



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE UNB PLANALTINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**REGIME DE UMIDADE EM UM SUBSTRATO REVEGETADO COM LODO DE  
ESGOTO NO DISTRITO FEDERAL**

**THYEGO PERY MONTEIRO DE LIMA**

**PLANALTINA – DF  
MARÇO/2019**

**THYEGO PERY MONTEIRO DE LIMA**

**Dissertação de Mestrado**

**REGIME DE UMIDADE EM UM SUBSTRATO REVEGETADO COM LODO DE  
ESGOTO NO DISTRITO FEDERAL**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Linha de Pesquisa: *Manejo e Conservação dos Recursos Naturais*

Orientador: Prof. Rodrigo Studart Corrêa

**PLANALTINA – DF  
MARÇO /2019**

## Ficha catalográfica

PT549r Pery Monteiro de Lima, Thyego

Regime de umidade em um substrato revegetado com lodo de esgoto no Distrito Federal / Thyego Pery Monteiro de Lima; Orientador: Rodrigo Studart Corrêa. -- Brasília, 2019.

97 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade de Brasília, 2019.

1. regime de umidade do solo. 2. substrato revegetado.  
3. lodo de esgoto. I. Studart Corrêa, Rodrigo, orient. II. Título.

**REGIME DE UMIDADE EM UM SUBSTRATO REVEGETADO COM LODO DE  
ESGOTO NO DISTRITO FEDERAL**

**THYEGO PERY MONTEIRO DE LIMA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS.

APROVADA POR:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Rodrigo Studart Corrêa (PPGCA/UnB)

---

Prof. Dr. Luiz Felipe Salemi (PPGCA/UnB)

---

Prof. Dr. Antonio Felipe Couto Junior (PPGCA /UnB)

## Resumo

O levantamento de áreas mineradas no Distrito Federal (DF) revelou a existência de 2.630 hectares explorados pela mineração e desprovidos de cobertura vegetal em 2015. A recuperação dessas áreas geralmente envolve a incorporação de uma fonte de matéria orgânica e nutrientes aos substratos minerados para reconstrução de um ambiente edáfico capaz de proporcionar o crescimento de plantas. No DF, o lodo de esgoto é utilizado nesse processo. Porém, as consequências dessa prática não estão totalmente compreendidas. Estudos constataram que substratos revegetados com lodo de esgoto no DF acumulam carbono orgânico ao longo do tempo, resultando em teores duas vezes mais altos em relação aos medidos em solos sob florestas na mesma região. Menos de 35% desse carbono orgânico nos substratos revegetados eram originários do lodo de esgoto inicialmente incorporado. A saturação por água por longos períodos é um dos fatores que pode explicar esse fenômeno. Nesse sentido, é necessário compreender o regime de umidade em substratos revegetados no Cerrado e, principalmente, entender se o comportamento da umidade favorece o acúmulo de carbono orgânico nesses materiais. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo verificar se o regime de umidade de um substrato de mineração revegetado com lodo de esgoto no Distrito Federal apresenta requisitos para proporcionar o acúmulo de carbono orgânico. Para isso, realizou-se a caracterização de um substrato minerado exposto, um substrato revegetado com lodo de esgoto e um solo sob Cerrado *strictu sensu*. Foram mensuradas as seguintes variáveis: densidade aparente, granulometria, condutividade hidráulica na saturação, teor de água à capacidade de campo e ponto de murcha permanente, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e resistência mecânica à penetração. Posteriormente, determinou-se o teor de água desses materiais ao longo da estação chuvosa de 2017/2018 e a tensão com que a água estava retida. Foi constatado que o substrato subsuperficial, o substrato revegetado e o solo sob Cerrado apresentam comportamentos distintos quanto à umidade. Ficou evidenciado que o substrato subsuperficial, localizado abaixo do substrato revegetado está submetido a um regime prolongado de alta umidade e apresenta condições que favorecem o acúmulo de carbono

**Palavras-chave:** regime de umidade do solo; substrato revegetado; lodo de esgoto.

## **Abstract**

The survey of mined areas in the Federal District (DF) revealed the existence of 2,630 ha exploited by mining activities and not covered by vegetation in 2015. The recovery of these areas usually involves the incorporation of an organic matter and nutrients source to the mined substrates for reconstruction of an edaphic environment capable of providing plant growth. In the DF, sewage sludge is used in this process. However, the consequences of this practice are not fully understood. Studies have found that substrates revegetated with sewage sludge in the DF accumulate organic carbon through the time, resulting in levels twice as high as those measured in soils under forests in the same region. Less than 35% of this organic carbon are from sewage sludge incorporation. Water saturation for long periods is one of the factors that may explain this phenomenon. In this sense, it is necessary to understand the moisture regime in revegetated substrates in the Cerrado and, especially, if the moisture regime favors the accumulation of organic carbon in these materials. Therefore, the present study aimed to verify whether the moisture regime of a mined substrate revegetated with sewage sludge in the Federal District presents requirements to provide the accumulation of organic carbon. For this, we performed the characterization of an exposed mined substrate, a revegetated substrate with sewage sludge and a soil under *strictu sensu* Cerrado. The following variables were measured: bulk density, granulometry, hydraulic conductivity at saturation, water content at field capacity and permanent wilting point, total porosity, microporosity, macroporosity and mechanical resistance to penetration. Subsequently, the water content of these materials was determined along the rainy season of 2017/2018 as well as the water tension. It was found that the subsuperficial substrate, the revegetated substrate and the soil under Cerrado are distinct materials regarding the moisture regime. It was evidenced that the subsuperficial substrate, which is below the revegetated substrate, was subjected to a prolonged high moisture regime and presents conditions that favor the accumulation of organic carbon.

**Keywords:** Soil moisture regime; revegetated substrate; sewage sludge.

## Sumário

Resumo.....	6
Abstract.....	7
1. Introdução .....	14
2. Objetivos .....	17
2.1. Objetivo geral.....	17
2.2. Objetivos específicos .....	17
3. Referencial Teórico .....	18
3.1. Impactos da exploração mineral no solo.....	18
3.2. Recuperação de áreas degradadas pela mineração .....	19
3.3. Áreas mineradas e revegetadas no DF .....	23
3.4. Água no solo.....	29
4. Materiais e Métodos .....	33
4.1. Caracterização da área de estudo.....	33
4.2. Obtenção de dados e delineamento experimental.....	36
4.2.1. Densidade aparente do solo .....	37
4.2.2. Granulometria .....	37
4.2.3. Condutividade hidráulica na saturação .....	37
4.2.4. Capacidade de Campo e o Ponto de Murcha Permanente .....	38
4.2.5. Porosidade total, macroporosidade e microporosidade .....	38
4.2.6. Resistência mecânica do solo à penetração de raízes .....	39

4.2.7. Pluviometria .....	41
4.2.8. Teor volumétrico de água.....	41
4.2.9. Teor volumétrico de ar .....	43
4.2.10. Tensão da água no solo.....	43
4.3. Coleta de amostras deformadas.....	45
4.4. Calibração dos equipamentos - Medição do conteúdo volumétrico de água ( $\theta_v$ ) e tensão ( $\psi$ ) em vasos.....	45
4.5. Análise estatística.....	47
5. Resultados e Discussão.....	50
5.1. Caracterização dos solos/substratos .....	50
5.1.1. Densidade aparente do solo .....	50
5.1.2. Granulometria .....	51
5.1.3. Condutividade hidráulica na saturação ( $K_{sat}$ ) .....	53
5.1.4. Capacidade de Campo (CC) e Ponto de Murcha Permanente (PMP) .	56
5.1.5. Porosidade total, macroporosidade e microporosidade .....	57
5.1.6. Resistência do solo à penetração de raízes.....	58
5.2. Teor volumétrico de água e ar nos solos/substratos .....	59
5.3. Tensão da água no solo .....	65
5.3.1. Tensão da água obtida por sensores.....	65
5.3.2. Tensão da água obtida por equação de van Genuchten.....	67
5.4. Análise de Componentes Principais .....	71
5.5. Regime de umidade.....	73

6. Considerações finais .....	76
Referências .....	77
APÊNDICE A - ANOVA e Testes de Tukey para caracterização do substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado.....	87
APÊNDICE B – Teores volumétricos de água, ar e tensão da água.....	91
APÊNDICE C – Análise de Componentes principais .....	94
APÊNDICE D - Regressão linear .....	96

## Lista de Figuras

Figura 3. 1 - Áreas mineradas no Distrito Federal (BIAS et al., 2018).....	23
Figura 3. 2 - Vista em corte de estrada de solo sobre material rochoso que pode apresentar deficiência de drenagem. Foto: Rodrigo Studart Corrêa. ....	28
Figura 4. 1 - Localização da área de estudo no ano de 2018 .....	34
Figura 4. 2 – A. Substrato exposto após mineração de cascalho em 2002. Foto: Rodrigo Studart Corrêa. B. Disposição de lodo de esgoto por caminhões no substrato exposto pela mineração. Foto: Rodrigo Studart Corrêa. C. Incorporação do lodo de esgoto ao substrato exposto com uso de grade aradora leve. Foto: Henrique Cruvinel. D. Substrato com lodo incorporado. Foto: Rodrigo Studart Corrêa. E e F. Árvores preservadas em porções originais do Cerrado e substrato revegetado com predominância de gramíneas. ....	35
Figura 4. 3 - Ilustração esquemática do perfil vertical da área de estudo, destacando substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado.....	36
Figura 4. 4 - A. Infiltrômetro de tensão modelo Mini Disk, produzido por Decagon Devices. Foto: Decagon Devices. B. Infiltrômetro Mini Disk sendo utilizado no substrato subsuperficial na área de estudo.....	38
Figura 4. 5 - Representação do Penetrômetro Stolf Reduzido produzido por Sondaterra Equipamentos Agronômicos. Fonte: Adaptado de Bento (2009).....	40
Figura 4. 6 - A. Bloco de resistência elétrica produzido em gesso. Foto: Delmhorst Instrument Co. B. Bloco de resistência instalado em campo com auxílio de trado. C. Sensor GS3 para medição de umidade e condutividade elétrica. Foto: Decagon Devices. D. Sensor MPS-6 para medição da tensão da água no solo. Foto: Decagon Devices.....	42
Figura 4. 7 - Datalogger modelo EM50 para armazenamento de dados digitais e analógicos. Fonte: Decagon Devices. ....	44

Figura 4. 8 - Valores da tensão da água no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado. ....	46
Figura 5. 1 - Densidade aparente do solo, do substrato subsuperficial e do substrato revegetado e solo sob Cerrado (valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey). ....	51
Figura 5. 2 - Classificação textural das camadas de substrato/solo estudado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). ....	52
Figura 5. 3 - Condutividade hidráulica na saturação ( $K_{sat}$ ) ( $mm\ h^{-1}$ ), na superfície do solo sob Cerrado, superfície do substrato revegetado, transição entre substrato revegetado/substrato subsuperficial e substrato subsuperficial na profundidade de 15 cm (valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey). ....	54
Figura 5. 4 - Vista da camada de substrato revegetado na área de estudo no mês de novembro (estação chuvosa). Foto: Rodrigo Studart Corrêa. ....	55
Figura 5. 5 - Porosidade total, macroporosidade e microporosidade ( $m^3\ m^{-3}$ ) do substrato revegetado, solo sob Cerrado e substrato da área de estudo (valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey para cada parâmetro mensurado). ....	57
Figura 5. 6 - Resistência mecânica a penetração do solo sob Cerrado e área revegetada .....	59
Figura 5. 7 - Teor volumétrico de água no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado ( $m^3\ m^{-3}$ ) e precipitação semanal acumulada (mm) em 22 semanas de observação. ....	60
Figura 5. 8 - Teor volumétrico de água no substrato subsuperficial ( $m^3\ m^{-3}$ ) em 22 semanas de observação. ....	61
Figura 5. 9 - Teor volumétrico de água no substrato revegetado ( $m^3\ m^{-3}$ ) em 22 semanas de observação. ....	62

Figura 5. 10 - Teor volumétrico de água no solo sob Cerrado ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em 22 semanas de observação. ....	63
Figura 5. 11 - Teor de ar do substrato, substrato revegetado e solo sob Cerrado ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em 22 semanas de observação. ....	64
Figura 5. 12 - Tensão da água (kPa) medida pelos sensores MPS-6 em 40 dias para o substrato subsuperficial, substrato revegetado e 100 dias para o solo sob Cerrado. ....	66
Figura 5. 13 – Teor volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) sob diferentes tensões (kPa). .	66
Figura 5. 14 - Curva de retenção de água no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado. ....	69
Figura 5. 15 - Correlação entre a tensão da água medida pelos sensores (kPa) e a tensão da água calculada pela equação (kPa).....	70
Figura 5. 16 - Tensão calculada da água no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado (kPa) em 22 semanas de observação, considerando o ponto de murcha permanente (1.500 kPa).....	70
Figura 5. 17 - Análise de Componentes Principais (PCA) para o substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado. Densidade aparente ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), areia grossa (%), areia fina (%), silte (%), argila (%), Ksat (condutividade hidráulica na saturação, $\text{mm h}^{-1}$ ), CC (teor volumétrico de água na capacidade de campo, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), PMP (teor volumétrico de água no ponto de murcha permanente, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), água disponível teor volumétrico de água disponível, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), porosidade total ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), microporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), macroporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), RMP (resistência mecânica a penetração, MPa), tempo acima da CC (tempo acima do teor volumétrico de água à capacidade de campo, semanas), tempo abaixo PMP (tempo abaixo do teor volumétrico de água ao ponto de murcha permanente, semanas) e tempo baixa porosidade de aeração (tempo com teor volumétrico de ar abaixo de 20% da porosidade total, semanas).....	72

## Lista de Tabelas

Tabela 3. 1 - Valores de variáveis físico-químicas para cinco fontes de matéria orgânica (% na matéria seca, com exceção do $pH_{H_2O}$ ).....	22
Tabela 3. 2 - Teor de Carbono Orgânico do Solo (COS) para a camada superficial de Latossolos na região do Distrito Federal. ....	25
Tabela 4. 1 - Resumo dos coeficientes gerados na regressão linear para obtenção de leitura em $m^3 m^{-3}$ no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado. ....	48
Tabela 5. 1 - Percentual médio de areia, silte e argila nas amostras de substrato revegetado, substrato e solo sob Cerrado.     52	
Tabela 5. 2 - Classes de condutividade hidráulica na saturação ( $K_{sat}$ ), em $mm h^{-1}$ . .....	55
Tabela 5. 3 - Teor volumétrico de água ( $m^3 m^{-3}$ ) à capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível dos solos/substratos investigados (valores seguidos pela mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey). ....	56
Tabela 5. 4 - Coeficientes da equação de Genuchten (1980) utilizados na obtenção das curvas de retenção de água no solo sob Cerrado, substrato revegetado e substrato.....	67
Tabela 5. 5 - Comparação entre os teores volumétricos água mensurados via extrator de Richards e aqueles calculados por meio da equação de Genuchten (1980), sob diferentes tensões, considerando o solo sob Cerrado, o substrato revegetado e o substrato subsuperficial. ....	68

## 1. Introdução

A exploração mineral causa impactos significativos aos ecossistemas. Geralmente, o desenvolvimento dessa atividade implica a supressão da cobertura vegetal, remoção da camada superficial do solo, exposição à superfície do horizonte C de solos ou da rocha matriz, podendo ocasionar processos erosivos e alterações na qualidade das águas superficiais e subterrâneas (CORRÊA, 2009; SHRESTHA e LAL, 2006, 2011). Bias et al. (2018) realizaram levantamento de áreas mineradas no Distrito Federal (DF) e apontou a existência de 168 jazidas exploradas e desprovidas de cobertura vegetal, somando 2.630 ha.

Substratos minerados demandam grande quantidade de matéria orgânica para serem revegetados. Nesse sentido, o lodo de esgoto pode ser considerado uma fonte (CORRÊA *et al.*, 2008). O lodo de esgoto produzido no DF é um subproduto do tratamento de esgotos domésticos e apresenta significativos teores de matéria orgânica ( $550 \text{ g kg}^{-1}$ ), nitrogênio ( $5,5 \text{ g kg}^{-1}$ ), fósforo ( $4,5 \text{ g kg}^{-1}$ ) e outros nutrientes em sua matéria seca. O estabelecimento espontâneo de uma cobertura vegetal herbácea é o efeito mais evidente após a incorporação de lodos de esgotos a substratos minerados no DF (SILVA *et al.*, 2013).

Silva et al. (2013) avaliaram os teores de carbono orgânico em uma cronossequência composta por cinco jazidas revegetadas com lodo do esgoto e concluíram que o sinergismo entre a adição de lodo de esgoto aos substratos expostos e o crescimento de plantas sobre eles resultou na acumulação de elevados teores de carbono no solo. Esses autores destacam que o carbono se acumulou, principalmente, na forma de compostos quimicamente estáveis nas frações físicas oclusas, ocasionando níveis muito mais elevados em relação àqueles observados em ecossistemas não perturbados na mesma região e sendo similares àqueles encontrados em solos hidromórficos. Silva et al. (2013) ainda constataram que mais de 65% do carbono orgânico do solo acumulado nesses ambientes tinham origem vegetal e o mecanismo específico para tal estabilização e acúmulo necessitaria de uma investigação mais detalhada. Nesse sentido, Silva et al. (2015) apontaram que o Fe presente nos substratos tratados com lodo de esgoto serviu de núcleo para a complexação e estabilização de carbono orgânico nas jazidas revegetadas. Todavia, esses autores atribuem à complexação pelo Fe parte do mecanismo de acumulação de carbono, restando a investigação de outros

mecanismos que expliquem o acúmulo de carbono orgânico nas jazidas revegetadas com lodo de esgoto no Distrito Federal (DF).

Resende et al. (1997) explicam que uma acumulação significativa de carbono no solo é resultado de um desequilíbrio entre a adição e a decomposição da matéria orgânica, possivelmente devido às alterações de temperatura do meio, mudanças na dinâmica da água, deficiência de oxigênio ou carência de nutrientes. Breemen e Buurman (2002) afirmam que a decomposição da matéria orgânica é majorada pela boa disponibilidade de oxigênio e nutrientes, altas temperaturas e baixos teores de cátions trivalentes (Al e Fe) ligados à matéria orgânica. Segundo os referidos autores, se um desses fatores não estiver dentro das condições ótimas, o processo de decomposição da matéria orgânica é dificultado, resultando no acúmulo de matéria orgânica no solo. No que tange ao teor de umidade do solo, Resende et al. (1997) afirmam que o excesso de água proporciona ao solo uma condição de decomposição lenta da matéria orgânica, provocando seu acúmulo e proporcionando um ambiente de baixo potencial de oxirredução. Assim, o Fe e o Mn são solubilizados e têm sua migração facilitada. Tanto a baixa disponibilidade de oxigênio quanto a condição redutora que atua sobre o Fe e Al, ocasionando na baixa mineralização de matéria orgânica, são fatores que resultam do excesso água do solo. Frequentemente, tais características descritas por Resende et al. (1997) são observadas em solos submetidos a um regime hidromórfico. Haridasan (1993) destaca que a saturação do solo por água na maior parte do ano é um dos fatores de formação de solos hidromórficos nas regiões tropicais que apresentam elevados teores de carbono.

Considerando que o mecanismo de nucleação por meio do Fe explica apenas uma parte do acúmulo de carbono orgânico e que a temperatura média anual do DF, que oscila entre 18 e 22 °C, não é baixa o suficiente para contribuir para a ocorrência desse fenômeno, este trabalho objetivou investigar o regime de umidade de um substrato revegetado com lodo de esgoto, baseado na hipótese de que o acúmulo de carbono orgânico previamente mensurado nele é resultado de seu regime de umidade.

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos. O Capítulo 1 trata da Introdução e o Capítulo 2 da definição do objetivo geral e específicos da pesquisa. O Capítulo 3 é um referencial teórico, abordando os impactos da mineração no solo, a recuperação de áreas degradadas por essa atividade, as áreas mineradas do

Distrito Federal e a dinâmica da água no solo. O Capítulo 4 é um detalhamento dos materiais e métodos da pesquisa, envolvendo a caracterização da área de estudo e o delineamento experimental. No Capítulo 5, são apresentados os resultados e discussões. Por fim, o Capítulo 6 expõe as considerações finais.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo geral**

Verificar se o regime de umidade de um substrato de mineração revegetado com lodo de esgoto no Distrito Federal apresenta condições para proporcionar o acúmulo de carbono orgânico.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Avaliar o regime de umedecimento e secamento de um substrato revegetado com lodo de esgoto no Distrito Federal;
- Determinar o período em que o mesmo substrato se mantém saturado por água.

### **3. Referencial Teórico**

#### **3.1. Impactos da exploração mineral no solo**

As alterações das características do solo é um problema presente em todo o mundo, muitas vezes sendo resultado da mineração, atividades industriais e práticas inadequadas na gestão de resíduos (GAY e KORRE, 2006). Quanto à mineração, ela é definida por Paone et al. (1978) como o processo ou atividade que objetiva a extração dos minerais desejados de seu lugar natural na terra. Shrestha e Lal (2006) apontam que em curto prazo, alguns minerais, como por exemplo carvão, gipsita, urânio e outros, possuem um valor econômico maior do que o solo que os cobre. Ainda segundo Shrestha e Lal (2006), a extração desses minerais pode ocorrer, principalmente, por meio de dois métodos: a mineração de superfície ou a mineração subterrânea, sendo que a proximidade desses minerais à superfície da terra é um dos principais fatores para se determinar qual método é o mais adequado.

No que tange à mineração de superfície, essa atividade causa a supressão da cobertura vegetal, remoção dos horizontes superficiais, alteração da topografia e das estruturas geológicas de forma permanente, modifica o regime hidrológico superficial e subterrâneo e retira nutrientes essenciais para o funcionamento de ecossistemas e para o equilíbrio ecológico (CORRÊA, 2009; SHRESTHA e LAL, 2006, 2011). Liu et al. (2008) destacam que a mineração nas últimas décadas contribuiu para a contaminação do solo, poluição das águas subterrâneas e diminuição da biodiversidade em diversos ambientes.

Identificar e mensurar as alterações causadas nas características do solo pela exploração mineral contribui para a compreensão dos impactos ambientais causados nesse ambiente. Buscando quantificar os efeitos da mineração nas propriedades físicas e químicas de solos minerados em Ohio, EUA, Shrestha e Lal (2011) apontaram que elas são significativas. Dentre essas modificações, destacaram-se o declínio acentuado nos teores de carbono orgânico e nitrogênio, aumento do pH, da condutividade elétrica e da densidade aparente do solo.

Segundo Corrêa (2009), a exploração mineral expõe à superfície material com atributos físicos, químicos e biológicos diferentes do solo natural, dificultando o processo de sucessão ecológica. Tais substratos, de forma geral, não possuem

a capacidade de cumprir a parte terrestre do ciclo hidrológico, ou seja, permitir a infiltração das precipitações para que a água seja lentamente liberada para corpos hídricos e aquíferos. Ao não infiltrar, a água escoar superficialmente, empobrecendo ainda mais os substratos e causando erosão.

Segundo Goedert e Corrêa (2004) e Corrêa (2009), os fatores que potencialmente limitam o estabelecimento e desenvolvimento de vegetação em áreas mineradas são intensos, pois os substratos expostos são mais compactados, estéreis, com baixos teores de matéria orgânica e nutrientes, baixa capacidade de infiltração das precipitações armazenamento de água para as. As alterações causadas nos atributos físicos e químicos do solo tem consequências diretas em suas propriedades hidráulicas. Para Silva et al. (2005), as modificações provocadas pelo revolvimento na estrutura, distribuição do tamanho dos poros e teor de carbono orgânico alteram as forças de retenção de água no solo e sua disponibilidade. Os resultados obtidos por Ankenbauer e Loheide II (2016) demonstraram que o teor de matéria orgânica e a retenção de água no solo possuem uma correlação positiva e que o aumento da retenção de água no solo causada pela matéria orgânica fornece um serviço benéfico à vegetação. Para Corrêa (2009), sob a perspectiva edafológica, sem armazenamento de água no substrato há reduzida chance de vida terrestre. Logo, a degradação pode ser vista como a quebra de ciclos naturais em sua porção terrestre. Machado et al. (2008) investigaram as interrelações entre as propriedades físicas e a retenção de água em um solo sob diferentes usos e concluíram que o aumento da densidade causado pela compactação do solo e a redução nos teores de matéria orgânica implicaram a redução da sua qualidade física e estrutural. Os autores explicaram as alterações negativas por meio de curvas de retenção de água no solo.

