com o software RStudio, onde os seguintes parâmetros foram calculados: média, mediana, máximo, mínimo, variância, coeficiente de variação, desvio-padrão e amplitude total. Para verificar a normalidade dos atributos utilizou-se o teste Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) com nível de significância de 5%. Para os dados que não apresentaram normalidade, foram aplicadas as seguintes transformações: logarítmica, raiz quadrada e potência na base dez. Após a normalização dos dados, procedeu-se a análise de correlação múltipla a fim de identificar e quantificar a interação entre os diferentes atributos.

No intuito de se observar a relação entre RP e os demais atributos a serem modelados (Ds,  $\Theta$ ,  $\alpha$ , Ma e Mi), foram gerados gráficos de dispersão utilizando pares de pontos organizados conforme a variação da unidade gravimétrica. Para tanto, duas séries de dados foram utilizadas com valores de Ug variando de 0,10 – 0,20 g g<sup>-1</sup> e 0,20 – 0,34 g g<sup>-1</sup>. Em todos os gráficos de dispersão, foram ajustadas equações polinomiais simples de segunda ordem, que serviram como uma primeira aproximação para elaboração das FPT. Em uma segunda aproximação, para o desenvolvimento das FPT, foi testado o modelo de regressão múltipla polinomial de 2º ordem (quadrático) através do método *Stepwise* (COSTA, 2012; NASCIMENTO, 2015) em todo o conjunto de dados, sem a separação das amostras conforme valores de Ug. Dados de Ug, Dp e porcentagem de argila foram também testados como variáveis independentes, de forma associada à RP, a fim de testar e verificar incrementos na qualidade preditiva dos modelos gerados. O processo de seleção de amostras para calibração (aprendizagem) e teste (validação) das FPT foi realizado de forma aleatória, onde foram selecionados 70 % dos pontos de amostragem para calibração e 30% para teste das funções. Para ajuste e validação dos modelos, foi utilizada a validação cruzada *leave-one-out* (PICARD e COOK, 1984) na etapa de aprendizagem e o conjunto externo de 30% das amostras totais na etapa de validação, conforme já mencionado. Para a comparação do desempenho das modelagens, os seguintes índices foram calculados: coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) (Equação 9) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Equação 10). Para o cálculo destes índices, os dados foram novamente transformados para suas unidades originais.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (9)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\bar{Y}_i - Y_i)^2} \quad (10)$$

Onde:

$Y_i$  – Valor predito;

$Y$  – Valor observado;

$\bar{Y}$  – Média dos valores observados;

$n$  – Número de amostras (com  $i$  variando de 1 a  $n$ ).

Para avaliar a eficiência das FPT utilizando os valores de RP, as mesmas funções foram geradas apenas com os valores de UG, DP e porcentagem de argila. O desempenho dos modelos com e sem RP foi avaliado por meio de teste de média e análise de variância (Teste de Tukey com nível de significância de 5%) (OLIVEIRA, 2008). No teste de Tukey, foram comparados os valores de  $R^2$  e RMSE após cinco repetições com seleção de dados aleatória para as etapas de calibração e teste na modelagem de um mesmo atributo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização físico-hídrica das amostras

A Tabela 1 apresenta as coordenadas e as informações qualitativas dos 41 pontos amostrais que foram estudados. A maior ocorrência de pontos amostrados deu-se em áreas de Latossolo Vermelho, sendo quatorze observações, seguido pelo Cambissolo Háplico com dez observações, Nitossolo Vermelho com cinco, Latossolo Amarelo com cinco, Neossolo Litólico e Plintossolo Háplico com duas observações cada, mais três pontos com transições entre as classes.

**Tabela 1 – Caracterização qualitativa e informacional dos pontos amostrais na área de estudo.**

Ponto	Coordenadas		Classe Textural	Cor Seco	Classe de Solo	Caracterização da cobertura vegetal
	X	Y				
1	296500	8181341	Franca	10 YR 7/4	Cambissolo Háplico	Mata Ciliar de densidade média com vegetação nativa
2	296620	8181336	Franco Argilo Siltosa	10 YR 5/4	Cambissolo Háplico	Vegetação de porte alto bem adensado
3	296439	8180975	Argila	10 YR 5/4	Cambissolo Háplico	Vegetação seca de alta densidade
4	296739	8180825	Franco Argilo Siltosa	10 YR 5/2	Cambissolo Háplico	Pasto denso com alto porte, sem presença de bovinos
5	296695	8180631	Franco Argilo Siltosa	7.5 YR 4/6	Cambissolo Háplico	Vegetação de porte alto, beira de estrada, área de transição
6	296393	8181171	Argila	10 YR 5/4	Cambissolo Háplico	Pasto alto com cobertura vegetal densa
7	296920	8181043	Franco Argilosa	7.5 YR 4/6	Cambissolo Háplico	Pasto alto com cobertura vegetal densa Colonião
8	296889	8180825	Franca	10 YR 5/4	Cambissolo Háplico	Beira de estrada, com presença de raízes
9	297445	8180631	Franco Argilo Siltosa	10 YR 5/4	Cambissolo Háplico	Vegetação rasteira com porte baixo transitório a mata ciliar
10	297595	8180931	Argilosa	10 YR 5/2	Cambissolo Háplico	Vegetação de baixo porte
11	296889	8181875	Argila	10 YR 6/6	Latossolo Amarelo	Vegetação seca de alta densidade
12	297050	8181762	Muito Argilosa	10 YR 6/6	Latossolo Amarelo	Pasto alto com cobertura vegetal densa
13	297070	8181621	Argila	10 YR 5/6	Latossolo Amarelo	Pasto roçado com muita cobertura vegetal seca
14	296995	8180631	Muito Argilosa	5 YR 4/2	Latossolo Amarelo	Vegetação de porte baixo, com vegetação arbórea
15	297145	8180631	Franco Argilo Siltosa	10 YR 6/6	Latossolo Amarelo	Vegetação de porte baixo(gramínea), com vegetação arbórea

Ponto	Coordenadas		Classe Textural	Cor Seco	Classe de Solo	Caracterização da cobertura vegetal
	X	Y				
16	296995	8180781	Franco Argilo Siltosa	5 YR 3/2	Latossolo Amarelo/ Plintossolo Háplico	Vegetação de porte alto adensado, com cobertura vegetal
17	296889	8181725	Muito Argilosa	2.5 YR 4/8	Latossolo Vermelho	Vegetação seca de alta densidade
18	296889	8181575	Argila	5 YR 4/6	Latossolo Vermelho	Pasto roçado, com alta densidade vegetal
19	296889	8181275	Franco Argilosa	5 YR 5/6	Latossolo Vermelho	Pasto alto denso, presença elevada de raízes
20	297070	8182072	Muito Argilosa	5 YR 4/6	Latossolo Vermelho	Pasto alto com cobertura vegetal densa
21	297070	8181920	Argila	2.5 YR 4/6	Latossolo Vermelho	Pasto alto com cobertura vegetal densa
22	297070	8181321	Argila	5 YR 5/6	Latossolo Vermelho	Pasto roçado com cobertura vegetal alta
23	297133	8182071	Muito Argilosa	2.5 YR 3/6	Latossolo Vermelho	Pasto porte intermediário com cobertura de palhada
24	297210	8181876	Argila	5 YR 4/6	Latossolo Vermelho	Pasto roçado com cobertura de matéria seca
25	297220	8181760	Argila	5 YR 4/6	Latossolo Vermelho	Pasto com cobertura de vegetação intermediária
26	297200	8181593	Argila	5 YR 4/6	Latossolo Vermelho	Pasto alto com cobertura vegetal densa
27	297230	8181147	Muito Argilosa	5 YR 4/6	Latossolo Vermelho	Pasto alto com cobertura vegetal densa
28	297280	8181292	Argila	2.5 YR 4/6	Latossolo Vermelho	Pasto com vegetação intermediária bem densa
29	297339	8181920	Muito Argilosa	2.5 YR 4/6	Latossolo Vermelho	Pasto porte intermediário com palhada
30	297405	8181832	Muito Argilosa	2.5 YR 4/6	Latossolo Vermelho	Pasto porte intermediário com palhada
31	296250	8181207	Franco argilosa	10 YR 6/4	Neossolo Litólico	Mata Ciliar de densidade média com vegetação nativa
32	296260	8181390	Franca	10 YR 5/6	Neossolo Litólico	Vegetação de topo de morro com de árvores nativas
33	296889	8180825	Argila	5 YR 4/6	Nitossolo Vermelho	Área de pastagem de porte baixo presença de bovinos
34	296739	8181125	Muito Argilosa	5 YR 4/6	Nitossolo Vermelho	Área arada, com vegetação densa morta
35	296699	8181271	Argila	7.5 YR 4/6	Nitossolo Vermelho	Área de experimento
36	296695	8181286	Argila	7.5 YR 4/6	Nitossolo Vermelho	Área de experimento
37	296703	8181260	Argila	7.5 YR 4/6	Nitossolo Vermelho	Área de experimento
38	297080	8181172	Argila	10 YR 5/4	Plintossolo Háplico	Pasto porte baixo denso, ocupado por equinos e bovinos
39	297200	8181203	Franco Argilosa	7.5 YR 4/6	Plintossolo Háplico	Pasto porte baixo denso, ocupado por equinos e bovinos
40	297295	8180931	Franco Argilo Siltosa	2.5 Y 7/2	Plintossolo Háplico/ Gleissolo Melânico	Área de franja de brejo com vegetação rasteira baixa
41	297445	8180931	Franco Siltosa	10 YR 5/4	Plintossolo Háplico/ Gleissolo Melânico	Vegetação de porte baixo, com vegetação arbórea baixa

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

A coluna cor do solo seco expressa a cor predominante nos minerais presentes no solo, tendo variações no matiz de cores devido ao relevo, clima, uso e ocupação do solo, uma vez que os mesmos influenciam diretamente nos processos pedogenéticos de formação do solo (CAMPOS, 2019). Nesse sentido, as cores obtidas para os Cambissolos Háplico variaram de 7,5 YR 4/6 a 10 YR 7/4, caracterizando solos mais brunos a amarelos, com a expressão da cor próxima ao mineral goethita ( $\text{FeOOH}$ ). Para os Latossolos Amarelos foi obtido 10 YR 6/6 com cor bruno-amarelado. A classe do Latossolo Vermelho apresentou a variação 2,5 YR 3/6 (vermelho escuro) a 5 YR 5/6 (vermelho-amarelado) dando a expressão próxima a cor do mineral hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). A classe do Nitossolo Vermelho por sua vez apresentou uma variação de cor entre 5 YR 4/6 a 7,5 YR 4/6 expressando assim cores vermelha amarelado a bruno escuro. Já a classe do Plintossolo Háplico apresentou cores variantes entre 7,5 YR 4/6 a 10 YR 5/4 com a presença de cores bruno escuro a bruno amarelado. E ainda, os Neossolos Litólicos com cores variando de 10 YR 5/6 (bruno amarelado) a 10 YR 6/4 (amarelo castanho).

O uso e ocupação do solo para a classe de Latossolo Vermelho apresentou predominância de áreas de pastagens, com ocupação de mais de 97%. No entanto, o ponto 17, mesmo estando na mancha em questão, foi o único que apresentou uma vegetação nativa rasteira seca de alta densidade, não sendo utilizado para pastagem. Nos pontos 38 e 39, observou-se o uso e cobertura de áreas de pasto de porte baixo denso, semeado, ocupado por equinos e bovinos, com classe textural de franco argilosa a argilosa e ambos sobre mancha de Plintossolo Háplico.

A Tabela 2 apresenta os resultados da caracterização físico-hídrica e granulométrica dos 41 pontos coletados. A área de estudo apresenta um relevo plano e suave ondulado a ondulado, com altitude média de 622 metros e declividades variando entre 0,58 – 16%, tais características confere a área uma grande variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos.



Tabela 2 – Caracterização físico-hídrico dos pontos amostrais da área de estudo.

Ponto	DS g cm <sup>-3</sup>	DP g cm <sup>-3</sup>	UG g g <sup>-1</sup>	Θ	α	Argila %	Silte	Areia	Ma cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	Mi cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	RP MPa
1	1.517	2.632	0.210	31.80	42.35	20.50	46.19	33.31	0.058	0.421	1.505
2	1.609	2.460	0.224	35.97	34.59	32.00	50.60	17.40	-0.018	0.479	2.343
3	1.517	2.565	0.157	23.77	40.85	46.60	27.27	26.13	0.043	0.442	6.035
4	1.447	2.587	0.143	20.75	44.05	32.55	58.71	8.74	0.039	0.485	3.112
5	1.263	2.532	0.220	27.84	50.12	37.65	57.20	5.15	0.117	0.473	2.290
6	1.668	2.532	0.175	29.20	34.11	39.10	31.10	29.80	-0.020	0.450	6.206
7	1.569	2.611	0.222	34.83	39.90	32.05	38.44	29.51	0.026	0.439	5.849
8	1.586	2.542	0.120	19.08	37.62	25.20	36.42	38.38	0.037	0.414	12.036
9	1.334	2.632	0.256	34.20	49.32	31.75	52.74	15.51	0.106	0.451	2.197
10	1.506	2.469	0.230	34.62	39.02	56.35	37.09	6.56	0.007	0.498	3.225
11	1.440	2.589	0.217	31.28	44.38	48.25	39.60	12.15	0.049	0.474	3.486
12	1.257	2.459	0.291	36.60	48.86	63.50	27.33	9.17	0.128	0.461	2.461
13	1.371	2.430	0.257	35.24	43.57	58.95	27.49	13.56	0.084	0.462	4.732
14	1.302	2.439	0.271	35.35	46.61	65.90	28.07	6.03	0.100	0.476	3.552
15	1.386	2.381	0.224	31.07	41.80	38.90	55.79	5.31	0.060	0.488	3.999
16	1.423	2.105	0.232	32.95	32.40	38.75	49.61	11.64	0.056	0.474	3.928
17	1.413	2.620	0.242	34.20	46.09	60.00	26.78	13.22	0.064	0.468	10.162
18	1.459	2.729	0.193	28.15	46.55	44.80	29.82	25.38	0.069	0.437	7.667
19	1.618	2.655	0.114	18.46	39.06	35.70	21.28	43.02	0.032	0.405	13.260
20	1.195	2.632	0.249	29.72	54.59	70.35	15.93	13.72	0.166	0.440	4.772
21	1.167	2.609	0.252	29.40	55.28	57.55	29.06	13.39	0.179	0.438	4.941
22	1.424	2.564	0.227	32.32	44.46	50.75	25.99	23.26	0.080	0.440	3.378
23	1.059	2.598	0.305	32.32	59.22	67.40	20.27	12.33	0.227	0.428	5.617
24	1.213	2.692	0.272	32.95	54.95	56.80	29.87	13.33	0.157	0.443	6.548
25	1.263	2.565	0.236	29.82	50.77	53.80	26.13	20.07	0.148	0.430	4.211
26	1.281	2.470	0.264	33.78	48.12	55.90	25.99	18.11	0.136	0.438	3.063
27	1.389	2.500	0.285	39.52	44.45	64.10	22.87	13.03	0.075	0.465	2.312
28	1.487	2.766	0.177	26.28	46.24	43.80	24.63	31.57	0.069	0.423	4.898
29	1.105	2.575	0.280	30.97	57.08	78.00	12.94	9.06	0.198	0.443	6.570
30	1.140	2.692	0.283	32.22	57.67	76.55	14.60	8.85	0.182	0.448	4.683
31	1.315	2.472	0.186	24.40	46.82	33.10	33.32	33.58	0.153	0.396	9.968
32	1.438	2.667	0.203	29.20	46.08	24.40	30.10	45.50	0.121	0.376	2.352
33	1.561	2.469	0.155	24.19	36.78	54.35	27.05	18.60	0.007	0.470	3.025
34	1.553	2.679	0.137	21.27	42.05	59.40	23.16	17.44	0.008	0.472	1.184
35	1.229	2.667	0.233	28.67	53.90	49.35	35.84	14.81	0.153	0.441	2.527
36	1.200	2.667	0.263	31.59	55.00	48.70	38.73	12.57	0.162	0.444	1.836
37	1.310	2.716	0.244	32.01	51.78	53.20	36.60	10.20	0.106	0.464	2.739
38	1.573	2.543	0.234	36.81	38.13	41.25	29.49	29.26	0.023	0.440	2.435
39	1.609	2.620	0.167	26.90	38.60	33.90	29.69	36.41	0.022	0.423	5.445
40	1.487	2.174	0.339	50.47	31.60	38.00	56.30	5.70	0.014	0.499	2.801
41	1.472	2.817	0.237	34.83	47.73	22.50	63.45	14.05	0.038	0.472	2.527

Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partícula; Ug: umidade gravimétrica; Θ: umidade volumétrica; α: porosidade total; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade e RP: resistência a penetração.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

Medina; Grohmann (1966) encontraram uma relação direta entre maior Ma e maiores teores de areia, assim como maior Mi e maiores teores de argila para diferentes solos

do Cerrado. Ao determinar os valores para a Ma a ocorrência de valores negativos (ponto 2 e 6), isso pode ser explicado devido aos requisitos próprios da FPT ao se ajustar a novos conjuntos de dados (NEBEL, 2009).

A Tabela 3, apresenta o resumo da análise estatística descritiva e exploratória dos dados amostrais.

