



**Universidade de Brasília
Campus Darcy Ribeiro
Instituto de Geociências**

**Variação sazonal da umidade relativa em
organossolos utilizando
tomografia elétrica na
Fazenda Água Limpa (FAL - UnB)**

Caio Benevides

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
GEOFÍSICA**

Brasília
2025

**Universidade de Brasília
Campus Darcy Ribeiro
Instituto de Geociências**

**Variação sazonal da umidade relativa em
organossolos utilizando
tomografia elétrica na
Fazenda Água Limpa (FAL - UnB)**

Caio Benevides

Trabalho Final de Graduação em Geofísica do
Instituto de Geociências como requisito para
o título de grau de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha

Brasília
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Benevides, Caio.

Variação sazonal da umidade relativa em organossolos utilizando tomografia elétrica na Fazenda Água Limpa (FAL - UnB) / Caio Benevides; orientador Luciano Soares da Cunha. -- Brasília, 2025.

39 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Geofísica) -- Universidade de Brasília, 2025.

1. Tomografia elétrica com lapso de tempo. 2. Zona vadosa. 3. Organossolo. I. da Cunha, Luciano Soares, orient. II. Título.

**Universidade de Brasília
Campus Darcy Ribeiro
Instituto de Geociências**

**Variação sazonal da umidade relativa em organossolos
utilizando tomografia elétrica na Fazenda Água Limpa (FAL -
UnB)**

Caio Benevides

Trabalho Final de Graduação em Geofísica do
Instituto de Geociências como requisito para
o título de grau de Bacharel em Geofísica.

Trabalho aprovado. Brasília, 29 de julho de 2025:

Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha
UnB/IG
Orientador

Prof. Dr. Marcelo Henrique Leão Santos
UnB/FUP
Examinador interno

Prof. Dr. Adriano Domingos dos Reis
UnB/IG
Examinador interno

*Este trabalho é dedicado a toda esfera da geociências no Brasil,
em especial à nova classe, geofísicos (as), reconhecida pela lei e pelo CREA no ano de 2025.*

Agradecimentos

Agradeço a toda a minha família, minha mãe Gilvânia, irmã Ana Carolina e o meu amor Talitha Cristina que sempre me apoiaram na jornada acadêmica. Aos amigos Maurício, Genesson, Daniela, Guilherme Villanova, Arthur Santos, Marcos Aurélio, Itallo Clementino, Dhamaria, Ana Clara, Bruno e Melissa que conheci na Universidade de Brasília e tivemos momentos de lutas e alegrias juntos nesse percurso acadêmico.

Agradeço aos professores Welitom Borges, Marco Ianniruberto, Monica Von Huelsen, Giuliano Marotta, Marcelo Rocha, José Peres Soares, Adriana Chatack Carmelo, George Sand, Rejane Ennes Cicerelli e em especial o meu orientador Luciano Soares da Cunha que me ajudaram, me ensinaram e me testaram para me tornar um profissional da área.