### **3.2. Recuperação de áreas degradadas pela mineração**

A recuperação da qualidade do solo e da função do ecossistema em substratos minerados depende do reestabelecimento da vegetação no local que, por sua vez, depende da melhoria das propriedades químicas e físicas dos solos perturbados. Os solos recuperados são fortemente influenciados pelo material parental, pelo procedimento de mineração utilizado, pelo método de recuperação e uso da terra após a recuperação. A recuperação de uma área minerada envolve

estratégias capazes de reduzir a perda de carbono orgânico do solo e sua compactação (SHRESTHA e LAL, 2006, 2011).

As atividades de recuperação de áreas degradadas pela mineração tipicamente envolvem a melhoria dos atributos físicos e a introdução de nutrientes na forma de matéria orgânica, que, em conjunto com a pressão de propágulos do grupo de espécies regionais, poderão desencadear a recuperação autogênica (SILVA et al., 2013). Porém, para Corrêa (2009), as perspectivas de regeneração natural em áreas mineradas no Cerrado não são promissoras porque o número de plantas espontaneamente desenvolvidas em tais áreas é insignificante, mesmo quando propágulos e sementes estão disponíveis no local. Ainda segundo esse autor, são raras as sementes que conseguem germinar e atingir o estágio de planta adulta sobre substratos minerados. Da mesma forma, a quantidade de raízes que permanece em substratos minerados diminui à medida que se aprofunda uma lavra, comprometendo assim os dois principais mecanismos de regeneração da vegetação nesse bioma, que são a germinação de sementes e a germinação de raízes que permanecem enterradas (CAVA et al., 2016; CORRÊA, 2009; DURIGAN et al., 1998).

A recuperação de ecossistemas é iniciada com a criação de condições que estimulam os caminhos da sucessão, que é definida como um processo de modificação do ambiente pelas comunidades que o habitam, iniciando com a colonização por uma comunidade simples e de pouca biomassa, evoluindo para uma comunidade clímax, cuja biomassa atinge o valor máximo possível para as condições locais. Como o processo de mineração remove as camadas superficiais do solo de uma área, a recuperação nesses locais pode ser comparada a um processo de sucessão primária, haja vista que se trata da colonização de um meio que nunca sofrera significativa influência biológica, como é o caso dos horizontes expostos de áreas mineradas (CORRÊA, 2009; ODUM e BARRETT, 2011). De acordo com Starr (2009), caso nenhum manejo seja realizado em tais áreas, o processo de recolonização pode demorar séculos.

Segundo Corrêa (2009), os vegetais necessitam de água, ar, luz, calor, fixação e nutrientes para que possam se desenvolver, cobrir substratos e restituir a parte terrestre dos ciclos naturais. Se qualquer um desses elementos estiver ausente, como por exemplo os nutrientes, que somam entre 0,5 e 5% da matéria seca das plantas, a vegetação não se estabelece e seu desenvolvimento é

impedido. Uma das formas de se fornecer à vegetação alguns dos elementos supracitados em áreas mineradas é incorporar matéria orgânica aos substratos. Substratos minerados apresentam teores de matéria orgânica abaixo de 1% e aumentar esse valor para 2%, no mínimo, é essencial para o sucesso da revegetação.

A matéria orgânica pode ser considerada como o atributo mais importante para a manutenção da sustentabilidade de ecossistemas e sua ausência implica a não existência de atividade que mantenha o ciclo evolutivo e adaptativo das plantas e dos animais que habitam a área. Esse material funciona como condicionador do solo, agregando partículas minerais e aferindo condições favoráveis de porosidade. Além disso, a matéria orgânica aumenta a retenção de água em solos, melhorando a capacidade de troca de cátions e ainda auxiliando a introdução e fixação de organismos vivos no solo (BENTO, 2009; RAIJ, 2011).

Quanto às fontes de matéria orgânica mais utilizadas na revegetação de substratos minerados no Distrito Federal, Corrêa (2009) afirma que são o esterco de gado, de cavalo, o composto de resíduos orgânicos e o lodo do tratamento de esgoto. A Tabela 3. 1 aponta os valores atribuídos à algumas variáveis físico-químicas de cinco fontes de matéria orgânica, que devem ser considerados no momento de se planejar a revegetação de substrato minerado.

Tabela 3. 1 - Valores de variáveis físico-químicas para cinco fontes de matéria orgânica (% na matéria seca, com exceção do pH<sub>H2O</sub>).

<b>Material</b>	<b>Matéria Orgânica*</b>	<b>pH<sub>H2O</sub></b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>
Lodo de esgoto	61	6,5	4,5	2	0,9	1,7	3
Composto de lixo	35	5,8	0,7	<0,2	2,2	8,2	0,1
Esterco Bovino	57	**	1,7	0,9	0,4	3,8	0,6

Fonte: Adaptado de Corrêa (2009)

\*Matéria orgânica, base seca

\*\*Valores não obtidos

Para o autor acima mencionado, a escolha da melhor fonte de matéria orgânica não depende apenas dos nutrientes que ela contém, devendo-se considerar também a quantidade disponível e o seu custo de aquisição, de transporte e de incorporação ao substrato. Nesse sentido, o composto de resíduos orgânicos e lodo oriundo do tratamento de esgoto são duas fontes de matéria orgânica economicamente vantajosas, principalmente devido à grande disponibilidade desses materiais e às restrições sanitárias para utilizá-los em outras atividades, tais como a agricultura.

Bento (2009) concluiu que o aumento dos teores de matéria orgânica com a incorporação do lodo de esgoto proporciona o aumento da disponibilidade de água e nutrientes para as plantas no substrato de mineração, demonstrando que este material é uma fonte de matéria orgânica importante para o aceleração dos processos de reconstrução dos solos em cascalheiras. Oliveira (2015) avaliou os efeitos da aplicação do lodo de esgoto e de plantas de cobertura na recuperação de uma área degradada em Brasília–DF, por meio de análises físicas (textura, densidade de partículas, densidade do solo), químicas (análise da fertilidade de solo, teor de carbono e nitrogênio, nitrogênio disponível, nitrato e amônio do solo) e microbiológicas (carbono da biomassa microbiana e respiração basal) em diferentes camadas do solo. A investigação dele corroborou a eficiência do lodo de esgoto associado a plantas de cobertura no incremento da fertilidade do solo, proporcionando benefícios aos atributos físicos, químicos e biológicos de substratos minerados.

### 3.3. Áreas mineradas e revegetadas no DF

Bias et al. (2018) realizou levantamento de áreas mineradas no Distrito Federal (DF) por meio de ortofotos imageadas em 2015 (Sirgas 2000), com 20 cm de resolução, revelando a existência de 168 jazidas exploradas e desprovidas de cobertura vegetal, que somavam 2.630 ha (Figura 3. 1).

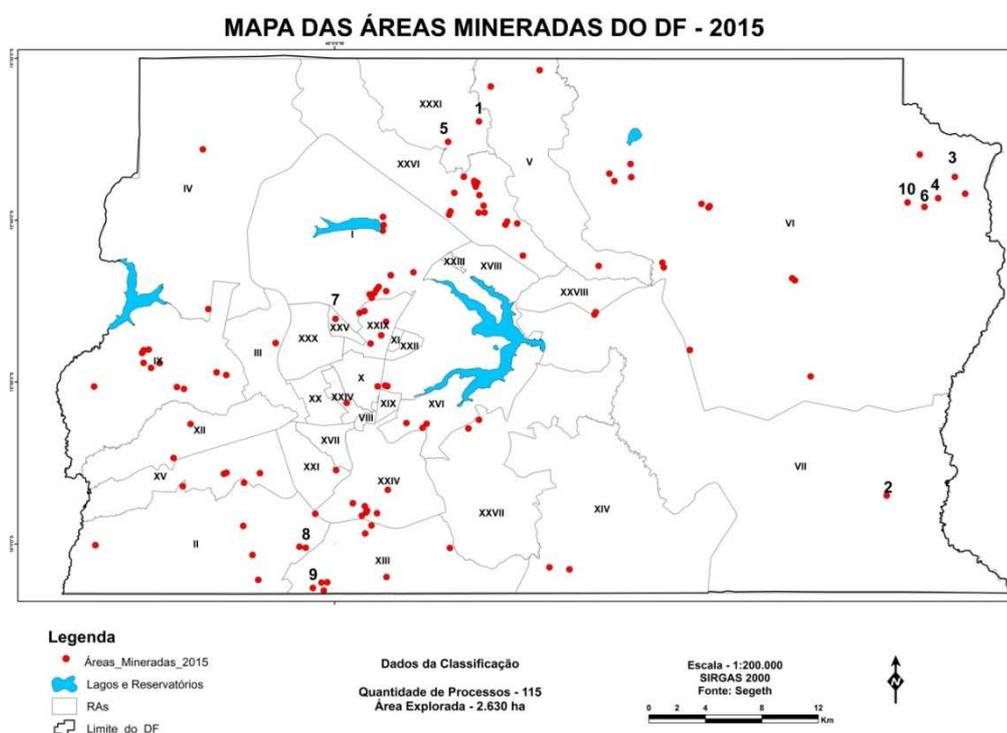


Figura 3. 1 - Áreas mineradas no Distrito Federal (BIAS et al., 2018)

Segundo Bento (2009), considerando a situação em que uma área se encontra degradada, a adição de matéria orgânica e revegetação pode ser uma alternativa para tornar a área novamente produtiva. Uma das fontes de matéria orgânica mais disponíveis no Distrito Federal é o lodo de esgoto. Batista (2015) estima que a produção de lodo desaguado no DF foi de 298 t.dia<sup>-1</sup> em 2014, destacando que o manejo do lodo nessa unidade federativa é realizado priorizando sua aplicação ao solo para recuperação de áreas degradadas. Tal manejo visa atender às exigências legais da Resolução CONAMA nº 375/2006, e a Resolução CONAM/DF nº 03/2006. Ambas estabelecem os limites máximos admissíveis de concentração de metais pesados, a classificação dos tipos de lodo conforme a

concentração de patógenos, as possibilidades de utilização de cada classe, além das necessidades de monitoramento da qualidade do lodo.

Estudos apontam que o processo de revegetação promove um avanço qualitativo nos substratos. Bento (2009) avaliou a qualidade dos substratos de cinco cascalheiras revegetadas com lodo de esgoto no Distrito Federal e constatou uma melhoria significativa dos atributos físicos (densidade aparente, porosidade total, resistência mecânica a penetração e água disponível), químicos (capacidade de troca catiônica, saturação por bases, variação do potencial hidrogeniônico e fósforo disponível) e biológicos (matéria orgânica do solo e macrofauna) nos substratos após a incorporação do lodo de esgoto. Ainda que houvesse registrado uma melhora nos atributos físicos, o autor aponta que esses foram os atributos que menos se assemelhava as características originais do solo do Cerrado, principalmente no que tange à resistência mecânica a penetração, podendo restringir o crescimento de raízes das espécies arbóreas introduzidas e de espécies sucessoras. Observações similares foram realizadas por Corrêa e Bento (2010), que avaliaram a qualidade edáfica de um substrato minerado revegetado com o uso de lodo de esgoto e concluíram que os atributos físicos do substrato revegetado são, entre os analisados, os menos semelhantes aos do solo original sob Cerrado e, como resultado, o substrato revegetado apresentou a metade da capacidade de o solo sob Cerrado armazenar água.

Outro fenômeno interessante que pode ser observado em substratos revegetados com lodo de esgoto no DF é o acúmulo de carbono acima do esperado. Silva et al. (2013) investigaram como a incorporação de matéria orgânica e nutrientes e a colonização espontânea de plantas promoveram a revegetação e o acúmulo de C-orgânico em substratos revegetados do DF. O estudo de Silva et al. (2013) utilizou uma cronosequência de 14 anos composta por cinco jazidas revegetadas e vinculou a mudança temporal nas comunidades vegetais e o acúmulo de C-orgânico, quantificando a influência da entrada de recursos e do estabelecimento de espécies na recuperação do solo. Esses autores constataram que após décadas de ausência de cobertura de vegetação, a incorporação de matéria orgânica a substratos minerados levou à colonização de espécies de plantas nativas e invasoras. Contudo, apesar do estabelecimento de várias espécies lenhosas, a vegetação herbácea dominou todos os sítios estudados.

Silva et al. (2013) verificaram que o carbono se acumulou ao longo de tempo, principalmente, na forma de compostos quimicamente estáveis nas frações físicas oclusas, ocasionando níveis muito mais elevados em relação àqueles observados em ecossistemas não perturbados da mesma região. A assinatura isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ ) da matéria orgânica aplicada, da vegetação colonizadora e do carbono orgânico do solo resultante apontou que 65% do carbono orgânico do solo acumulado nesses ambientes tinha origem de vegetação  $\text{C}_4$  e os 35% restante eram originários de vegetação nativa  $\text{C}_3$  e do lodo de esgoto inicialmente incorporado ao substrato exposto pela mineração, sendo que o mecanismo específico para tal estabilização e acúmulo necessitava de uma investigação mais detalhada. Silva et al. (2013) ainda apontaram que os maiores valores de carbono orgânico, aproximadamente  $96 \text{ g kg}^{-1}$  na camada 0-5cm, foram encontrados entre o terceiro e o nono ano após a incorporação do lodo e que tais níveis se comparam àqueles encontrados em solos hidromórficos e cerca de duas vezes mais altas em relação aos medidos em florestas estabelecidas na mesma região. A Tabela 3. 2 indica valores médios de Carbono Orgânico no Solo (COS) levantados na camada superficial de Latossolos não perturbados no Distrito Federal.

Tabela 3. 2 - Teor de Carbono Orgânico do Solo (COS) para a camada superficial de Latossolos na região do Distrito Federal.

<b>Teor de COS (<math>\text{g kg}^{-1}</math>)</b>	<b>Autor</b>
19,49	Costa et al. (2006)
26,22	Araújo et al. (2007)
12,94	Corrêa e Bento (2010)
28,41	Oliveira (2015)
28,54	Mota (2017)

Fonte: Adaptado dos estudos mencionados

Deve-se ponderar que os estudos apontados pela Tabela 3. 2 ocorreram em lugares e camadas diferentes de solo com distintas classificações. Porém, pode-se obter uma noção dos valores médios de carbono encontrados na camada superficial dos solos da região. Verifica-se que o valor de  $96 \text{ g kg}^{-1}$  encontrado por Silva et al. (2013) é cerca de quatro vezes maior que a média de  $23 \text{ g kg}^{-1}$  apontada pelos outros estudos citados e também maior que o valor de  $82 \text{ g kg}^{-1}$  encontrado

por Rodolfo Júnior et al. (2015) para um Organossolo da mesma região. Silva et al. (2015) investigaram se o acúmulo de carbono observado por Silva et al. (2013) foi facilitado pela formação de complexos nucleados pelo Fe. Essa hipótese baseava-se na interação entre os processos biológicos e a estabilização química de materiais orgânicos como um passo para a formação de agregados e acumulação de carbono em solos. A hipótese de Silva et al. (2015) considerava que os óxidos de Fe eram os agentes de formação de agregados dominantes no solo original, e que um teor de Fe significativamente mais reativo, aquele oriundo da precipitação fêrrica no tratamento terciário de esgoto, fora adicionado ao sistema juntamente com o lodo. Utilizando análises isotópicas e elementares, tal hipótese foi testada e o estudo identificou uma rápida formação de microagregados logo após a aplicação de lodo, caracterizado por uma forte associação entre o Fe e a matéria orgânica derivada de plantas. Os autores ainda apontam que a formação de macroagregados precedeu o desenvolvimento de microagregados, que aumentou drasticamente o teor de carbono do solo alguns anos após a restauração. Nesse sentido, concluiu-se que o Fe presente nos substratos tratados com lodo de esgoto serve de núcleo para a complexação e estabilização de carbono orgânico nas jazidas revegetadas. Todavia, esses autores atribuem a esse mecanismo parte da acumulação de carbono, restando a investigação de outros mecanismos que expliquem o expressivo acúmulo de carbono orgânico nos substratos revegetados com lodo de esgoto no Distrito Federal.

O balanço de carbono no solo é representado pelo equilíbrio entre a entrada desse elemento por meio da produção primária e sua saída pela decomposição /respiração (AMUNDSON, 2001). Portanto, o fenômeno investigado por Silva et al. (2013, 2015) pode indicar que há um desequilíbrio entre produção primária e decomposição de matéria orgânica em substratos revegetados com lodo de esgoto, propiciando o acúmulo de carbono observado no solo. Resende et al. (1997) explicam que esse desequilíbrio entre a incorporação e a decomposição da matéria orgânica pode ser uma consequência de alterações de temperatura do solo, mudanças na dinâmica da água, deficiência de oxigênio ou carência de nutrientes. Breemen e Buurman (2002) esclarecem que a decomposição da matéria orgânica é majorada pela boa disponibilidade de oxigênio e nutrientes, altas temperaturas e baixos teores de cátions trivalentes (Al e Fe) ligados à matéria orgânica. Se um desses fatores não estiver dentro das condições ótimas, o processo de

decomposição da matéria orgânica é dificultado, resultando no acúmulo de matéria orgânica. No que tange ao teor de umidade do solo, Resende et al. (1997) afirmam que o excesso de água condiciona ao solo uma decomposição lenta da matéria orgânica, provocando seu acúmulo e proporcionando um ambiente de baixo potencial de oxirredução. Assim, o Fe e o Mn são solubilizados e tem sua migração facilitada. Corroborando esse pensamento, Barcellos et al. (2018) demonstram que a umidade do solo está positivamente relacionada com as concentrações de carbono orgânico dissolvido e  $Fe^{+2}$  em solos tropicais caracterizados por abundância de Fe e submetidos a altas precipitações. Barcellos et al. (2018) ainda afirmam que a quantidade de carbono orgânico dissolvido nesses ambientes depende diretamente do processo de redução do  $Fe^{+3}$ , sugerindo que a diminuição do carbono orgânico dissolvido é impulsionada pela desorção/dissolução da matéria orgânica a partir de fases reativas de  $Fe^{+3}$ .

Frequentemente, o acúmulo de carbono e baixos potenciais de oxirredução são observados em solos submetidos a um regime hidromórfico. No que tange ao hidromorfismo, Brady e Weil (2013) preconizam que os solos hidromórficos são definidos por três atributos: primeiro, eles estão sujeitos a períodos de saturação por água, dificultando a difusão de  $O_2$  para o interior do solo. Segundo, esses solos ficam submetidos por longos períodos a condições de redução, onde os receptores de elétrons estão sendo reduzidos. Terceiro, eles exibem alguns indicadores do hidromorfismo, como por exemplo, perda ou acúmulo localizado de formas de Fe, Mn, S ou C. Nascimento et al. (2010) afirmam que nos solos hidromórficos, a dinâmica do carbono é influenciada pelo déficit de  $O_2$ , condição que diminui a taxa de decomposição e gera produtos diferenciados em relação aos solos bem drenados. Haridasan (1993) destaca que a saturação do solo por água na maior parte do ano é um dos fatores de formação de solos hidromórficos nas regiões tropicais, apresentando elevados teores de carbono.

Haridasan (1993) explica que solos hidromórficos geralmente ocorrem em depressões, linhas de drenagem e em áreas com deficiência de drenagem do subsolo. A existência de uma camada impermeável no subsolo (Figura 3. 2) pode fazer com que o solo acima dela esteja submetido à uma má drenagem. No caso das jazidas mineradas, a topografia remanescente após a mineração, geralmente côncava, e a baixa capacidade de infiltração de água nos substratos expostos à superfície favorecem a formação e manutenção de um ambiente encharcado.

Considerando a definição de hidromorfismo de Brady e Weil (2013), verifica-se que a existência de um ambiente encharcado, por si só, não é suficiente para assegurar a ocorrência de um regime hidromórfico em áreas mineradas. Deve-se determinar, complementarmente, o período em que o solo permanece saturado por água, a existência de prolongadas condições de redução e a ocorrência de algum indicador de hidromorfismo.



Figura 3. 2 - Vista em corte de estrada de solo sobre material rochoso que pode apresentar deficiência de drenagem. Foto: Rodrigo Studart Corrêa.

As características diferenciadas dos solos reconstruídos com lodo de esgoto podem ter implicações sobre o funcionamento ecológico desses ambientes no Cerrado. Eiten (1993) explica que o efeito do principal filtro ecológico existente, o clima, é indireto no Cerrado, sendo o efeito edáfico direto nesse bioma. O autor exemplifica que o clima existente no Cerrado pode sustentar ao mesmo tempo formações campestres, florestais e savânicas, a depender das características do solo. Considerando que solos reconstruídos com lodo de esgoto não possuem as mesmas características dos solos originais, tais ambientes recuperados podem direcionar processos de sucessão que estabelecerão comunidades vegetais distintas das originalmente presentes em cada local.

Objetivando avaliar a restauração de jazidas revegetadas com o uso de lodo de esgoto, Souza (2017) comparou a composição florística, a riqueza de espécies e a diversidade funcional do estrato arbustivo-arbóreo entre duas jazidas

revegetadas com lodo de esgoto e duas áreas adjacentes de vegetação nativa em Cerrado sentido restrito. A investigação apontou que as jazidas revegetadas com lodo de esgoto são floristicamente diferentes das áreas nativas, visto que o Índice de Similaridade de Jaccard apresentou valores menores que 7% de semelhança entre as duas áreas. Souza (2017) indicou que a riqueza de espécies foi menor nas jazidas revegetadas em relação às áreas nativas, sendo que os números de espécies encontradas nas jazidas revegetadas foram em média cinco vezes menores que o encontrado nas áreas de Cerrado nativo. A investigação também apontou que os valores de diversidade de grupos funcionais e de diversidade funcional expressada pelo Índice FRic (riqueza funcional) foram menores nas jazidas revegetadas.

Eiten (1993) afirma que o Cerrado ocorre em um gradiente de formas fisionômicas, dependendo de três aspectos: 1) a fertilidade e o correlacionado teor de Al disponível. 2) a profundidade efetiva do solo; e 3) o grau e duração de saturação por água da camada superficial ou subsuperficial. O terceiro aspecto listado por esse autor é o foco de investigação do presente trabalho.

### **3.4. Água no solo**

A água possui um papel fundamental para o funcionamento ecológico dos solos, tanto para desenvolvimento dos organismos ali presentes como para os processos físico-químicos. Conforme Brady e Weil (2013), o regime de umidade ao qual o solo está submetido é um dos mais importantes condicionantes da produtividade dos ecossistemas terrestres. Reichardt e Timm (2012) destacam que a escassez ou excesso de água afetam de forma decisiva o desenvolvimento das plantas e, por esse motivo, seu manejo racional é imperativo. Brye e Gbur (2010) afirmam que a própria formação do solo e suas propriedades são influenciados pela água. Em particular, o armazenamento e a ciclagem de carbono e nitrogênio estão intimamente associados às flutuações de umidade do solo.

Brady e Weil (2013) descrevem os processos que ocorrem quando um solo é saturado e que passa pelo processo de secagem, destacando que ele e o seu conteúdo de água sofrem alterações graduais no comportamento físico e na sua relação com as plantas. A capacidade máxima de retenção de água pelo solo ocorre

quando todos os seus poros se encontram preenchidos com água e, nesse estado, o potencial matricial está próximo a zero. Quando a capacidade máxima de retenção de água pelo solo é atingida, o teor volumétrico de água ( $\theta_v$ ) é essencialmente o mesmo que a porosidade total. Nesse estado o solo encontra-se saturado, com insignificante conteúdo de ar e  $O_2$ . Após algum tempo, sob influência da gravidade e do gradiente hidráulico, a água nos macroporos é drenada. Porém, os microporos se mantêm cheios, podendo suprir as plantas. Este último estado é denominado capacidade de campo e representa a máxima quantidade de água útil às plantas. Nesse estado, o solo contém água e ar e os processos aeróbicos não são prejudicados.

À medida que a evaporação ocorre e as raízes absorvem água, o solo seca e a taxa de retirada da água diminui. Ao longo desse processo, a água atinge um estado em que está tão fortemente retida pelo solo que a planta não consegue mais utilizá-la. Nesse estado, o teor de água é chamado de Ponto de Murcha Permanente. Comumente, assume-se um potencial matricial de -10 a -30 kPa para a Capacidade de Campo e de -1500 kPa para o Ponto de Murcha Permanente (BRADY e WEIL, 2013; REICHARDT e TIMM, 2012). Portanto, a água disponível às plantas é aquela retida com potenciais matriciais entre a Capacidade de Campo e o Ponto de Murcha Permanente.