**Tabela 3 – Análise estatística descritiva e exploratória dos atributos físico-hídricos.**

	<b>Ds</b>	<b>Ds</b>	<b>Ug</b>	<b>Θ</b>	<b>α</b>	<b>Argila</b>	<b>Silte</b>	<b>Areia</b>	<b>RP</b>	<b>Ma</b>	<b>Mi</b>
	$g\ cm^{-3}$		$g\ g^{-1}$						$MPa$		
<b>Máximo</b>	1,668	2,816	0,339	50,47	59,22	78,00	63,45	45,50	13,26	22,65	49,87
<b>Amplitude</b>	0,608	0,711	0,225	32,01	27,61	57,50	50,51	40,35	12,08	24,61	12,29
<b>Mínimo</b>	1,059	2,105	0,114	18,46	31,60	20,50	12,94	5,15	1,18	1,96	37,58
<b>Média</b>	1,394	2,563	0,225	30,85	45,43	47,36	33,99	18,65	4,53	8,43	44,94
<b>Mediana</b>	1,423	2,586	0,231	31,59	46,08	48,25	29,82	14,05	3,55	6,85	44,41
<b>Variância</b>	0,024	0,019	0,002	34,46	51,62	219,95	162,81	119,23	7,72	0,40	0,07
<b>D.P</b>	0,157	0,138	0,0511	5,87	7,19	14,83	12,76	10,92	2,78	6,36	2,69
<b>CV (%)</b>	11,00	5,00	23,00	19,00	16,00	31,00	39,00	59,00	61,00	75,00	6,00

Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partícula; Ug: umidade gravimétrica; Θ: umidade volumétrica; α: porosidade total; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade e RP: resistência a penetração; D.P: desvio padrão; CV (%): coeficiente de variação.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

Ao analisar os componentes físico-hídrico do solo, foi observado que a Ds apresentou valor médio de  $1,39\ g\ cm^{-3}$ , com valores de máximo e mínimo de  $1,66\ g\ cm^{-3}$  e  $1,05\ g\ cm^{-3}$ , respectivamente, com um desvio padrão de  $0,15\ g\ cm^{-3}$ , coeficiente de variação de 11,00% e uma amplitude total de  $0,6089\ g\ cm^{-3}$ . O valor máximo para a Ds apresentada compreende o ponto amostral 13, o qual está sobre um Latossolo Vermelho que apresenta cor seca de 2.5 YR – 4/6, classe textural argilosa, uso e cobertura de solo com pasto alto com cobertura vegetal densa. A densidade do solo pode ser afetada por cultivos, que alteram a estrutura e por consequência o arranjo e volume dos poros. Segundo Reichert *et al.* (2003), densidades de solo acima de  $1,55\ g\ cm^{-3}$  são consideradas críticas para o bom crescimento do sistema radicular em solos de textura média. No entanto, Beutler *et al.* (2005) constataram que Ds acima de  $1,26$  e  $1,29\ g\ cm^{-3}$  em Latossolo Vermelho já ocorrem algumas limitações. A Ds por possuir estreita relação com os outros atributos do solo é amplamente usada como indicador na maioria das pesquisas e converge para o fato de que, com o aumento da Ds, ocorre

diminuição da  $\alpha$ , Ma, condutividade hidráulica, absorção iônica, assim como o consequente aumento da Mi e da resistência mecânica à penetração de raízes (LIMA *et al.*, 2007).

Conforme observado por Stefanoski *et al.* (2013), alterações na Ds implicam a diminuição da qualidade física do solo para o crescimento radicular das culturas, diminuição da aeração e mudanças indesejáveis no comportamento da água, como redução da infiltração. Vale ressaltar que a área de estudo possui um histórico de intenso uso agrícola, o que pode justificar alguns dos valores elevados para a densidade do solo. A Ds reflete o estado do solo num determinado momento, e a mesma relaciona-se diretamente com a resistência do solo a penetração, onde solos com valores de Ds mais elevados e baixos valores de umidade tendem a serem mais resistente a penetração. Ao avaliarem os atributos físicos de diferentes classes de solos, Araújo *et al.*, (2007) observaram que maiores valores para Ds foram registrados na camada superficial em áreas sob pastagem e cultivo convencional devido ao constante pisoteio dos animais e trânsito de máquinas e implementos agrícolas na área em estudo.

A densidade média de partículas foi de  $2,56 \text{ g cm}^{-3}$ , com variação entre os valores máximo e mínimo de  $2,81 \text{ g cm}^{-3}$  e  $2,10 \text{ g cm}^{-3}$ , respectivamente (Tabela 3). A Dp reflete as características mineralógicas do solo, sendo um atributo mais estável, porém pode sofrer alterações ocasionadas pelo uso e manejo do solo, principalmente pela incorporação de matéria orgânica no solo. Conforme Amaro Filho *et al.* (2007), mesmo em áreas consideradas homogêneas em que os solos pertencem a uma mesma unidade taxonômica, existe variação espacial de determinados atributos físicos, seja decorrente de fatores e processos pedogenéticos ou de práticas de manejo. Os valores médios de Dp, no presente trabalho corroboram com Campos (2019), onde os solos compreendidos na área de estudo apresentam características de solos mais desenvolvidos com níveis de intemperismos já avançados, apresentando teores de óxidos de ferro baixos próximos a  $2,6 \text{ g.cm}^{-3}$  em Dp (LESPCH, 2011).

A  $\alpha$  do solo apresentou-se de forma variada com média de 45%, com desvio padrão 7,18% e coeficiente de variação de 16% nos valores (Tabela 3). De acordo com Kemper; Chepil (1965), a porosidade total de um solo considerado ideal para o crescimento e desenvolvimento de plantas deve ser de 50%, sendo 33% de macroporos (aeração) e 67% de microporos para armazenamento de água.

Observou-se que as amostras que apresentaram valores mais altos de Ds apresentaram também os menores valores de  $\alpha$  e, conseqüentemente, baixo  $\Theta$ . Portanto o aumento de massa por unidade de volume resultando em aumento na Ds, na resistência à penetração de raízes e na Mi relativa, o que contribui para a redução linear da  $\alpha$  e da Ma

(BEUTLER *et al.*, 2005) e, conseqüentemente, pode causar modificações na retenção de água do solo decorrentes das alterações sofridas na distribuição do diâmetro de poros (FIGUEIREDO *et al.*, 2009). De forma análoga, solos com menores valores de densidade apresentaram melhores valores na  $\alpha$ , ou seja, possuem uma melhor distribuição do espaço poroso na matriz do solo, e elevados valores de umidade na base de volume.

Tais valores encontrados na área corroboram com dados apresentados por Ferreira (2010), nos quais inferiram que existe uma relação direta da  $\alpha_{total}$  com a  $D_s$ , o qual já foi discutido anteriormente que interfere diretamente na capacidade do solo de suportar cargas. Ainda, com a redução do espaço poroso, segundo Reichardt (2010), ocorre a redução do crescimento radicular, redução da movimentação vertical da água no solo e ainda no aumento da RP. No entanto, essas relações são mutáveis em função do manejo e das práticas agrícolas adotadas (HARTEMINK E MCBRATNEY, 2008; PRADO *et al.*, 2010).

A  $U_g$  apresentou uma mediana de 0, 2315 g g<sup>-1</sup> com uma amplitude de valores 0, 2254 g g<sup>-1</sup>, e uma variância de 0,0026 g g<sup>-1</sup> apontando assim que a variância dos pontos amostrais está próxima ao valor central amostral que é de 0, 2250 g g<sup>-1</sup>. O  $\Theta$  por sua vez apresentou uma média de 30, 85%, amplitude de 32% e um desvio padrão de 5, 87%. Com base nos valores apresentados para umidade  $U_g$  e  $\Theta$ , pode-se notar que a classe de solo tem forte influência nestes parâmetros físico-hídricos, a variação dos valores supracitados é diretamente influenciada pelos valores da granulometria,  $M_a$  e  $M_i$  e afeta diretamente a RP.

Na granulometria, as áreas de Cambissolo Háplico apresentaram uma média granulométrica 33% de argila, 45% de silte e 22% de areia, evidenciando que a predominância textural desses solos são de franca a franco argilosa siltosa. As áreas de Latossolo Amarelo apresentaram uma média de argila de 53%, silte 37% e areia 10% caracterizando áreas com predominância textural argilosa e muito argilosa. A mancha de Neossolo Litólico, por sua vez, apresentou uma granulometria mais arenosa, com argila de 28%, silte de 31% e areia com 41% apresentando assim uma textura de franca a franco argilosa. O Nitossolo Vermelho teve uma média de 54% argila, 31% silte e 15% de areia, apresentando assim uma classe textura de argilosa a muito argilosa. Campos (2019) apresenta que a área de estudo, está inserida na região das Cristas de Unaí, com o predomínio de Latossolos Vermelhos-Amarelos e Latossolos Vermelhos de textura argilosa ou muito argilosa, raramente média, o qual corrobora com os valores de argila, silte e areia encontrados (Tabela 3). No entanto, para os pontos 4, 5, 15, 40 e 41 foram encontrados valores de silte mais elevados (58,71%; 57,20%; 55,79%; 56,30% e 63,45%), tendo classe textural de Franco argilo siltosa a Franco siltosa, tais valores encontrados

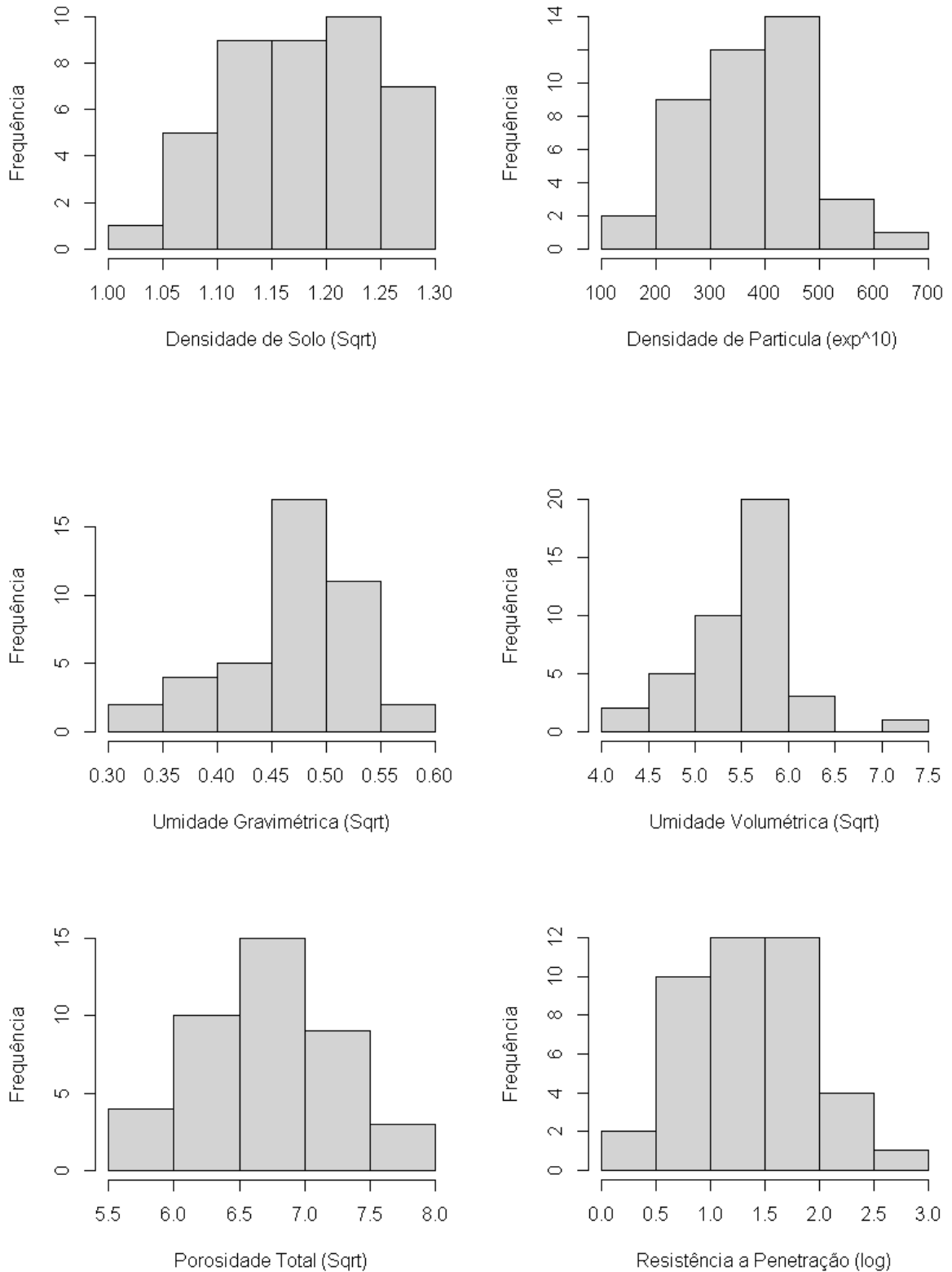
são explicados pelas características topográficas da área, uma vez que os pontos em questão estão localizados em áreas de baixada na fazenda são áreas propensas a acúmulo de sedimentos e matéria orgânica.

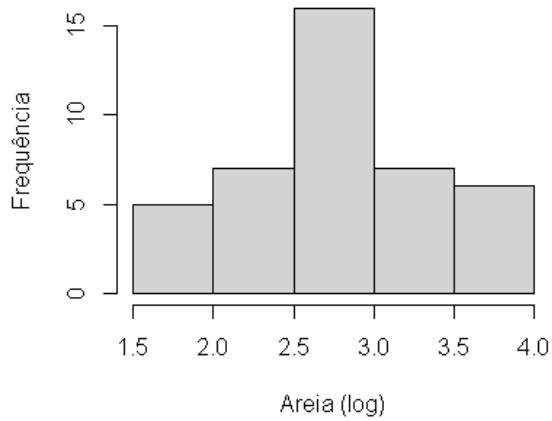
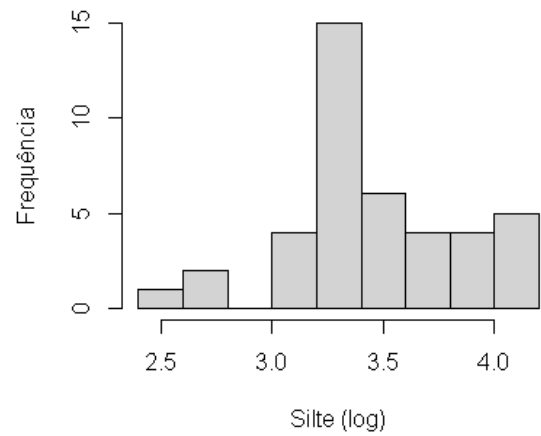
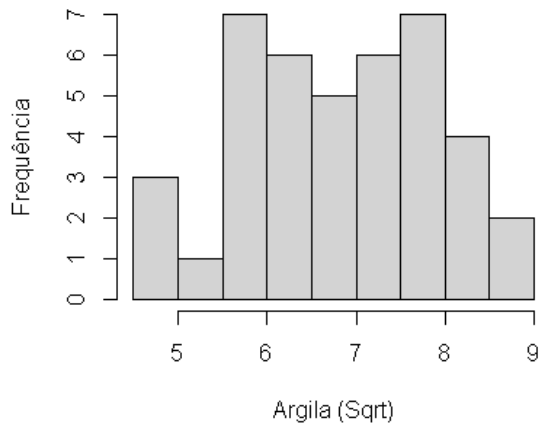
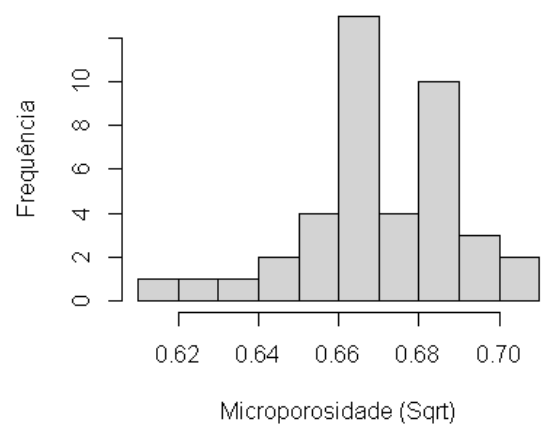
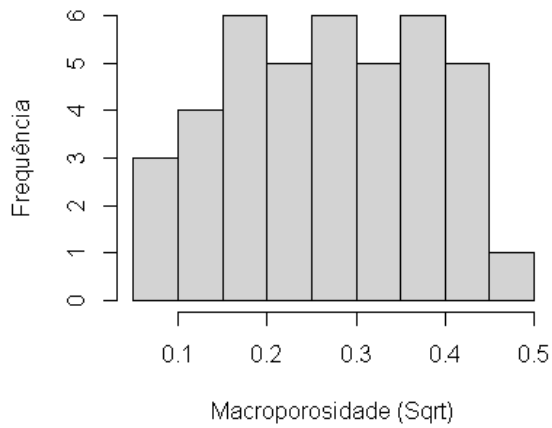
A RP por sua vez, apresentou-se de forma variada, tanto entre as mesmas classes de solo quanto entre a distribuição na área de estudo, tendo uma média de 4,53 MPa, um desvio padrão de 2,78 MPa e um coeficiente de variação de 61,37%, os valores observados de máximo e mínimo apresentou uma amplitude de elevada de aproximadamente 12,00 MPa, evidenciando assim a alta dispersão entre os valores de RP na área. Para uma mesma classe de solo, por exemplo Latossolo Vermelho que apresentou as maiores observações, foi encontrado uma amplitude de 10,94 MPa, o ponto 23 apresentou a maior resistência a penetração dentre as observações, conseqüentemente, uma Ds mais elevada de  $1,6182 \text{ g cm}^{-3}$ , sendo este o segundo maior valor para Ds observada, a menor Ug registrada de  $0,1140 \text{ g g}^{-1}$  e uma  $\alpha$  de 39,06%. A diferença entre os valores de RP dos pontos está associada as características físicas e morfológicas do solo e ainda ao uso e cobertura ao longo do tempo. Para verificação do perfil de resistência a penetração em profundidade dos pontos, consultar o Apêndice A.

## **5.2. Modelagem dos atributos e desempenho das FPT**

Os atributos que não apresentaram normalidade foram submetidos às seguintes transformações matemáticas: logarítmica (silte, areia e RP), raiz quadrada (Ds, Ug,  $\Theta$ ,  $\alpha$ , argila, Ma, Mi) e potência na base dez (Dp), a fim de se obter uma melhor aproximação dos dados a uma função de densidade de probabilidade gaussiana, com variância constante. A Figura 2 mostra os resultados obtidos com as normalizações representados por histograma de frequência.

**Figura 2: Histogramas de frequência dos atributos físico-hídricos do solo normalizados.**





Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

A Tabela 4 apresenta o resultado da matriz de correlação múltipla entre os dados normalizados. Não houve correlação satisfatória da RP com nenhum outro atributo físico-hídrico que comprovasse a possibilidade de modelagem utilizando apenas uma relação linear simples. No entanto, os baixos coeficientes de correlação entre a RP e os atributos  $D_p$ ,  $U_g$  e

argila, e entre estes mesmos atributos, são pré-requisitos para a condição de não colinearidade entre variáveis independentes de uma FPT (RIBEIRO JR, 2001).