*“Preço é o que você paga
Valor é o que você leva.”
(Warren Buffett)*

Resumo

Com a crescente preocupação em relação às variações ambientais, a compreensão dos processos que controlam a variação da umidade do solo ao longo do tempo é crucial para entender a dinâmica da água subterrânea na zona vadosa e na zona radicular. A tomografia elétrica com lapso de tempo é um método eficaz, sensível às variações de umidade no solo, permitindo um monitoramento rápido, não invasivo e de baixo custo, o que a torna uma ferramenta valiosa para estudos em solos orgânicos de áreas preservadas e degradadas. Assim, o objetivo desta pesquisa é monitorar a umidade relativa do solo por meio da variação da resistividade elétrica em uma área de Cerrado degradada com organossolo, além de identificar novas funções de pedotransferência entre parâmetros elétricos e propriedades do solo. O estudo foi realizado na Fazenda Água Limpa – UnB, em uma área degradada por atividades antropogênicas com organossolo, solo com altos teores de matéria orgânica, esse solo tem baixa ocorrência no bioma Cerrado. A região, localizada no Distrito Federal, é marcada por duas estações climáticas distintas, sendo que o período de seca se prolonga consideravelmente, afetando a dinâmica de umidade no solo. A aquisição de dados foi feita utilizando tomografia elétrica com um eletrorresistivímetro SuperSting R8, utilizando os arranjos Dipolo-Dipolo, com espaçamento de 1m e 5m, 28 eletrodos e aplicando uma corrente de 2A. O processamento dos dados foi iniciado no software SSAdim, seguido da inversão pelo Res2dinvx64 utilizando o método de mínimos quadrados. Os perfis de tomografia elétrica foram realizados em momentos estratégicos ao longo de 2023 a 2025, permitindo a identificação de variações na resistividade aparente nos diferentes meses do ano. As principais características associadas a essas variações incluem a extensão da seca no Cerrado, a alternância entre os períodos de chuva e seca, além da densidade vegetativa. Esses resultados contribuem para o entendimento da dinâmica do carbono no bioma Cerrado. Dessa forma, a tomografia elétrica se mostra eficaz no monitoramento da variação de umidade relativa em uma área degradada do Cerrado, os perfis de tomografia se mostraram sensíveis a variação de umidade no solo em todas as campanhas influenciando diretamente a dinâmica da água na zona vadosa e radicular, e, conseqüentemente, na dinâmica do carbono presente no solo.

Palavras-chave: Tomografia elétrica com lapso de tempo; zona vadosa; organossolo.

Abstract

With the growing concern about environmental variations, understanding the processes that control soil moisture variation over time is crucial for comprehending groundwater dynamics in the vadose and root zones. Time-lapse electrical resistivity tomography (ERT) is an effective method that is sensitive to soil moisture variations, enabling rapid, non-invasive, and low-cost monitoring, making it a valuable tool for studies in organic soils in both preserved and degraded areas. Thus, the objective of this research is to monitor soil relative moisture through variations in electrical resistivity in a degraded Cerrado area with Organossolo, as well as to identify new pedotransfer functions between electrical parameters and soil properties. The study was conducted at Fazenda Água Limpa – UnB, in a degraded area due to anthropogenic activities, with Organossolo soil, which has high organic matter content and low occurrence in the Cerrado biome. The region, located in the Federal District of Brazil, is marked by two distinct climatic seasons, with a prolonged dry period that significantly affects soil moisture dynamics. Data acquisition was carried out using electrical tomography with a SuperSting R8 resistivimeter, employing Dipole-Dipole and Wenner-Schlumberger arrays, with 1 m and 5 m spacing, 28 electrodes, and a 2A current. Data processing began with the SSAdim software, followed by inversion using Res2dinvx64 with the least-squares method. Electrical tomography profiles were obtained at strategic times from 2023 to 2025, allowing the identification of variations in apparent resistivity across different months of the year. The main characteristics associated with these variations include the extent of the dry season in the Cerrado, the alternation between rainy and dry periods, and vegetative density. These results contribute to the understanding of carbon dynamics in the Cerrado biome. Therefore, electrical tomography proves to be effective in monitoring relative moisture variation in a degraded area of the Cerrado, directly influencing water dynamics in the vadose and root zones, and consequently, carbon dynamics.

Keywords: time-lapse electrical resistivity tomography; vadose zone; organic soil.