O regime de umidade do solo refere-se a presença ou ausência de água disponível para a vegetação durante períodos específicos de tempo (BRADY e WEIL, 2013). Esse regime refere-se ao comportamento da umidade do solo ao longo de um período temporal específico. Os regimes de umidade podem ser utilizados como critério de classificação dos solos, porque influenciam a pedogênese (formação do solo), sua utilização e gestão, bem como podem ser utilizados para agrupar solos com propriedades e morfologia semelhantes. As classes de regime de umidade definidas por Brady e Weil (2013) são: **Áquico**, quando o solo permanece saturado por água e praticamente livre de oxigênio gasoso por períodos de tempos suficientes para apresentar indícios de má aeração. **Údico**, quando os teores de água no solo são suficientemente altos para atender às necessidades das plantas o ano todo na maioria dos anos. **Perúdicico**, quando o regime possui excesso de umidade e tal fato ocasiona a lixiviação ao longo de todos os meses do ano. **Ústico**, quando os teores de água são intermediários entre os regimes Údicos e Arídico, apresentando um pouco de umidade disponível para as

plantas durante o período de crescimento, apesar de poderem ocorrer períodos significativos de seca. **Árido** ocorre quando o solo permanece seco durante, minimamente, metade da estação de crescimento das plantas e úmido por menos de noventa dias consecutivos. Por fim, o regime **Xérico** é caracterizado por longos períodos de seca, geralmente presente em regiões de clima do tipo mediterrânico.

A dinâmica da água em ambientes recuperados após a mineração necessita ser mais investigada para saber se esses ambientes tem a capacidade de sustentar uma comunidade similar àquela existente antes da exploração e para se avaliar o regime de umidade de cada local (BRADY e WEIL, 2013). Cejpek et al. (2013) afirmam que apesar de as tecnologias de recuperação afetarem positivamente o solo degradado, seus efeitos sobre as propriedades hidrológicas e o regime de umidade são insuficientemente compreendidos. Nesse contexto, Cejpek et al. (2013) investigaram as propriedades hidrológicas e o regime de umidade de solos recuperados e não recuperados de diferentes idades em Sokolov, região da República Tcheca, que se destaca pela extração de carvão mineral. A investigação concluiu que as áreas não recuperadas apresentaram uma heterogeneidade muito grande quanto à umidade do solo e que a combinação de um ponto de murcha permanente mais elevados e um maior consumo de água resultou em deficiências de água semelhantes em solos recuperados e não recuperados. Esses autores destacam que a investigação conduzida naquele âmbito não foi capaz de corroborar a ideia de que a recuperação de áreas degradadas pela reposição de topsoil sobre a superfície do terreno proporciona melhorias nas propriedades hidrológicas do solo em longo prazo. Para Sidorova e Borisova (2018), a umidade do solo é um dos fatores que determina o funcionamento dos ecossistemas naturais e dos ecossistemas transformados. Estudo conduzido por Yair e Danin (1980), em Israel, investigou a distribuição espacial da umidade do solo e a correlacionou com a distribuição espacial de plantas e comunidades vegetais da região. Os resultados apontaram que uma disponibilidade maior de água proporcionou uma maior diversidade de plantas e comunidades vegetais no ambiente estudado.

Leatherdale et al. (2012) estudaram o comportamento da umidade em diferentes áreas recuperadas em Alberta, no Canadá, região que se destaca pela exploração mineral de depósitos betuminosos. Os autores explicaram que, nesse tipo de exploração mineral, o relevo existente é substituído por pilhas de materiais estéreis e rejeitos, criando grandes montes na região. Após a atividade exploração,

os materiais estéreis e rejeitos acumulados são misturados com outros materiais para recompor o solo da área minerada. Esses autores observaram que os solos investigados apresentaram diferenças na capacidade de armazenamento de água devido aos diferentes teores de argila, areia e matéria orgânica. Os solos reconstruídos desse trabalho, caracterizados por possuírem uma fração maior de material grosseiro, apresentaram uma maior condutividade hidráulica e uma menor capacidade de armazenar água para a vegetação. Um dos solos investigados, caracterizado pela maior proporção areia e pelo menor teor de carbono orgânico, apresentou teor volumétrico de água abaixo do ponto de murcha permanente durante a maior parte da estação de crescimento da vegetação e não foi capaz sustentar o desenvolvimento das plantas.

Apesar de existirem investigações que descrevem as propriedades hidrológicas de substratos revegetados, ainda se faz necessário compreender as características do regime de umidade desses materiais no bioma Cerrado e, principalmente, se o comportamento da umidade pode proporcionar o acúmulo de carbono orgânico no solo.

## 4. Materiais e Métodos

### 4.1. Caracterização da área de estudo

O presente trabalho ocorreu em uma cascalheira revegetada com lodo de esgoto, localizada às margens da rodovia BR-060, no Distrito Federal (Figura 4. 1). A área fora minerada para retirada de cascalho em 2001 e 2002, que resultou em uma cava de 64 ha. A geologia da área de estudo pertence ao Grupo Canastra, unidade Meso-neoproterozóico (FREITAS-SILVA e CAMPOS, 1998). O local onde se situa a área de estudo pertence à macrounidade de Região de Chapada, que ocupa em torno de 35% da área de todo o DF e caracteriza-se por topografia plana a plano-ondulada, acima da cota 1.000 m. Para uma melhor caracterização pedológica da região, o trabalho realizado pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos Embrapa (1978) indicou que se trata de uma área de Cambissolo Háplico, de onde cascalho é comumente extraído.

No Distrito Federal predomina o clima Tropical de Savana – (Aw - Köppen-Geiger) (PEEL et al, 2007). A precipitação média anual é aproximadamente 1.500 mm, com 84% do volume precipitado no verão (INMET, 2018). A temperatura média mensal oscila entre 19 e 22 °C e a umidade relativa do ar média anual é de 66%.

Silva et al. (2013) explicam que a área de estudo era originalmente coberta por Cerrado típico. A presença desse tipo de vegetação está condizente com Embrapa (1978), que afirma que a fitofisionomia de Cerrado Típico pode ocorrer em Cambissolos.

A exploração de cascalho aconteceu nos anos 2001 e 2002, expondo uma superfície plana de 4 a 6 m abaixo do nível original do terreno. A incorporação de lodo ao substrato minerado (Figura 4. 2 A, B, C e D) ocorreu em 2002 e a dosagem utilizada foi de 250 Mg ha<sup>-1</sup>, com 88% de umidade, resultando em 30 Mg ha<sup>-1</sup> de matéria seca. O processo de incorporação do lodo com a utilização de grade aradora leve fez a matéria orgânica alcançar a profundidade de até 15 cm do substrato exposto pela mineração.

Havia fragmentos de Cerrado sentido restrito na área. Visando estimular a revegetação natural por meio de sementes, árvores nativas adultas foram preservadas em porções originais do dentro da jazida (Figura 4. 2 E e F).

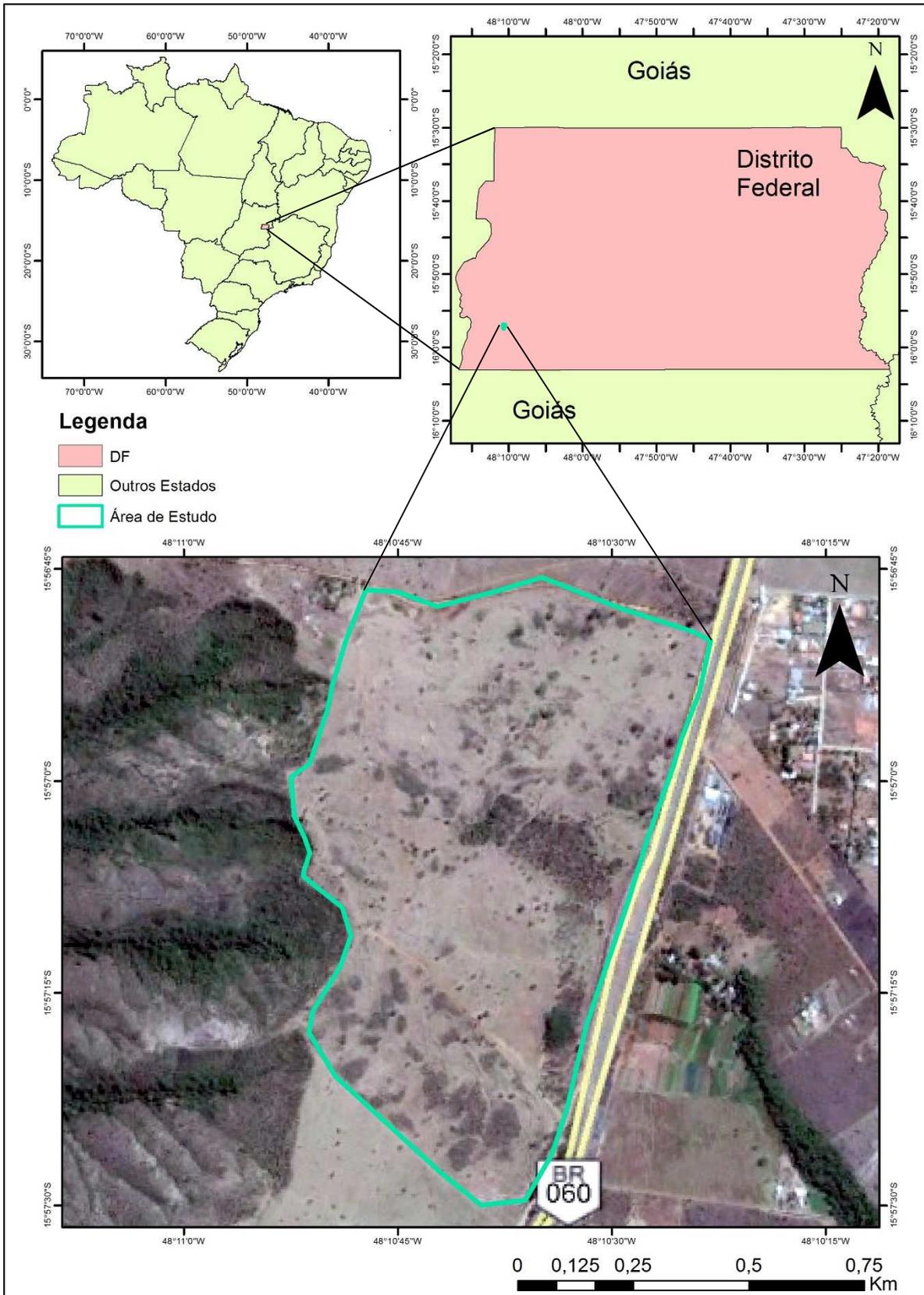


Figura 4. 1 - Localização da área de estudo no ano de 2018



Figura 4. 2 – **A.** Substrato exposto após mineração de cascalho em 2002. Foto: Rodrigo Studart Corrêa. **B.** Disposição de lodo de esgoto por caminhões no substrato exposto pela mineração. Foto: Rodrigo Studart Corrêa. **C.** Incorporação do lodo de esgoto ao substrato exposto com uso de grade aradora leve. Foto: Henrique Cruvinel. **D.** Substrato com lodo incorporado. Foto: Rodrigo Studart Corrêa. **E e F.** Árvores preservadas em porções originais do Cerrado e substrato revegetado com predominância de gramíneas.

## 4.2. Obtenção de dados e delineamento experimental

A investigação foi subdividida em três etapas no que tange à obtenção de dados e informações sobre os solos/substratos da área investigada. A primeira etapa consistiu na caracterização do substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado (Figura 4. 3). Na segunda etapa ocorreu a coleta de amostras deformadas desses materiais para realização de testes em vasos e calibração dos equipamentos. Por fim, a terceira etapa consistiu na mensuração *in loco* do teor volumétrico de água ( $\theta_v$ ) sob diferentes tensões ( $\psi$ ) nos materiais investigados.

Foram analisados no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob cobertura nativa de Cerrado sentido restrito a densidade aparente, a granulometria, a condutividade hidráulica na saturação, o teor volumétrico de água à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, a porosidade total, a microporosidade, a macroporosidade, a curva do teor volumétrico de água, a curva de retenção de água no solo e a resistência mecânica à penetração de raízes.

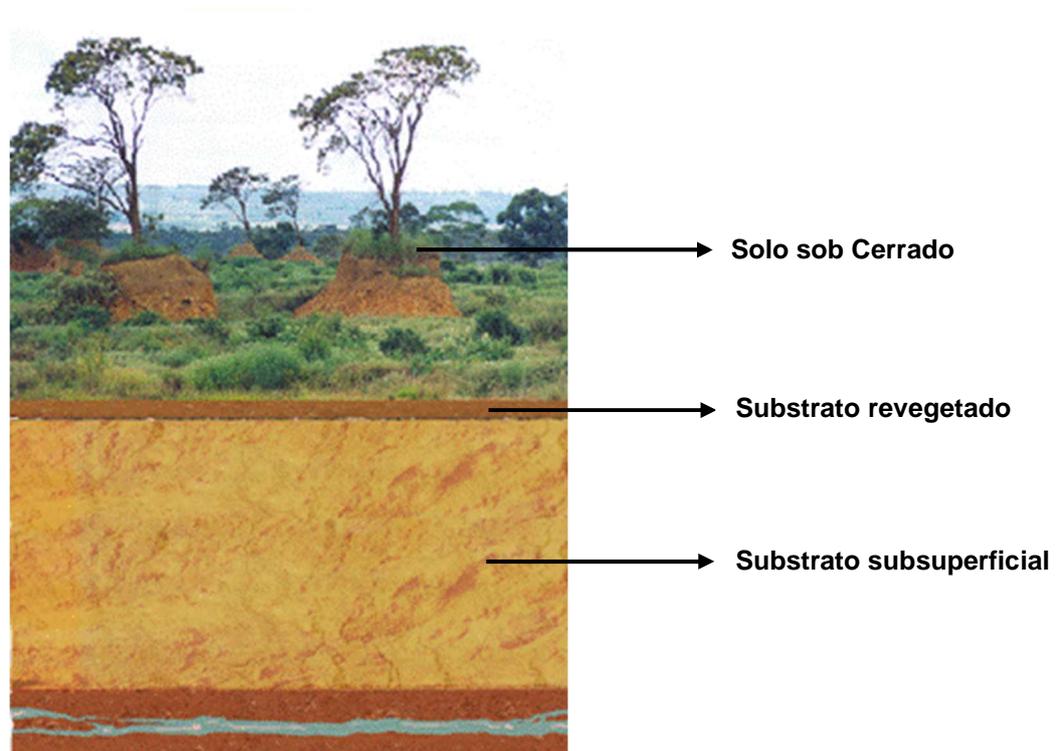


Figura 4. 3 - Ilustração esquemática do perfil vertical da área de estudo, destacando substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado.

#### **4.2.1. Densidade aparente do solo**

A densidade aparente foi obtida pelo método do anel volumétrico, coletando-se amostras indeformadas através de um anel de aço (Kopecky) com volume interno de 150 cm<sup>3</sup>, conforme descrito por Embrapa (1997). Esse parâmetro foi determinado em triplicata no substrato minerado, no substrato revegetado e no solo sob Cerrado, totalizando nove amostras.

#### **4.2.2. Granulometria**

A granulometria do solo foi determinada pelo método da pipeta, que se baseia na velocidade de queda das partículas que compõem o solo, em conformidade com Embrapa (1997). Esse parâmetro foi determinado em triplicata no substrato minerado, no substrato revegetado e no solo sob Cerrado, totalizando nove amostras.

#### **4.2.3. Condutividade hidráulica na saturação**

Para a obtenção da condutividade hidráulica na saturação dos solos/substratos ( $K_{sat}$ ), utilizou-se o infiltrômetro de tensão Mini Disk (Figura 4. 4) produzido pela Decagon Devices. Esse parâmetro foi mensurado em quatro pontos na superfície do solo sob Cerrado, em doze pontos na superfície do substrato revegetado, em onze pontos na transição entre o substrato revegetado e o substrato subsuperficial e doze pontos na profundidade 15 cm do substrato subsuperficial, totalizando trinta e nove medições na área de estudo. A diferença no número de medições em cada camada se deve ao fato de que aquelas que apresentaram uma maior variabilidade nos dados foram objeto de medições adicionais, reduzindo o desvio dos dados.



Figura 4. 4 - **A.** Infiltrômetro de tensão modelo Mini Disk, produzido por Decagon Devices. Foto: Decagon Devices. **B.** Infiltrômetro Mini Disk sendo utilizado no substrato subsuperficial na área de estudo.

#### **4.2.4. Capacidade de Campo e o Ponto de Murcha Permanente**

A Capacidade de Campo (CC) e o Ponto de Murcha Permanente (PMP) do substrato subsuperficial, do substrato revegetado e do solo sob Cerrado foram mensurados em mesa de tensão, a 30 kPa e 1.500 kPa, com a utilização de cilindros metálicos de 150 cm<sup>3</sup> (EMBRAPA, 1997). Esses parâmetros foram determinados em triplicata no substrato minerado, no substrato revegetado e no solo sob Cerrado, totalizando nove amostras. A mensuração do teor de água à CC e ao PMP permitiu a determinação da faixa de água disponível à vegetação.

#### **4.2.5. Porosidade total, macroporosidade e microporosidade**

A porosidade total foi estimada pela relação entre a densidade aparente e a densidade de partículas, conforme a Equação 4. 1, definida por Reichardt e Timm (2012). Esse parâmetro foi determinado em três amostras do substrato minerado, três amostras do substrato revegetado e três amostras da camada do solo sob Cerrado, totalizando nove amostras.

Equação 4. 1:

$$Pt = 1 - \frac{Ds}{Dp}$$

Em que:

Pt: Porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ );

Ds: Densidade aparente ( $kg m^{-3}$ ); e

Dp: Densidade de partículas ( $kg m^{-3}$ ). Assumiu-se o valor de 2,65.

A microporosidade foi considerada como o teor volumétrico de água retida pelo solo na tensão de 6 kPa em câmara de Richards, conforme definido por Reichardt e Timm (2012) e aplicado por Dalmago et al. (2009) e Andrade e Stone (2011). Esse parâmetro foi determinado em três amostras do substrato minerado, três amostras do substrato revegetado e três amostras da camada do solo sob Cerrado, totalizando nove amostras

A macroporosidade foi calculada pela diferença entre porosidade total e microporosidade, em conformidade com Embrapa (1997). Esse parâmetro foi determinado em triplicata no substrato minerado, no substrato revegetado e no solo sob Cerrado, totalizando nove amostras.

#### **4.2.6. Resistência mecânica do solo à penetração de raízes**

A resistência mecânica do solo à penetração de raízes (RMP) foi mensurada por meio de um Penetrômetro Stolf Reduzido, fabricado pela empresa Sondaterra Equipamentos Agronômicos. O equipamento possuía uma massa de impacto de 1,59 kg, altura de queda da massa de impacto de 58,8 cm, haste inferior de 60 cm e uma ponteira com área de  $2,27cm^2$  (Figura 4. 5). Realizaram-se quatro ensaios para o solo sob Cerrado e seis ensaios para o substrato revegetado, totalizando dez ensaios para a área de estudo.

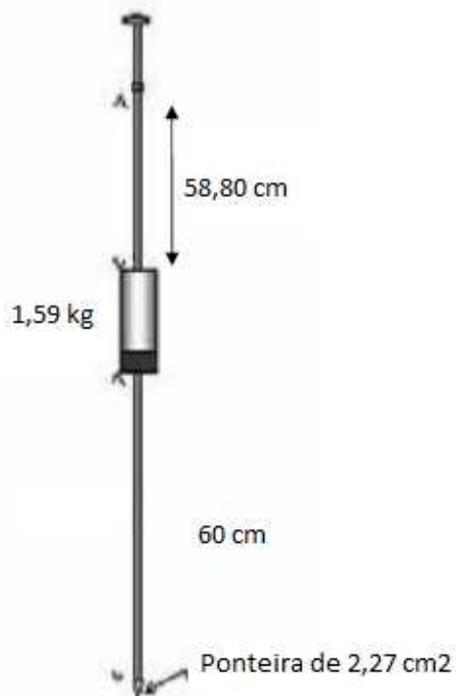


Figura 4. 5 - Representação do Penetrômetro Stolf Reduzido produzido por Sondaterra Equipamentos Agrônômicos. Fonte: Adaptado de Bento (2009).

Considerando que a resistência mecânica à penetração é influenciada pela umidade do solo, o penetrômetro foi utilizado em um mesmo dia no substrato minerado, substrato revegetado e solo sob Cerrado, durante o período chuvoso de 2018 e seguindo as instruções de Stolf et al. (1983). Os resultados obtidos em campo (número de impactos) foram convertidos em força/unidade de área por meio da Equação 4. 2, elaborada especificamente para o equipamento utilizado (STOLF, 1990).

Equação 4. 2:

$$RMP = 1,36 + 2,121 N$$

Em que:

RMP: Resistência mecânica à penetração (kgf cm<sup>-2</sup>);

N: unidade prática de resistência do solo (impactos dm<sup>-1</sup>)

Para melhor representação dos dados, os valores obtidos com a Equação 4.2 e expressos em  $\text{kgf cm}^{-2}$  foram convertidos para MPa dividindo-os por 10, conforme Stolf et al. (2014).

#### **4.2.7. Pluviometria**

Os dados pluviométricos foram coletados da estação meteorológica automática Gama (A046) do Instituto Nacional de Meteorologia, situada à 5 km da área de estudo.

#### **4.2.8. Teor volumétrico de água**

A determinação do teor volumétrico de água ( $\theta_v$ ) ocorreu por meio de dois tipos de sensores. O primeiro deles é o sensor GS3, produzido pela Decagon Devices (Figura 4.6 C). O segundo tipo de sensor são blocos de resistência elétrica fabricado em gesso (Brady e Weil, 2013; Reichardt e Timm, 2012) (Figura 4.6 A e Figura 4.6 B).

As medições realizadas por meio dos blocos de resistência elétrica foram calibradas com as leituras do sensor GS3 de teor volumétrico de água. A leitura simultânea dos dois tipos sensores possibilitou a obtenção de um número maior de dados sobre a área de estudo, uma vez que o número dos blocos de resistência elétrica era trinta vezes maior que o de sensores GS3 disponíveis.

Os equipamentos para medição *in loco* do teor volumétrico de água ( $\theta_v$ ) e tensão da água ( $\psi$ ) foram instalados em 16/12/2017 e retirados em 12/05/2018, totalizando 22 semanas de monitoramento das supracitadas variáveis. Os sensores Decagon GS3 e MPS-6 foram programados para executar medições a cada seis horas durante esse período e registrar suas respectivas leituras em um *datalogger*. O uso desses equipamentos permitiu o levantamento contínuo de dados da área de estudo sem a necessidade de um operador estar presente. Os blocos de resistência elétrica foram instalados no mesmo período (16/12/2017 a 12/05/2018). Porém, sua leitura ocorreu semanalmente. Após o levantamento de dados, as

leituras realizadas por meio dos blocos foram calibradas utilizando-se as medições dos sensores Decagon como referência.

O número total de blocos de resistência elétrica fabricado em gesso (Figura 4. 6 A) instalados ao longo da área de estudo foi de 64. Desse total, quinze foram destinados para a camada do solo nas porções remanescente de Cerrado. Outros vinte e um blocos foram instalados no substrato revegetado. Por fim, vinte e oito blocos foram instalados no substrato minerado exposto. Simultaneamente à instalação dos blocos de resistência elétrica, ocorreu a instalação dos sensores Decagon GS3. Instalou-se um sensor GS3 (medição do teor volumétrico de água no solo) e um MPS-6 (tensão da água no solo) em cada camada estudada.