**Tabela 4 – Matriz de correlação múltipla entre os atributos físico-hídricos com a RP.**

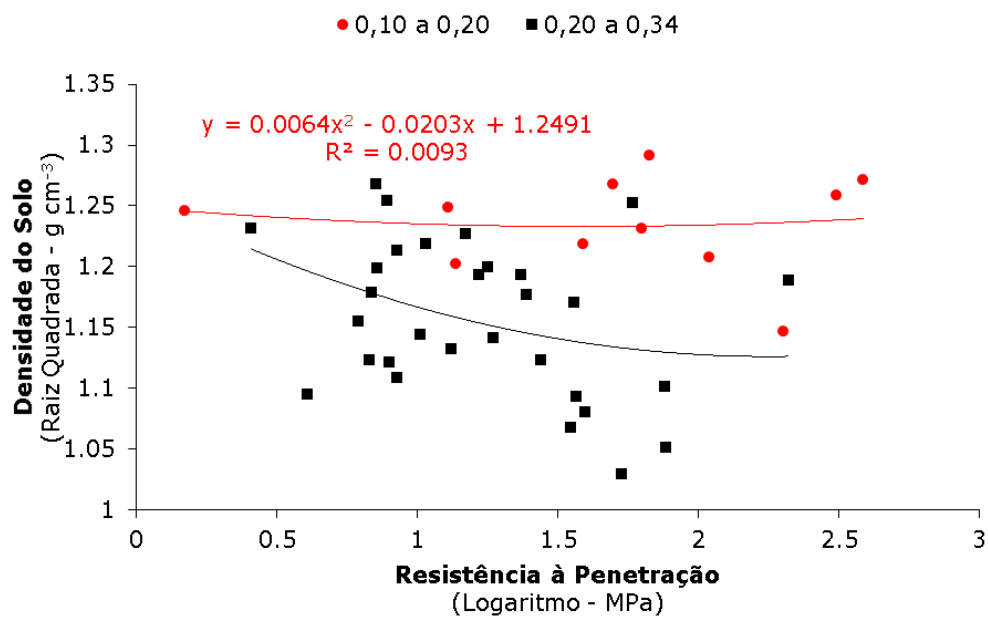
	Ds	Dp	Ug	$\Theta$	$\alpha$	Argila	Silte	Areia	Ma	Mi	RP
<b>DS</b>	1	-0.085	-0.654	-0.208	-0.881	-0.614	0.351	0.493	-0.923	0.052	0.015
<b>DP</b>		1	-0.195	-0.308	0.508	-0.077	-0.177	0.326	0.192	-0.362	0.015
<b>UG</b>			1	0.875	0.427	0.464	-0.07	-0.588	0.524	0.292	-0.263
<b>UV</b>				1	-0.009	0.193	0.16	-0.452	0.091	0.418	-0.344
<b><math>\alpha</math></b>					1	0.505	-0.409	-0.245	0.88	-0.238	-0.002
<b>Argila</b>						1	-0.72	-0.459	0.436	0.237	0.071
<b>Silte</b>							1	-0.191	-0.381	0.389	-0.348
<b>Areia</b>								1	-0.193	-0.79	0.295
<b>Ma</b>									1	-0.366	0.105
<b>Mi</b>										1	-0.372
<b>RP</b>											1

Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partícula; Ug: umidade gravimétrica;  $\Theta$ : umidade volumétrica;  $\alpha$ : porosidade total; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade e RP: resistência a penetração.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

Por meio da relação direta entre a RP e atributos do solo (Ds,  $\Theta$ ,  $\alpha$ , Ma, Mi) normalizados, obtiveram-se os seguintes gráficos de dispersão (Figuras 3, 4, 5, 6 e 7) dos dados amostrados categorizados pela Ug em duas séries (0,1 a 0,2 g g<sup>-1</sup> e 0,2 a 0,3 g g<sup>-1</sup>).

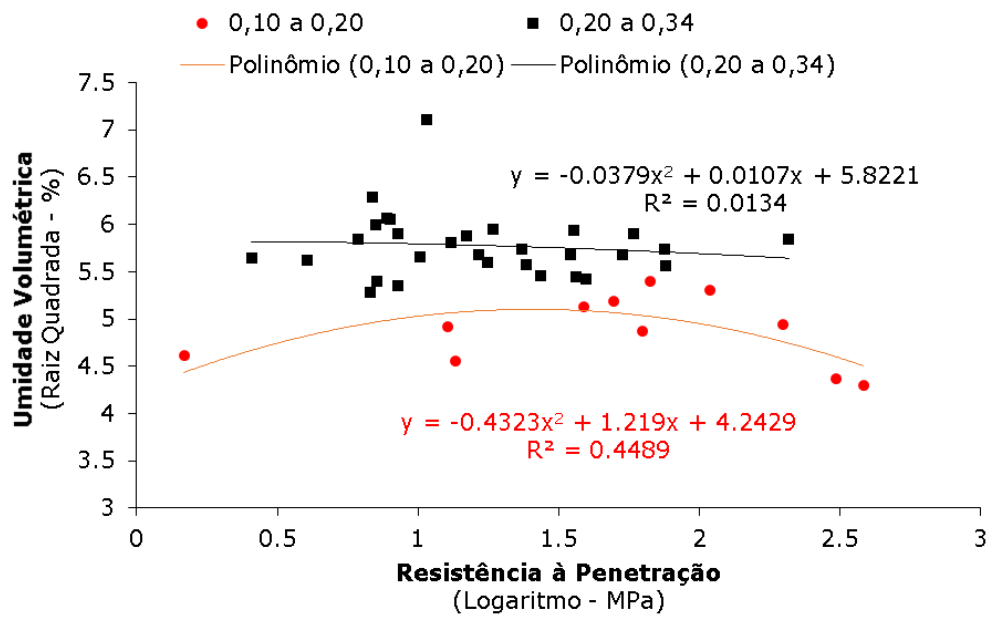
**Figura 3 – Gráfico de dispersão entre a densidade do solo e a resistência à penetração com dados normalizados.**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

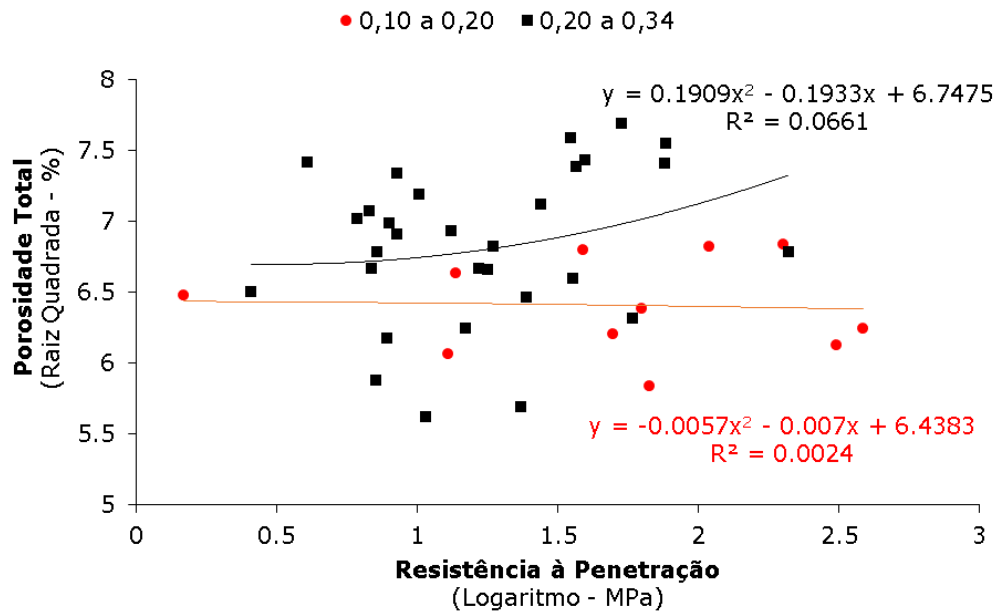


Figura 4 – Gráfico de dispersão entre a umidade volumétrica e a resistência à penetração com dados normalizados.



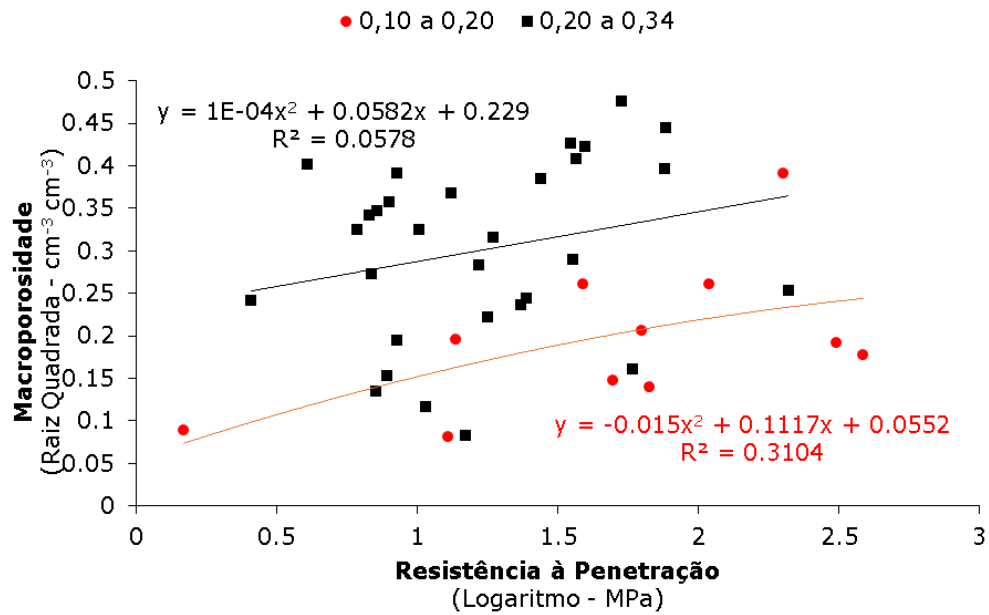
Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

Figura 5 – Gráfico de dispersão entre a porosidade total e a resistência à penetração com dados normalizados.



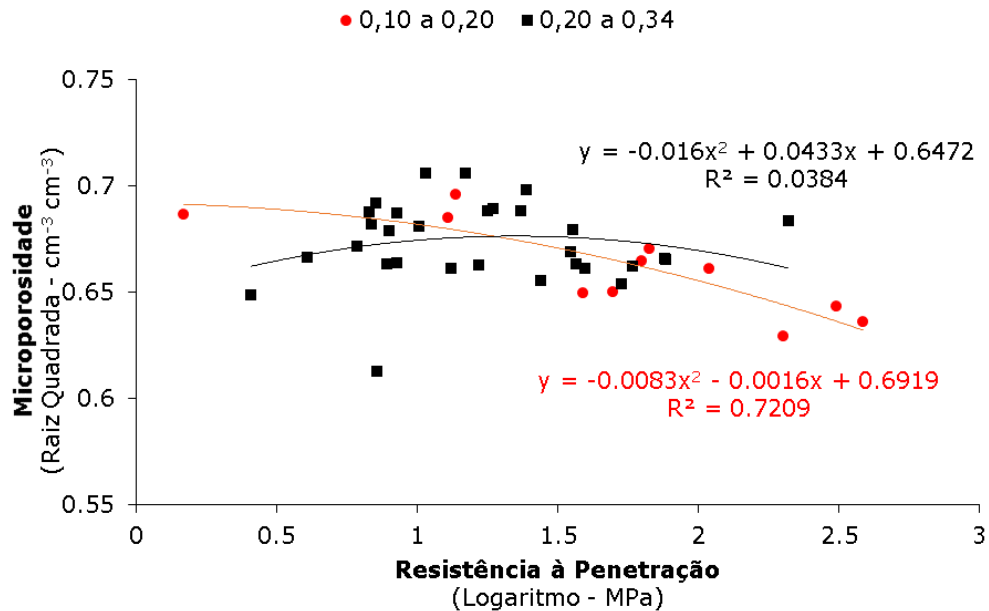
Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

Figura 6 – Gráfico de dispersão entre a macroporosidade e a resistência à penetração com dados normalizados.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

Figura 7 – Gráfico de dispersão entre a microporosidade e a resistência à penetração com dados normalizados.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

Os gráficos de dispersão foram modulados por base na polinomial de segunda ordem e obtidos os seguintes valores de  $R^2$ , conforme mostrou acima. Dentre as modelagens

realizadas, apenas o atributo  $M_i$  para série 0,10 – 0,20 g g<sup>-1</sup> apresentou um  $R^2$  que explicou 72% da variabilidade dos dados, podendo assim ser utilizada para a mensuração da  $M_i$  com  $U_g$  até de 0,20 g g<sup>-1</sup>. No entanto, não foram obtidos coeficientes de determinação satisfatórios que comprovassem a possibilidade de modelar os atributos físico-hídricos investigados utilizando apenas os valores de RP como variável independente em regressões polinomiais simples de segunda ordem.

A performance das FPT obtidas para as quantificações dos atributos investigados ( $D_s$ ,  $\Theta$ ,  $\alpha$ ,  $M_a$ ,  $M_i$ ) através de regressões polinomiais múltipla de 2º ordem com os atributos RP,  $D_p$ ,  $U_g$  e argila como variáveis independentes é apresentada na Tabela 5.

**Tabela 5 – Performance das FPT (calibração e teste) com seus coeficientes de determinação e RMSE para cada atributo investigado com e sem a RP e atributos auxiliares ( $D_p$ ,  $U_g$  e Argila).**

	Densidade de Solo com RP				Densidade de Solo sem RP			
	Calibração		Teste		Calibração		Teste	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
Simulação 01	0.7635	0.0748	0.2512	0.1373	0.6023	0.0949	0.6804	0.0931
Simulação 02	0.6750	0.0866	0.5713	0.1012	0.6937	0.0861	0.4376	0.1147
Simulação 03	0.8083	0.0644	0.4615	0.1200	0.6804	0.0885	0.2913	0.1022
Simulação 04	0.6363	0.0822	0.5347	0.1257	0.7441	0.0805	0.2533	0.1250
Simulação 05	0.6972	0.0788	0.2419	0.1295	0.7497	0.0785	0.2274	0.1180
	Umidade Volumétrica com RP				Umidade Volumétrica sem RP			
	Calibração		Teste		Calibração		Teste	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
Simulação 01	0.8985	1.5827	0.5419	4.9178	0.8743	1.8898	0.4779	4.7413
Simulação 02	0.9160	1.3316	0.4118	5.4741	0.9152	1.8345	0.6797	2.5657
Simulação 03	0.7951	1.5784	0.7251	4.5780	0.9021	1.6731	0.1715	5.7091
Simulação 04	0.9575	1.3681	0.2284	2.7812	0.9296	1.6801	0.3980	3.4287
Simulação 05	0.9110	1.6172	0.4906	4.5199	0.8917	1.9208	0.7818	2.4908
	Porosidade com RP				Porosidade sem RP			
	Calibração		Teste		Calibração		Teste	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
Simulação 01	0.7187	3.2815	0.6820	4.9238	0.8656	2.7844	0.0783	5.0778
Simulação 02	0.8212	3.0880	0.6587	3.3808	0.8347	3.0347	0.4755	4.4386
Simulação 03	0.7348	3.5808	0.8649	2.5268	0.8273	2.8904	0.5170	5.0195
Simulação 04	0.8671	2.6129	0.3112	5.7453	0.7842	3.3575	0.4119	5.1667
Simulação 05	0.8348	2.7969	0.4346	5.4111	0.8133	3.3310	0.5207	3.8158
	Macroporosidade com RP				Macroporosidade sem RP			
	Calibração		Teste		Calibração		Teste	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
Simulação 01	0.6623	0.0316	0.3500	0.0506	0.6725	0.0358	0.3987	0.0420
Simulação 02	0.6920	0.0322	0.3962	0.0492	0.6196	0.0356	0.5266	0.0448
Simulação 03	0.7077	0.0318	0.5574	0.0418	0.5141	0.0399	0.5529	0.0434
Simulação 04	0.7392	0.0299	0.2170	0.0564	0.5816	0.0392	0.4886	0.0423
Simulação 05	0.7163	0.0338	0.1787	0.0462	0.6715	0.0345	0.4722	0.0438

	Microporosidade com RP				Microporosidade sem RP			
	Calibração		Teste		Calibração		Teste	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
Simulação 01	0.7302	0.0128	0.0357	0.0299	0.3733	0.0204	0.2480	0.0243
Simulação 02	0.4367	0.0209	0.1311	0.0212	0.3716	0.0199	0.2231	0.0259
Simulação 03	0.4477	0.0179	0.2377	0.0267	0.2968	0.0201	0.3742	0.0250
Simulação 04	0.4033	0.0208	0.3967	0.0197	0.3328	0.0197	0.2402	0.0267
Simulação 05	0.2869	0.0191	0.3384	0.0270	0.3856	0.0203	0.2568	0.0241

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

Para cada atributo físico-hídrico investigado, foram realizadas cinco simulações tanto na fase de calibração quanto no teste. Na fase de calibração independente do atributo investigado, a RP não entrou de forma independente na FPT, no entanto, o mesmo atributo quando associado com outro atributo dependente (Dp, Ug, argila) se apresentou de forma significativa. Em outras palavras, quando a variável RP multiplicada por outro atributo dependente, tem-se uma melhor performance para as modelagens com RP. Na Tabela 6, o resumo com as médias de  $R^2$  e RMSE para a calibração e teste com e sem a RP é apresentado.