Lista de figuras

Figura 2.1	Modelo esquemático do fluxo de corrente. Fonte: (Everett, 2013) Adaptado.	14
Figura 2.2	(a) Representação tridimensional de um potencial semi-esférico em volta de um eletrodo de corrente pontual em um meio homogêneo. (b) Decaimento do potencial nas proximidades do eletrodo de corrente pontual. Fonte: (Reynolds, 1997; Borges, 2007).	15
Figura 2.3	Variação de resistividade de solos e rochas. Fonte: (Braga, 2016).	17
Figura 2.4	Modelo esquemático do arranjo de 4 eletrodos. Fonte: (Borges, 2007) Adaptado.	18
Figura 2.5	Arranjos eletródicos utilizados em aquisição de tomografia elétrica. Fonte: (Samouëlian <i>et al.</i> , 2005).	19
Figura 2.6	Esquema sequencial de aquisição de dados utilizado em tomografia elétrica com o arranjo dipolo-dipolo. Fonte: (Braga, 2006) Adaptado.	21
Figura 2.7	Pseudo seção de resistividade aparente. Fonte: (Braga, 2006) Adaptado.	21
Figura 3.1	A - Mapa de Localização da Fazenda Experimental Água Limpa (FAL-UnB) com informação de solos. Fonte: EMBRAPA/SISDIA adaptado. B - Fotografia da área monitorada com tomografia elétrica com vegetação local. Fonte: Elaboração própria.	26
Figura 3.2	A e B - NVDI da FAL-UnB do ano de 1986 e 2022 respectivamente. Fonte: USGS adaptado.	27
Figura 3.3	Diagrama esquemático de medição de resistividade em meio uniforme. Adaptado (Nijland <i>et al.</i> , 2010)	28
Figura 3.4	Modelo de blocos do Perfil 3 com espaçamento entre eletrodos de 5 m.	29
Figura 3.5	Seção de tomografia elétrica após inversão com espaçamento de 1 m entre os eletrodos. Perfil 1 realizado em Maio/2023.	29
Figura 3.6	Seção de tomografia elétrica após inversão com espaçamento de 1 m entre os eletrodos. Perfil 2 realizado em Junho/2023.	30
Figura 3.7	Seção de tomografia elétrica após inversão com espaçamento de 5 m entre os eletrodos. Perfil 3 realizado em Setembro/2023.	30
Figura 3.8	Seção de tomografia elétrica após inversão com espaçamento de 5 m entre os eletrodos. Perfil 4 realizado em Junho/2024.	31
Figura 3.9	Seção de tomografia elétrica após inversão com espaçamento de 5 m entre os eletrodos. Perfil 5 realizado em Novembro/2024.	31
Figura 3.10	Seção de tomografia elétrica após inversão com espaçamento de 5 m entre os eletrodos. Perfil 6 realizado em Abril/2025.	32

Lista de tabelas

Tabela 2.1	Características dos diferentes tipos de arranjos.	20
Tabela 3.1	Tabela de parâmetros utilizados nos perfis de monitoramento com tomografia elétrica.	28

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Objetivo geral e específicos	12
1.2	Disposição Textual	13
2	Fundamentação Teórica	14
2.0.1	Eletrorresistividade	17
3	Artigo Científico	22
	Resumo	22
	Abstract	23
3.1	Introdução	24
3.2	Material	24
3.2.1	Área de Estudo	24
3.2.2	Tomografia Elétrica	25
3.2.3	Aquisição de Dados	28
3.2.4	Método	28
3.3	Resultados	29
3.4	Discussões	32
3.5	Conclusões	33
4	Conclusões e Considerações Finais	35
	Referências	36

1 Introdução

A crescente intensificação das mudanças climáticas tem alterado profundamente os ciclos hidrológicos e biogeoquímicos da *critical zone*, definida como a camada superficial planetária que se estende da rocha inalterada até a cobertura vegetal sobre a qual a atividade humana exerce sua maior influência. Estudos recentes apontam que na zona crítica se concentram as transformações mais rápidas e impactantes do ciclo da água, do carbono e dos nutrientes, sendo, portanto, um ambiente propício para compreender respostas ambientais de escala regional a global (Brantley; Goldhaber; Ragnarsdottir, 2007; Banwart *et al.*, 2019).

Neste contexto, métodos geofísicos elétricos têm-se destacado como ferramentas não invasivas para investigar dinâmicas na zona crítica. Em particular, a Tomografia Elétrica (*ERT, electrical resistivity tomography*) permite monitorar variações espaciais e temporais de umidade e resistividade aparente, oferecendo resoluções adequadas à análise de processos sazonais e impactos antrópicos (Binley *et al.*, 2015; Robinson *et al.*, 2010). A técnica é sensível às mudanças no teor de água do solo com aplicação rápida e precisa, e pode ser repetida em intervalos regulares (“*time-lapse ERT*”) para identificar padrões de infiltração, recarga e evapotranspiração (Miller *et al.*, 2008; Fan, 2015).