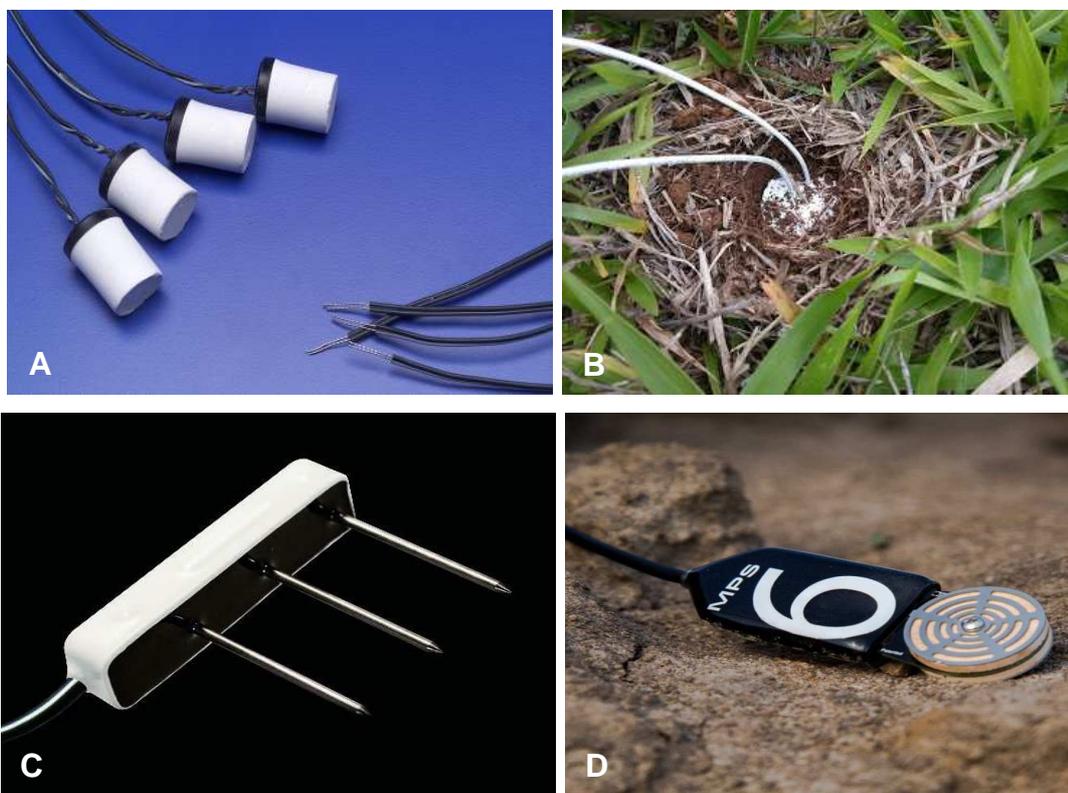


Figura 4. 6 - **A.** Bloco de resistência elétrica produzido em gesso. Foto: Delmhorst Instrument Co. **B.** Bloco de resistência instalado em campo com auxílio de trado. **C.** Sensor GS3 para medição de umidade e condutividade elétrica. Foto: Decagon Devices. **D.** Sensor MPS-6 para medição da tensão da água no solo. Foto: Decagon Devices.

#### 4.2.9. Teor volumétrico de ar

A mensuração da porosidade total e do teor volumétrico de água permitiu a obtenção do teor volumétrico de ar, também conhecido como porosidade de aeração, conforme a Equação 4. 3 adaptada de Libardi (2000).

Equação 4. 3:

$$\text{Porosidade de aeração} = P_t - \theta_v$$

Em que:

Porosidade de aeração: teor volumétrico de ar no solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )

$P_t$ : Porosidade total ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_v$ : Teor volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )

#### 4.2.10. Tensão da água no solo

A tensão da água ( $\psi$ ) foi obtida por meio de dois métodos. No primeiro deles utilizaram-se sensores MPS-6, produzidos pela Decagon Devices, apresentado na Figura 4. 6 D. Cabe ressaltar que, por limitação numérica de sensores disponíveis (dois sensores), esses foram instalados por um período de quarenta dias no substrato subsuperficial/substrato revegetado e cem dias no solo sob Cerrado.

O segundo método envolveu a obtenção da curva de retenção de água no solo. Essa curva foi construída com base na Equação 4. 4, obtida de van Genuchten (1980). Para isso, utilizaram-se os teores volumétricos de água sob oito valores diferentes de tensão: 0, 1, 3, 6, 10, 35, 84, 6.11 e 15.00 kPa, adquiridos por meio do extrator de Richards. Os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) foram calculados pelo método dos mínimos quadrados, considerando o menor erro quadrático possível entre os valores medidos em laboratório e inferidos pela equação. Nesse processo, estabeleceu-se que os valores dos parâmetros  $\theta_R$ ,  $n$  e  $\alpha$  fossem maiores do que zero, conforme Silva et al. (2006). Ao final, os resultados dos dois métodos descritos foram comparados para verificar qual apresentou os dados mais coerentes.

Equação 4. 4:

$$\theta = \theta_R + \frac{\theta_S - \theta_R}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}$$

Em que:

$\theta$ : umidade do solo ( $m^3 m^{-3}$ );

$\theta_R$ : umidade residual ( $m^3 m^{-3}$ );

$\theta_S$ : umidade na saturação ( $m^3 m^{-3}$ );

$\psi$ : tensão da água no solo (HPa)

$\alpha$ : parâmetro de ajuste da equação;

$n$ : parâmetro de ajuste da equação;

$m$ : parâmetro de ajuste da equação ( $m=1-1/n$ );

Os dados coletados com os sensores GS3 e MPS-6, assim como a data e o horário das leituras foram armazenados em um *Datalogger* modelo EM50 Decagon Devices (Figura 4. 7).



Figura 4. 7 - *Datalogger* modelo EM50 para armazenamento de dados digitais e analógicos. Fonte: Decagon Devices.

### **4.3. Coleta de amostras deformadas**

O procedimento de amostragem para o solo sob Cerrado envolveu, primeiramente, a escolha aleatória de umas das porções de Cerrado (Figura 4. 2 E e F). Em seguida, o local de amostragem teve a camada superficial de vegetação retirada manualmente com auxílio de uma enxada. Utilizando-se uma cavadeira reta, delimitou-se uma pequena área de escavação para retirada de aproximadamente 30 kg de amostra da camada 0 - 15 cm que, em seguida, foi acondicionada em saco de polipropileno.

O procedimento de amostragem para o substrato revegetado e substrato subsuperficial foi similar ao do Cerrado. Primeiramente, selecionou-se um ponto da área revegetada. Em seguida, a camada superficial de vegetação foi retirada manualmente com auxílio de uma enxada e a área de escavação foi delimitada com auxílio de uma cavadeira reta. Posteriormente, coletou-se aproximadamente 30 kg da camada 0 - 15 cm que, em seguida, foi acondicionada em saco de polipropileno. Esse material coletado se tratava do substrato que fora revegetado com a incorporação de lodo de esgoto em 2002. Em seguida, coletou-se aproximadamente 30 kg da camada 15 - 30 cm do mesmo ponto. Essa amostra também foi acondicionada em saco de polipropileno e foi assumida como o substrato que se encontrava exposto antes do processo de incorporação do lodo.

### **4.4. Calibração dos equipamentos - Medição do conteúdo volumétrico de água ( $\theta_v$ ) e tensão ( $\psi$ ) em vasos**

As nove amostras deformadas foram acondicionadas em vasos de 25 L, com drenagem própria, e saturadas com a água de chuva armazenada em um poço. Após a saturação dos solos/substratos, os vasos foram expostos às condições climáticas locais e a mensuração do conteúdo volumétrico de água ( $\theta_v$ ), da temperatura e da tensão da água no solo ( $\psi$ ) ocorreu a cada duas horas ao longo de, no mínimo, duas semanas para cada teste. Os testes permitiram a determinação das curvas de retenção de água, o monitoramento do conteúdo volumétrico de água sob diferentes tensões nos materiais estudados ao longo do tempo.

Os ensaios em vasos iniciaram em 30/06/2017 e finalizaram em 23/10/2017. Esta etapa do estudo visou a calibração dos equipamentos em um período caracterizado pela ausência precipitação no Distrito Federal.

A calibração dos equipamentos (Figura 4. 8) apontou que o substrato subsuperficial apresenta uma tendência a atingir o Ponto de Murcha Permanente (PMP) em um menor período, aproximadamente 400 h após ser saturado por água. O substrato revegetado atinge esse estado energia da água em pouco menos de 600 h após ser saturado por água e o solo sob Cerrado não atingiu o ponto de murcha permanente até se atingir as 630 h de monitoramento.

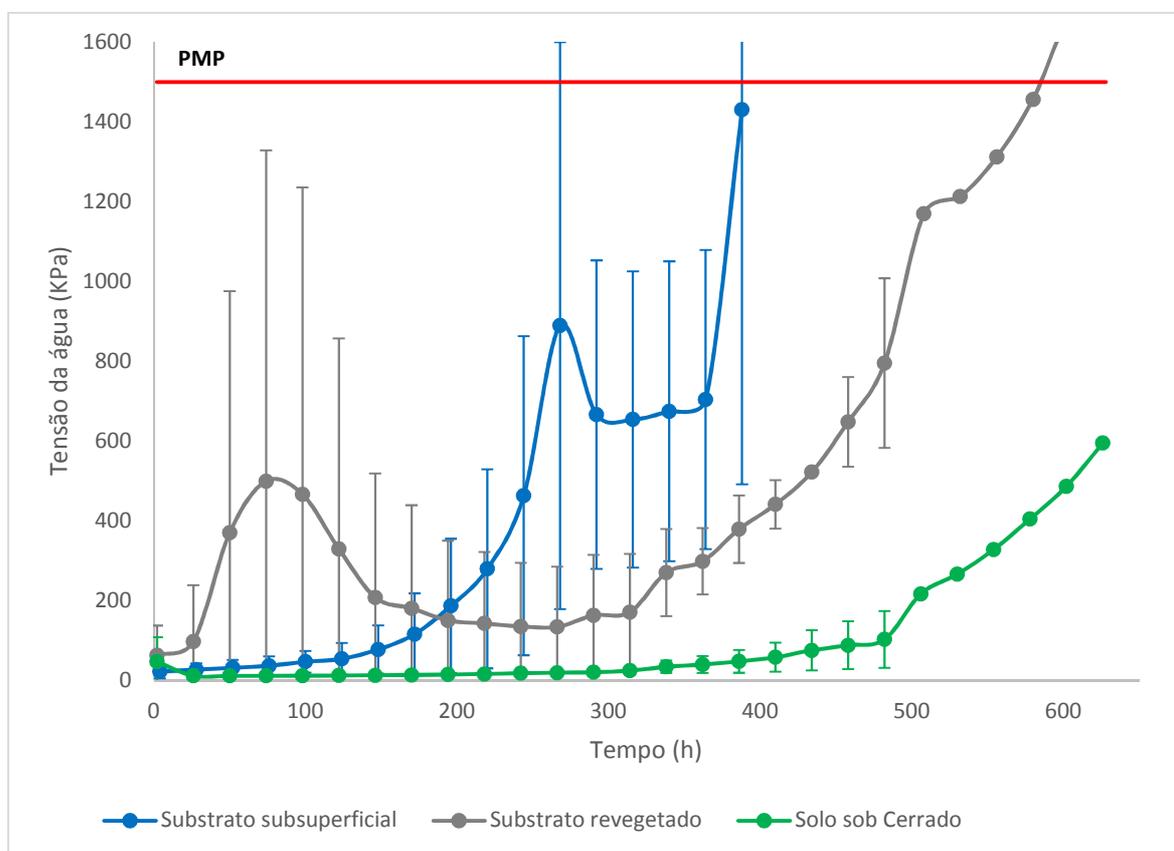


Figura 4. 8 - Valores da tensão da água no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado.

#### 4.5. Análise estatística

Com objetivo de explorar o conjunto de dados, procedeu-se a análise estatística descritiva por meio de ANOVA de fator único (One-Way ANOVA), conforme sugerido por Fávero et al. (2009). Complementarmente à ANOVA, realizou o teste de Tukey para identificar quais grupos específicos apresentaram diferenças estatísticas significativas nas comparações realizadas.

A análise estatística também envolveu o uso de técnicas de regressão. As leituras realizadas por meio dos blocos de resistência elétrica, que variavam de 0 a 100 %, foram convertidas para teor volumétrico de água no solo ( $m^3_{\text{água}} \cdot m^{-3}_{\text{solo}}$ ) por meio de regressão linear, considerando os valores registrados simultaneamente pelos sensores Decagon GS3 como referência. Obteve-se um modelo linear para cada material estudado (substrato, substrato revegetado e solo sob Cerrado). Field (2009) afirma que para o desenvolvimento de um modelo de regressão confiável, deve-se observar, minimamente, dez casos de dados para cada previsor no modelo. A quantidade de casos de dados utilizada na presente pesquisa (trinta e quatro) estava adequada ao critério desse autor.

Os coeficientes gerados na regressão linear para conversão das leituras realizadas por meio dos blocos de resistência elétrica no substrato (%) em teor volumétrico de água ( $m^3_{\text{água}} \cdot m^{-3}_{\text{solo}}$ ) são apresentados na Tabela 4. 1. Após a obtenção dos modelos lineares, procedeu-se a ANOVA com nível de significância (valor-P) < 0,05 para verificar se seu o grau de previsão de cada variável preditora era significativo, conforme indicado por Field (2009).

Tabela 4. 1 - Resumo dos coeficientes gerados na regressão linear para obtenção de leitura em  $m^3 m^{-3}$  no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado.

<b>Material</b>	<b>Variável</b>	<b>Coeficientes</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>Stat t</b>	<b>valor-P</b>
<b>Subst. subsuperficial</b>	Interseção	0.046	0.127	0.361	0.733
	Inclinação	0.005	0.001	2.912	0.033
<b>Subst. revegetado</b>	Interseção	0.027	0.068	0.404	0.707
	Inclinação	0.004	0.001	4.554	0.010
<b>Solo sob Cerrado</b>	Interseção	0.046	0.127	0.361	0.733
	Inclinação	0.004	0.002	2.912	0.033

Subsequentemente à regressão linear, realizou-se uma análise de componentes principais (PCA) com a intenção de reduzir as variáveis para um conjunto significativo de dados. Dessa forma, resumiu-se, em poucas dimensões, a maior parte da variabilidade da matriz de dispersão, conforme Legendre e Legendre (2012). As dezesseis variáveis inseridas na PCA foram: densidade aparente ( $Mg m^{-3}$ ), areia grossa (%), areia fina (%), silte (%), argila (%),  $K_{sat}$  ( $mm h^{-1}$ ), teor volumétrico de água na capacidade de campo ( $m^3 m^{-3}$ ), teor volumétrico de água no ponto de murcha permanente ( $m^3 m^{-3}$ ), água disponível ( $m^3 m^{-3}$ ), porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ ), microporosidade ( $m^3 m^{-3}$ ), macroporosidade ( $m^3 m^{-3}$ ), RMP (MPa), tempo acima da capacidade de campo (semanas), tempo abaixo do ponto de murcha permanente (semanas) e tempo com baixa porosidade de aeração (abaixo de 20% da porosidade total) (semanas). Como a matriz de dados possuía variáveis com diferentes unidades, realizou-se sua padronização considerando a variância dos dados. Para isso, cada variável inserida na PCA foi expressa em unidades de desvio padrão em relação a uma média igual a zero, gerando uma

nova matriz, que foi submetida à PCA. Para a escolha do número de eixos, adotou-se o critério de utilizar aqueles que explicavam, no mínimo, 70% da variação.

A estatística descritiva, testes estatísticos, regressão linear, ANOVA e PCA foram realizados por meio do software R (R CORE TEAM, 2018), especificamente com o pacote estatístico “vegan” (OKSANEN *et al.*, 2018).

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Caracterização dos solos/substratos

#### 5.1.1. Densidade aparente do solo

Um dos efeitos da alteração da qualidade do solo é o aumento de sua densidade (ALVES et al., 2007) e a incorporação de matéria orgânica juntamente com a revegetação são medidas que melhoram as condições físicas de solos reconstruídos após a mineração (NETO *et al.*, 2008). A densidade aparente do substrato subsuperficial foi de  $1,43 \pm 0,09 \text{ Mg m}^{-3}$  e a revegetação desse material com uso de lodo de esgoto reduziu o valor para  $0,84 \pm 0,13 \text{ Mg m}^{-3}$ , próximo ao valor de  $0,97 \pm 0,04 \text{ Mg m}^{-3}$  encontrado no solo sob Cerrado (Figura 5. 1).

Bento (2009) mensurou a densidade aparente em substrato revegetado no DF e obteve um valor  $0,93 \pm 0,07$  e  $1,28 \pm 0,14 \text{ Mg m}^{-3}$  para o substrato revegetado e solo sob Cerrado, respectivamente, na mesma área de estudo, mas no ano de 2008. Segundo Corrêa e Melo Filho (1998), densidade aparente a partir de  $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$  impede o estabelecimento de plantas e, nesse sentido, o substrato subsuperficial da área de estudo poderia permitir o estabelecimento de plantas sobre ele, pois apresentou  $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$  de valor médio de densidade aparente.

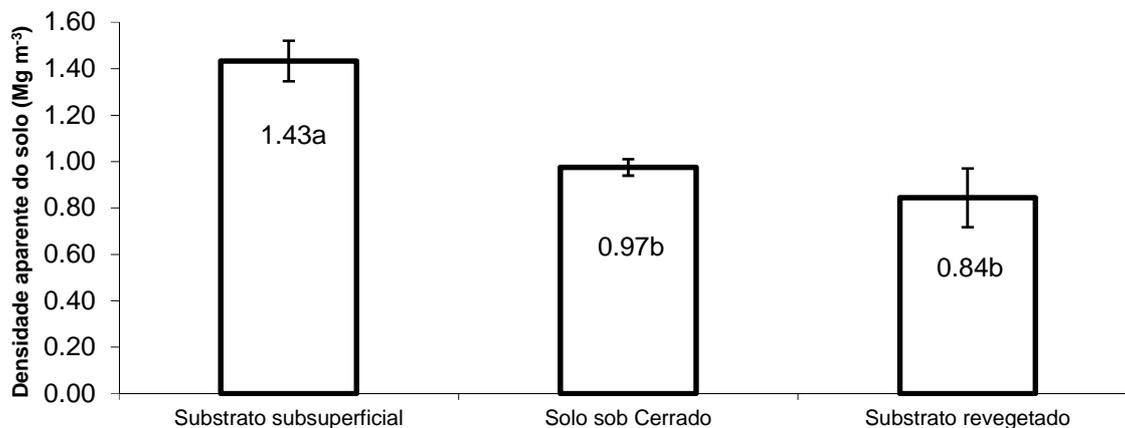


Figura 5. 1 - Densidade aparente do solo, do substrato subsuperficial e do substrato revegetado e solo sob Cerrado (valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey).

### 5.1.2. Granulometria

Observa-se que o substrato revegetado e o substrato situaram-se na classificação média, enquanto que o solo sob Cerrado foi classificado como argiloso (Figura 5. 2). O substrato revegetado foi o material investigado que apresentou o maior percentual média de silte e o substrato subsuperficial foi o que apresentou o maior percentual médio de areia (Tabela 5. 1). De acordo com Ker et al. (2015), as dimensões das partículas minerais alteram as propriedades do solo (CTC, retenção, disponibilidade e movimento de água no solo entre outros) e o seu comportamento (expansibilidade, contractilidade e susceptibilidade à erosão entre outros).

A proporção maior de argila no solo sob Cerrado pode resultar em uma capacidade maior de armazenamento e disponibilização de água para a vegetação. A maior proporção de areia do substrato revegetado e do substrato pode significar uma menor capacidade de retenção de água. Cabe destacar que a semelhança entre substrato subsuperficial e substrato revegetado quanto à granulometria sugere que seja um efeito material ligado à profundidade do perfil.

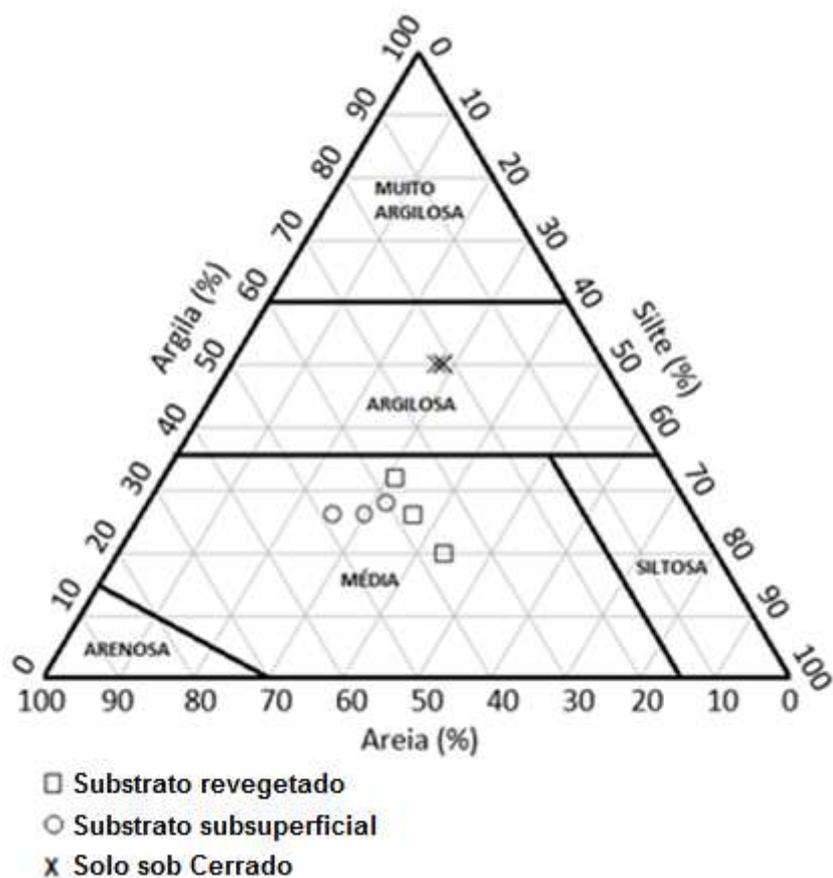


Figura 5. 2 - Classificação textural das camadas de substrato/solo estudado segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

Tabela 5. 1 - Percentual médio de areia, silte e argila nas amostras de substrato revegetado, substrato e solo sob Cerrado.

Amostra	Granulometria (%)			
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
Substrato Subsuperficial	33,2 ± 3,3	11,1 ± 1,6	29,1 ± 3,1	26,7 ± 1,2
Substrato Revegetado	28,9 ± 0,6	8,1 ± 0,1	37,0 ± 6,3	26,0 ± 6,0
Solo sob Cerrado	17,6 ± 4,6	3,6 ± 0,3	21,1 ± 6,2	57,7 ± 1,5

### 5.1.3. Condutividade hidráulica na saturação ( $K_{sat}$ )

Como valor de condutividade hidráulica na saturação, o solo sob Cerrado apresentou  $356 \pm 56 \text{ mm h}^{-1}$  na sua superfície. Por sua vez, o substrato revegetado apresentou  $213 \pm 47 \text{ mm h}^{-1}$  na superfície. A transição entre o substrato revegetado e o substrato subsuperficial apresentou  $53 \pm 38 \text{ mm h}^{-1}$ . Na profundidade de 15 cm do substrato subsuperficial foi encontrado um valor  $250 \pm 148 \text{ mm h}^{-1}$  (Figura 5. 3).

Considerando que o solo sob Cerrado apresentou a maior proporção da fração argila em sua granulometria, esperava-se que ele apresentasse a menor condutividade hidráulica na saturação, o que não ocorreu. A boa capacidade de infiltração do solo sob Cerrado pode ser explicada pela densidade aparente observada, haja vista que esta variável indicou que esse solo é um material não compactado (ALVES et al., 2007) e também pela sua estrutura. Os solos do Cerrado podem apresentar estrutura tipo granular pequena a muito pequena, conferindo-lhes uma boa permeabilidade (COSTA et al., 1999; MAIA, 2016; REATTO et al., 2007).

A permeabilidade de água é um dos fenômenos que melhor refletem a qualidade física do solo (Alves et al., 2007; Resende et al., 2012). A menor permeabilidade da água apresentada pelo substrato, que possui maior densidade, está em conformidade com as observações de Alves et al. (2007), que destacaram a relação inversa entre densidade do solo e porosidade total em diferentes solos.