**Tabela 06 – Médias dos valores de  $R^2$  e RMSE das FPT para calibração e teste com e sem a RP.**

	Com Resistência à Penetração				Sem Resistência à Penetração			
	Calibração		Teste		Calibração		Teste	
	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
<b>Ds</b>	0.72	0.0774	0.41	0.1227	0.69	0.0857	0.38	0.1106
<b>Θ</b>	0.90	1.4956	0.48	4.4542	0.90	1.7997	0.50	3.7871
<b>α</b>	0.80	3.0720	0.59	4.3976	0.83	3.0796	0.40	4.7037
<b>Ma</b>	0.70	0.0318	0.34	0.0488	0.61	0.0370	0.49	0.0433
<b>Mi</b>	0.46	0.0183	0.23	0.0249	0.35	0.0201	0.27	0.0252

Ds: densidade do solo; Θ: umidade volumétrica; α: porosidade total; Ma: macroporosidade e Mi: microporosidade.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

A Ds apresentou um  $R^2$  de 72% e RMSE de  $0,0774 \text{ g cm}^{-3}$  para a fase de calibração e 41% e RMSE de  $0,1227 \text{ g cm}^{-3}$  de teste, durante as cinco simulações com RP. Observou-se que a RP não se apresentou de forma independente na FPT para esse atributo investigado, mas sempre associada a um outro atributo, com a maior frequência de ocorrência para a densidade de partícula, umidade gravimétrica e argila. Ao se realizar a modelagem das FPT notou-se que a cada nova simulação a função genérica se auto ajustava, as equações obtidas para cada simulação (calibração e teste) com e sem RP estão apresentadas no Apêndice B. Dentre as simulações com RP, a Dp se associou de forma multiplicativa com a RP em quatro das cinco simulações. As FPT sem RP apresentaram um  $R^2$  de 69% e RMSE de  $0,0857 \text{ g cm}^{-3}$  para a fase

de calibração e 38% e RMSE de 0,1106 g cm<sup>-3</sup> de teste, o atributo argila se apresentou nas cinco simulações em todas de forma isolada e associada, ora a Dp ora Ug e dentre as simulações a Dp aparece em apenas duas simulações das cinco. As simulações para teste sem RP apresentaram valores de R<sup>2</sup> baixos quando analisado com RP (Tabela 5), no entanto, ao se realizar o teste Tukey (Tabela 7), verifica-se que médias seguidas pela mesma letra tanto na linha quanto na coluna, não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

**Tabela 7 – Teste de Tukey ao nível de significância de 5% para Densidade do solo com e sem RP.**

Análise de variância	R <sup>2</sup>	RMSE
GL resíduo	17	17
F tratamentos	0.41	0.72
Média geral	0.33	0.02
Desvio-padrão	0.12	0.00
DMS (5%)	0.11	0.00
CV (%)	36.44	12.33
Teste de Tukey a 5%:		
CRP	0.34 a	0.02 a
SRP	0.31 a	0.02 a

GL: graus de liberdade; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação; CRP: com resistência à penetração; SRP: sem resistência à penetração.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

A  $\Theta$  apresentou-se dentre todas as FPT (com e sem RP) os melhores valores de R<sup>2</sup> para a fase de calibração com um percentual de 90%, tanto com e sem RP. Para a fase de calibração, obteve-se aproximadamente um RMSE de 1,50%; já na fase de teste um R<sup>2</sup> de 48% e RMSE de 4,45%. Na modelagem da  $\Theta$  houve uma dependência maior do atributo Ug durante as cinco simulações, com maior frequência associado ao atributo argila. Já, para as FPT sem RP, obtivemos um RMSE de 1,80% na fase de calibração e 3,78% no teste, com um R<sup>2</sup> de 50% apresentando uma eficiência melhor do que com RP.

Assim como na modelagem anterior a dependência associativa à variável Ug para as FPT sem RP também ocorreu, sendo que dentre as cinco simulações, a simulação 4 (Tabela 5) a variável entrou de forma isolada e com associação a Dp e argila, porém dentre as simulações a última que apresentou o melhor R<sup>2</sup> de 78% e o menor RSME de 2,49% quando se utilizou todas as variáveis dependentes para a modelagem. Assim como para a Ds, ao se realizar teste Tukey (Tabela 8) com os R<sup>2</sup> e RMSE da etapa de calibração e teste com e sem RP, verificou-se que médias não difere significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

**Tabela 8 – Teste de Tukey ao nível de significância de 5% para Umidade Volumétrica com e sem RP.**

<b>Análise de variância</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RMSE</b>
GL resíduo	17	17
F tratamentos	0.05	0.21
Média geral	0.69	2.88
Desvio-padrão	0.15	0.88
DMS (5%)	0.14	0.83
CV (%)	21.49	30.65
Teste de Tukey a 5%:		
CRP	0.69 a	2.97 a
SRP	0.70 a	2.79 a

GL: graus de liberdade; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação; CRP: com resistência à penetração; SRP: sem resistência à penetração.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

As FPT obtidas para o atributo porosidade total, apresentou para a fase com RP um R<sup>2</sup> de 80% e um RMSE de 3,07% na etapa de calibração, um R<sup>2</sup> de 59% e RMSE de 4,40% na etapa de teste. O atributo Ug se associou de forma isolada na modelagem e dependente com a argila para todas as simulações, o que pode ser explicado devido a relação entre a umidade gravimétrica e a porosidade, uma vez que quanto maior o valor da porosidade do solo maior é a capacidade de armazenamento de água pelo mesmo (BUSKE, 2013). A RP associou-se com maior frequência com a Dp e a argila de forma multiplicativa, e não foi registrado ao decorrer das simulações nenhuma associação multiplicativa com a Ug. Já, as FPT sem RP apresentaram para calibração um R<sup>2</sup> de 83% e um RMSE de 3,07% na fase teste um R<sup>2</sup> de 40% e um RMSE de 4,7%. Na modelagem destas FPT temos que as variáveis dependentes argila e Dp apresentaram uma associação em todas as simulações, sendo que a Dp ainda para essas simulações entrou também como elevado a potência 2. Ao realizar o teste Tukey (Tabela 9) assim como a Ds e  $\Theta$  as médias não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade, mesmo apresentando entre si uma amplitude grande nos valores das simulações (Tabela 5).

**Tabela 9 – Teste de Tukey ao nível de significância de 5% para Porosidade Total com e sem RP.**

Análise de variância	r <sup>2</sup>	RMSE
GL resíduo	17	17
F tratamentos	1.33	0.21
Média geral	0.65	3.81
Desvio-padrão	0.16	0.76
DMS (5%)	0.15	0.72
CV (%)	23.75	20.05
Teste de Tukey a 5%:		
CRP	0.69 a	3.73 a
SRP	0.61 a	3.89 a

GL: graus de liberdade; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação; CRP: com resistência à penetração; SRP: sem resistência à penetração.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

A Ma foi o atributo investigado que apresentou a menor amplitude nos valores de R<sup>2</sup> entre as simulações tanto com e sem RP como calibração e teste (Tabela 5). Para fase calibração as FPT com RP apresentaram um R<sup>2</sup> médio de 70% com RMSE de 0,0318 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> e na fase teste um R<sup>2</sup> aproximado de 34% e um RMSE de 0,0488 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (Tabela 6). Na modelagem das FPT a argila apareceu 80% das simulações de forma isolada sem associação a outra variável, ainda, para todas as simulações ela apareceu associada a Ug. Já as FPT sem RP temos que o R<sup>2</sup> na etapa de calibração foi de 61% e o RMSE de 0,0370 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> e no teste um R<sup>2</sup> de 48% e o RMSE de 0,0433 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. Em 80% das simulações as variáveis Ug e argila entraram na modelagem de forma isolada, mas com a argila associando também a Dp durante as simulações. Temos que todas as variáveis dependentes foram utilizadas durante as simulações para a inferência dos atributos investigados. O teste Tukey (Tabela 10) para a Ma, assim como os demais não difere significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.

**Tabela 10 – Teste de Tukey ao nível de significância de 5% para Macroporosidade com e sem RP.**

Análise de variância	r <sup>2</sup>	RMSE
GL resíduo	17	17
F tratamentos	0.34	0.01
Média geral	0.54	0.04
Desvio-padrão	0.11	0.00
DMS (5%)	0.10	0.00
CV (%)	20.16	10.40
Teste de Tukey a 5%:		
CRP	0.52 a	0.04 a
SRP	0.55 a	0.04 a

GL: graus de liberdade; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação; CRP: com resistência à penetração; SRP: sem resistência à penetração.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

A Mi o último atributo investigado, mesmo apresentando um R<sup>2</sup> que explicou 72% da variabilidade dos dados para série 0,10 – 0,20 g g<sup>-1</sup> no gráfico de dispersão com os dados normalizados (Gráfico 5) e tendo apenas a RP como variável independente, passou pela modelagem da FPT a fim de englobar maior parte dos dados amostrais. Foi obtido após a modelagem e simulação da FPT um R<sup>2</sup> para calibração de 70% e um RMSE de 0,0318 g g<sup>-1</sup> e no teste um R<sup>2</sup> de 34% e o RMSE de 0,0488 g g<sup>-1</sup> com a variável de RP. Já sem RP, obteve-se R<sup>2</sup> de 61% e RMSE de 0,0370 g g<sup>-1</sup> na calibração e R<sup>2</sup> de 49% com um RMSE de 0,0433 g g<sup>-1</sup>. Para todas as simulações, com e sem RP, a argila foi associada a outro atributo (Ug, Dp e RP), porém as simulações sem RP a argila entrou ainda como variável isolada. O teste Tukey (Tabela 11) para a Mi, assim como os demais atributos investigados, não difere significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade.



**Tabela 11 – Teste de Tukey ao nível de significância de 5% para Microporosidade com e sem RP.**

Análise de variância	R <sup>2</sup>	RMSE
GL resíduo	17	17
F tratamentos	0.41	0.72
Média geral	0.33	0.02
Desvio-padrão	0.12	0.00
DMS (5%)	0.11	0.00
CV (%)	36.44	12.33
Teste de Tukey a 5%:		
CRP	0.34 a	0.02 a
SRP	0.31 a	0.02 a

GL: graus de liberdade; DMS: diferença mínima significativa; CV: coeficiente de variação; CRP: com resistência à penetração; SRP: sem resistência à penetração.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2021.

## 6. CONCLUSÃO

Com base neste estudo, apenas os dados de RP são insuficientes, como variáveis independentes, para produzirem FPT satisfatórias para a quantificação de  $D_s$ ,  $\Theta$ ,  $\alpha$ ,  $M_a$  e  $M_i$ . No entanto, ao serem utilizadas outras variáveis independentes, em especial DP, UG e argila, em conjunto com RP, as FPT tornam-se eficientes para tais predições, exceto para a  $M_i$ , principalmente na fase de calibração da modelagem. Apesar das FPT modeladas sem RP apresentarem resultados satisfatórios, a incorporação deste atributo confere a estas funções a possibilidade de quantificações contínuas em profundidade, na forma de perfis.

## REFERÊNCIAS

AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R. F. D.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 415-422, 2007.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p.1099- 1108, 2007.

ARSHAD M.A., LOWERY B., AND GROSSMAN B. 1996. Physical Tests for Monitoring Soil Quality. In: Doran J.W., Jones A.J., editors. **Methods for assessing soil quality**. Madison, WI. p 123-41.

BENITTES, V.M.; MACHADO, P.O.A.; FIDALGO, E.C.C.; COELHO, M.R.; MADARI, B.E.; LIMA, C.X. Funções de Pedotransferência para estimativa de densidade dos solos brasileiros. Rio de Janeiro, **Embrapa Solos**. 2006.

BERNARDO, Salassier. **Manual de Irrigação** / Salassier Bernardo, Antônio Alves Soares, Everardo Chartuni Mantovani. ed.–Viçosa: Editora UFV, 2006. ISBN 85-7269-242-8.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.843-849, 2005.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, New York, v. 9, p.177-213, 1989.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SOARES, J.M.D. Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de solo franco arenoso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, p.1646-1653, 2007.

BUDIMAN, M.; MCBRATNEY, A.B.; MENDONÇA-SANTOS, M.L.; SANTOS, H.G. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do Solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50 p.. - (Embrapa Solos. Documentos; n. 45).

BUSKE, T. C. **Comportamento da Umidade do Solo Determinada por Métodos Expeditos**. 2013. 68 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria, RS, 2013.

CAMPOS, T. P. **Relação Solo-Paisagem em uma Topossequência da Bacia do Rio Preto, Minas Gerais: um estudo na Fazenda do ICA/UFVJM**, 2019. Monografia (Bacharel Interdisciplinar em Ciências Agrárias). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Unaí-MG.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. (1990). Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.3, p.99- 105.

CASTRO, N. M. S. **Mapeamento e monitoramento da umidade do solo através de Índices Espectrais de Vegetação**, 2019. Monografia (Bacharel Interdisciplinar em Ciências Agrárias). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Unaí-MG.

CENTURION, JF; FREDDI, OS; ARATANI, RG; METZNER, AFM; BEUTLER, AN & ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e damineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31: 199-209, 2007.

COELHO, Eugênio Ferreira; COELHO FILHO, Maurício Antônio; OLIVEIRA, Sizernando Luiz de. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. **Bahia Agrícola**, Bahia, Ba, v. 1, n. 7, p.57-60, set/2005.

COSTA, A. **Retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina: Avaliação e geração de funções de pedotransferência**, 2012. 423 f. Tese (Doutorado em Manejo do solo), Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Lages SC.

COSTA, L. V. B; SOARES, W. A. Avaliações de Funções de Pedotransferência para Solos Brasileiros. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 14, n. 4, p. 2028-2041, ago. 2021. ISSN 1984-2295. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/245146>>. Acesso em: ago. 2021. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2028-2041>.

DECHEN, S.C.F.; TELLES, T.S.; GUIMARÃES, M. de F.; MARIA, I.C. de. (2015). Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v.74, n.2, p.224-233.

EICHERT, J.; M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade do solo e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista de Ciência Ambiental**, v.27, p. 29-48, 2003.

EUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um latossolo vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1223-1232, 2007.

FERREIRA, M.M. **Caracterização Física do Solo**. In: van Lier, Q.J. (Ed.). Física do Solo. Viçosa: SBCS, 2010. chap. I, p. 1-27.

FIGUEIREDO, C. C.; SANTOS, G. G.; PEREIRA, S.; NASCIMENTO, J. L.; ALVES JÚNIOR, J. Propriedades físico-hídricas em Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.146-151, 2009.

HAKANSSON, I. & LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil Tillage Res.**, 53:71-85, 2000.

HARTEMINK, A.E.; MCBRATNEY, A. A soil science renaissance. **Geoderma**, v.148, p.123- 129, 2008.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.35. p.1493-1500, Julho. 2000.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C. A. Methods of soil analysis. Madison, **American Society Agronomy**, p. 499-510, 1965.

LEPSCH, Igor F. **19 Lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. ISBN 978-85-7975-029-8.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Adv.Soil**. Califórnia, v. 1, n. 2, p. 277-294, 1985.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da Água no Solo**. 2. ed. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012. (Acadêmica 61). ISBN 978-85-314-1384-1.

LIBARDI, Paulo Leonel. **Dinâmica da Água no Solo**. 2. ed. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012. (Acadêmica; 61). ISBN 978-85-314-1384-1.

LIER, Q.J. **Física do solo**. Livro, Viçosa: Edi ufv, 2016.

LIMA, C.G.R.; CARVALHO, M.P.; MELLO, L.M.M. et al. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.5, p.1233-1244, 2007.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.217-223, 2006.

LIMA, K. E. A. **Resistência mecânica de um latossolo vermelho à penetração: comparação de penetrômetros, ajustes de modelos e correção da umidade**. Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Rondonópolis, 2019.

LOPES, A. K. A. **Veredas do Noroeste de Minas Gerais: Caracterização dos solos sob diferentes condições ambientais**, 2018. Monografia (Bacharel Interdisciplinar em Ciências Agrárias), Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Unai-MG.

MEDINA, H.P.; GROHMANN, F. **Disponibilidade de água em alguns solos sob cerrado**. *Bragantia*, v.25, p.65-75, 1966.

MICHELON, C. J., CARLESSO, R., OLIVEIRA, Z. B., KNIES, A. E., PETRY, M. T., MARTINS, J. D., 2010. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural** 40, 848-853.

MOLIN, J.P.; DIAS, C.T.S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.584-590, 2012.

NAIME, U.J.; MOTTA, P.E.F.; SILVA, D.C.; SIMÃO, M.L.R.; SANTOS, A.J.R. Solos e avaliação do potencial agrossilvipastoril das microrregiões Paracatu e Unai - Minas Gerais. Belo Horizonte: **EPAMIG**, 2014. 106p.: il.; ISBN: 978-85-99764-39-8.

NASCIMENTO, D. V. **Funções de pedotransferência para estimar a umidade em solos cultivados com cana-de-açúcar na zona da mata de Pernambuco**, 2015. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife PE.

NEBEL, A. L. C. **Funções de pedotransferência e estrutura de variabilidade espacial da retenção de água em solos de várzea do Rio Grande do Sul**, 2019. 140 f. Tese (Doutorado em Ciências – área de conhecimento: Solos). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas RS.

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; RODRIGUES, J. J. V.; MARQUES, A. F. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:26:315-323, 2002.

OTTONI, M.V.; OTTONI FILHO, T.B.; SCHAAP, M.G.; LOPES-ASSAD, M.L.R.C.; ROTUNNO FILHO, O.C. Hydrophysical database for Brazilian soils (HYBRAS) and pedotransfer functions for water retention. **Vadose Zone Journal**, v.17, p.1-17, 2018.

PICARD, R.R.; COOK, R.D. Cross-validation of regression models. **Journal of the American Statistical Association**, v.79, p.575-583, 1984.

PRADO, R.B. et al. **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. 486 p.

RANZANI, G. **Manual de Levantamento de Solos**. Livro, ed. Edgard Blucher, 1969.

RAUBER, M. J. **Estimativa da retenção e disponibilidade de água para os solos do Rio Grande do Sul**. Cerro Largo, 2019 Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2019.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; Horn, R. Mecânica do Solo. In: van Lier, Q.J. (Ed.). **Física do Solo**. Viçosa: SBCS, 2010. chap. II, p. 29-102.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Propriedades físicas do solo. **Centro de Ciências Rurais**. Mai. 2006.

RIBEIRO Jr., J.I. **Análises estatísticas no SEAG**. Universidade Federal de Viçosa. 310p. 2001.

RUBISMAR STOL; THURLER, A. M; BACCHI, O. O. S; REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35:447-459, 2011.

SANTOS H.G; JACOMINE, P. K. T; ANJOS, L. H. C dos; OLIVEIRA, V. A de; ARAÚJO FILHO, J. C; OLIVEIRA, J. B. CUNHA, T. J.. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5. Ed. Brasília: Embrapa Solos; 2018.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:1-10, 2008.

SS SHAPIRO, MB WILK, An analysis of variance test for normality (amostras completas), **Biometrika**, Volume 52, Issue 3-4, December 1965, Pages 591-611, <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F.A.; PACHECO L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.17, n. 12, p. 120-132, 2013.