No território brasileiro, especificamente no bioma Cerrado, pode-se detectar áreas degradadas por antigas práticas de manejo e cultivo, resultando na exposição de organossolos — solos com elevado teor de matéria orgânica, alta porosidade e sensível variação hídrica. Essas unidades pedológicas, além de armazenarem grandes volumes de carbono, têm sua capacidade hídrica comprometida quando submetidas à retirada da cobertura vegetal e à compactação mecânica (Junior *et al.*, 2015). Poucos estudos até o momento aplicaram a *ERT* em organossolos degradados, deixando uma lacuna importante quanto a esse tipo de solo.

1.1 Objetivo geral e específicos

Este trabalho propõe, portanto, integrar abordagens de *time-lapse ERT* à caracterização de Organossolos degradados na Fazenda Água Limpa (FAL–UnB), com vistas a:

- Contextualizar os efeitos das mudanças climáticas na zona crítica do Cerrado e justificar a aplicação de métodos geofísicos elétricos neste cenário;
- Aplicar e validar protocolos de tomografia elétrica com lapso de tempo para monitoramento sazonal de umidade em organossolos;

1.2 Disposição Textual

A seguir, na Seção 2, é apresentada a fundamentação teórica relativa ao trabalho; na Seção 3, é apresentado o artigo científico a ser submetido à revista *Brazilian Journal of Geophysics*; na Seção 4 são apresentadas as conclusões e considerações finais do estudo; na Seção final são incluídas as referências bibliográficas utilizadas ao longo da dissertação.

2 Fundamentação Teórica

A resistividade elétrica é uma propriedade intrínseca dos materiais que representa a intensidade de oposição ao fluxo elétrico, logo um material com baixa resistividade tem uma maior mobilidade elétrica e uma alta resistividade possui baixa mobilidade. Deste modo, um material cilíndrico de comprimento L , em metros (m), resistência R , em ohms (Ω), e área de seção transversal A , em metros quadrados (m^2). Posto isso, a resistividade ρ é dada por:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (2.1)$$

em que a unidade de ρ é ($\Omega.m$) com seu modelo na [figura 3.3](#).

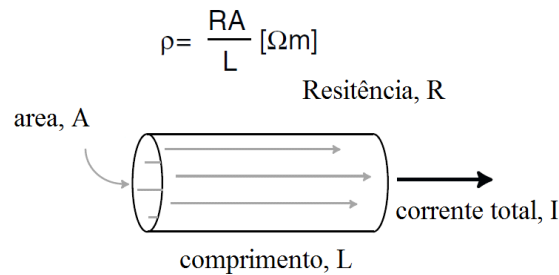


Figura 2.1 – Modelo esquemático do fluxo de corrente. Fonte: (Everett, 2013) Adaptado.

Para um único eletrodo de corrente implantado na superfície de um meio homogêneo de resistividade ρ , a corrente flui radialmente onde a variável $\rho(r)$ da resistividade da subsuperfície apresentada na [figura 2.2](#). O inverso da resistividade é a condutividade, dada como:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.2)$$

A condutividade é definida como a habilidade do material em conduzir corrente elétrica.

Para melhor entender o método da resistividade, necessita-se da definição de densidade de corrente. Esta variável, representada por J , relaciona-se diretamente com o campo elétrico E , de acordo com a Lei de Ohm:

$$J = \sigma E \quad (2.3)$$

de forma que:

$$E = \frac{J}{\sigma} = \rho J = \frac{I \rho \hat{r}}{2\pi r^2} \quad (2.4)$$

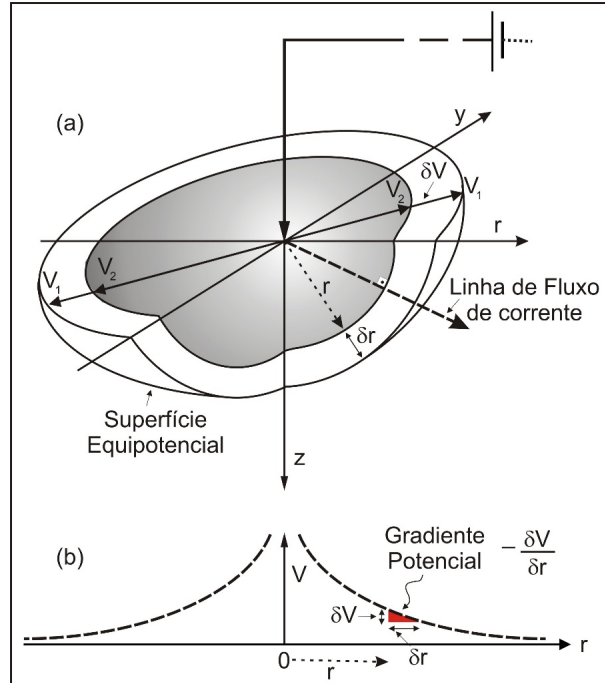


Figura 2.2 – (a) Representação tridimensional de um potencial semi-esférico em volta de um eletrodo de corrente pontual em um meio homogêneo. (b) Decaimento do potencial nas proximidades do eletrodo de corrente pontual. Fonte: (Reynolds, 1997; Borges, 2007).

A voltagem no ponto de injeção ΔV é definida como o trabalho que um campo elétrico E realiza sobre uma partícula carregada para levá-la do ponto ao infinito.

$$\Delta V = \int_c E \cdot ds \quad (2.5)$$

sendo c o caminho até o infinito:

$$\Delta V = \int_r^\infty E \cdot dr = \int_r^\infty \frac{I\rho}{2\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2.6)$$

O fluxo de corrente elétrica não pode fluir através do ar, ele flui radialmente para dentro do meio, no hemisfério de raio r e área de superfície $2\pi r^2$.

Entretanto, a suposição de que a resistividade da terra é homogênea não é uma realidade, portanto trataremos uma esfera heterogênea onde sua resistividade elétrica, em termos de resistividade aparente, expressa por:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (2.7)$$

Outro fator a ser considerado é que o valor da resistividade elétrica varia ponto a ponto, tanto lateralmente como também com o aumento de profundidade. Consequentemente, o valor medido em superfície irá variar para cada posição do eletrodo, assim como para a disposição e/ou o tamanho do arranjo de eletrodos utilizado.

A resistividade aparente não é um parâmetro físico do meio e sim um valor que representa o efeito integrado do semi-espaço sobre o qual a medida é efetuada. A resistividade aparente é uma resultante que sofre influência de diversas resistividades existentes no volume investigado. Trata-se de um conceito formal, não podendo ser considerada uma média das resistividades em subsuperfície.

2.0.0.1 Propriedades Elétricas dos Materiais

A corrente elétrica pode fluir através dos materiais (Reynolds, 1997; Loke, 2012) por:

- Condução eletrolítica: Baixa mobilidade dos íons presentes;
- Condução eletrônica: Fluxo de corrente;
- Condução dielétrica: Materiais ruins em condução, ou isolantes.

Na condução eletrônica, o fluxo de corrente ocorre por meio de elétrons livres, como em metais. Na condução eletrolítica, o fluxo de corrente ocorre por meio do movimento de íons em águas subterrâneas (Loke, 2012).

Há fatores que afetam a resistividade dos materiais. No caso de estudos em subsuperfície, o fluxo de corrente nos solos se dá por meio de condução eletrolítica, onde a condução ocorre por meio dos íons presentes nas moléculas do meio. A condutividade nos materiais é determinada pelos seguintes componentes (McNeill, 1980):

- Composição mineralógica do meio: Magnetita, hematita e grafite aumentam a condutividade;
- Quantidade e tamanho dos poros;
- Concentração de eletrólitos dissolvidos na água;
- Estado físico e temperatura da água;
- Quantidade e composição de coloides presentes no meio.

2.0.0.2 Propriedades Elétricas das Rochas

Rochas sedimentares, que geralmente são mais porosas e possuem maior teor de água, normalmente apresentam valores de resistividade mais baixos em comparação com rochas ígneas e metamórficas, e sedimentos inconsolidados geralmente apresentam valores de resistividade ainda mais baixos do que rochas sedimentares. Solos argilosos normalmente apresentam um valor de resistividade menor do que solos arenosos. Em quesito dos valores de resistividade, uma determinada rocha ou amostra de solo depende de uma série de fatores, como a porosidade, o grau de saturação de água e a concentração de sais dissolvidos (Loke, 2012). Os diferentes valores de resistividade para alguns tipos de rocha e solo estão apresentados na [figura 2.3](#).