Cabe destacar o declínio muito acentuado de  $K_{sat}$  na transição entre o substrato revegetado e o substrato subsuperficial. Ele pode ser explicado pelo acúmulo de carga na incorporação do lodo de esgoto ao substrato com uso de uma grade aradora leve, formando o que é conhecido como “pé de grade” (VOGEL e FEY, 2016). Isso indica que o substrato revegetado, localizado imediatamente acima do substrato subsuperficial, possivelmente não seja bem drenado e pode estar sujeito ao fenômeno de saturação periódica pelas águas pluviais, por conta da camada pouco permeável abaixo dela. Um recorte realizado no substrato revegetado em novembro/2017 (período chuvoso) corrobora essa hipótese de acúmulo de água subsuperficial de água (Figura 5. 4).

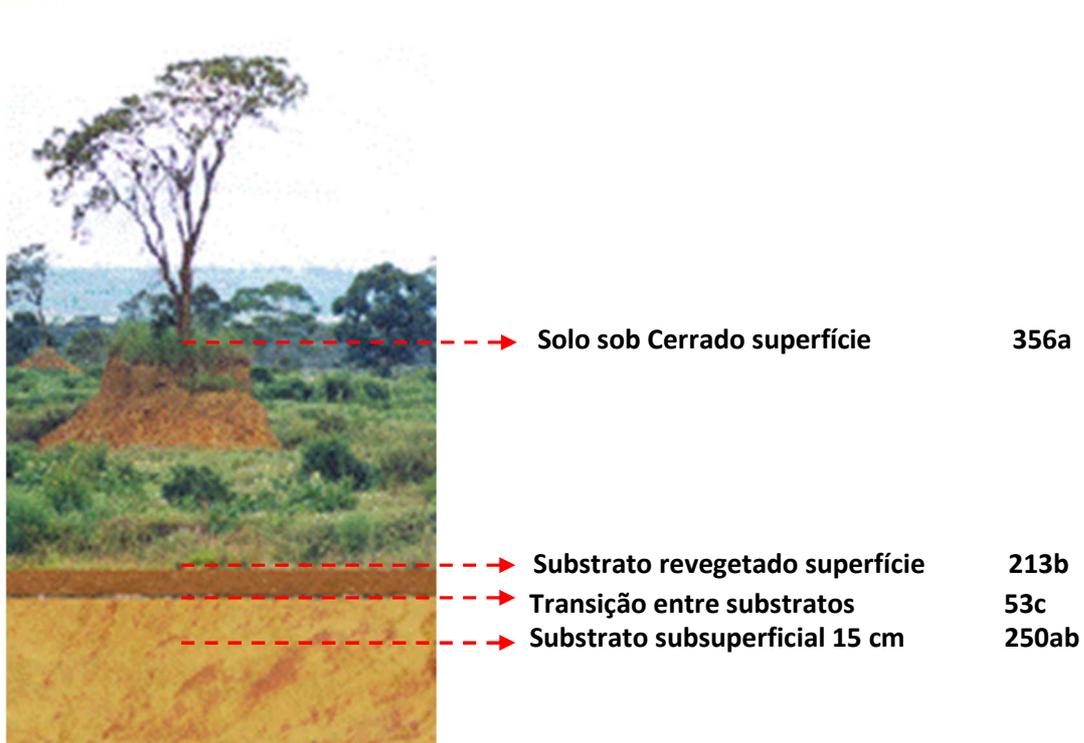


Figura 5. 3 - Condutividade hidráulica na saturação ( $K_{sat}$ ) ( $\text{mm h}^{-1}$ ), na superfície do solo sob Cerrado, superfície do substrato revegetado, transição entre substrato revegetado/substrato subsuperficial e substrato subsuperficial na profundidade de 15 cm (valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey).



Figura 5. 4 - Vista da camada de substrato revegetado na área de estudo no mês de novembro (estação chuvosa). Foto: Rodrigo Studart Corrêa.

Considerando a classificação definida por *Soil Science Division Staff* (2017) quanto à condutividade hidráulica na saturação (Tabela 5. 2), verifica-se que a superfície do solo sob Cerrado apresentou classificação de  $K_{sat}$  “muito rápida”, enquanto que a superfície do substrato revegetado e o substrato subsuperficial na profundidade 15 cm teve  $K_{sat}$  classificada como “moderada a rápida”. A transição entre substratos teve  $K_{sat}$  classificada como “lenta a moderada”.

Tabela 5. 2 - Classes de condutividade hidráulica na saturação ( $K_{sat}$ ), em  $\text{mm h}^{-1}$ .

<b>Classe</b>	<b><math>K_{sat}</math> (<math>\text{mm h}^{-1}</math>)</b>
Rápida	> 254
Moderada a rápida	254 - 127
Moderada	127 - 63,5
Lenta a moderada	63,5 - 20
Lenta	20 - 5
Muito lenta	< 5

Fonte: Adaptado de *Soil Science Division Staff* (2017).

#### 5.1.4. Capacidade de Campo (CC) e Ponto de Murcha Permanente (PMP)

Os resultados mostraram que o substrato revegetado apresentou o maior teor volumétrico de água na Capacidade de Campo e no Ponto de Murcha Permanente, resultando em  $0,07 \pm 0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  de água disponível para as plantas. O teor volumétrico de água disponível de  $0,08 \pm 0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  apresentado pelo solo sob Cerrado foi 40% maior do que o teor volumétrico de água disponibilizado pelo substrato subsuperficial e 20% maior que aquele disponibilizado pelo substrato revegetado (Tabela 5. 3). Esses resultados são similares aos encontrados por Corrêa e Bento (2010), que relataram que o substrato revegetado da mesma área de estudo deste trabalho apresentou uma menor quantidade de água disponível em relação ao solo sob Cerrado. A ANOVA e o teste de Tukey sugerem que todos os teores volumétricos de água na capacidade de campo foram significativamente diferentes. Os mesmos testes apontam que não houve diferenças significativas entre os teores volumétricos de água na PMP do substrato subsuperficial e solo sob Cerrado. A ANOVA e o teste de Tukey também indicam o teor volumétrico de água disponível do substrato e do solo sob Cerrado é significativamente diferente.

Tabela 5. 3 - Teor volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) à capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível dos solos/substratos investigados (valores seguidos pela mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey).

Amostra	Teor volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )		
	Capacidade de campo (CC)	Ponto de murcha permanente (PMP)	Água Disponível
Substrato subsuperficial	$0,27 \pm 0,04$ a	$0,21 \pm 0,02$ a	$0,06 \pm 0,01$ a
Substrato revegetado	$0,40 \pm 0,04$ b	$0,34 \pm 0,04$ b	$0,07 \pm 0,01$ ab
Solo sob Cerrado	$0,33 \pm 0,03$ c	$0,25 \pm 0,02$ a	$0,08 \pm 0,01$ b

### 5.1.5. Porosidade total, macroporosidade e microporosidade

Os maiores valores de Porosidade Total foram encontrados no substrato revegetado e no solo sob Cerrado (0,68 e 0,63  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ , respectivamente). O menor valor (0,46  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) foi atribuída ao substrato subsuperficial. O mesmo padrão foi encontrado para a macro e microporosidade, onde o substrato revegetado apresentou os maiores valores e o substrato subsuperficial os menores valores.

Densidade aparente e porosidade total de solos são atributos fortemente relacionados (ALVES et al., 2007; GOEDERT, 2005). A maior densidade aparente do substrato refletiu nos menores valores de porosidade total mensurados no âmbito deste trabalho. O mesmo se aplica ao substrato revegetado, que apresentou a menor densidade e a maior porosidade total.

A ANOVA e o teste de Tukey sugerem que não houve diferenças significativas no que tange às médias de macroporosidade dos materiais analisados. Quanto à microporosidade, houve diferença apenas entre o substrato revegetado e substrato subsuperficial. Em relação à porosidade total, os testes sugerem que a média do substrato subsuperficial é diferente das demais (Figura 5. 5).

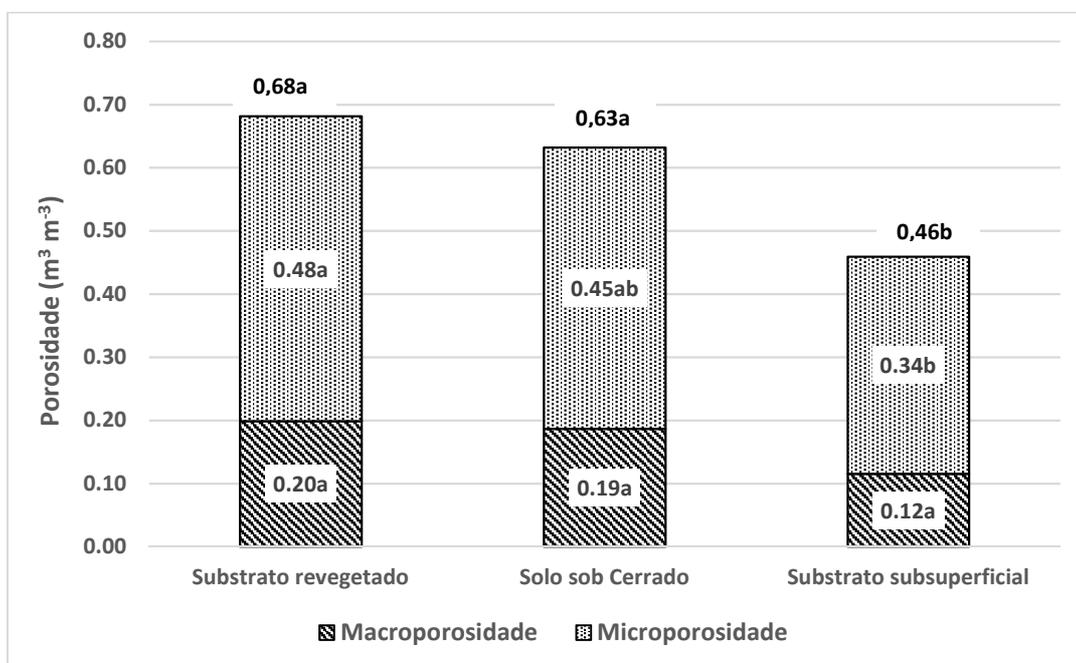


Figura 5. 5 - Porosidade total, macroporosidade e microporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) do substrato revegetado, solo sob Cerrado e substrato da área de estudo (valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey para cada parâmetro mensurado).

### **5.1.6. Resistência do solo à penetração de raízes**

A resistência do solo à penetração de raízes apresentou valores entre 1,13 e 1,83 MPa no solo sob Cerrado, com baixa variação ao longo do perfil estudado. Na área revegetada, os valores variaram de 1,94 a 4,80 MPa. Cabe destacar que o valor máximo de RMP na área revegetada ocorreu na profundidade de 15 cm, onde ocorre a transição entre a camada de substrato revegetado para substrato adensado imediatamente abaixo da camada revegetada. Isso corrobora a influência grade aradora leve na formação do pé de grade. Vogel e Fey (2016) avaliaram a resistência do solo à penetração sob quatro diferentes sistemas de manejo do solo. Esses autores encontraram também observaram picos de RMP promovidos por ação do pé de grade.

A RMP no perfil de solo sob Cerrado registrada foi pouco superior à RMP observada por Bento (2009) na mesma área, que foi de aproximadamente 1 MPa ao longo de todo o perfil até 30 cm. No substrato revegetado, Bento (2009) identificou que o maior valor de RMP, aproximadamente 5 MPa, ocorreu na profundidade 22 cm. A Figura 5. 6 apresenta o comportamento da RMP até a profundidade de 60 cm para a área de Cerrado e para a área revegetada, destacando as diferenças entre os dois tipos de áreas.

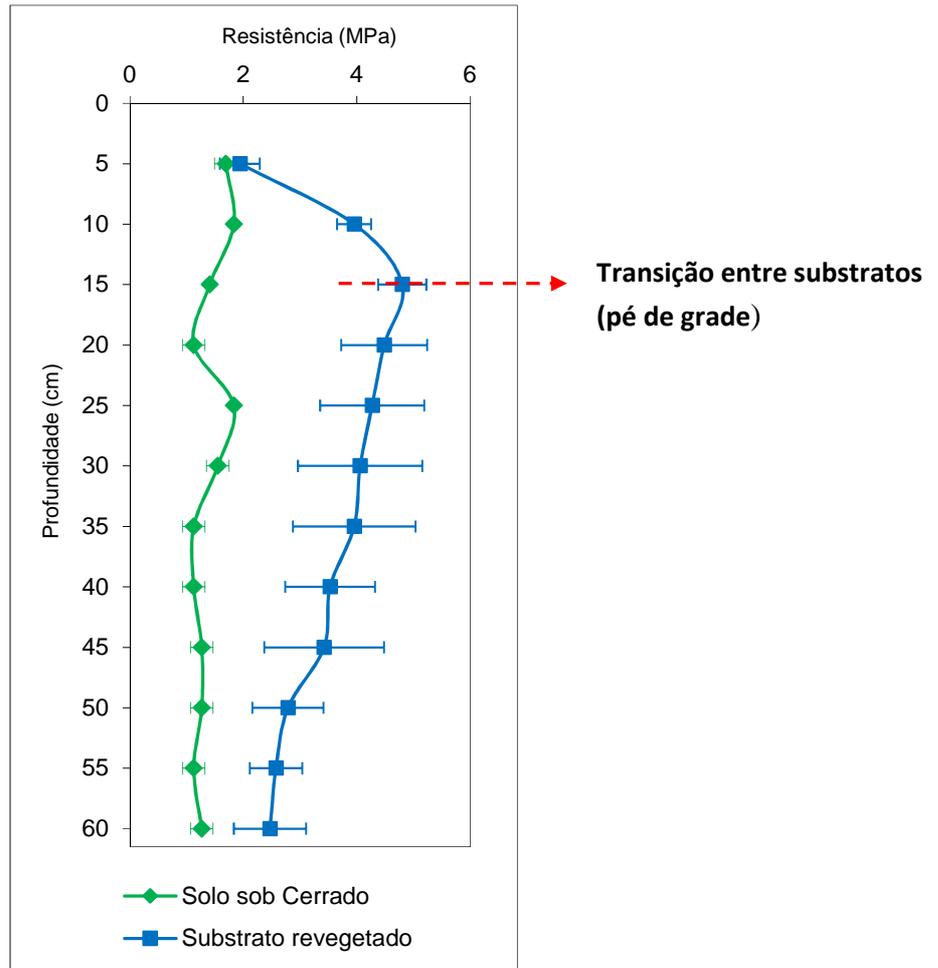


Figura 5. 6 - Resistência mecânica a penetração do solo sob Cerrado e área revegetada

## 5.2. Teor volumétrico de água e ar nos solos/substratos

O total de chuva precipitada em 22 semanas de investigação na área de estudo foi de 720 mm. A semana que apresentou a maior precipitação acumulada foi a 13ª, com aproximadamente 160 mm. As diferentes características observadas no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado proporcionaram distintos comportamentos da água precipitada nesses materiais (Figura 5. 7).

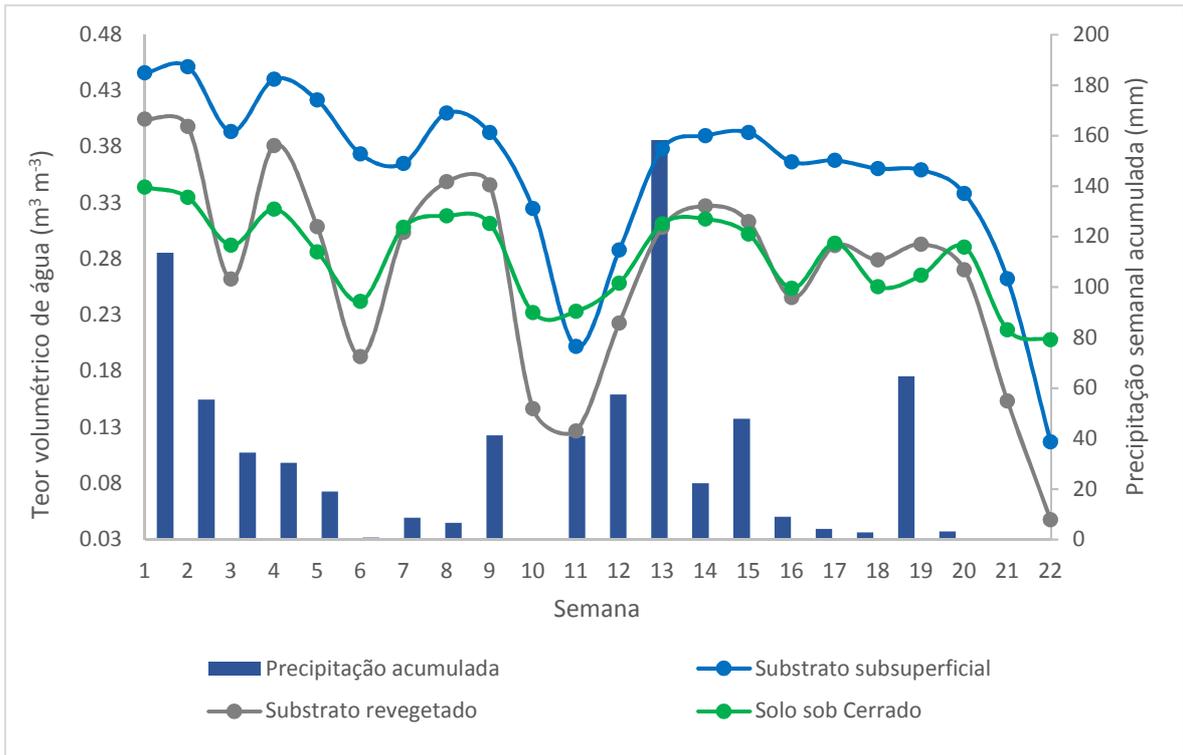


Figura 5. 7 - Teor volumétrico de água no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e precipitação semanal acumulada (mm) em 22 semanas de observação.

O substrato subsuperficial destacou-se como o material que manteve por mais tempo o teor volumétrico de água acima da Capacidade de Campo (CC), especificamente por 86% do período de investigação (Figura 5. 8). O solo sob Cerrado e o substrato revegetado apresentaram teores volumétricos de água acima da CC por 9% e 5% do mesmo período, respectivamente.

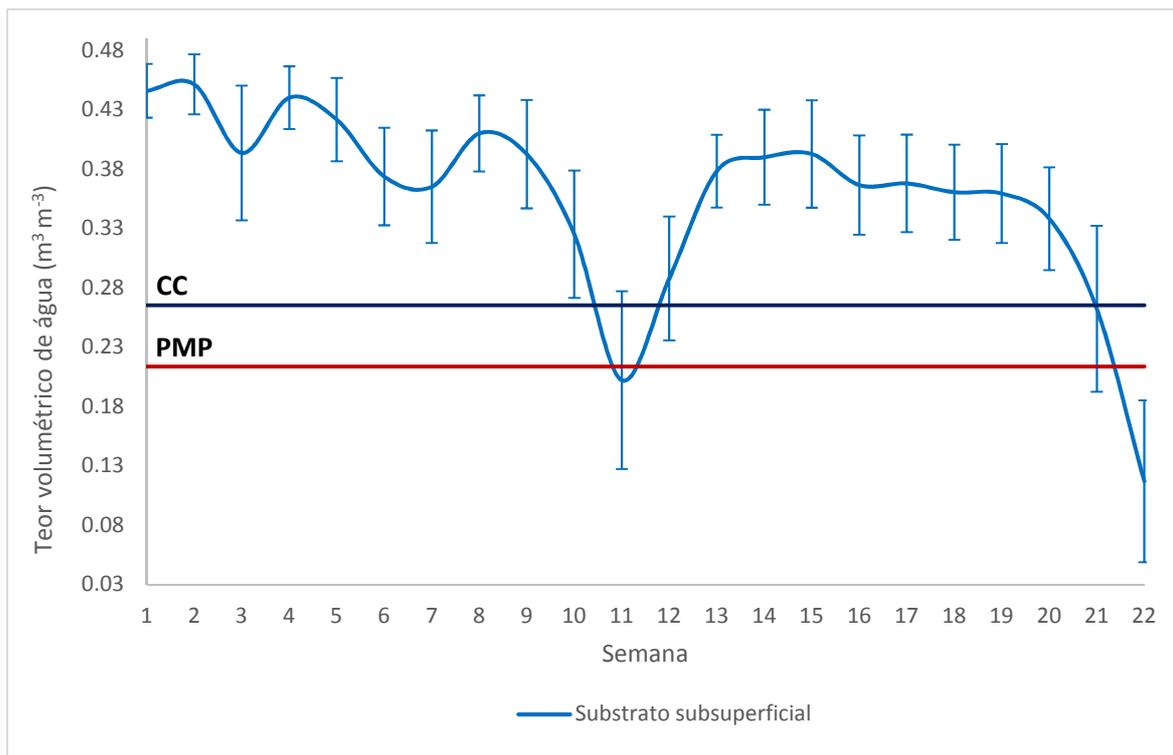


Figura 5. 8 - Teor volumétrico de água no substrato subsuperficial ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em 22 semanas de observação.

O substrato revegetado destacou-se como o material que manteve por mais tempo o teor volumétrico de água retido abaixo do Ponto de Murcha Permanente (PMP), especificamente por 77% do período de investigação (Figura 5. 9). O solo sob Cerrado e o substrato subsuperficial apresentaram teores volumétricos de água retidos abaixo do PMP por 23% e 9% do mesmo período, respectivamente.

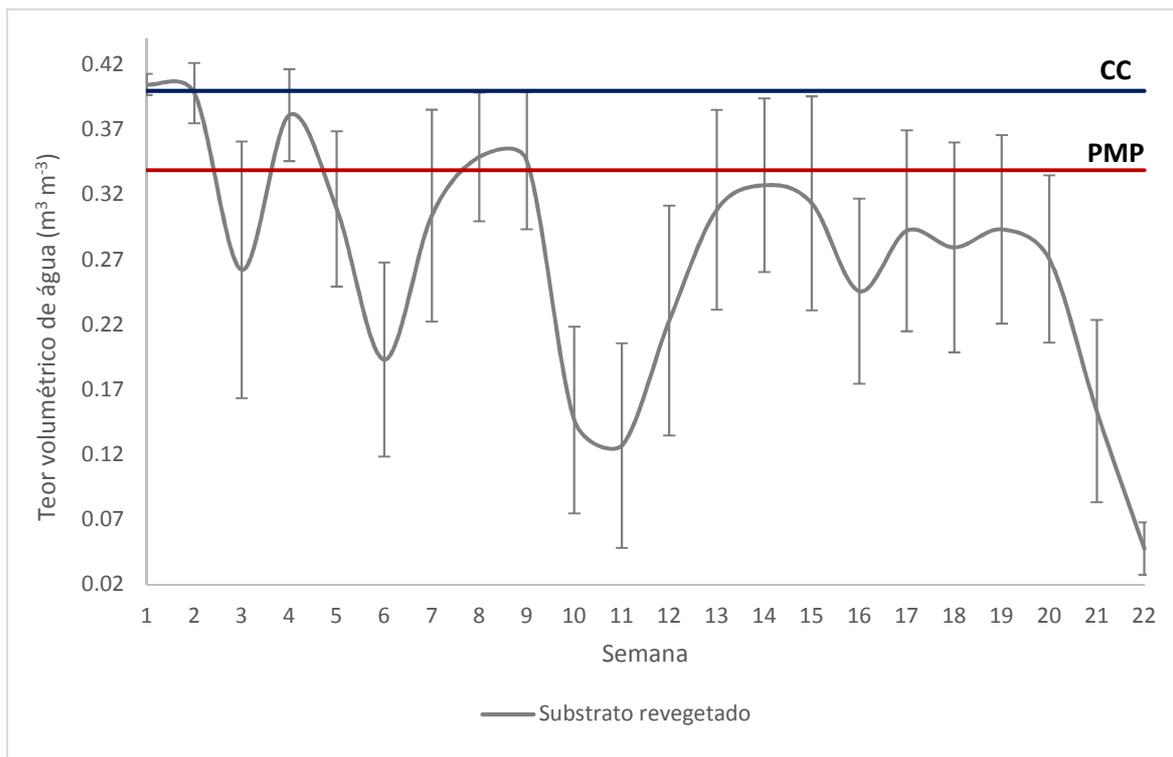


Figura 5. 9 - Teor volumétrico de água no substrato revegetado ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em 22 semanas de observação.

Observa-se que o solo sob Cerrado manteve o teor volumétrico de água por mais tempo dentro da faixa de água disponível, mais especificamente por 68% do período de investigação (Figura 5. 10). O substrato revegetado e o substrato subsuperficial apresentaram teores volumétricos de água dentro da faixa de água disponível por 23% e 5% do período de investigação, respectivamente.