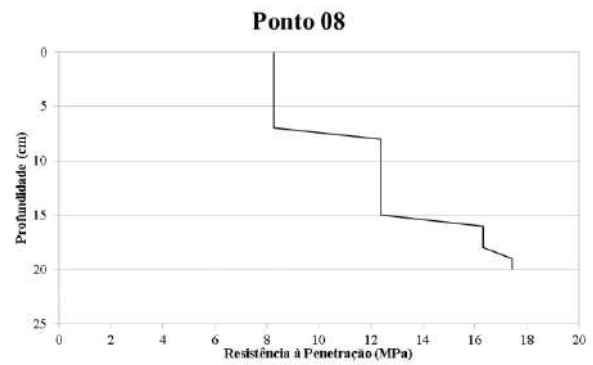
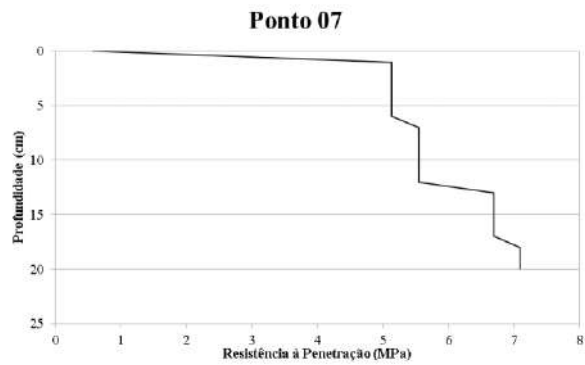
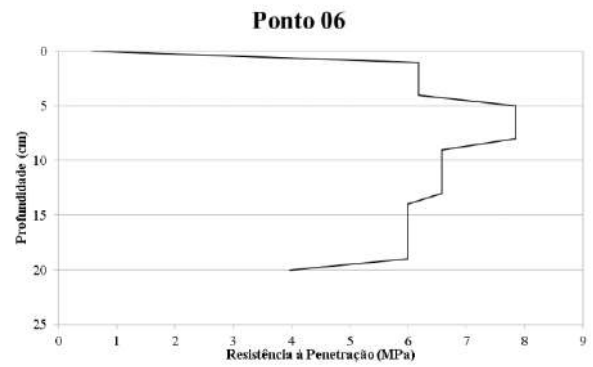
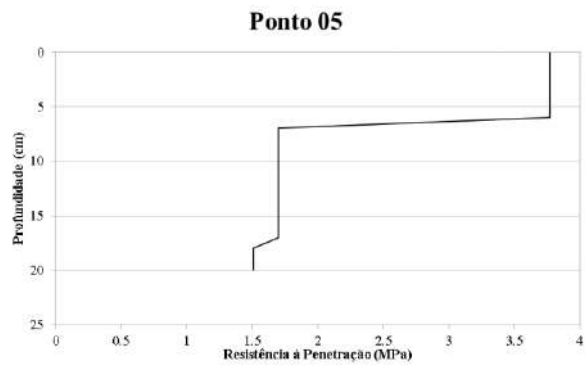
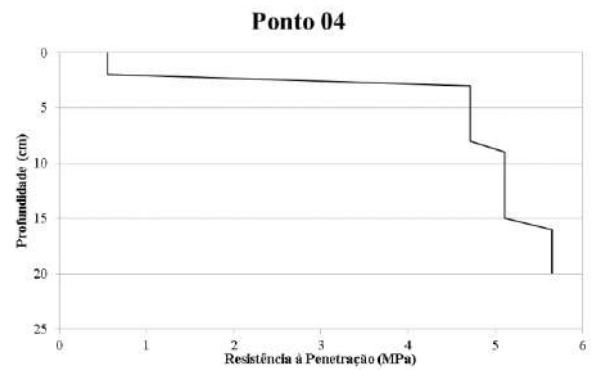
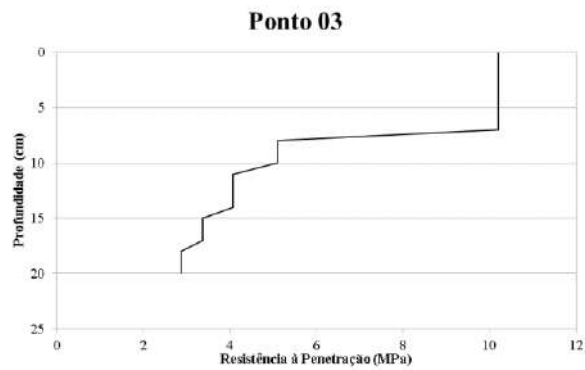
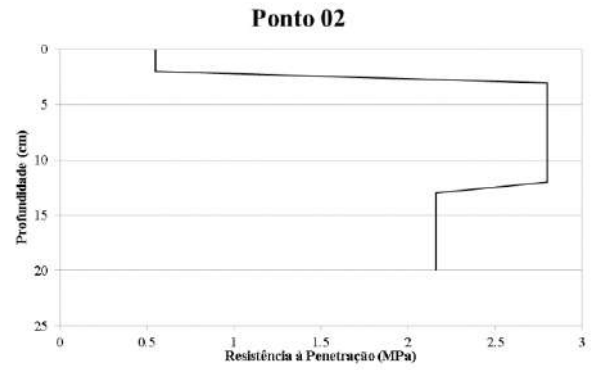
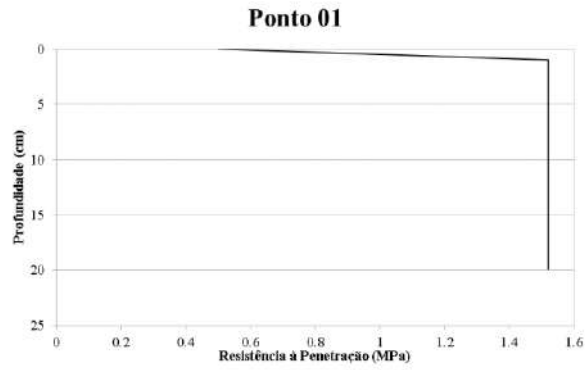
STOLF, R.; THURLER, A.M.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.447-449, 2011.

TEIXEIRA PC, Donagema GK, Fontana A, Teixeira WG. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. Ed. Brasília: Embrapa Solos; 2017.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from Southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v.92, p.104-113, 2007.

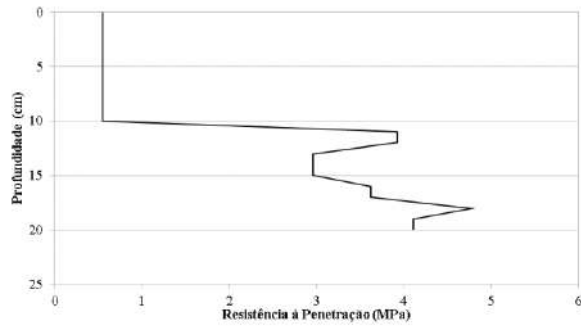
## APÊNDICE A

Curvas de resistência a penetração em profundidade de cada ponto amostral.

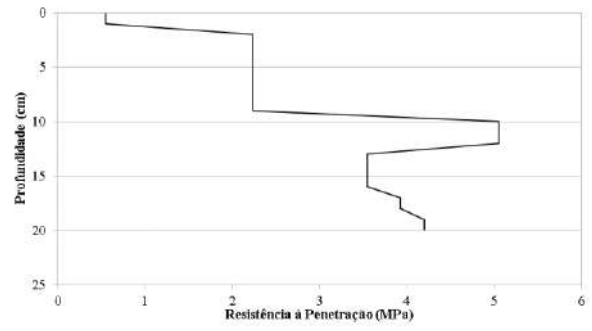




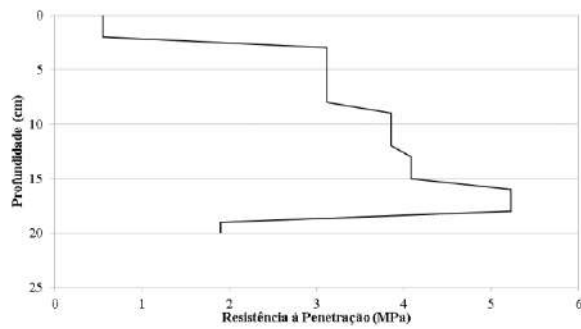
**Ponto 09**



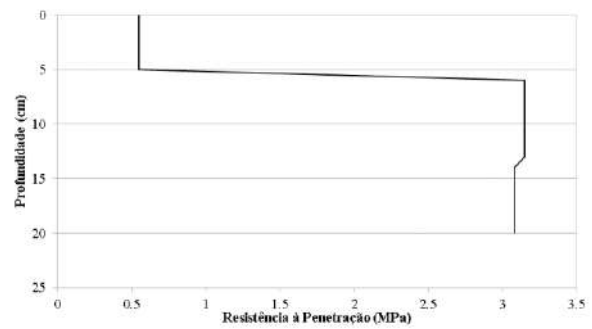
**Ponto 10**



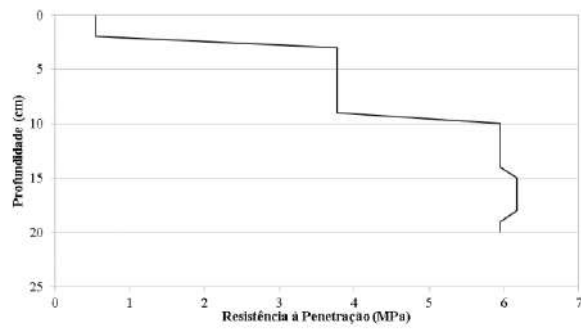
**Ponto 11**



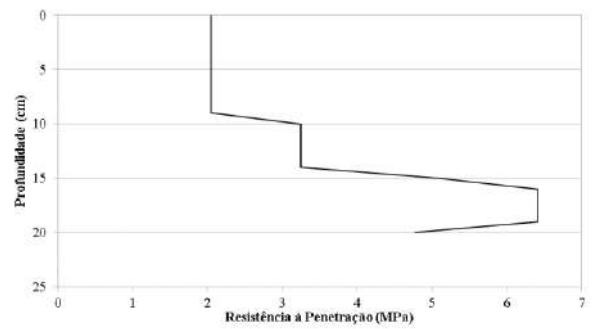
**Ponto 12**



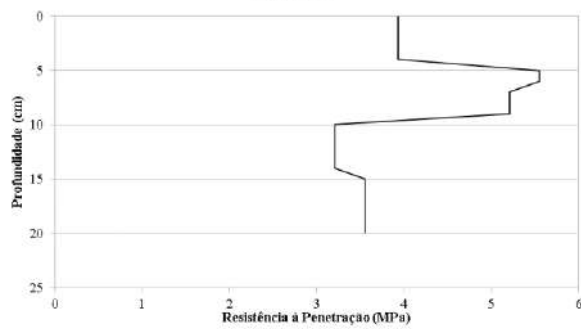
**Ponto 13**



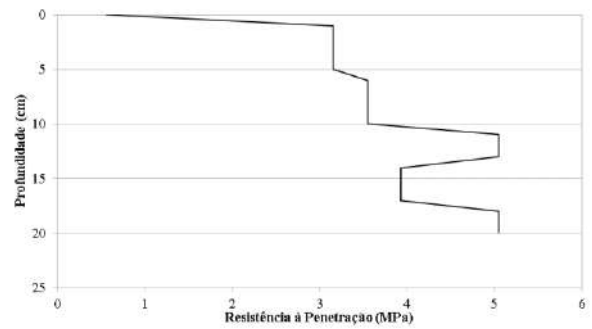
**Ponto 14**

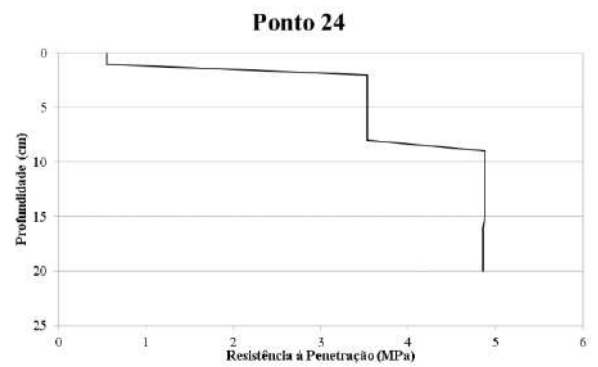
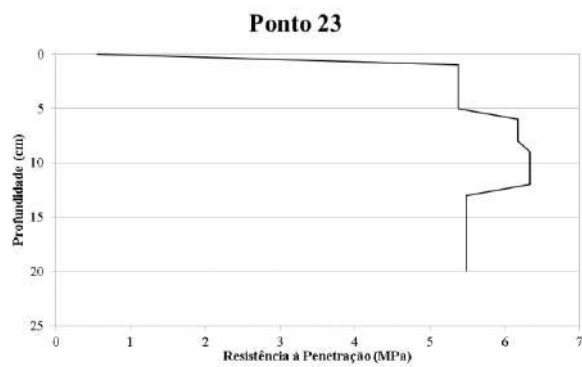
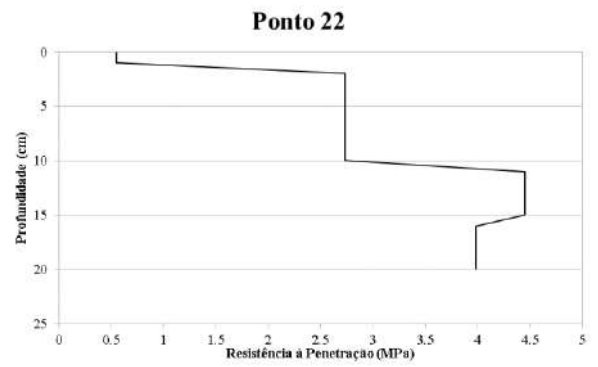
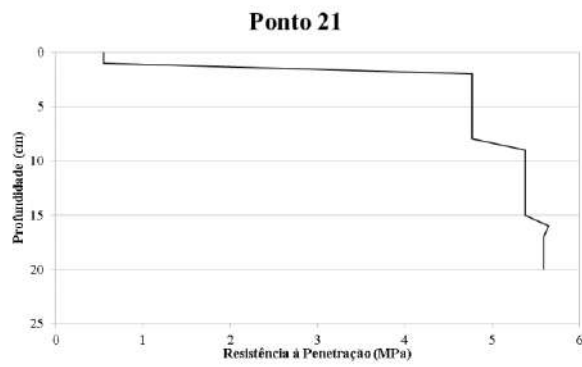
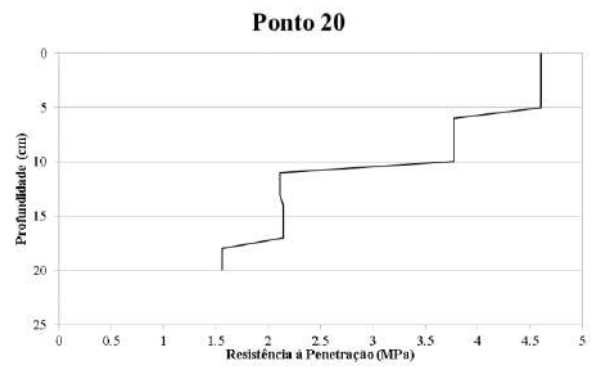
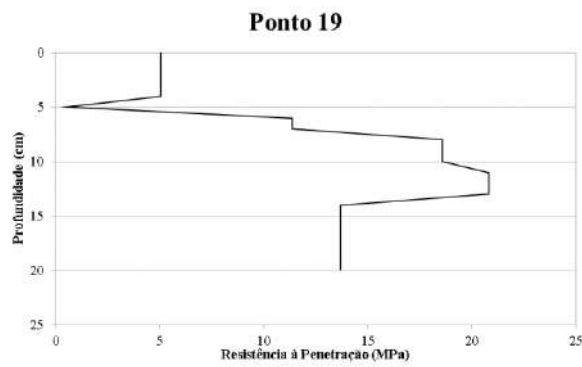
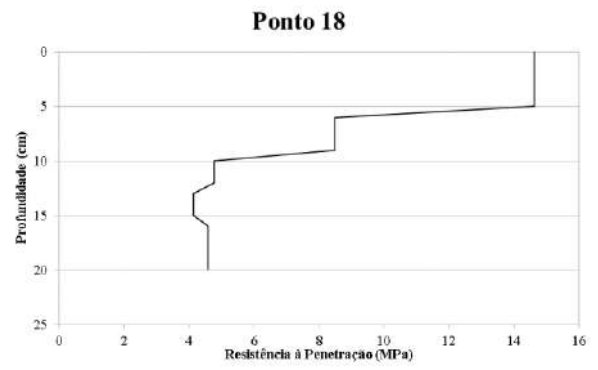
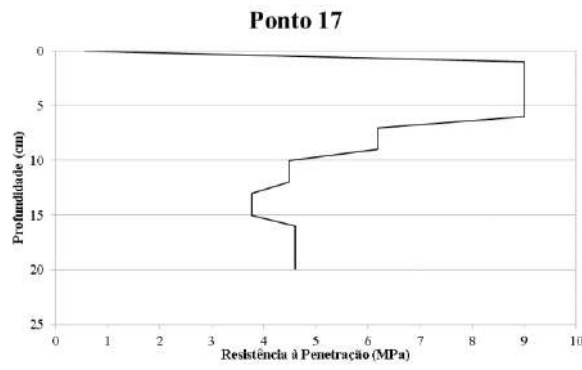