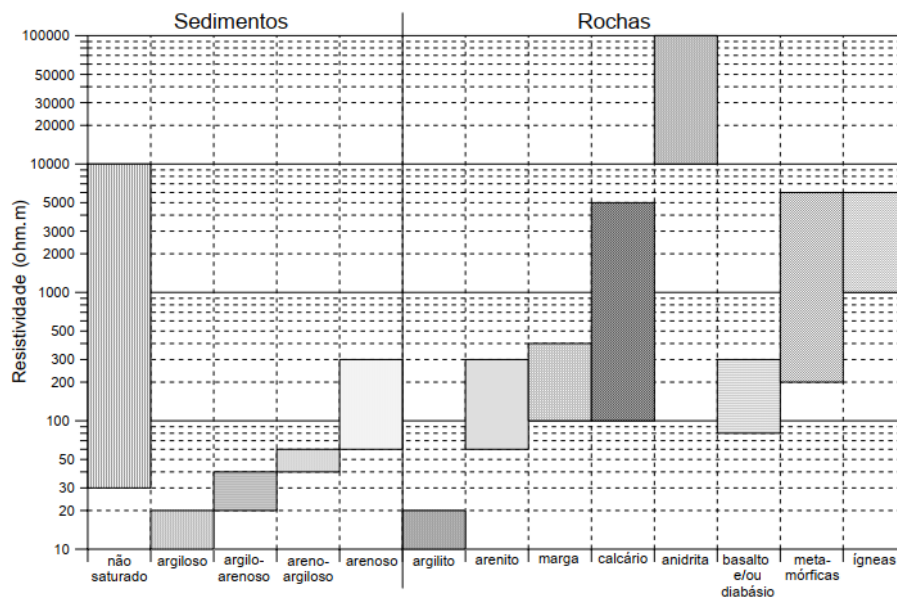


Figura 2.3 – Variação de resistividade de solos e rochas. Fonte: (Braga, 2016).

2.0.1 Eletrorresistividade

Os métodos geofísicos se fundamentam na análise de propriedades físicas que diferenciam os diversos materiais presentes no meio físico/geológico, sendo sua eficácia associada aos contrastes entre essas propriedades. Dentre esses métodos, os métodos elétricos se destacam pela versatilidade e ampla aplicação em diferentes campos das ciências da Terra (Braga, 2006).

Os métodos elétricos são inicialmente mencionados nos primeiros trabalhos realizados por Conrad Schlumberger no ano de 1912 (Everett, 2013). Entretanto, alguns anos antes, pesquisadores suecos usaram técnicas do método elétrico em um experimento localizando anomalias condutivas (Dahlin, 2001). A partir de avanços na instrumentação, nos protocolos de aquisição e nos algoritmos de modelagem, os estudos com métodos elétricos passaram a oferecer maior precisão em termos de caracterização da subsuperfície. A eletrorresistividade, baseia-se na análise dos campos elétricos naturais ou induzidos, sendo sua aplicação centrada na estimativa da resistividade elétrica dos materiais. Essa propriedade, aliada à constante dielétrica e à permeabilidade magnética, define o comportamento eletromagnético das formações geológicas investigadas em subsuperfície (Braga, 2006).

Os métodos elétricos podem ser divididos em:

- Eletrorresistividade - Resistividade elétrica dos materiais;
- Polarização Induzida - Variações de cargabilidade em função do tempo ou da frequência;
- Eletromagnéticos - Condutividade dos materiais;
- Radar de Penetração - Constante dielétrica ou Permissividade.

Na eletrorresistividade injeta-se a corrente elétrica através de dois eletrodos metálicos inseridos no subsolo, e em outros dois eletrodos mede-se o potencial elétrico que flui no meio. A partir disso, calculam-se a resistência elétrica e a resistividade elétrica aparente do meio (Telford; Geldart; Sheriff, 1990).

O método da resistividade elétrica é amplamente usado no monitoramento de poluição ambiental, na localização de falhas e fraturas, em investigações geotécnicas, em estudos arqueológicos, no mapeamento geológico, entre outras (Reynolds, 1997). A distribuição do potencial é em função da geometria das estruturas da resistividade elétrica, da geometria, o arranjo e da intensidade da corrente elétrica injetada no solo (Reynolds, 1997; Telford; Geldart; Sheriff, 1990). Para um terreno homogêneo, a profundidade de penetração de corrente aumenta com o aumento da separação dos eletrodos de corrente de forma simultânea em torno de um ponto central.