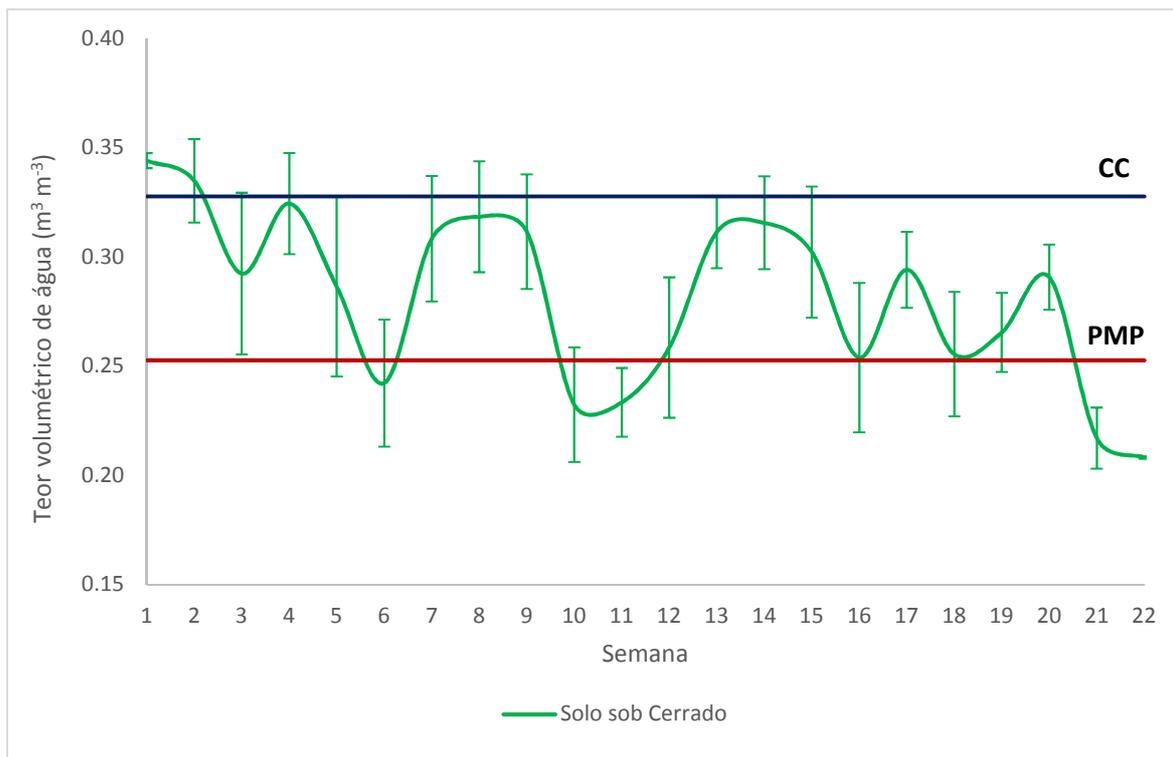


Figura 5. 10 - Teor volumétrico de água no solo sob Cerrado ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em 22 semanas de observação.

Considerando o tempo de permanência do teor volumétrico de água dentro da faixa de água disponível, há evidências de que apenas o substrato subsuperficial esteja submetido a um regime prolongado de saturação por água durante a estação chuvosa do Distrito Federal. Contudo, apresentar um teor volumétrico de água acima da CC não é suficiente para afirmar que o solo/substrato está submetido a um regime hidromórfico. Haridasan (1993) afirma que solos tropicais saturados por água por período superior a seis meses por ano desenvolvem caráter hidromórfico. Por sua vez, Brady e Weil (2013) definem critérios mais detalhados para constatar a ocorrência de regime hidromórfico, não bastando o fato de o solo estar saturado por água. Um desses critérios é a constatação de que aeração do solo está prejudicada pelo excesso de água ali existente.

Brady e Weil (2013) explicam que a condição de aeração do solo pode ser caracterizada de várias formas, dentre elas, pela quantidade de poros preenchidos por ar. Segundo os mesmos autores, se a quantidade de poros preenchidos por ar for menor que 20% do espaço poroso, a atividade microbiana e o crescimento de plantas são severamente afetados. Erickson (1982) e Tormena et al. (1998) relatam que valores inferiores a  $0,1 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  de poros preenchidos por ar impõem limitação

ao pleno desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Observa-se que o solo sob Cerrado e o substrato revegetado não apresentaram porosidade preenchida por ar em níveis inferiores à 20% da porosidade total e tampouco inferiores à  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  nas semanas de investigação. Entretanto, o substrato subsuperficial apresentou níveis inferiores à 20% da porosidade total em 55% desse período e teores inferiores à  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  em 73% no mesmo intervalo de tempo (Figura 5. 11). Também é possível observa-se que o solo sob Cerrado e o substrato revegetado foram capazes de manter o teor volumétrico de ar acima de 50% da porosidade total na maior parte do período de investigação em campo. Porém, o mesmo não ocorreu para o substrato subsuperficial, que apresentou um preenchimento dos poros por ar superior a 50% somente na 11ª e 22ª semana, quando o material se encontra em seu ponto de murcha permanente. É possível observar que na maior parte do tempo de investigação a aeração do substrato subsuperficial foi baixa, evidenciando que ele estava submetido à um regime com alto teor de umidade.

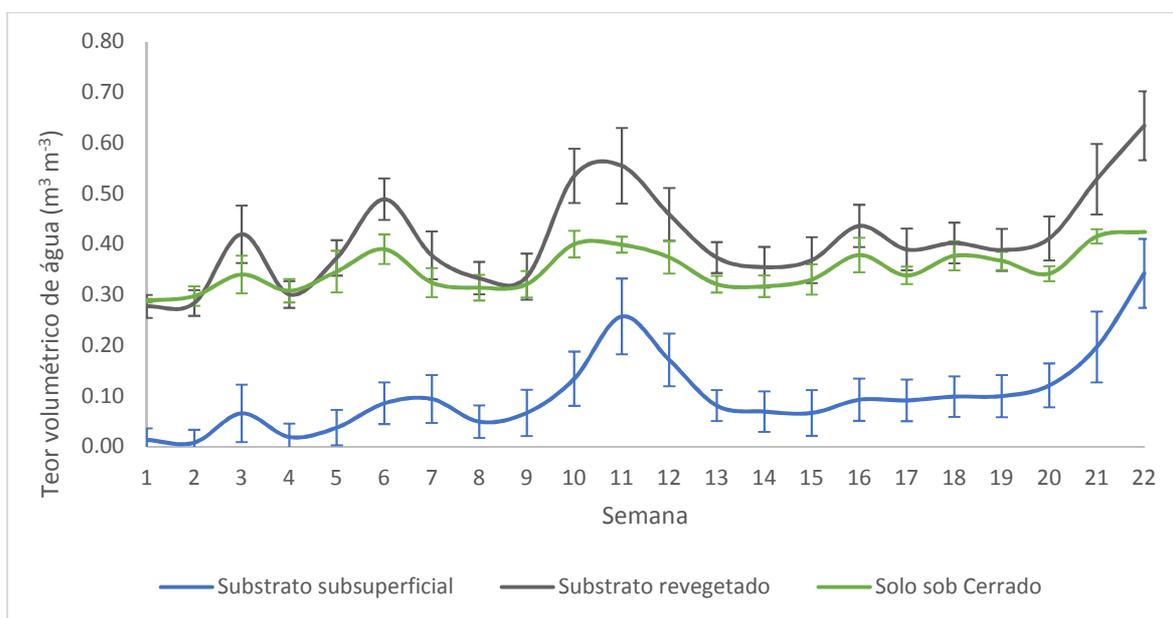


Figura 5. 11 - Teor de ar do substrato, substrato revegetado e solo sob Cerrado ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) em 22 semanas de observação.

### **5.3. Tensão da água no solo**

#### **5.3.1. Tensão da água obtida por sensores**

Na maior parte dos quarenta dias em que o sensor MPS-6 permaneceu instalado no substrato subsuperficial, esse material se manteve com uma tensão próxima de 30 kPa e não se aproximou do ponto de murcha permanente (1.500 kPa) (Figura 5. 12). O mesmo não ocorreu para as outras camadas estudadas. A tensão no substrato revegetado superou o patamar de 1.500 kPa no 35° dia de medição e o solo sob Cerrado atingiu a mesma tensão no 100° dia. O substrato subsuperficial, o substrato revegetado e o solo sob Cerrado se mantiveram entre 30 e 1.500 kPa durante 100, 92 e 94% dos dias em que os sensores estiveram instalados, respectivamente.

Quanto ao teor volumétrico de água (Figura 5. 13), observa-se que houve variação de 0,26–0,48; 0,21–0,44 e 0,22–0,46 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> no substrato subsuperficial, no substrato revegetado e no solo sob Cerrado, respectivamente. Essa observação indica que o substrato subsuperficial foi o material que apresentou o maior teor volumétrico de água nas tensões próximas de 30 kPa, seguido pelo substrato revegetado e solo sob Cerrado. Também pode-se averiguar que o substrato revegetado foi o material que apresentou a maior amplitude de variação do teor de água.

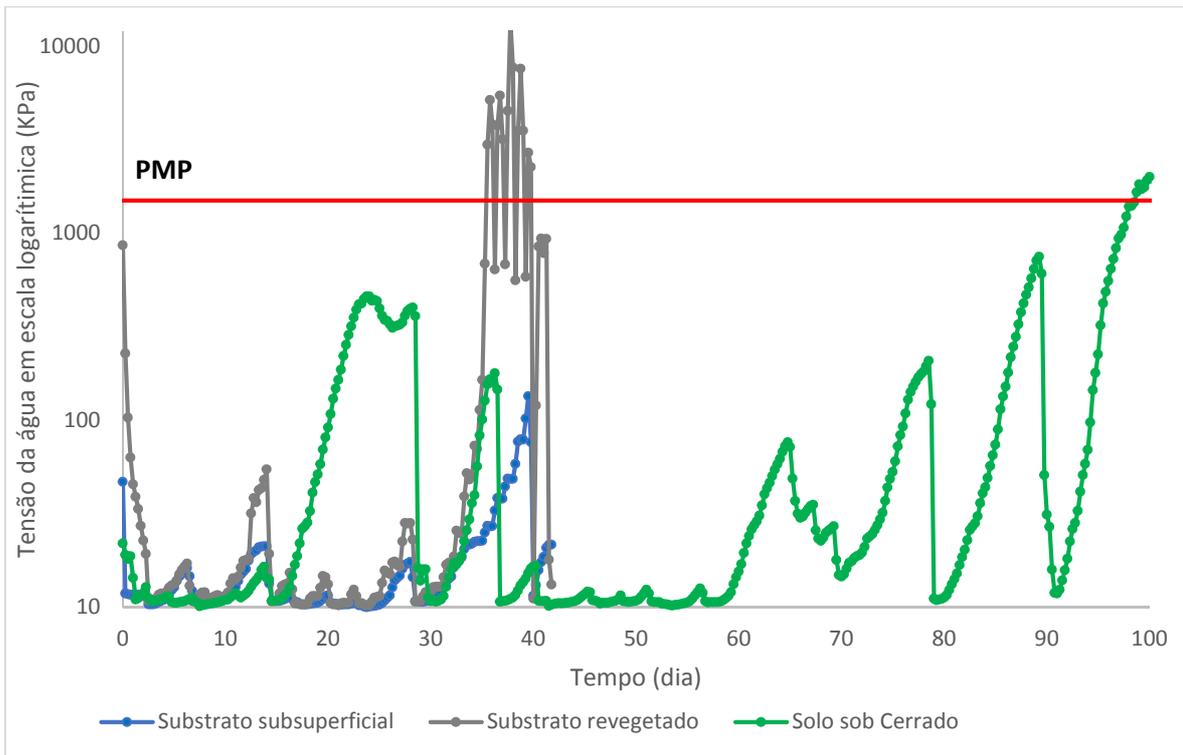


Figura 5. 12 - Tensão da água (kPa) medida pelos sensores MPS-6 em 40 dias para o substrato subsuperficial, substrato revegetado e 100 dias para o solo sob Cerrado.

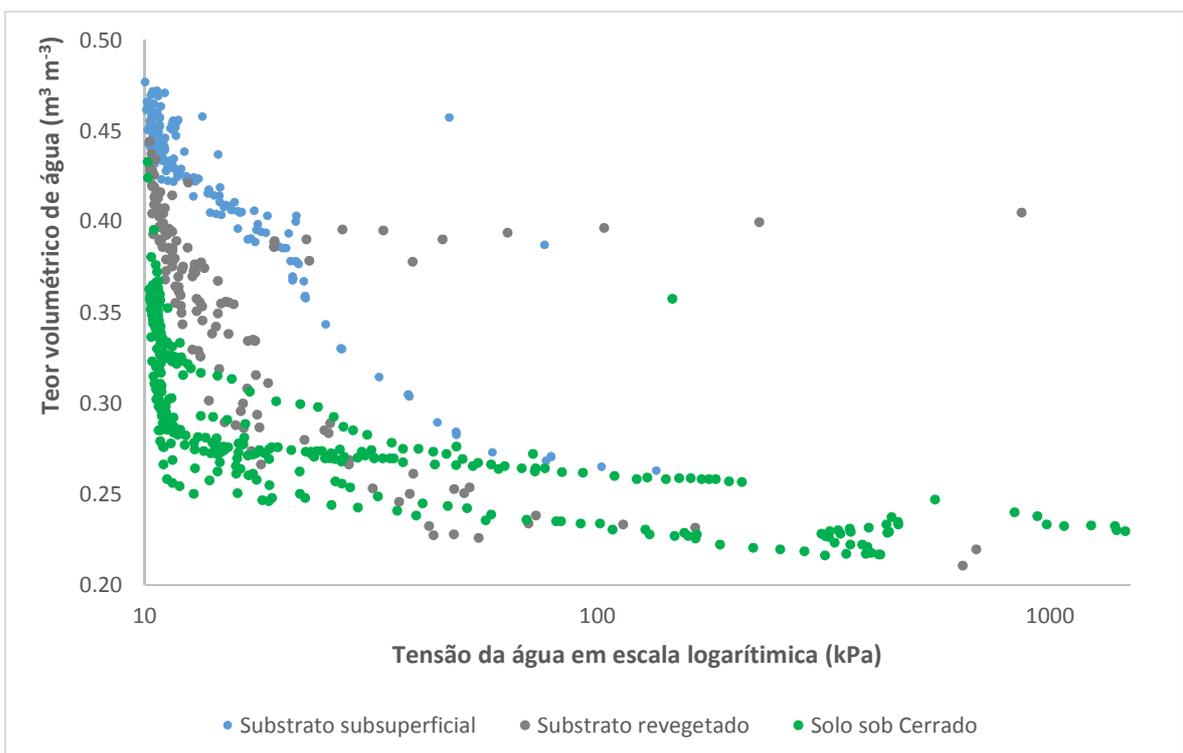


Figura 5. 13 – Teor volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) sob diferentes tensões (kPa).

### 5.3.2. Tensão da água obtida por equação de van Genuchten

Os parâmetros obtidos para equação de van Genuchten (Tabela 5. 4) permitiram a obtenção de valores calculados de tensão da água nos substratos/solos sob diferentes teores volumétricos de água. Na comparação entre os teores volumétricos de água mensurados via extrator de Richards e aqueles calculados por meio da equação de Genuchten (Tabela 5. 5), observa-se que os erros quadráticos foram muito próximos de zero, indicando que os dados calculados são confiáveis. Com as curvas de retenção de água para o substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado (Figura 5. 14), obteve-se a tensão da água em cada meio estudado ao longo de 22 semanas (Figura 5. 16). Observa-se que o substrato subsuperficial foi o material que apresentou os menores valores de tensão, muito próximos de zero, indicando que a água ali presente não estava fortemente retida pelo substrato.

Tabela 5. 4 - Coeficientes da equação de Genuchten (1980) utilizados na obtenção das curvas de retenção de água no solo sob Cerrado, substrato revegetado e substrato

<b>Parâmetros van Genuchten (1980)</b>	<b>Solo sob Cerrado</b>	<b>Substrato revegetado</b>	<b>Substrato subsuperficial</b>
$\alpha$	0,06	0,05	0,05
n	1,15	1,15	1,16
$\theta_R$	0,16	0,11	0,15
$\theta_S$	0,64	0,65	0,45
m	0,28	0,27	0,30

Tabela 5. 5 - Comparação entre os teores volumétricos água mensurados via extrator de Richards e aqueles calculados por meio da equação de Genuchten (1980), sob diferentes tensões, considerando o solo sob Cerrado, o substrato revegetado e o substrato subsuperficial.

Tensão (KPa)	Solo sob Cerrado (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )			Substrato revegetado (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )			Substrato subsuperficial (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
	Extrator de Richards	Van Genuchten (1980)	Erro <sup>2</sup>	Extrator de Richards	Van Genuchten (1980)	Erro <sup>2</sup>	Extrator de Richards	Van Genuchten (1980)	Erro <sup>2</sup>
0	0,64	0,64	< 0,001	0,65	0,65	< 0,001	0,45	0,45	< 0,001
1	0,58	0,58	< 0,001	0,59	0,60	< 0,001	0,42	0,42	< 0,001
3	0,53	0,51	< 0,001	0,54	0,53	< 0,001	0,38	0,37	< 0,001
6	0,45	0,46	< 0,001	0,48	0,48	< 0,001	0,34	0,34	< 0,001
10	0,42	0,42	< 0,001	0,43	0,43	< 0,001	0,30	0,31	< 0,001
35	0,35	0,34	< 0,001	0,35	0,34	< 0,001	0,27	0,26	< 0,001
84	0,28	0,29	< 0,001	0,26	0,28	< 0,001	0,23	0,23	< 0,001
611	0,25	0,23	< 0,001	0,23	0,21	< 0,001	0,21	0,19	< 0,001
1.500	0,20	0,21	< 0,001	0,17	0,18	< 0,001	0,17	0,18	< 0,001

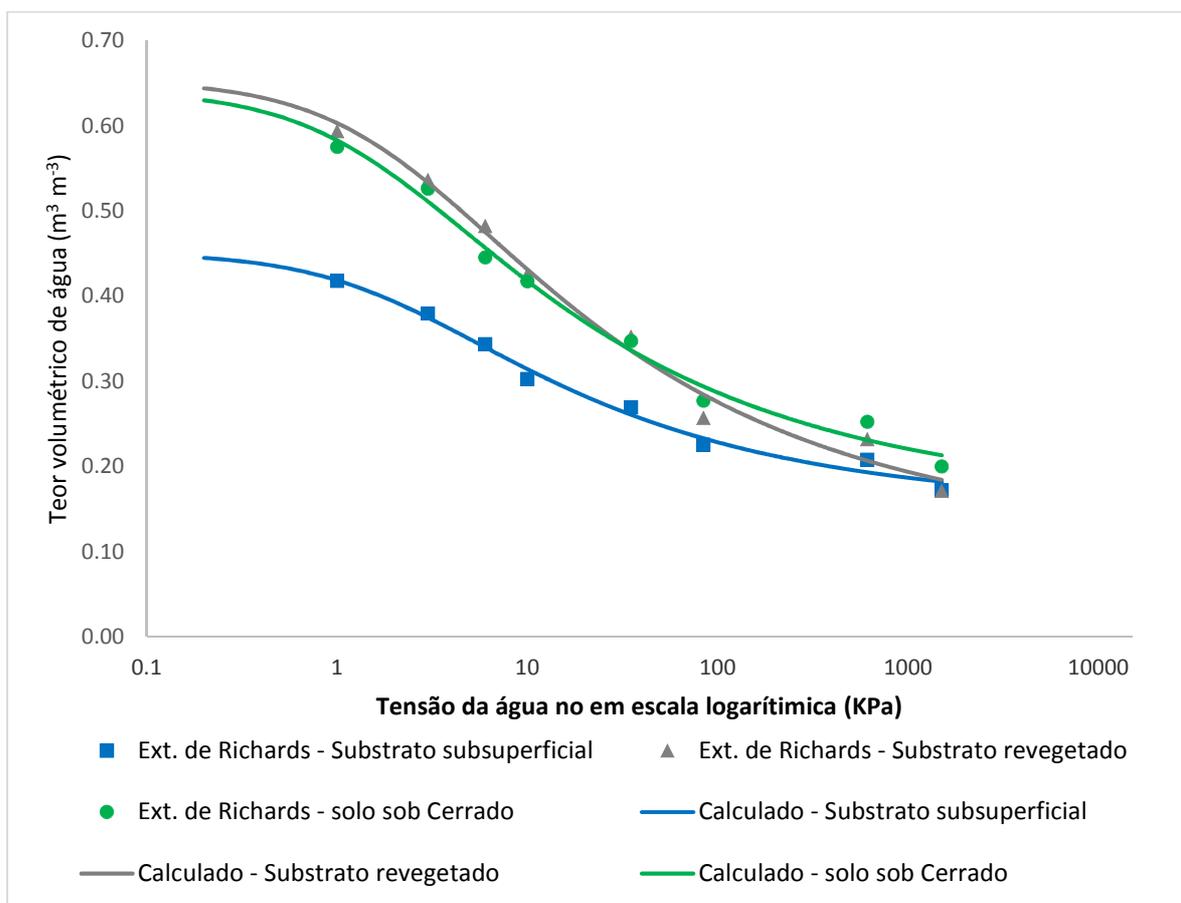


Figura 5. 14 - Curva de retenção de água no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado.

Na comparação entre os resultados mensurados pelos sensores e aqueles calculados pela equação de van Genuchten (Figura 5. 15), observa-se que para o substrato subsuperficial tais resultados apresentaram uma forte correlação ( $r = 0,91$ ). Para o substrato revegetado e o solo sob Cerrado as correlações entre os resultados mensurados e calculados foram moderadas, com  $r = 0,54$  e  $0,57$ , respectivamente. Todas as correlações obtiveram valor- $p < 0,01$ .

Cabe destacar que no substrato subsuperficial, as leituras de tensão variaram de 10 a 135 kPa, não se aproximando do ponto de murcha permanente (1.500 kPa). Considerando também o tempo reduzido de quarenta dias de permanência dos sensores MPS-6 no substrato subsuperficial e no substrato revegetado, optou-se por adotar os resultados da equação de van Genuchten para o monitoramento da tensão ao longo do período de investigação da área de estudo.

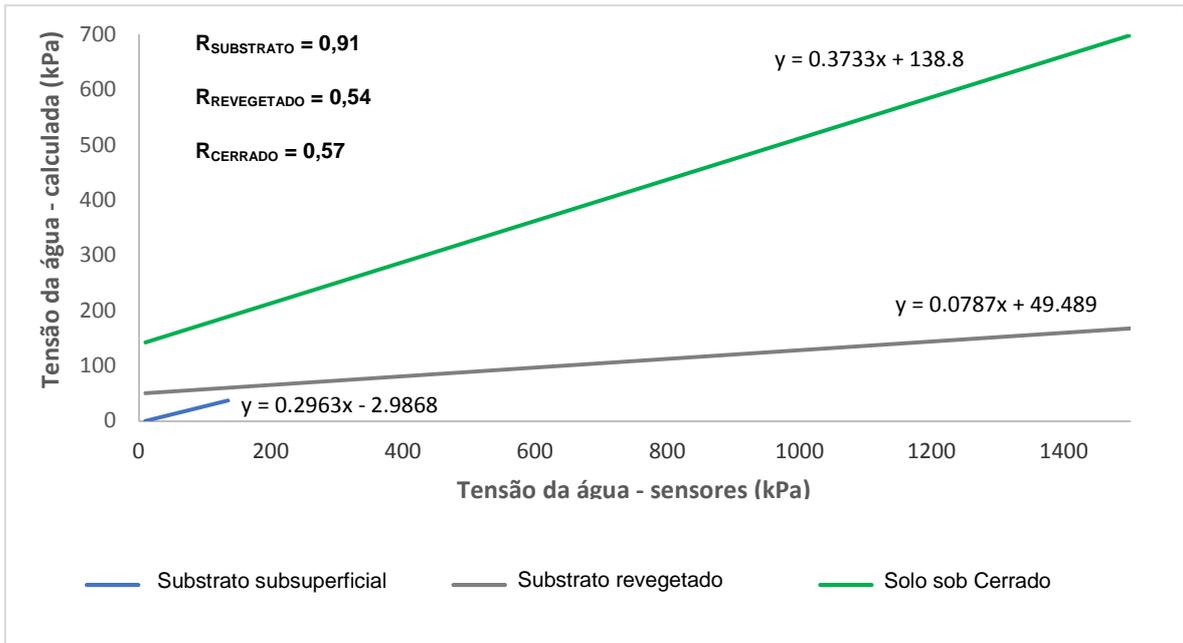


Figura 5. 15 - Correlação entre a tensão da água medida pelos sensores (kPa) e a tensão da água calculada pela equação (kPa).