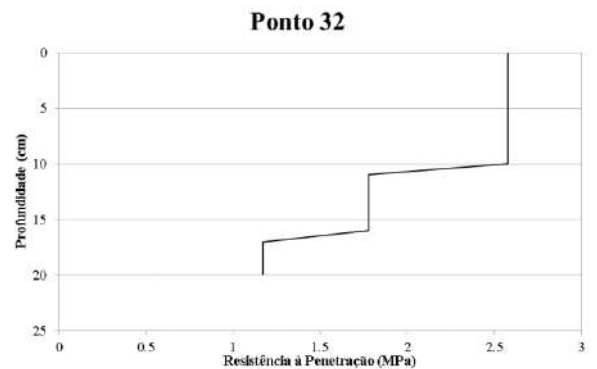
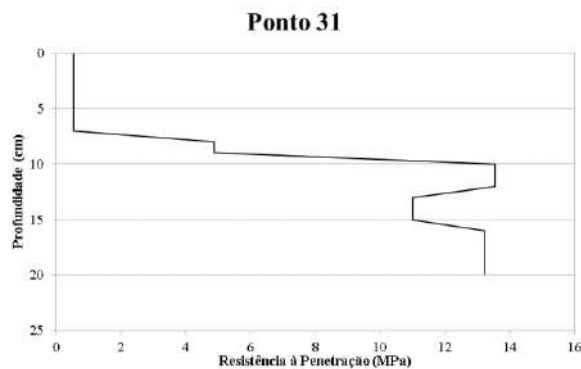
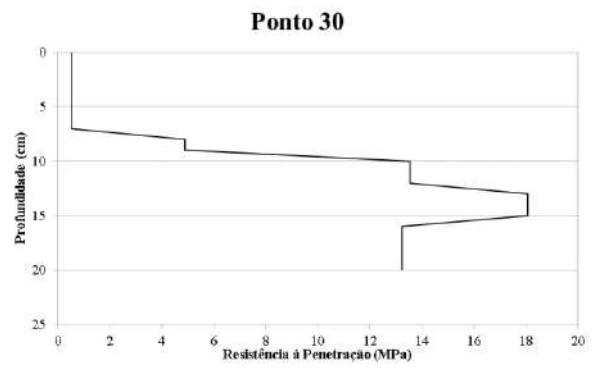
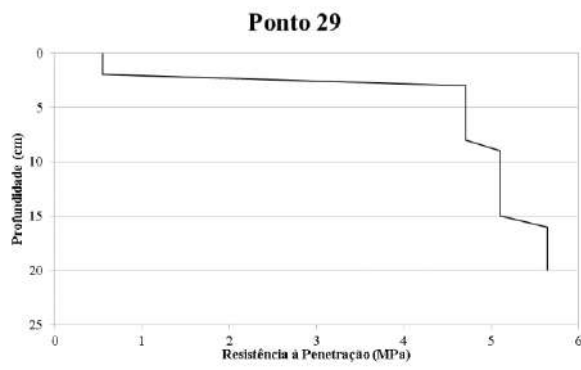
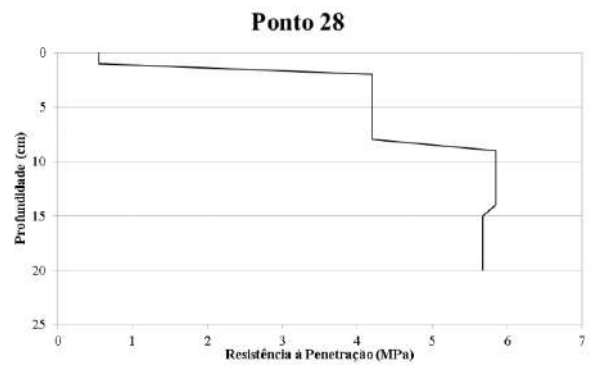
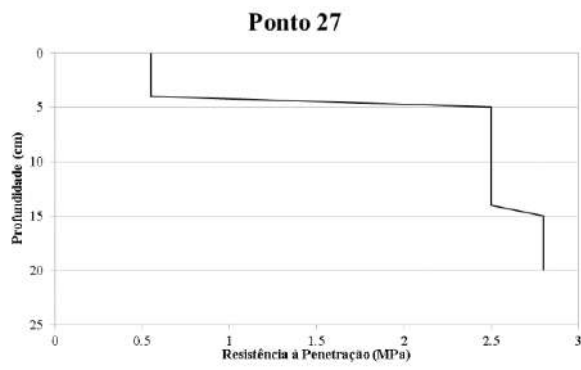
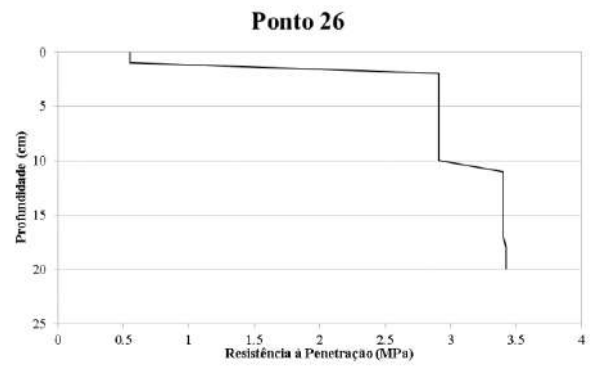
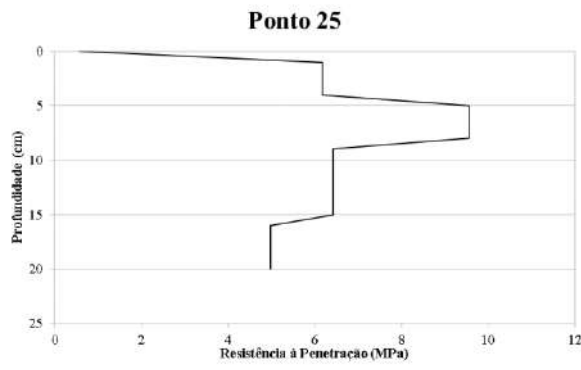
**Ponto 15**

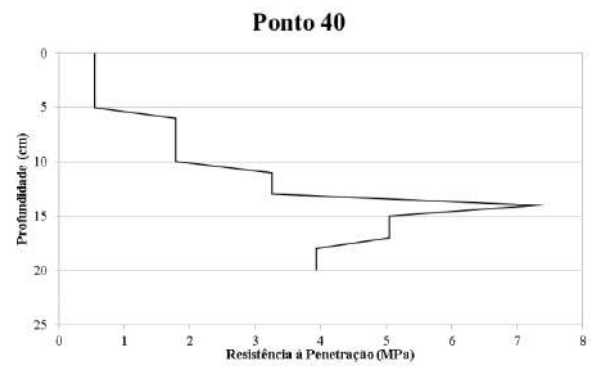
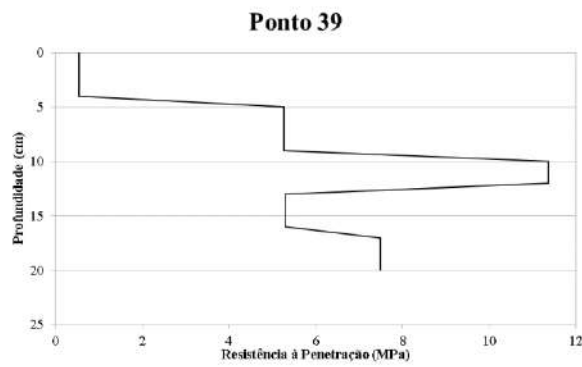
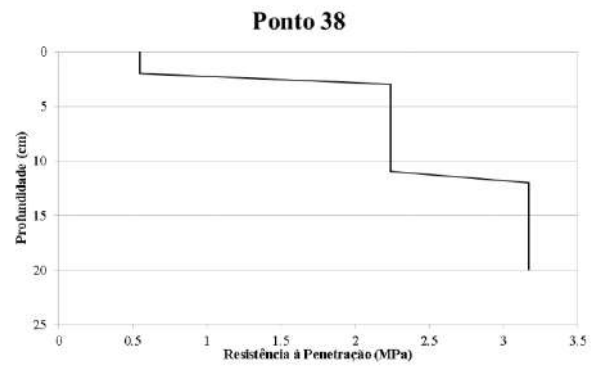
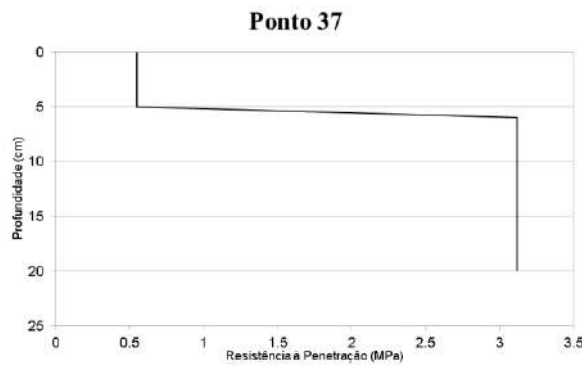
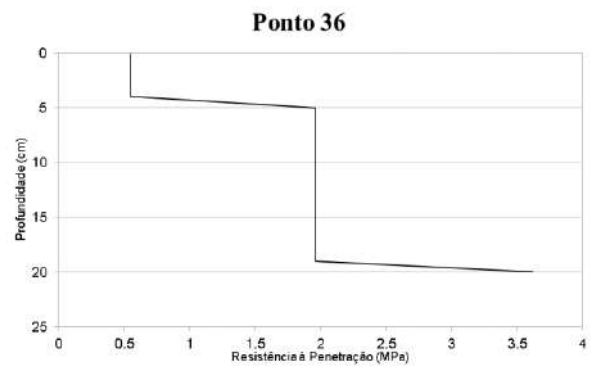
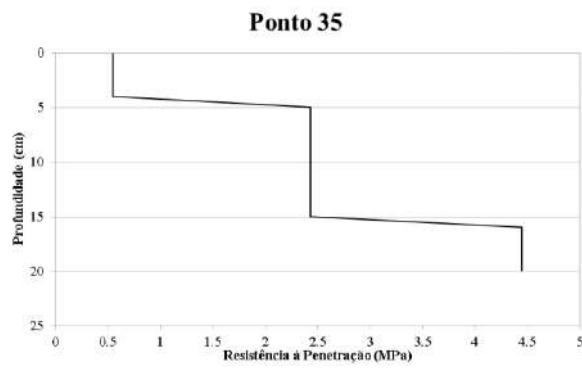
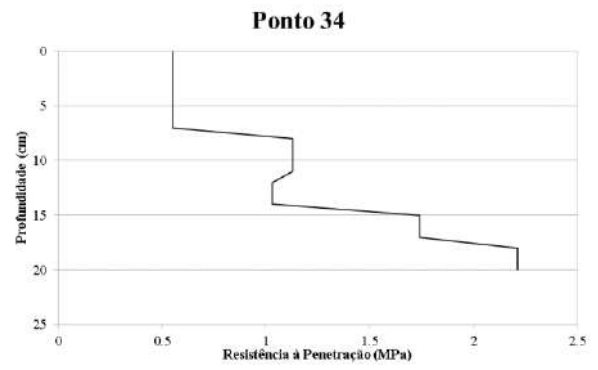
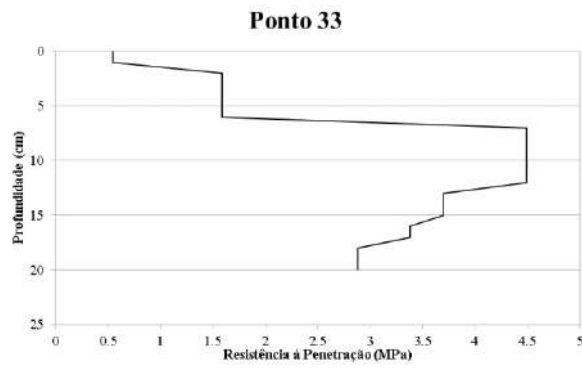


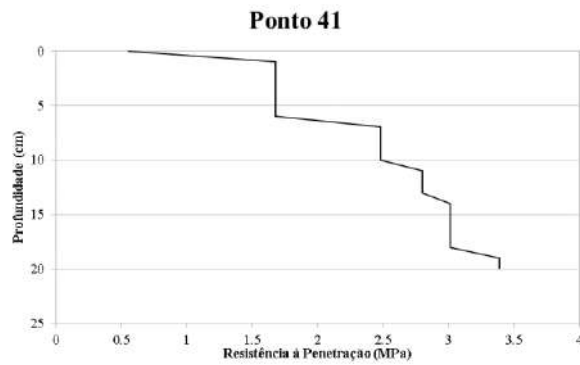
**Ponto 16**











## APÊNDICE B

Funções de Pedotransferência obtidas para cada simulação (calibração e teste) com e sem RP para cada atributo investigado.

### Densidade do solo

#### Primeira simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ds ~ dp + ug + w + I(rp^2) + I(ug^2) + I(rp * w) +
    I(dp * ug) + I(dp * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.069072 -0.024180 -0.001816  0.027054  0.073665
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -1.190e+00  1.071e+00  -1.112  0.28007
dp           3.549e-03  1.033e-03   3.436  0.00277 **
ug           7.379e+00  3.639e+00   2.028  0.05686 .
w            6.160e-02  3.979e-02   1.548  0.13814
I(rp^2)      3.580e-02  2.811e-02   1.274  0.21815
I(ug^2)     -6.307e+00  3.360e+00  -1.877  0.07598 .
I(rp * w)   -1.334e-02  1.043e-02  -1.279  0.21633
I(dp * ug)  -5.648e-03  1.680e-03  -3.363  0.00327 **
I(dp * w)   -1.585e-04  8.265e-05  -1.918  0.07031 .
```

```
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.03864 on 19 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7698,    Adjusted R-squared:  0.6729
F-statistic: 7.943 on 8 and 19 DF,  p-value: 0.0001089
```

#### Segunda simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ds ~ ug + w + I(rp * dp) + I(rp * ug) + I(dp * w) +
    I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.084443 -0.024969 -0.000926  0.028249  0.068353
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.155e-01  5.674e-01   0.380   0.7079
ug           2.450e+00  1.193e+00   2.053   0.0527 .
w           1.867e-01  9.013e-02   2.072   0.0508 .
I(rp * dp)   3.231e-04  1.447e-04   2.232   0.0366 *
I(rp * ug)  -2.419e-01  1.303e-01  -1.857   0.0775 .
I(dp * w)   -8.581e-05  3.079e-05  -2.787   0.0111 *
I(ug * w)   -3.892e-01  1.836e-01  -2.120   0.0461 *
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.04193 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6793,    Adjusted R-squared:  0.5877
F-statistic: 7.413 on 6 and 21 DF,  p-value: 0.0002346
```

### Terceira simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ds ~ ug + I(dp^2) + I(ug^2) + I(w^2) + I(rp * dp) +
    I(rp * w) + I(dp * ug) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.04340 -0.02173  0.00379  0.01336  0.07003
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -1.686e-02  4.152e-01  -0.041  0.968030
ug           6.527e+00  1.831e+00   3.565  0.002068 **
I(dp^2)     -5.545e-07  3.483e-07  -1.592  0.127942
I(ug^2)     -3.892e+00  1.657e+00  -2.349  0.029781 *
I(w^2)       1.821e-02  5.579e-03   3.265  0.004074 **
I(rp * dp)   6.429e-04  1.449e-04   4.438  0.000282 ***
I(rp * w)   -3.807e-02  8.846e-03  -4.304  0.000383 ***
I(dp * ug)  -1.435e-03  4.577e-04  -3.136  0.005436 **
I(ug * w)   -4.661e-01  1.492e-01  -3.124  0.005590 **
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.02924 on 19 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8742,    Adjusted R-squared:  0.8212
F-statistic: 16.51 on 8 and 19 DF,  p-value: 4.899e-07
```

### Quarta simulação com Resistência à Penetração

```

Call:
lm(formula = ds ~ I(rp^2) + I(ug^2) + I(w^2) + I(rp * dp) + I(dp *
    w) + I(ug * w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.072573 -0.025678  0.003578  0.022244  0.074010

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.445e+00  6.310e-02  22.902 2.46e-16 ***
I(rp^2)      -3.363e-02  1.625e-02  -2.069  0.05105 .
I(ug^2)      2.016e+00  1.184e+00   1.702  0.10347
I(w^2)       1.606e-02  6.451e-03   2.489  0.02129 *
I(rp * dp)   2.561e-04  1.126e-04   2.274  0.03355 *
I(dp * w)    -7.916e-05  2.653e-05  -2.984  0.00708 **
I(ug * w)    -4.101e-01  1.673e-01  -2.451  0.02307 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.04 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.639,    Adjusted R-squared:  0.5359
F-statistic: 6.196 on 6 and 21 DF,  p-value: 0.0007303

```

### Quinta simulação com Resistência à Penetração

```

Call:
lm(formula = ds ~ I(rp^2) + I(ug^2) + I(w^2) + I(rp * dp) + I(rp *
    w) + I(dp * w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.089983 -0.018904 -0.005044  0.014505  0.070015

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.504e+00  5.725e-02  26.271 < 2e-16 ***
I(rp^2)      -2.513e-02  1.600e-02  -1.571  0.131177
I(ug^2)      -1.034e+00  2.265e-01  -4.565  0.000168 ***
I(w^2)       2.299e-03  1.719e-03   1.337  0.195499
I(rp * dp)   3.332e-04  1.514e-04   2.201  0.039087 *
I(rp * w)    -1.358e-02  9.808e-03  -1.385  0.180732
I(dp * w)    -7.508e-05  3.279e-05  -2.290  0.032477 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.03796 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.708,    Adjusted R-squared:  0.6246
F-statistic: 8.488 on 6 and 21 DF,  p-value: 9.41e-05

```

### Primeira simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ds ~ ug + w + I(dp * ug) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
```

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-0.096460	-0.029414	0.002104	0.032263	0.065052

```
Coefficients:
```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.5007821	0.7137708	0.702	0.4900
ug	1.9709902	1.4626754	1.348	0.1909
w	0.1450370	0.1081103	1.342	0.1928
I(dp * ug)	-0.0004243	0.0001716	-2.472	0.0213 *
I(ug * w)	-0.3578674	0.2197530	-1.628	0.1170

```
---
```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.04424 on 23 degrees of freedom
```

```
Multiple R-squared:  0.6071,    Adjusted R-squared:  0.5387
```

```
F-statistic: 8.883 on 4 and 23 DF,  p-value: 0.0001725
```



### Segunda simulação sem Resistência à Penetração

Call:

```
lm(formula = ds ~ dp + w + I(w^2) + I(dp * ug) + I(dp * w), data = treino)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-0.087123	-0.027771	0.002432	0.021474	0.060304

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	4.994e-01	4.844e-01	1.031	0.31377
dp	1.637e-03	6.257e-04	2.616	0.01576 *
w	1.995e-01	1.226e-01	1.628	0.11779
I(w^2)	-1.308e-02	7.752e-03	-1.687	0.10572
I(dp * ug)	-1.938e-03	4.874e-04	-3.976	0.00064 ***
I(dp * w)	-1.283e-04	8.147e-05	-1.575	0.12963

---  
signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.04083 on 22 degrees of freedom  
Multiple R-squared: 0.7038, Adjusted R-squared: 0.6365  
F-statistic: 10.46 on 5 and 22 DF, p-value: 3.086e-05