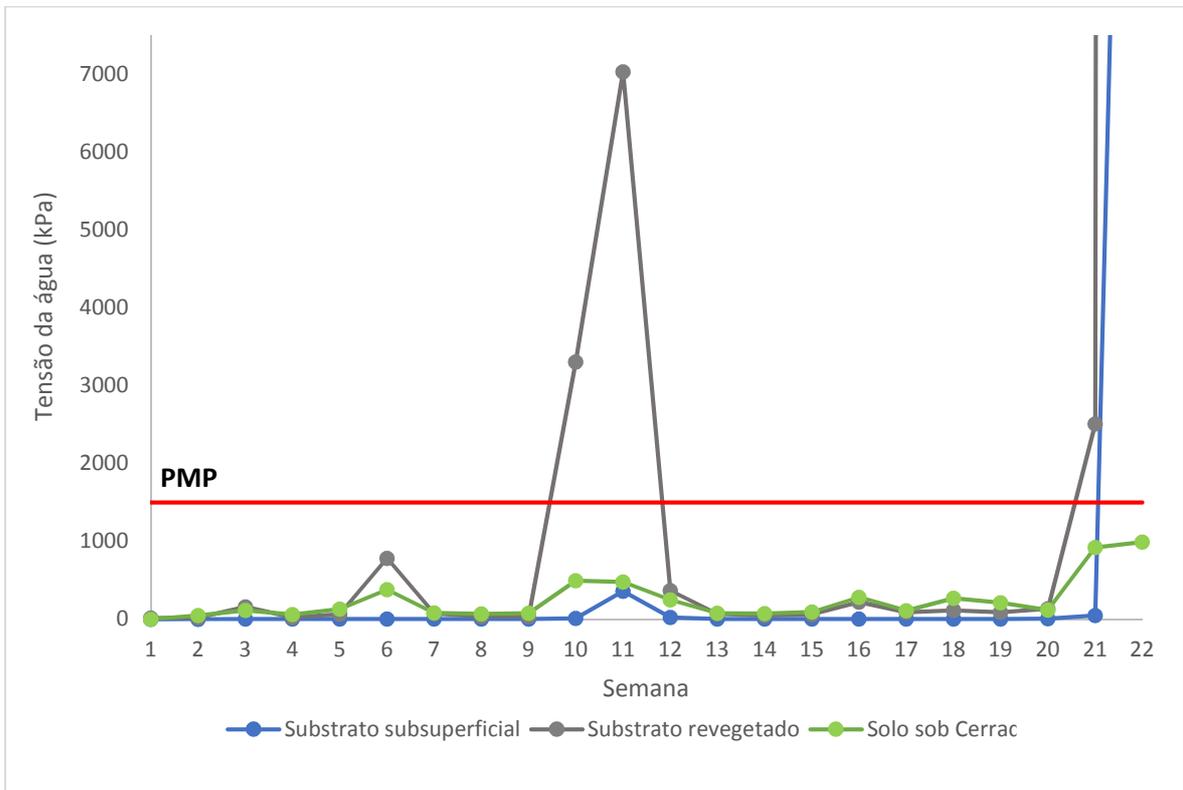


Figura 5. 16 - Tensão calculada da água no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado (kPa) em 22 semanas de observação, considerando o ponto de murcha permanente (1.500 kPa).

#### 5.4. Análise de Componentes Principais

Os resultados da Análise de Componentes Principais (PCA) (Figura 5. 17) mostram que as Componentes Principais 1 e 2 representam 99,9% da variância medida. Dentre as variáveis determinadas, o substrato subsuperficial se caracterizou pelo tempo que permaneceu com o teor de água acima da capacidade de campo e pelo tempo que a porosidade de aeração esteve abaixo de 20% da porosidade total. Isso corrobora a condição mais úmida desse material em relação ao substrato revegetado e solo sob Cerrado. Essa condição de umidade está associada aos valores de densidade aparente. Observa-se que o substrato subsuperficial se contrapõe aos valores de porosidade (macroporosidade, microporosidade e porosidade total), ao teor de água retida à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente e ao tempo com teor de água abaixo do ponto de murcha permanente. De fato, o substrato subsuperficial foi o material analisado com menor volume de água à capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

Por sua vez, o substrato revegetado se associou aos valores de porosidade, ao teor volumétrico de água à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente e ao tempo com teor de água abaixo do ponto de murcha permanente. Observa-se que o substrato revegetado se contrapõe aos valores de densidade aparente, tempo com teor de água retida acima da capacidade de campo e ao tempo que a porosidade de aeração esteve abaixo de 20% da porosidade total. Isso corrobora o fato de que o substrato revegetado não está submetido a um regime prolongado de alta umidade.

Quanto ao solo sob Cerrado, esse é caracterizado na PCA pelo percentual de argila em sua granulometria, pelo teor de água disponível e pela capacidade de permeabilidade de água sob regime de saturação. Apesar de ser um material argiloso, o que poderia ser um fator limitante à capacidade de infiltração, os solos do Cerrado podem apresentar estrutura tipo granular pequena a muito pequena, conferindo-lhes uma boa permeabilidade (COSTA et al., 1999; MAIA, 2016; REATTO et al., 2007). Cunha et al. (2015) e Ramos et al. (2013) observaram que solos do Cerrado com maiores teores de argila também apresentaram elevadas capacidades de infiltração. O solo sob Cerrado se contrapõe ao percentual de areia (fina e grossa), ao percentual de silte e à resistência mecânica à penetração.

Ressalta-se que substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado não apresentaram semelhança em relação aos parâmetros mensurados, uma vez que se localizaram em diferentes quadrantes na PCA. O substrato revegetado, mais uma vez, está distante de ser um solo reconstruído assemelhado a camada superficial do solo sob Cerrado.

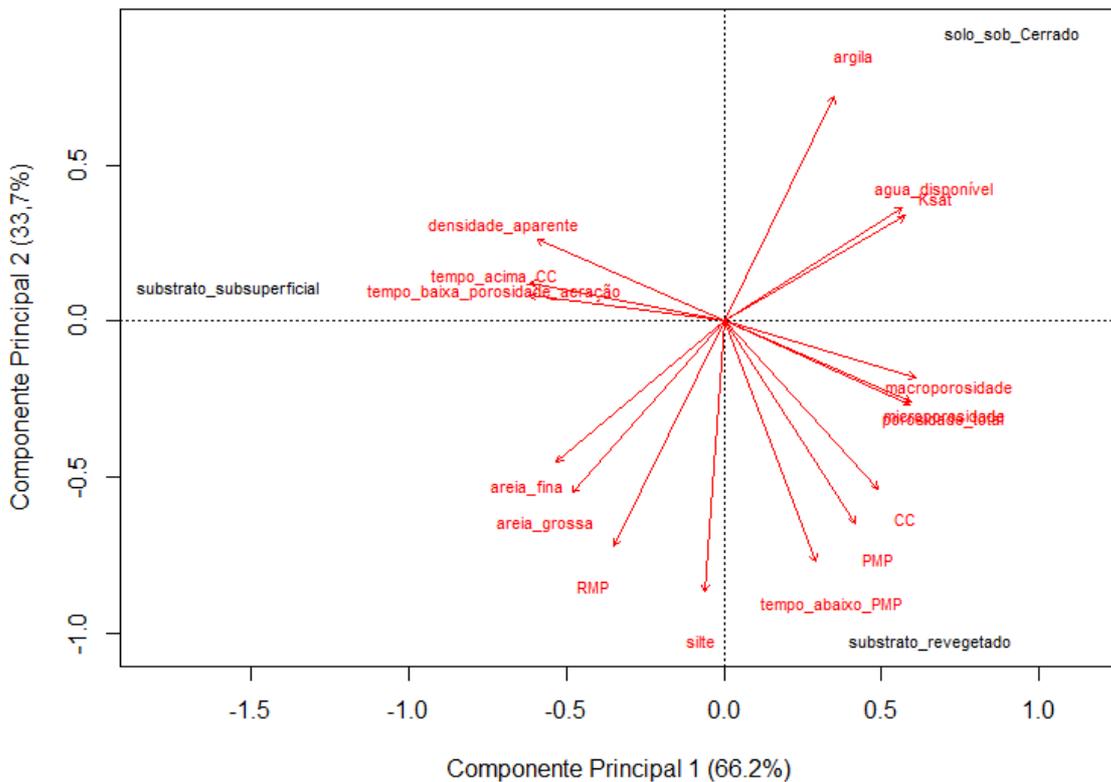


Figura 5. 17 - Análise de Componentes Principais (PCA) para o substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado. Densidade aparente ( $Mg\ m^{-3}$ ), areia grossa (%), areia fina (%), silte (%), argila (%), Ksat (condutividade hidráulica na saturação,  $mm\ h^{-1}$ ), CC (teor volumétrico de água na capacidade de campo,  $m^3\ m^{-3}$ ), PMP (teor volumétrico de água no ponto de murcha permanente,  $m^3\ m^{-3}$ ), água disponível teor volumétrico de água disponível,  $m^3\ m^{-3}$ ), porosidade total ( $m^3\ m^{-3}$ ), microporosidade ( $m^3\ m^{-3}$ ), macroporosidade ( $m^3\ m^{-3}$ ), RMP (resistência mecânica a penetração, MPa), tempo acima da CC (tempo acima do teor volumétrico de água à capacidade de campo, semanas), tempo abaixo PMP (tempo abaixo do teor volumétrico de água ao ponto de murcha permanente, semanas) e tempo baixa porosidade de aeração (tempo com teor volumétrico de ar abaixo de 20% da porosidade total, semanas).

## 5.5. Regime de umidade

Os resultados obtidos evidenciam que o substrato subsuperficial, o substrato revegetado e o solo sob Cerrado apresentam regimes de umidade distintos. Brady e Weil (2013) afirmam que o regime de umidade Áquico é aquele em que o solo permanece saturado com água e praticamente livre de oxigênio gasoso por períodos de tempos suficientes para apresentar indícios de má aeração. Essas condições foram observadas no substrato subsuperficial, que apresentou teores volumétricos de ar inferiores à  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  em 73% do período de investigação, durante a estação chuvosa. Isso indica a ocorrência de má aeração do meio. Segundo Reatto et al. (2004) e Haridasan (1993), a ocorrência de solos com essas características representam menos que 5% da área geográfica do Distrito Federal.

O substrato revegetado, por sua vez, apresentou teor volumétrico de água sob tensão abaixo do ponto de murcha permanente na maior parte do período de crescimento da vegetação. Quando o substrato revegetado foi naturalmente umedecido, ele permaneceu nesse estado por menos de noventa dias consecutivos ao longo da estação chuvosa (Figura 5. 9). Segundo os critérios estabelecidos por Brady e Weil (2013), o regime de umidade do substrato revegetado pode ser considerado Arídico. Contudo, deve-se destacar a grande variabilidade apresentada pelos dados e que foi refletida no desvio padrão do teor volumétrico de água desse material. Verificou-se que parte das medições em campo apresentaram teor volumétrico de água dentro da faixa de água disponível, o que poderia subsidiar uma classificação de regime de umidade diferente da arídica em algumas áreas de substrato revegetado. Nesse sentido, Cejpek et al. (2013) demonstra que substratos apresentam uma heterogeneidade muito grande quanto à umidade do solo.

O solo sob Cerrado não está submetido à saturação prolongada por água e as suas respectivas características proporcionam que, na maior parte do período chuvoso, o teor volumétrico de água seja mantido dentro da faixa de água disponível. Considerando que há umidade disponível para as plantas em parte do ano e que ocorre um período significativo de seca que caracteriza a região, o regime de umidade do solo sob Cerrado investigado pode ser classificado como Ústico (BRADY e WEIL, 2013). Nessa perspectiva, Buol (2009) ressalta que a maioria dos solos do Cerrado possuem esse regime de umidade.

Portanto, os resultados do solo sob Cerrado e do substrato revegetado ao longo da estação chuvosa de 2017/2018 apontam que eles não estão submetidos a um regime de alta umidade prolongada o suficiente para a ocorrência do fenômeno hidromorfismo. O único material que apresentou um regime prolongado de alta umidade foi o substrato subsuperficial. A falta de umidade do substrato revegetado (Figura 5. 9) poderia representar um fator limitante ao estabelecimento da vegetação. Porém, a presença de raízes no substrato subsuperficial indica que esse material fornece a água necessária para o crescimento das plantas da área de estudo (Figura 5. 8). Essas raízes parecem ser as fontes de carbono que complexam com íons metálicos e estabilizam, conforme processo descrito por Silva et al. (2015).

O excesso de umidade observado no substrato subsuperficial, bem como seus baixos teores de ar podem proporcionar o estabelecimento de condições redutoras nesse ambiente ao longo da estação chuvosa. Hall e Silver (2015) comprovam que condições redutoras, como as que foram observadas no substrato subsuperficial, contribuem efetivamente para o acúmulo de carbono no solo. O mecanismo desse processo envolve a sorção e complexação do carbono com metais reativos, principalmente com Al e Fe, formando compostos organominerais. Essa hipótese foi testada e comprovada por Silva et al. (2015), que apontaram que o Fe presente nos substratos tratados com lodo de esgoto serve de núcleo para a complexação e estabilização de carbono orgânico nas jazidas revegetadas. Porém, esses autores não investigaram a influência do Al nesse processo.

Cabe ressaltar que lodos de esgoto podem conter quantidades expressivas de Al, principalmente se o efluente é submetido ao tratamento de nível terciário. Um dos objetivos desse tipo de tratamento é a remoção de nutrientes e outros poluentes específicos por meio de processos físico-químicos, como a coagulação, a floculação e a precipitação química, sobretudo com a utilização de sais metálicos (JORDÃO e PESSÔA, 2009). As estações de tratamento de esgoto (ETE) do DF contemplam o tratamento terciário de esgoto, que consiste basicamente na coagulação de nutrientes com  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ou  $\text{FeCl}_3$  (Batista, 2015). Batista (2015) ainda destaca que os lodos de esgoto gerados em tais ETEs apresentam concentrações de Al total que variam de 17,4 a 42,9  $\text{g kg}^{-1}$ , conforme caracterização realizada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Essas concentrações são entre vinte e cinco e sessenta vezes mais elevadas que a

concentração de  $0,71 \text{ g kg}^{-1}$  de Al encontrado por Rodrigues et al. (2007) para substratos expostos, sugerindo que o lodo representa um aporte considerável desse elemento.

O regime prolongado de alta umidade, má aeração, possível baixo potencial de oxirredução, presença de íons metálicos oriundos do lodo (Al e Fe) e as raízes como fonte de carbono representam as condições necessárias para o acúmulo de carbono. Tais condições foram observadas no substrato subsuperficial, localizado imediatamente abaixo do substrato revegetado.

Ainda cabe destacar a consequência ecológica de substrato revegetado e solo sob Cerrado apresentarem regimes de umidade distintos. O regime de umidade do substrato revegetado provavelmente não supre as necessidades de uma fitofisionomia similar à que existia antes do processo de mineração, que era o Cerrado sentido restrito. Um dos aspectos que define essa fitofisionomia de Cerrado, segundo Eiten (1993), é o grau e duração de saturação da camada superficial ou subsuperficial. A saturação da camada subsuperficial é o processo que está ocorrendo na jazida revegetada com lodo de esgoto. Nesse sentido, o processo de revegetação com lodo de esgoto está conduzindo a sucessão ecológica ao estabelecimento de uma fitofisionomia diferente daquela que existia na área de estudo antes da mineração.

## **6. Considerações finais**

O substrato subsuperficial pela mineração, o mesmo substrato subsequentemente revegetado e o solo sob Cerrado usado como controle são materiais distintos quanto aos parâmetros mensurados e ao regime de umidade.

Quanto ao tempo que se mantém saturados, ficou evidenciado que o substrato subsuperficial está submetido à um regime de saturação constante durante o período chuvoso. Por sua vez, o substrato revegetado manteve o teor de água abaixo do Ponto de Murcha Permanente na maior parte do experimento. Esse fato sugere que processo de revegetação com lodo de esgoto foi capaz de alterar o regime de umidade apresentado pelo substrato subsuperficial, mas não foi capaz de proporcionar um regime de umidade análogo ao do solo sob Cerrado.

Considerando o regime prolongado de alta umidade prolongada, a recorrente má aeração do meio e as consequências do processo de revegetação na camada imediatamente superior, o substrato subsuperficial reúne as condições necessárias para dificultar a decomposição de carbono orgânico e provocar seu acúmulo.

## Referências

ALVES, Marlene Cristina; SUZUKI, Luís Gustavo Akihiro Sanches; SUZUKI, Luiz Eduardo Akiyoshi Sanches. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo vermelho distrófico em recuperação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 4, p. 617–625, 2007.

AMUNDSON, Ronald. The carbon budget in soils. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 29, p. 535–562, 2001.

ANDRADE, Rui da S.; STONE, Luís F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 2, p. 111–116, 2011.

ANKENBAUER, Kyle; LOHEIDE II, Steven P. The effects of soil organic matter on soil water retention and plant water use in a meadow of the Sierra Nevada, CA. *Hydrological Processes*, n. June 2016, p. Publicado online, 3 Nov 2016, 2016. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.11070/abstract>>.

ARAÚJO, Ricardo; GOEDERT, Wenceslau J.; LACERDA, Marilusa Pinto Coelho. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 1099–1108, 2007.

BARCELLOS, Diego; O'CONNELL, Christine S.; SILVER, Whendee; MEILE, Christof; THOMPSON, Aaron. Hot Spots and Hot Moments of Soil Moisture Explain Fluctuations in Iron and Carbon Cycling in a Humid Tropical Forest Soil. *Soil Systems*, v. 2, p. 59, 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2571-8789/2/4/59>>.

BATISTA, Lucilene Ferreira. Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final. Dissertação de Mestrado. 197 f. Universidade de Brasília, 2015.

BENTO, Marcel Anderson Borges. Avaliação da qualidade dos substratos minerados em cinco cascalheiras revegetadas no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado. 128 f. Universidade de Brasília, 2009.

BIAS, Edilson de Souza; CORRÊA, Rodrigo Studart; BRITES, Ricardo Seixas; COSTA, Gilson Alexandre Ostwald Pedro da; PASSO, Denilson Pereira; ANTUNES, Rodrigo Rodrigues. Atualização do mapeamento das áreas mineradas do DF mediante a utilização de imagens do sensor RapidEye. Projeto de Pesquisa. Brasília-DF, 2018.

BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos. 3. ed. Porto Alegre-RS: Bookman, 2013.

BREEMEN, Nico Van; BUURMAN, Peter. Soil Formation. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

BRYE, Kristofor R.; GBUR, Edward E. Regional differences in soil carbon and nitrogen storage as affected by land use and soil moisture regime. *Soil Science*, v. 175, n. 7, p. 339–348, 2010.

BUOL, Stanley W. Soils and agriculture in central-west and north Brazil. *Scientia Agricola*, v. 66, n. 5, p. 697–707, 2009.

CAVA, Mário Guilherme de Biagi; ISERNHAGEN, Ingo; MENDONÇA, Augusto Hashimoto de; DURIGAN, Giselda. Comparação de técnicas para restauração da vegetação lenhosa de Cerrado em pastagens abandonadas. *Hoehnea*, v. 43, n. 2, p. 301–315, 2016.

CEJPEK, Jiri; KURÁŽ, Václav; FROUZ, Jan. Hydrological Properties of Soils in Reclaimed and Unreclaimed Sites after Brown-Coal Mining. *Pol. J. Environ. Stud*, v. 22, n. 3, p. 645–652, 2013.

CORRÊA, Rodrigo Studart; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello; BALDUÍNO, Alexander Paulo do Carmo; SILVA, Lucas de Carvalho Ramos. Eficiência agrônômica de dois resíduos orgânicos na revegetação do horizonte C de um Latossolo Vermelho. *Revista Ciência Agronômica*, v. 39, n. 4, p. 503–510, 2008. Disponível em: <<http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/380>>.

CORRÊA, Rodrigo Studart. Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração no Cerrado. 2. ed. Brasília-DF: Universa, 2009.

CORRÊA, Rodrigo Studart; BENTO, Marcel Anderson Borges. Qualidade do substrato minerado de uma área de empréstimo revegetada no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 1435–1443, 2010.

CORRÊA, Rodrigo Studart; MELO FILHO, B. Ecologia da revegetação em áreas escavadas. In: CORRÊA, RODRIGO STUDART; MELO, B. F. (Org.). *Ecologia e recuperação de áreas degradadas no Cerrado*. Brasília-DF: Paralelo 15, 1998. p. 65–99.

COSTA, Édio Luiz da; SILVA, Antônio Marciano da; COLOMBO, Alberto; ABREU, Agostinho R. de. Infiltração de água em solo, determinada por simulador de chuvas e pelo método dos anéis. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 3, n. 2, p. 131–134, 1999.

COSTA, Eusângela Antônia; GOEDERT, Wenceslau J.; SOUSA, Djalma Martinhão Gomes de. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 7, p. 1185–1191, 2006.

CUNHA, Jorge L. X. L.; COELHO, Maria E. H.; ALBUQUERQUE, Abel W. de; SILVA, Cicero A.; JÚNIOR, Antônio B. da Silva; CARVALHO, Islan D. E. de. Water infiltration rate in Yellow Latosol under different soil management systems. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 11, p. 1021–1027, 2015.

DALMAGO, Genei A.; BERGAMASCHI, Homero; BERGONCI, João I.; KRÜGER, Cleusa A. M. B.; COMIRAN, Flávia; HECKLER, Bruna M. M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. Suplemento, p. 855–864, 2009.

DURIGAN, Giselda; CONTIERI, Wilson A.; FRANCO, Geraldo A. D. C.; GARRIDO, Marco A. O. Indução do processo de regeneração da vegetação de Cerrado em área de pastagem, Assis, SP. *Acta Botanica Brasilica*, v. 12, n. 3, p. 421–429, 1998.

EITEN, George. Vegetação. In: PINTO, Maria Novaes (Org.). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. 2. ed. Brasília-DF: Editora Universidade de Brasília, 1993. p. 681.

EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal - Boletim Técnico 53. Rio de Janeiro-RJ: 1978.

EMBRAPA. Manual de Métodos e Análise de Solo. 2. ed. Rio de Janeiro-RJ: Embrapa-CNPS, 1997.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro-RJ: Embrapa-SPI, 2006.

ERICKSON, A. E. Tillage effects on soil aeration - Predicting tillage effects on infiltration. In: VAN DOREN, D. M. (Org.). Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. Madison-WI: America Society of Agronomy, 1982. p. 91–104.

FÁVERO, Luiz Paulo; BELFIORE, Patrícia; SILVA, Fabiana Lopes da; CHAN, Betty Lilian. Análise de dados - Modelagem Multivariada para tomada de decisões. 1. ed. Rio de Janeiro-RJ: Elsevier, 2009.

FIELD, Andy. Descobrimo a estatística usando o SPSS. 2. ed. Porto Alegre-RS: Artmed, 2009.

FREITAS-SILVA, F. H.; CAMPOS, J. E. G. Geologia do Distrito Federal. Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília-DF: MMA-SRH, 1998. p. 86.

FRIZZONE, José Antônio. Necessidade de água para irrigação - Disciplina LEB 1571. Piracicaba-SP. 2017.

GAY, J. Rebecca; KORRE, Anna. A spatially-evaluated methodology for assessing risk to a population from contaminated land. Environmental Pollution, v. 142, p. 227–234, 2006.

GENUCHTEN, M. Van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

GOEDERT, Wenceslau J. Qualidade do solo em sistemas de produção agrícola. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, v. 30, p. 1–20, 2005.

GOEDERT, Wenceslau J.; CORRÊA, Rodrigo Studart. Usos, degradação e qualidade do solo. In: CORRÊA, Rodrigo Studart; BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello (Org.). Mineração e áreas degradadas no Cerrado. Brasília-DF: Universa, 2004. p. 159–172.