### Terceira simulação sem Resistência à Penetração

Call:

```
lm(formula = ds ~ ug + w + I(dp * ug) + I(ug * w), data = treino)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-0.090102	-0.020129	0.001795	0.028159	0.057217

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	0.6812656	0.4126756	1.651	0.1124
ug	1.5846468	0.8787013	1.803	0.0844 .
w	0.1214782	0.0635720	1.911	0.0686 .
I(dp * ug)	-0.0002907	0.0001423	-2.043	0.0527 .
I(ug * w)	-0.3160177	0.1336880	-2.364	0.0269 *

---  
signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.04091 on 23 degrees of freedom  
Multiple R-squared: 0.6884, Adjusted R-squared: 0.6342  
F-statistic: 12.7 on 4 and 23 DF, p-value: 1.338e-05

### Quarta simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ds ~ dp + ug + w + I(dp^2) + I(dp * ug) + I(dp *
  w) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.069735 -0.016036 -0.001272  0.024931  0.060489
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -9.963e-01  9.872e-01  -1.009  0.3249
dp           2.684e-03  1.227e-03   2.188  0.0407 *
ug           4.239e+00  1.850e+00   2.291  0.0329 *
w            2.808e-01  1.340e-01   2.095  0.0491 *
I(dp^2)      -7.309e-07  5.310e-07  -1.376  0.1839
I(dp * ug)   -3.140e-03  1.678e-03  -1.871  0.0760 .
I(dp * w)    -1.146e-04  7.364e-05  -1.556  0.1355
I(ug * w)    -5.503e-01  2.602e-01  -2.115  0.0472 *
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.04037 on 20 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.751,    Adjusted R-squared:  0.6639
F-statistic: 8.618 on 7 and 20 DF,  p-value: 6.845e-05
```

### Quinta simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ds ~ ug + w + I(dp * ug) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.096460 -0.029414  0.002104  0.032263  0.065052
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  0.5007821  0.7137708   0.702  0.4900
ug           1.9709902  1.4626754   1.348  0.1909
w            0.1450370  0.1081103   1.342  0.1928
I(dp * ug)  -0.0004243  0.0001716  -2.472  0.0213 *
I(ug * w)   -0.3578674  0.2197530  -1.628  0.1170
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.04424 on 23 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6071,    Adjusted R-squared:  0.5387
F-statistic: 8.883 on 4 and 23 DF,  p-value: 0.0001725
```

## Umidade Volumétrica

### Primeira simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = uv ~ rp + dp + ug + w + I(rp^2) + I(ug^2) + I(rp *
  dp) + I(rp * ug) + I(rp * w) + I(dp * w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.44380 -0.05970  0.01206  0.08771  0.29771

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -8.312e+00  4.661e+00  -1.783  0.09239 .
rp          -2.255e+00  1.014e+00  -2.223  0.04005 *
dp           4.444e-03  2.505e-03   1.774  0.09394 .
ug           4.703e+01  1.726e+01   2.725  0.01441 *
w            6.728e-01  2.142e-01   3.141  0.00595 **
I(rp^2)      2.540e-01  1.369e-01   1.856  0.08087 .
I(ug^2)     -4.575e+01  1.830e+01  -2.500  0.02296 *
I(rp * dp)   3.651e-03  1.157e-03   3.154  0.00579 **
I(rp * ug)   2.057e+00  1.430e+00   1.438  0.16850
I(rp * w)   -1.297e-01  7.087e-02  -1.830  0.08478 .
I(dp * w)   -1.476e-03  4.174e-04  -3.535  0.00254 **
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1811 on 17 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9079,    Adjusted R-squared:  0.8537
F-statistic: 16.75 on 10 and 17 DF,  p-value: 6.684e-07
```

### Segunda simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = uv ~ dp + ug + w + I(rp^2) + I(ug^2) + I(dp * w) +
  I(ug * w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.274895 -0.070539  0.009725  0.079305  0.230997

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -1.033e+01  2.379e+00  -4.343  0.000315 ***
dp           3.804e-03  1.906e-03   1.996  0.059728 .
ug           4.923e+01  9.632e+00   5.110  5.34e-05 ***
w            6.917e-01  3.770e-01   1.835  0.081492 .
I(rp^2)      6.582e-02  2.469e-02   2.666  0.014849 *
I(ug^2)     -3.771e+01  1.367e+01  -2.759  0.012095 *
I(dp * w)   -6.805e-04  2.969e-04  -2.292  0.032883 *
I(ug * w)   -1.069e+00  8.338e-01  -1.282  0.214599
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1425 on 20 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9266,    Adjusted R-squared:  0.9009
F-statistic: 36.05 on 7 and 20 DF,  p-value: 5.448e-10
```

### Terceira simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = uv ~ rp + ug + I(ug^2) + I(rp * dp) + I(dp * w) +
    I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.25525 -0.09531 -0.01895  0.11779  0.24066
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -6.804e+00  4.222e+00  -1.611 0.122007
rp          -1.230e+00  3.221e-01  -3.819 0.001001 **
ug           5.115e+01  1.808e+01   2.830 0.010042 *
I(ug^2)     -4.907e+01  1.979e+01  -2.480 0.021712 *
I(rp * dp)   2.979e-03  7.987e-04   3.730 0.001237 **
I(dp * w)    -6.987e-04  1.664e-04  -4.199 0.000404 ***
I(ug * w)     3.558e-01  1.476e-01   2.410 0.025212 *
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.1617 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8031,    Adjusted R-squared:  0.7468
F-statistic: 14.27 on 6 and 21 DF,  p-value: 1.884e-06
```

### Quarta simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = uv ~ dp + ug + w + I(rp * dp) + I(rp * w) + I(dp *
    ug) + I(dp * w) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.19460 -0.10026 -0.01462  0.06833  0.34565
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -5.8333151  2.1720376  -2.686 0.01464 *
dp           0.0062794  0.0036641   1.714 0.10285
ug          22.0566477  4.0703584   5.419 3.15e-05 ***
w           0.9998513  0.3289914   3.039 0.00675 **
I(rp * dp)   0.0010872  0.0006670   1.630 0.11955
I(rp * w)    -0.0673477  0.0417053  -1.615 0.12283
I(dp * ug)  -0.0074377  0.0056337  -1.320 0.20245
I(dp * w)    -0.0007450  0.0002859  -2.605 0.01738 *
I(ug * w)    -1.5244198  0.5894447  -2.586 0.01811 *
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.1517 on 19 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9568,    Adjusted R-squared:  0.9386
F-statistic: 52.61 on 8 and 19 DF,  p-value: 2.428e-11
```

### Quinta simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = uv ~ rp + ug + I(rp^2) + I(dp^2) + I(ug^2) + I(w^2) +
    I(rp * dp) + I(rp * ug) + I(rp * w) + I(dp * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.37946 -0.07600  0.00681  0.10464  0.34749
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -7.791e+00  4.735e+00  -1.645  0.11823
rp          -1.097e+00  9.368e-01  -1.171  0.25787
ug           5.379e+01  2.011e+01   2.675  0.01599 *
I(rp^2)      2.561e-01  1.368e-01   1.872  0.07854 .
I(dp^2)      1.848e-06  1.445e-06   1.279  0.21808
I(ug^2)     -5.159e+01  2.165e+01  -2.383  0.02912 *
I(w^2)       4.146e-02  1.436e-02   2.887  0.01023 *
I(rp * dp)   2.840e-03  1.145e-03   2.480  0.02392 *
I(rp * ug)   1.624e+00  1.399e+00   1.160  0.26194
I(rp * w)    -2.161e-01  1.025e-01  -2.108  0.05020 .
I(dp * w)   -8.666e-04  2.545e-04  -3.405  0.00337 **
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.1835 on 17 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9229,    Adjusted R-squared:  0.8776
F-statistic: 20.35 on 10 and 17 DF,  p-value: 1.554e-07
```

### Primeira simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = uv ~ dp + ug + w + I(ug^2) + I(dp * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.39216 -0.12735  0.02552  0.08381  0.36710
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -6.318e+00  2.728e+00  -2.316  0.03025 *
dp           4.882e-03  2.463e-03   1.982  0.06008 .
ug           3.683e+01  1.035e+01   3.557  0.00176 **
w            3.219e-01  1.805e-01   1.784  0.08830 .
I(ug^2)     -3.270e+01  1.190e+01  -2.748  0.01173 *
I(dp * w)   -8.491e-04  3.923e-04  -2.165  0.04154 *
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.1921 on 22 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8877,    Adjusted R-squared:  0.8622
F-statistic: 34.78 on 5 and 22 DF,  p-value: 9.827e-10
```

### Segunda simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = uv ~ dp + ug + w + I(dp * ug) + I(dp * w) + I(ug *
  w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.25360 -0.15819 -0.01431  0.10329  0.31048

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -6.1071674   2.8263591   -2.161  0.0424 *
dp            0.0107329   0.0051445    2.086  0.0493 *
ug           22.0509772   4.5322354    4.865 8.24e-05 ***
w            0.8332560   0.4099119    2.033  0.0549 .
I(dp * ug)  -0.0119125   0.0064933   -1.835  0.0808 .
I(dp * w)   -0.0008547   0.0005762   -1.483  0.1528
I(ug * w)   -1.2893924   0.6589150   -1.957  0.0638 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1897 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9165,    Adjusted R-squared:  0.8927
F-statistic: 38.43 on 6 and 21 DF,  p-value: 2.91e-10
```

### Terceira simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = uv ~ dp + ug + I(dp^2) + I(ug^2) + I(w^2) + I(dp *
  w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.23581 -0.14589 -0.00960  0.06978  0.39942

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -4.582e+00  2.369e+00  -1.934  0.06666 .
dp            4.904e-03  2.693e-03   1.821  0.08285 .
ug           3.274e+01  9.844e+00   3.326  0.00321 **
I(dp^2)      3.595e-06  2.702e-06   1.331  0.19758
I(ug^2)     -2.861e+01  1.138e+01  -2.514  0.02015 *
I(w^2)       3.723e-02  1.278e-02   2.914  0.00830 **
I(dp * w)   -1.205e-03  3.880e-04  -3.105  0.00537 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1718 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9149,    Adjusted R-squared:  0.8905
F-statistic: 37.61 on 6 and 21 DF,  p-value: 3.568e-10
```

### Quarta simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = uv ~ ug + I(dp^2) + I(ug^2) + I(dp * ug) + I(ug *
w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.36370 -0.11262  0.00673  0.08439  0.31508
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -4.500e+00  1.909e+00  -2.357 0.027711 *
ug           3.781e+01  8.608e+00   4.393 0.000231 ***
I(dp^2)      5.658e-06  1.955e-06   2.894 0.008421 **
I(ug^2)     -2.643e+01  9.136e+00  -2.893 0.008447 **
I(dp * ug)  -1.178e-02  3.314e-03  -3.555 0.001772 **
I(ug * w)   -1.783e-01  7.677e-02  -2.323 0.029848 *
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.168 on 22 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.933,    Adjusted R-squared:  0.9177
F-statistic: 61.24 on 5 and 22 DF,  p-value: 3.596e-12
```

### Quinta simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = uv ~ dp + ug + w + I(dp * ug) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.32220 -0.10975 -0.01154  0.08139  0.32631
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -6.708447  3.686411  -1.820 0.08243 .
dp           0.006093  0.004165   1.463 0.15769
ug          27.107090  7.238052   3.745 0.00112 **
w           0.895814  0.448557   1.997 0.05833 .
I(dp * ug)  -0.014019  0.008186  -1.713 0.10085
I(ug * w)   -1.996194  0.895804  -2.228 0.03639 *
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.1922 on 22 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8925,    Adjusted R-squared:  0.8681
F-statistic: 36.54 on 5 and 22 DF,  p-value: 6.09e-10
```

## Porosidade Total

### Primeira simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = por ~ ug + I(w^2) + I(rp * dp) + I(dp * ug) + I(ug *
  w) + I(rp^2), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.6248 -0.1523  0.0257  0.1362  0.4153

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  8.795e+00  2.513e+00   3.499  0.00214 **
ug          -1.723e+01  1.046e+01  -1.647  0.11448
I(w^2)      -9.650e-02  5.263e-02  -1.834  0.08093 .
I(rp * dp)  -1.374e-03  8.051e-04  -1.707  0.10256
I(dp * ug)   8.909e-03  2.889e-03   3.084  0.00562 **
I(ug * w)    2.938e+00  1.484e+00   1.980  0.06092 .
I(rp^2)      1.449e-01  1.075e-01   1.348  0.19197
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2856 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7084,    Adjusted R-squared:  0.6251
F-statistic: 8.502 on 6 and 21 DF,  p-value: 9.3e-05
```

### Segunda simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = por ~ dp + ug + I(dp^2) + I(w^2) + I(rp * dp) +
  I(rp * w) + I(ug * w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.57625 -0.17733  0.05623  0.13861  0.55016

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  6.987e+00  2.949e+00   2.369  0.02801 *
dp           1.104e-02  2.939e-03   3.757  0.00124 **
ug          -1.855e+01  1.207e+01  -1.537  0.13999
I(dp^2)     -5.110e-06  3.458e-06  -1.477  0.15513
I(w^2)     -1.239e-01  6.630e-02  -1.868  0.07647 .
I(rp * dp)  -2.962e-03  1.374e-03  -2.156  0.04343 *
I(rp * w)    1.611e-01  8.021e-02   2.008  0.05832 .
I(ug * w)    3.390e+00  1.795e+00   1.889  0.07354 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2765 on 20 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8198,    Adjusted R-squared:  0.7568
F-statistic: 13 on 7 and 20 DF,  p-value: 3.272e-06
```



### Terceira simulação com Resistência à Penetração

Call:

```
lm(formula = por ~ ug + I(w^2) + I(rp * dp) + I(rp * w) + I(dp *
  ug) + I(ug * w), data = treino)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-0.63249	-0.21190	0.04338	0.16098	0.57555

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
(Intercept)	11.445695	2.453116	4.666	0.000132	***
ug	-28.403328	10.259616	-2.768	0.011515	*
I(w^2)	-0.140253	0.053855	-2.604	0.016560	*
I(rp * dp)	-0.002809	0.001100	-2.554	0.018476	*
I(rp * w)	0.152986	0.064595	2.368	0.027536	*
I(dp * ug)	0.014096	0.003077	4.581	0.000162	***
I(ug * w)	3.970170	1.470020	2.701	0.013387	*

---  
 signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3142 on 21 degrees of freedom  
 Multiple R-squared: 0.7273, Adjusted R-squared: 0.6494  
 F-statistic: 9.334 on 6 and 21 DF, p-value: 4.822e-05

### Quarta simulação com Resistência à Penetração

Call:

```
lm(formula = por ~ rp + ug + I(dp^2) + I(ug^2) + I(w^2) + I(rp *
  dp) + I(dp * ug) + I(ug * w), data = treino)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-0.32457	-0.12489	0.01264	0.09424	0.55334

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
(Intercept)	1.586e+01	3.676e+00	4.314	0.000374	***
rp	1.509e+00	5.303e-01	2.846	0.010338	*
ug	-5.128e+01	1.681e+01	-3.051	0.006568	**
I(dp^2)	-6.689e-06	2.995e-06	-2.233	0.037750	*
I(ug^2)	2.656e+01	1.772e+01	1.499	0.150267	
I(w^2)	-1.082e-01	4.631e-02	-2.336	0.030600	*
I(rp * dp)	-3.981e-03	1.330e-03	-2.993	0.007484	**
I(dp * ug)	2.720e-02	5.970e-03	4.556	0.000216	***
I(ug * w)	3.217e+00	1.282e+00	2.509	0.021314	*

---  
 signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2342 on 19 degrees of freedom  
 Multiple R-squared: 0.8707, Adjusted R-squared: 0.8163  
 F-statistic: 16 on 8 and 19 DF, p-value: 6.274e-07

### Quinta simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = por ~ dp + ug + I(dp^2) + I(ug^2) + I(w^2) + I(rp *
  dp) + I(rp * w) + I(ug * w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.56098 -0.08274  0.01794  0.07956  0.52892

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.384e+01  3.939e+00   3.513  0.00232 **
dp           1.383e-02  3.722e-03   3.715  0.00147 **
ug          -5.069e+01  1.794e+01  -2.825  0.01082 *
I(dp^2)     -6.075e-06  3.728e-06  -1.629  0.11970
I(ug^2)     3.870e+01  2.118e+01   1.827  0.08338 .
I(w^2)     -1.254e-01  5.340e-02  -2.349  0.02979 *
I(rp * dp)  -5.139e-03  1.592e-03  -3.228  0.00442 **
I(rp * w)    2.949e-01  9.098e-02   3.242  0.00429 **
I(ug * w)    2.953e+00  1.476e+00   2.001  0.05990 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.259 on 19 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8279,    Adjusted R-squared:  0.7554
F-statistic: 11.42 on 8 and 19 DF,  p-value: 8.328e-06
```

### Primeira simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = por ~ ug + I(dp^2) + I(w^2) + I(dp * ug) + I(dp *
  w) + I(ug * w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.37579 -0.13342  0.00244  0.17499  0.48576

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.014e+01  2.129e+00   4.761  0.000106 ***
ug          -2.349e+01  8.979e+00  -2.617  0.016118 *
I(dp^2)     -5.195e-06  2.230e-06  -2.330  0.029854 *
I(w^2)     -8.302e-02  4.171e-02  -1.990  0.059739 .
I(dp * ug)   2.185e-02  4.947e-03   4.416  0.000240 ***
I(dp * w)   -5.381e-04  3.803e-04  -1.415  0.171792
I(ug * w)    3.071e+00  1.267e+00   2.423  0.024494 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2388 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8671,    Adjusted R-squared:  0.8292
F-statistic: 22.84 on 6 and 21 DF,  p-value: 3.468e-08
```

## Segunda simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = por ~ I(dp^2) + I(ug^2) + I(dp * ug) + I(ug * w),
    data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.4712 -0.1320  0.0252  0.1495  0.4407
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  4.819e+00  2.537e-01  18.997 1.48e-15 ***
I(dp^2)      -7.589e-06  2.963e-06  -2.561 0.017461 *
I(ug^2)     -3.993e+00  1.868e+00  -2.137 0.043438 *
I(dp * ug)   1.814e-02  4.298e-03   4.221 0.000325 ***
I(ug * w)    2.365e-01  1.274e-01   1.857 0.076148 .
---

```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.2489 on 23 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8345,    Adjusted R-squared:  0.8057
F-statistic: 28.99 on 4 and 23 DF,  p-value: 1.101e-08
```

## Terceira simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = por ~ dp + w + I(dp^2) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.44651 -0.08884 -0.01275  0.17291  0.33486
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.877e+00  4.619e-01   8.394 1.86e-08 ***
dp           6.147e-03  2.135e-03   2.879 0.00848 **
w          -1.947e-01  9.811e-02  -1.984 0.05927 .
I(dp^2)     -4.073e-06  2.668e-06  -1.527 0.14050
I(ug * w)    7.548e-01  1.441e-01   5.237 2.60e-05 ***
---

```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.2419 on 23 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8223,    Adjusted R-squared:  0.7914
F-statistic: 26.61 on 4 and 23 DF,  p-value: 2.454e-08
```

### Quarta simulação sem Resistência à Penetração

Call:

```
lm(formula = por ~ w + I(dp^2) + I(ug^2) + I(dp * w) + I(ug * w), data = treino)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-0.57862	-0.17039	0.03381	0.22936	0.49237

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
(Intercept)	1.004e+01	1.972e+00	5.092	4.22e-05	***
w	-1.551e+00	5.796e-01	-2.676	0.0138	*
I(dp^2)	-7.229e-06	4.464e-06	-1.619	0.1196	
I(ug^2)	-1.447e+01	8.783e+00	-1.647	0.1137	
I(dp * w)	1.279e-03	4.852e-04	2.637	0.0151	*
I(ug * w)	2.571e+00	1.246e+00	2.064	0.0510	.