HALL, Steven J.; SILVER, Whendee L. Reducing conditions, reactive metals, and their interactions can explain spatial patterns of surface soil carbon in a humid tropical forest. *Biogeochemistry*, v. 125, p. 149–165, 2015.

HARIDASAN, Mundayatan. Solos. In: PINTO, Maria Novais (Org.). Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. Brasília-DF: Editora Universidade de Brasília, 1993. p. 681.

INMET. Normal Climatológica do Brasil 1981-2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 14 dez. 2018.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. Tratamento de Esgotos Domésticos. 5. ed. Rio de Janeiro-RJ: Synergia Editora, 2009.

KER, João Carlos; CURI, Nilton; SCHAEFER, Carlos Ernesto G. R.; VIDAL-TORRADO, Pablo. Pedologia - Fundamentos. 1. ed. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

LEATHERDALE, J.; CHANASYK, D. S.; QUIDEAU, S. Soil water regimes of reclaimed upland slopes in the oil sands region of Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, v. 92, p. 117–129, 2012.

LEGENDRE, Pierre; LEGENDRE, Louis. Numerical Ecology. 3. ed. Oxford-UK: Elsevier, 2012.

LIBARDI, Paulo Leonel. Dinâmica da água no solo. 2. ed. Piracicaba-SP: ESALQ/USP, 2000.

LIU, Yun-Guo; ZHOU, Ming; ZENG, Guang-Ming; WANG, Xin; LI, Xin; FAN, Ting. Bioremediation of heavy metals from mine tailings by indigenous sulfur-oxidizing bacteria: Effects of substrate concentration. *Bioresource Technology*, v. 99, p.

4124–4129, 2008.

MACHADO, Jorge Luiz; TORMENA, Cássio Antônio; FIDALSKI, Jonez; SCAPIM, Carlos Alberto. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, NULL, v. 32, p. 495–502, 2008.

MAIA, Felipe Cardoso de Oliveira. Curva de retenção e capacidade de água disponível em Latossolos. 2016. 52 f. Universidade de Brasília, 2016. Disponível em: <[http://bdm.unb.br/bitstream/10483/1794/1/2011\\_ElianadeFarias.pdf](http://bdm.unb.br/bitstream/10483/1794/1/2011_ElianadeFarias.pdf)>.

MOTA, Fabrícia Conceição Menez. Biomassa, fluxos de carbono e energia em área de Cerrado sentido restrito e plantio de eucalipto no Distrito Federal. Tese de Doutorado. 2017. Universidade de Brasília, 2017.

NASCIMENTO, Paulo César do; LANI, João Luís; MENDONÇA, Eduardo de Sá; ZOFFOLI, Hugo José de Oliveira; PEIXOTO, Henrique Theodoro Martins. Teores e características da matéria orgânica de solos hidromórficos do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 339–348, 2010.

NETO, Antônio Lunardi; ALBUQUERQUE, Jackson Adriano; ALMEIDA, Jaime Antônio de; MAFRA, Álvaro L.; MEDEIROS, João Carlos; ALBERTON, Adálcio. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 4, p. 1379–1388, 2008.

ODUM, Eugene P.; BARRETT, Gary W. *Fundamentos de Ecologia*. 5. ed. São Paulo-SP: Cenage Learning, 2011.

OKSANEN, Jari; BLANCHET, F. Guillaume; FRIENDLY, Michael; KINDT, Roeland; LEGENDRE, Pierre; MCGLINN, Dan; MINCHIN, Peter R.; O'HARA, R. B.; SIMPSON, Gavin L.; SOLYMOS, Peter; STEVENS, M. Henry H. SZOECS, Eduard; WAGNER, Helene. *Vegan: Community Ecology Package*. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=vegan>>. 2018.

OLIVEIRA, Daiana Nara Santos de. Efeito do lodo de esgoto e de plantas de cobertura na recuperação de uma área degradada em Brasília-DF. Dissertação de

Mestrado. 61 f. Universidade de Brasília, 2015.

PAONE, J.; STRUTHERS, P.; JOHNSON, W. Extent of disturbed lands and major reclamation problems in the United States. In: SCHALLER, F. W.; SUTTON, P. (Org.). Reclamation of drastically disturbed lands. Madison-WI: ASA/CSSA/SSSA, 1978.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 11, p. 1633–1644, 2007.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Viena-Áustria: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. , 2018

RAIJ, Bernardo Van. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. 1. ed. Piracicaba-SP: IPNI, 2011.

RAMOS, Bárbara Z.; PAIS, Paula Sant'Anna M.; FREITAS, Wellington A.; JUNIOR, Moacir de Souza D. Avaliação dos atributos físico-hídricos em um Latossolo Vermelho distroférrico sob diferentes sistemas de manejo - Lavras / Minas Gerais / Brasil. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 36, n. 3, p. 340–346, 2013.

REATTO, A.; BRUAND, A.; SILVA, E. M.; MARTINS, E. S.; BROSSARD, M. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequence across the Brazilian Central Plateau. *Geoderma*, v. 139, p. 51–59, 2007.

REATTO, Adriana; MARTINS, Éder de Souza; FARIAS, Marcus Fábio Ribeiro; SILVA, Ângelo Valverde da; JÚNIOR, Osmar Abílio de Carvalho. Mapa pedológico digital - SIG atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo. Planaltina-DF, 2004.

REICHARDT, Klaus; TIMM, Luís Carlos. Solo, Planta e Atmosfera - Conceitos, processos e aplicações. 2. ed. Barueri-SP: Manole, 2012.

RESENDE, Mauro; CURI, Nilton; REZENDE, Sérvulo Batista de; CORRÊA, Gilberto

Fernandes. Pedologia: Base para Distinção de Ambientes. 2. ed. Viçosa-MG: NEPUT, 1997.

RESENDE, Thalita Mendes; MORAES, Emmerson Rodrigues de; FRANCO, Fernando Oliveira; ARRUDA, Everton Martins; ARAÚJO, José Renato; SANTOS, Douglas da Silva; BORGES, Elias Nascentes; RIBEIRO, Bruno Teixeira. Avaliação física do solo em áreas sob diferentes usos com adição de dejetos animais no bioma Cerrado. Bioscience Journal, v. 28, n. Supplement 1, p. 179–184, 2012.

RODRIGUES, Graciela B.; MALTONI, Kátia L.; CASSIOLATO, Ana Maria R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma Cerrado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 11, n. 1, p. 73–80, 2007. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br>>.

SHRESTHA, Raj K.; LAL, Rattan. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. Geoderma, NULL, v. 161, p. 168–176, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.015>>.

SHRESTHA, Raj K.; LAL, Rattan. Ecosystem carbon budgeting and soil carbon sequestration in reclaimed mine soil. Environment International, v. 32, p. 781–796, 2006.

SIDOROVA, M. A.; BORISOVA, E. O. Moisture regime of loamy sandy soils of Moscow Meshchera Region under the impact of different surface planning operations. Eurasian Soil Science, v. 51, n. 8, p. 976–984, 2018.

SILVA, Euzébio Medrado da; LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck; AZEVEDO, Juscelino Antônio de; RODRIGUES, Lineu Neiva. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 41, n. 2, p. 323–330, 2006.

SILVA, Mellissa Ananias Soler da; MAFRA, Álvaro Luiz; ALBUQUERQUE, Jackson Adriano; BAYER, Cimélio; MIELNICZUK, João. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. Ciência Rural, NULL, v. 35, n. 3, p. 544–552, 2005.

SILVA, Lucas C. R.; DOANE, Timothy A.; CORRÊA, Rodrigo S.; VALVERDE,

Vinicius; PEREIRA, Engil I. P.; HORWATH, William R. Iron-mediated stabilization of soil carbon amplifies the benefits of ecological restoration in degraded lands. *Ecological Applications*, v. 25, n. 5, p. 1226–1234, 2015.

SILVA, Lucas C.R.; CORRÊA, Rodrigo S.; DOANE, Timothy A.; PEREIRA, Engil I.P. HORWATH, William R. Unprecedented carbon accumulation in mined soils: The synergistic effect of resource input and plant species invasion. *Ecological Applications*, v. 23, n. 6, p. 1345–1356, 2013.

SOIL SCIENCE DIVISION STAFF. *Soil Survey Manual*. 18. ed. Washington-DC: United States Department of Agriculture, 2017.

SOUZA, Patrícia Corrêa Guedes De. Riqueza florística e diversidade funcional da flora lenhosa em Cerrado sentido restrito e áreas revegetadas com lodo de esgoto. Trabalho de Conclusão de Curso. 59 f. Universidade de Brasília, 2017.

STARR, Carolina Rizzi. Avaliação da sucessão ecológica e do desenvolvimento de árvores em uma lavra de cascalho revegetada do Distrito Federal – DF. Dissertação de Mestrado. 71 f. Universidade de Brasília, 2009.

STOLF, Rubismar. Fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em força/unidade de área. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, v. 19, n. 2, p. 823–836, 1990.

STOLF, Rubismar; MURAKAMI, Jorge Hiroshi; BRUGNARO, Caetano; SILVA, Luiz Gabriel; SILVA, Luiz Carlos Ferreira da; MARGARIDO, Luiz Antônio Correia. Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em Excel-VBA. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 774–782, 2014.

STOLF, Rubismar; FERNANDES, José; NETO, Victório Furlani. Recomendação para uso do penetrômetro de Impacto. *STAB - açúcar, álcool e subprodutos*, v. 1, n. 3, 1983.

TORMENA, Cássio Antônio; SILVA, Álvaro Pires da; LIBARDI, Paulo Leonel. Characterization of the Least Limiting Water Range of an Oxisol Under No-Tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 573–581, 1998.

VOGEL, Gabriel Felipe; FEY, Rubens. Resistência mecânica à penetração em diferentes sistemas de uso do solo. *Revista de Agricultura Neotropical*, v. 3, n. 1, p. 21–26, 2016.

YAIR, A.; DANIN, A. Spatial Variations in Vegetation as Related to the Soil Moisture Regime over an Arid Limestone Hillside, Northern Negev, Israel. *Oecologia*, v. 47, p. 83–88, 1980.

**APÊNDICE A - ANOVA e Testes de Tukey para caracterização do substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado.**

Tabela A. 1 - Resultado da ANOVA realizada para verificação de diferenças entre as médias na densidade aparente do substrato, substrato revegetado e solo sob Cerrado.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,44	2	0,22	25,94	0,002	5,79
Dentro dos grupos	0,04	5	0,01			
Total	0,48	7				

Tabela A. 2 - Resultado do teste de Tukey para comparação da densidade aparente do substrato, substrato revegetado e solo sob Cerrado.

Comparação	Estatística Q de Tukey	valor-P
Substrato revegetado e substrato subsuperficial	9,94	0,002*
Substrato revegetado e solo sob Cerrado	2,46	0,279
Substrato subsuperficial e solo sob Cerrado	7,74	0,007*

\* Valor-p < 0,05 sugere que a média comparada é significativamente diferente.

Tabela A. 3 - Resultado da ANOVA realizada para verificação de diferenças entre as médias na condutividade hidráulica na superfície do solo sob Cerrado, superfície do substrato revegetado, transição entre substrato revegetado e substrato subsuperficial e substrato subsuperficial na profundidade de 15 cm.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	366714,29	3	122238,09	14,79	2,197E-06	2,87
Dentro dos grupos	289187,04	35	8262,49			
Total	655901,33	38				

Tabela A. 4 - Resultado do teste de Tukey para comparação da condutividade hidráulica na condutividade hidráulica na superfície do solo sob Cerrado, superfície do substrato revegetado, transição entre substrato revegetado e substrato subsuperficial e substrato subsuperficial na profundidade de 15 cm.

<b>Comparação</b>	<b>Estatística Q de Tukey</b>	<b>valor-P</b>
Superfície Cerrado e superfície subst. revegetado	38,54	0,047*
Superfície Cerrado e transição entre substratos	80,78	0,001*
Superfície Cerrado e subst. exposto 15 cm	28,43	0,204
Superfície revegetado e transição entre substratos	59,68	0,001*
Superfície revegetado e subst. exposto 15 cm	14,29	0,722
Transição entre substratos e subst. exposto 15 cm	73,66	0,001*

\* Valor-p < 0,05 sugere que a média comparada é significativamente diferente.

Tabela A. 5 - Resultado da ANOVA realizada para verificação de diferenças entre as médias do teor volumétrico de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível do substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado.

	<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>CC</b>	Entre grupos	0,045	2	0,023	17,28	0,0003	3,89
	Dentro dos grupos	0,016	12	0,001			
	Total	0,061	14				
<b>PMP</b>	Entre grupos	0,041	2	0,021	20,16	0,0002	3,89
	Dentro dos grupos	0,012	12	0,001			
	Total	0,053	14				
<b>AD</b>	Entre grupos	0,001	2	0,001	5,19	0,0359	4,46
	Dentro dos grupos	0,001	8	0,000			
	Total	0,002	10				

Tabela A. 6 - Resultado do teste de Tukey para comparação das médias do teor volumétrico de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível do substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado.

	<b>Comparação</b>	<b>Estatística Q de Tukey</b>	<b>valor-P</b>
	Substrato revegetado e substrato subsuperficial	8,31	0,0002*
<b>CC</b>	Substrato revegetado e solo sob Cerrado	4,45	0,0213*
	Substrato subsuperficial e solo sob Cerrado	3,86	0,0451*
	Substrato revegetado e substrato subsuperficial	8,77	0,0001*
<b>PMP</b>	Substrato revegetado e solo sob Cerrado	6,04	0,0029*
	Substrato subsuperficial e solo sob Cerrado	2,73	0,1721
	Substrato revegetado e substrato subsuperficial	1,81	0,4449
<b>AD</b>	Substrato revegetado e solo sob Cerrado	2,40	0,2649
	Substrato subsuperficial e solo sob Cerrado	4,54	0,0298*

\* Valor-p < 0,05 sugere que a média comparada é significativamente diferente.

Tabela A. 7 - Resultado da ANOVA realizada para verificação de diferenças entre as médias de porosidade total, microporosidade e macroporosidade do substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado.

	<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
<b>Porosidade total</b>	Entre grupos	0,062	2	0,031	25,94	0,002	5,79
	Dentro dos grupos	0,006	5	0,001			
	Total	0,068	7				
<b>Microporosidade</b>	Entre grupos	0,031	2	0,016	7,91	0,021	5,14
	Dentro dos grupos	0,012	6	0,002			
	Total	0,043	8				
<b>Macroporosidade</b>	Entre grupos	0,012	2	0,006	3,33	0,106	5,14
	Dentro dos grupos	0,011	6	0,002			
	Total	0,023	8				

Tabela A. 8 - Resultado do teste de Tukey para comparação das médias de porosidade total e microporosidade do substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado.

	<b>Comparação</b>	<b>Estatística Q de Tukey</b>	<b>valor-P</b>
<b>Porosidade total</b>	Substrato revegetado e substrato subsuperficial	9,94	0,002*
	Substrato revegetado e solo sob Cerrado	2,47	0,279
	Substrato subsuperficial e solo sob Cerrado	7,74	0,006*
<b>Microporosidade</b>	Substrato revegetado e substrato subsuperficial	5,43	0,020*
	Substrato revegetado e solo sob Cerrado	1,44	0,592
	Substrato subsuperficial e solo sob Cerrado	3,98	0,068

\* Valor-p < 0,05 sugere que a média comparada é significativamente diferente.

## APÊNDICE B – Teores volumétricos de água, ar e tensão da água

Tabela B. 1 - Teor volumétrico de água do substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em 22 semanas de investigação.

Semana	Data	Teor volumétrico de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )		
		Substrato subsuperficial	Substrato revegetado	Solo sob Cerrado
1	16/12/2017	0,45*	0,41*	0,34*
2	23/12/2017	0,45*	0,40	0,34*
3	30/12/2017	0,39*	0,26**	0,29
4	06/01/2018	0,44*	0,38	0,33
5	13/01/2018	0,42*	0,31**	0,29
6	20/01/2018	0,37*	0,19**	0,24**
7	27/01/2018	0,37*	0,30**	0,31
8	03/02/2018	0,41*	0,35	0,32
9	10/02/2018	0,39*	0,35	0,31
10	17/02/2018	0,33*	0,15**	0,23**
11	24/02/2018	0,20**	0,13**	0,23**
12	03/03/2018	0,29*	0,22**	0,26
13	10/03/2018	0,38*	0,31**	0,31
14	17/03/2018	0,39*	0,33**	0,32
15	24/03/2018	0,39*	0,31**	0,30
16	31/03/2018	0,37*	0,25**	0,25
17	07/04/2018	0,37*	0,29**	0,29
18	14/04/2018	0,36*	0,28**	0,26
19	21/04/2018	0,36*	0,29**	0,27
20	28/04/2018	0,34*	0,27**	0,29
21	05/05/2018	0,26	0,15**	0,22**
22	12/05/2018	0,12**	0,05**	0,21**

\* Teor volumétrico de água acima CC do material

\*\* Teor volumétrico de água abaixo do PMP do material

Tabela B. 2 - Teor volumétrico de ar do substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em 22 semanas de investigação

Semana	Data	Teor volumétrico de ar ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )		
		Substrato subsuperficial	Substrato revegetado	Solo sob Cerrado
1	16/12/2017	0,01*	0,28	0,29
2	23/12/2017	0,01*	0,28	0,30
3	30/12/2017	0,07*	0,42	0,34
4	06/01/2018	0,02*	0,30	0,31
5	13/01/2018	0,04*	0,37	0,35
6	20/01/2018	0,09*	0,49	0,39
7	27/01/2018	0,09**	0,38	0,32
8	03/02/2018	0,05*	0,33	0,31
9	10/02/2018	0,07*	0,34	0,32
10	17/02/2018	0,13	0,54	0,40
11	24/02/2018	0,26	0,56	0,40
12	03/03/2018	0,17	0,46	0,37
13	10/03/2018	0,08*	0,37	0,32
14	17/03/2018	0,07*	0,35	0,32
15	24/03/2018	0,07*	0,37	0,33
16	31/03/2018	0,09**	0,44	0,38
17	07/04/2018	0,09*	0,39	0,34
18	14/04/2018	0,10**	0,40	0,38
19	21/04/2018	0,10**	0,39	0,37
20	28/04/2018	0,12	0,41	0,34
21	05/05/2018	0,20	0,53	0,42
22	12/05/2018	0,34	0,63	0,42

\* Teor volumétrico de ar inferior a 20% da porosidade total do material, conforme descrito por Brady e Weil (2013) e  $\leq 0,1 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ , conforme descrito por Erickson (1982) e Tormena et al. (1998).

\*\* Teor volumétrico de ar  $\leq 0,1 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ , conforme descrito por Erickson (1982) e Tormena et al. (1998).

Tabela B. 3 - Tensão da água no substrato subsuperficial, substrato revegetado e solo sob Cerrado (kPa) em 22 semanas de investigação.

Semana	Data	Tensão da água (kPa)		
		Substrato subsuperficial	Substrato revegetado	Solo sob Cerrado
1	16/12/2017	0	15	0
2	23/12/2017	0	17	48
3	30/12/2017	2	156	114
4	06/01/2018	0	21	59
5	13/01/2018	1	66	130
6	20/01/2018	3	781	379
7	27/01/2018	3	72	81
8	03/02/2018	1	34	66
9	10/02/2018	2	36	76
10	17/02/2018	9	3305	495
11	24/02/2018	360	7035	480
12	03/03/2018	24	366	251
13	10/03/2018	2	66	77
14	17/03/2018	2	48	70
15	24/03/2018	2	61	93
16	31/03/2018	3	220	280
17	07/04/2018	3	88	110
18	14/04/2018	4	112	270
19	21/04/2018	4	87	211
20	28/04/2018	6	133	119
21	05/05/2018	48	2508	920
22	12/05/2018	23700*	1195500*	991

\* Valores de tensão de água muito acima do ponto de murcha permanente e podem ser considerados *outliers*.

## APÊNDICE C – Análise de Componentes principais

Tabela C. 1 – Autovetores das variáveis, conforme o as componentes principais

Variável	Componente principal 1	Componente principal 2
densidade_aparente	-0.6967	0.30763
areia_grossa	-0.5666	-0.64615
areia_fina	-0.6248	-0.53032
silte	-0.0712	-1.0188
argila	0.4114	0.84588
Ksat	0.6736	0.39602
CC	0.5762	-0.62922
PMP	0.4897	-0.7596
agua_disponível	0.6641	0.42638
porosidade_total	0.6951	-0.31472
macroporosidade	0.7146	-0.21234
microporosidade	0.6981	-0.30146
RMP	-0.4109	-0.84637
tempo_acima_CC	-0.723	0.14633
tempo_abaixo_PMP	0.3433	-0.90358
tempo_baixa_porosidade_aeração	-0.7272	0.09607

Tabela C. 2 – Escores dos materiais investigados, conforme o as componentes principais

Material	Componente principal 1	Componente principal 2
substrato_subsuperficial	-1.5738	0.1059
substrato_revegetado	0.6584	-1.0255
solo_sob_Cerrado	0.9154	0.9196

Tabela C. 3 – Loadings das variáveis em cada componente principal

<b>Variável</b>	<b>Componente principal 1</b>	<b>Componente principal 2</b>
densidade_aparente	-0.95377645	0.30051701
areia_grossa	-0.77561754	-0.63120317
areia_fina	-0.8553501	-0.51805038
silte	-0.09746578	-0.99523888
argila	0.56320036	0.82632037
Ksat	0.92213697	0.38686355
CC	0.78878236	-0.61467259
PMP	0.67036135	-0.74203481
agua_disponível	0.90912862	0.41651549
porosidade_total	0.95156737	-0.30744032
macroporosidade	0.97824914	-0.2074334
microporosidade	0.95565568	-0.29448638
RMP	-0.56249807	-0.8267986
tempo_acima_CC	-0.98973061	0.14294513
tempo_abaixo_PMP	0.4699765	-0.88267893
tempo_baixa_porosidade_aeração	-0.99558622	0.09385132

## APÊNDICE D - Regressão linear

Tabela D. 1 - Resumo da regressão linear para obtenção de resultados em teor volumétrico de água ( $m^3_{\text{água}} \cdot m^{-3}_{\text{solo}}$ ) no substrato subsuperficial.

R múltiplo	0.79
R-Quadrado	0.63
R-quadrado ajustado	0.56
Erro padrão	0.03
Observações	11

Tabela D. 2 - Significância da regressão linear para obtenção de resultados em teor volumétrico de água ( $m^3_{\text{água}} \cdot m^{-3}_{\text{solo}}$ ) no substrato subsuperficial.

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
<b>Regressão</b>	1	0.008	0.008	8.48	0.033
<b>Resíduo</b>	9	0.005	0.001		
<b>Total</b>	10	0.012			

Tabela D. 3 - Resumo da regressão linear para obtenção de resultados em teor volumétrico de água ( $m^3_{\text{água}} \cdot m^{-3}_{\text{solo}}$ ) no substrato revegetado.

R múltiplo	0.92
R-Quadrado	0.83
R-quadrado ajustado	0.80
Erro padrão	0.04
Observações	11

Tabela D. 4 - Significância da regressão linear para obtenção de resultados em teor volumétrico de água ( $m^3_{\text{água}} \cdot m^{-3}_{\text{solo}}$ ) no substrato revegetado.

	gl	SQ	MQ	F	F de significação
<b>Regressão</b>	1	0.037	0.036	20.74	0.010
<b>Resíduo</b>	9	0.007	0.002		
<b>Total</b>	10	0.044			

Tabela D. 5 - Resumo da regressão linear para obtenção de resultados em teor volumétrico de água ( $m^3_{\text{água}} \cdot m^{-3}_{\text{solo}}$ ) no solo sob Cerrado.

R múltiplo	0.78
R-Quadrado	0.61
R-quadrado ajustado	0.57
Erro padrão	0.03
Observações	13

Tabela D. 6 - Significância da regressão linear para obtenção de resultados em teor volumétrico de água ( $m^3_{\text{água}} \cdot m^{-3}_{\text{solo}}$ ) no solo sob Cerrado.

	<b>gl</b>	<b>SQ</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>F de significação</b>
<b>Regressão</b>	1	0.017	0.017	16.95	0.002
<b>Resíduo</b>	11	0.011	0.001		
<b>Total</b>	12	0.028			