---  
 signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.288 on 22 degrees of freedom  
 Multiple R-squared: 0.7797, Adjusted R-squared: 0.7296  
 F-statistic: 15.57 on 5 and 22 DF, p-value: 1.366e-06

### Quinta simulação sem Resistência à Penetração

Call:

```
lm(formula = por ~ ug + w + I(dp^2) + I(dp * ug) + I(ug * w), data = treino)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-0.50047	-0.11518	0.00312	0.12185	0.60652

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )	
(Intercept)	1.276e+01	4.804e+00	2.655	0.01446	*
ug	-1.842e+01	9.661e+00	-1.907	0.06964	.
w	-1.129e+00	7.673e-01	-1.471	0.15541	
I(dp^2)	-4.284e-06	2.495e-06	-1.717	0.09998	.
I(dp * ug)	1.327e-02	3.935e-03	3.373	0.00275	**
I(ug * w)	2.660e+00	1.549e+00	1.717	0.10006	.

---  
 signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2826 on 22 degrees of freedom  
 Multiple R-squared: 0.8119, Adjusted R-squared: 0.7691  
 F-statistic: 18.99 on 5 and 22 DF, p-value: 2.534e-07

## Macroporosidade

### Primeira simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ma ~ rp + dp + I(dp^2) + I(w^2) + I(rp * dp) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.137690 -0.036480 -0.004991  0.048585  0.092612
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -1.214e+00  2.797e-01  -4.338 0.000289 ***
rp           3.476e-01  1.374e-01   2.531 0.019450 *
dp           4.266e-03  9.524e-04   4.480 0.000206 ***
I(dp^2)      -3.699e-06  9.941e-07  -3.721 0.001263 **
I(w^2)       -1.116e-02  2.594e-03  -4.301 0.000316 ***
I(rp * dp)   -7.842e-04  3.394e-04  -2.310 0.031128 *
I(ug * w)     2.751e-01  5.031e-02   5.467 2.01e-05 ***
---

```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.0713 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6463,    Adjusted R-squared:  0.5453
F-statistic: 6.396 on 6 and 21 DF,  p-value: 0.0006012
```

### Segunda simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ma ~ ug + w + I(w^2) + I(rp * dp) + I(rp * w) + I(dp * w) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.150243 -0.038632  0.005309  0.045601  0.099171
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.802e+00  9.987e-01   2.806 0.01092 *
ug          -8.269e+00  2.475e+00  -3.341 0.00325 **
w           -2.961e-01  1.769e-01  -1.674 0.10965
I(w^2)      -3.395e-02  1.595e-02  -2.128 0.04593 *
I(rp * dp)  -6.299e-04  3.354e-04  -1.878 0.07506 .
I(rp * w)    3.312e-02  2.046e-02   1.619 0.12121
I(dp * w)    1.858e-04  6.695e-05   2.776 0.01167 *
I(ug * w)    1.402e+00  3.737e-01   3.752 0.00126 **
---

```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.07071 on 20 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7078,    Adjusted R-squared:  0.6055
F-statistic: 6.921 on 7 and 20 DF,  p-value: 0.000298
```

### Terceira simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ma ~ rp + w + I(ug^2) + I(w^2) + I(rp * dp) + I(dp *
  w) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.089294 -0.041883 -0.006164  0.042905  0.114521
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.271e+00  5.020e-01   2.531 0.019874 *
rp           2.018e-01  1.186e-01   1.701 0.104439
w           -4.218e-01  1.422e-01  -2.965 0.007647 **
I(ug^2)     -7.822e+00  2.020e+00  -3.872 0.000948 ***
I(w^2)      -1.458e-02  1.194e-02  -1.221 0.236288
I(rp * dp)  -5.673e-04  2.911e-04  -1.949 0.065481 .
I(dp * w)    1.442e-04  5.977e-05   2.412 0.025572 *
I(ug * w)    1.228e+00  2.748e-01   4.469 0.000235 ***
```

```
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.06512 on 20 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7347,    Adjusted R-squared:  0.6419
F-statistic: 7.914 on 7 and 20 DF,  p-value: 0.0001229
```

### Quarta simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ma ~ w + I(ug^2) + I(rp * dp) + I(rp * ug) + I(dp *
  w) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.154816 -0.033784  0.007016  0.037520  0.102996
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.478e+00  4.549e-01   3.249 0.00384 **
w           -4.737e-01  1.306e-01  -3.627 0.00158 **
I(ug^2)     -6.107e+00  1.895e+00  -3.223 0.00408 **
I(rp * dp)  -3.726e-04  2.556e-04  -1.458 0.15964
I(rp * ug)   3.486e-01  2.414e-01   1.444 0.16339
I(dp * w)    1.142e-04  5.153e-05   2.216 0.03787 *
I(ug * w)    9.446e-01  2.565e-01   3.683 0.00138 **
```

```
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.06737 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7245,    Adjusted R-squared:  0.6458
F-statistic: 9.206 on 6 and 21 DF,  p-value: 5.32e-05
```

### Quinta simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ma ~ w + I(ug^2) + I(rp * dp) + I(rp * ug) + I(dp *
  w) + I(ug * w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.154816 -0.033784  0.007016  0.037520  0.102996

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.478e+00  4.549e-01   3.249  0.00384 **
w            -4.737e-01  1.306e-01  -3.627  0.00158 **
I(ug^2)      -6.107e+00  1.895e+00  -3.223  0.00408 **
I(rp * dp)   -3.726e-04  2.556e-04  -1.458  0.15964
I(rp * ug)    3.486e-01  2.414e-01   1.444  0.16339
I(dp * w)     1.142e-04  5.153e-05   2.216  0.03787 *
I(ug * w)     9.446e-01  2.565e-01   3.683  0.00138 **
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.06737 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7245,    Adjusted R-squared:  0.6458
F-statistic: 9.206 on 6 and 21 DF,  p-value: 5.32e-05
```

### Primeira simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ma ~ dp + ug + w + I(ug^2) + I(dp * w) + I(ug *
  w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.121418 -0.022738 -0.001848  0.024933  0.141033

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  8.607e-01  8.935e-01   0.963  0.346332
dp           -9.584e-04  7.356e-04  -1.303  0.206737
ug            4.193e+00  3.319e+00   1.264  0.220229
w            -4.925e-01  1.144e-01  -4.304  0.000314 ***
I(ug^2)      -1.025e+01  3.707e+00  -2.764  0.011642 *
I(dp * w)     1.832e-04  1.149e-04   1.594  0.125851
I(ug * w)     9.237e-01  2.142e-01   4.312  0.000308 ***
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.06879 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7154,    Adjusted R-squared:  0.634
F-statistic: 8.797 on 6 and 21 DF,  p-value: 7.338e-05
```

### Segunda simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ma ~ dp + ug + w + I(dp^2) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.134939 -0.043183  0.003405  0.047239  0.108888
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.110e+00  8.975e-01   1.237  0.2292
dp           2.022e-03  9.514e-04   2.125  0.0450 *
ug          -2.904e+00  1.793e+00  -1.620  0.1195
w           -3.031e-01  1.309e-01  -2.315  0.0303 *
I(dp^2)      -1.862e-06  1.213e-06  -1.535  0.1390
I(ug * w)     6.505e-01  2.756e-01   2.360  0.0276 *
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.07451 on 22 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6279,    Adjusted R-squared:  0.5434
F-statistic: 7.425 on 5 and 22 DF,  p-value: 0.0003265
```

### Terceira simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ma ~ ug + w + I(dp * w) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.103013 -0.037215 -0.007807  0.029154  0.175412
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.034e+00  9.488e-01   2.143  0.0429 *
ug          -3.868e+00  1.986e+00  -1.948  0.0637 .
w           -3.555e-01  1.383e-01  -2.570  0.0171 *
I(dp * w)    3.206e-05  2.168e-05   1.479  0.1528
I(ug * w)    7.418e-01  2.846e-01   2.606  0.0158 *
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.07537 on 23 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5921,    Adjusted R-squared:  0.5212
F-statistic: 8.347 on 4 and 23 DF,  p-value: 0.0002593
```



### Quarta simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ma ~ w + I(dp^2) + I(ug^2) + I(dp * ug) + I(ug *
  w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.117087 -0.037335 -0.002578  0.040649  0.153500

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.047e+00  4.438e-01   2.359  0.0276 *
w           -3.260e-01  1.254e-01  -2.600  0.0164 *
I(dp^2)     -1.064e-06  7.598e-07  -1.401  0.1753
I(ug^2)     -4.832e+00  1.812e+00  -2.667  0.0141 *
I(dp * ug)   2.069e-03  1.204e-03   1.718  0.0999 .
I(ug * w)    7.231e-01  2.691e-01   2.687  0.0135 *
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.07109 on 22 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6811,    Adjusted R-squared:  0.6087
F-statistic: 9.399 on 5 and 22 DF,  p-value: 6.65e-05
```

### Quinta simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = ma ~ ug + w + I(dp * w) + I(ug * w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.139464 -0.048055  0.002288  0.044443  0.191648

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.123e+00  1.216e+00   1.745  0.0943 .
ug          -3.901e+00  2.586e+00  -1.509  0.1450
w           -4.018e-01  1.771e-01  -2.268  0.0330 *
I(dp * w)    6.811e-05  2.792e-05   2.440  0.0228 *
I(ug * w)    7.876e-01  3.701e-01   2.128  0.0443 *
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.08138 on 23 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5425,    Adjusted R-squared:  0.4629
F-statistic: 6.817 on 4 and 23 DF,  p-value: 0.0009005
```

## Microporosidade

### Primeira simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = mi ~ rp + dp + ug + w + I(dp^2) + I(ug^2) + I(w^2) +
    I(rp * dp) + I(rp * ug) + I(dp * ug), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.020828 -0.006618  0.001176  0.006484  0.020155

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.412e+00  4.241e-01   3.329  0.00398 **
rp          -1.643e-01  6.550e-02  -2.508  0.02257 *
dp          -1.291e-03  4.501e-04  -2.869  0.01065 *
ug          -2.357e+00  1.660e+00  -1.420  0.17371
w           4.875e-02  3.091e-02   1.577  0.13311
I(dp^2)      5.955e-07  2.012e-07   2.960  0.00876 **
I(ug^2)      1.737e+00  1.453e+00   1.195  0.24848
I(w^2)      -3.667e-03  2.479e-03  -1.479  0.15737
I(rp * dp)   1.253e-04  6.271e-05   1.999  0.06189 .
I(rp * ug)   2.286e-01  1.189e-01   1.923  0.07140 .
I(dp * ug)   1.320e-03  7.908e-04   1.669  0.11337
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01225 on 17 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.7311,    Adjusted R-squared:  0.573
F-statistic: 4.623 on 10 and 17 DF,  p-value: 0.002833
```

### Segunda simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = mi ~ rp + w + I(dp^2) + I(dp * w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.050278 -0.008075 -0.003799  0.010040  0.031511

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  6.165e-01  4.002e-02  15.405 1.31e-13 ***
rp          -1.113e-02  6.165e-03  -1.805  0.0841 .
w           1.923e-02  8.058e-03   2.387  0.0256 *
I(dp^2)      1.989e-07  1.335e-07   1.490  0.1498
I(dp * w)   -3.555e-05  1.616e-05  -2.200  0.0381 *
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.0174 on 23 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4343,    Adjusted R-squared:  0.3359
F-statistic: 4.414 on 4 and 23 DF,  p-value: 0.008567
```

### Terceira simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = m1 ~ rp + w + I(dp^2) + I(w^2) + I(rp * w) + I(dp *
w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.022391 -0.008072 -0.002413  0.008156  0.033107
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  4.645e-01  1.123e-01   4.137 0.000469 ***
rp           -8.578e-02  4.783e-02  -1.794 0.087292 .
w            7.773e-02  3.624e-02   2.145 0.043838 *
I(dp^2)      2.966e-07  1.233e-07   2.405 0.025453 *
I(w^2)      -5.176e-03  2.923e-03  -1.771 0.091101 .
I(rp * w)    1.105e-02  6.993e-03   1.580 0.129015
I(dp * w)   -4.294e-05  1.468e-05  -2.926 0.008081 **
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.01528 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4519,    Adjusted R-squared:  0.2953
F-statistic: 2.886 on 6 and 21 DF,  p-value: 0.03274
```

### Quarta simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = m1 ~ dp + I(rp^2) + I(w^2) + I(rp * dp) + I(dp *
ug) + I(dp * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.031516 -0.008476  0.003203  0.010684  0.020418
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  8.024e-01  4.377e-02  18.334 2.12e-14 ***
dp           -4.704e-04  2.245e-04  -2.095  0.0485 *
I(rp^2)      -2.010e-02  6.823e-03  -2.947  0.0077 **
I(w^2)      -1.338e-03  9.034e-04  -1.481  0.1534
I(rp * dp)   8.742e-05  4.348e-05   2.011  0.0574 .
I(dp * ug)  -3.969e-04  1.923e-04  -2.064  0.0516 .
I(dp * w)    6.810e-05  3.010e-05   2.263  0.0344 *
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.01509 on 21 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6202,    Adjusted R-squared:  0.5117
F-statistic: 5.716 on 6 and 21 DF,  p-value: 0.001182
```

### Quinta simulação com Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = m1 ~ rp + dp + I(dp^2) + I(ug^2) + I(ug * w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.048808 -0.006381 -0.002308  0.007492  0.024677

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  7.581e-01  3.519e-02  21.544  2.8e-16 ***
rp          -9.447e-03  5.934e-03  -1.592  0.1256
dp          -3.509e-04  1.591e-04  -2.205  0.0382 *
I(dp^2)      4.112e-07  1.993e-07  2.063  0.0511 .
I(ug^2)     -2.243e-01  1.329e-01  -1.687  0.1056
I(ug * w)    1.419e-02  8.152e-03  1.740  0.0958 .
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01635 on 22 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2858,    Adjusted R-squared:  0.1235
F-statistic: 1.761 on 5 and 22 DF,  p-value: 0.1627
```

### Primeira simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = m1 ~ dp + ug + w + I(ug * w), data = treino)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.040837 -0.006523 -0.002379  0.009376  0.041954

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.339e-01  2.728e-01  0.857  0.4001
dp          -8.425e-05  3.396e-05  -2.481  0.0209 *
ug           9.231e-01  5.468e-01  1.688  0.1049
w           6.966e-02  4.313e-02  1.615  0.1199
I(ug * w)   -1.360e-01  8.532e-02  -1.594  0.1245
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01681 on 23 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.3694,    Adjusted R-squared:  0.2597
F-statistic: 3.368 on 4 and 23 DF,  p-value: 0.02613
```

## Segunda simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = mi ~ w + I(ug^2) + I(dp * ug) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.0307889 -0.0051424  0.0002185  0.0075994  0.0216871
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.242e-01  9.577e-02   3.385  0.00255 **
w            9.368e-02  2.632e-02   3.559  0.00167 **
I(ug^2)      1.511e+00  4.506e-01   3.353  0.00276 **
I(dp * ug)   -1.658e-04  6.039e-05  -2.745  0.01153 *
I(ug * w)    -1.865e-01  5.667e-02  -3.292  0.00319 **
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.01413 on 23 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5199,    Adjusted R-squared:  0.4363
F-statistic: 6.225 on 4 and 23 DF,  p-value: 0.001512
```

## Terceira simulação sem Resistência à Penetração

```
Call:
lm(formula = mi ~ ug + w + I(dp * w) + I(ug * w), data = treino)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.040813 -0.009885  0.000256  0.010368  0.038999
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.294e-01  1.645e-01   1.395  0.1765
ug           9.196e-01  3.485e-01   2.639  0.0147 *
w            6.678e-02  2.486e-02   2.686  0.0132 *
I(dp * w)    -7.275e-06  4.632e-06  -1.571  0.1299
I(ug * w)    -1.320e-01  5.112e-02  -2.583  0.0166 *
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.01662 on 23 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2972,    Adjusted R-squared:  0.175
F-statistic: 2.431 on 4 and 23 DF,  p-value: 0.07654
```

### Quarta simulação sem Resistência à Penetração

Call:

```
lm(formula = mi ~ dp + ug + w + I(ug * w), data = treino)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-0.038409	-0.008347	0.000482	0.004766	0.040190

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	3.220e-01	1.663e-01	1.936	0.0652 .
dp	-7.095e-05	3.425e-05	-2.072	0.0497 *
ug	7.165e-01	3.620e-01	1.979	0.0599 .
w	5.738e-02	2.420e-02	2.372	0.0265 *
I(ug * w)	-1.098e-01	5.153e-02	-2.130	0.0441 *

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01627 on 23 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.3339, Adjusted R-squared: 0.2181

F-statistic: 2.882 on 4 and 23 DF, p-value: 0.04524

### Quinta simulação sem Resistência à Penetração

Call:

```
lm(formula = mi ~ ug + w + I(dp * ug) + I(ug * w), data = treino)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-0.040346	-0.008575	-0.001115	0.009517	0.040865

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	2.879e-01	1.918e-01	1.501	0.1470
ug	8.302e-01	3.905e-01	2.126	0.0444 *
w	5.422e-02	3.126e-02	1.734	0.0962 .
I(dp * ug)	-1.497e-04	7.084e-05	-2.113	0.0456 *
I(ug * w)	-1.084e-01	6.223e-02	-1.742	0.0948 .

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.01678 on 23 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.3831, Adjusted R-squared: 0.2758

F-statistic: 3.57 on 4 and 23 DF, p-value: 0.02092