De forma geral, utiliza-se um arranjo de quatro eletrodos onde dois são de corrente e dois de potencial, modelo representado na figura 2.4. O espaçamento entre os eletrodos $\overline{AM}$, $\overline{BM}$, $\overline{AN}$, $\overline{BN}$ varia de acordo com o arranjo definido.

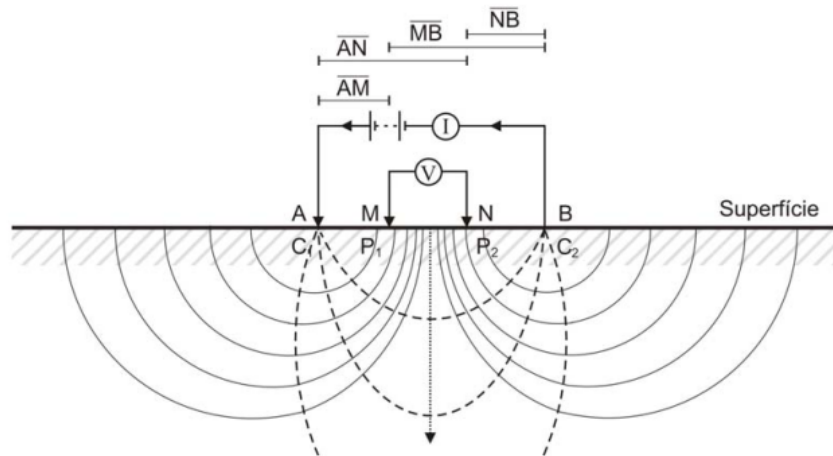


Figura 2.4 – Modelo esquemático do arranjo de 4 eletrodos. Fonte: (Borges, 2007) Adaptado.

A variação de potencial nos eletrodos M e N:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}} \right) - \left(\frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{BN}} \right) \right] \quad (2.8)$$

e o fator geométrico K :

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{BM}} \right) - \left(\frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{BN}} \right)} \quad (2.9)$$

A constante K depende unicamente da disposição dos eletrodos de corrente e potencial na superfície.

2.0.1.1 Arranjo de Eletrodos

Os arranjos eletródicos são compostos de quatro eletrodos, um par de eletrodos para introduzir a corrente elétrica em sub superfície (AB) e o outro par utilizado para medir a diferença de potencial gerada pela injeção de corrente elétrica (MN) (Braga, 2006). Os arranjos eletródicos, então, possuem configurações distintas de posição dos quatro eletrodos fazendo assim o seu fator geométrico K diferentes entre si:

- Wenner;
- Schulumberger;
- Wenner-Schlumberger;
- Dipolo-Dipolo;
- Polo-Dipolo;
- Polo-Polo;
- Gradiente;
- Mise-a-la-masse.

A [figura 2.5](#) demonstra a configuração dos eletrodos de corrente e potencial e seu fator geométrico K de alguns dos arranjos mais utilizados.

	Electrodes array	K
2D		$2\pi a$
		$\pi n(n+1)a$
		$\pi n(n+1)(n+2)a$
		$2\pi a$
		$2\pi n(n+1)a$

A and B current electrodes, M and N potential electrodes
 A: spacing between electrodes used in a particular measurement
 n: spacing factor (integer values 1-6)
 x: distance to "infinite electrodes" in pole-pole array

Figura 2.5 – Arranjos eletródicos utilizados em aquisição de tomografia elétrica. Fonte: (Samouëlian *et al.*, 2005).

Os arranjos eletródicos evidenciam características como: Sensibilidade a heterogeneidades horizontais e verticais, têm diferentes profundidades de investigação e têm diferentes sensibilidades à intensidade do sinal (Samouëlian *et al.*, 2005). Com a [tabela 2.1](#) os diferentes arranjos podem ser comparados com a sua respectiva sensibilidade a essas características.

Tabela 2.1 – Características dos diferentes tipos de arranjos.

Características	Wenner	Wenner-Schulumberger	Dipolo-Dipolo	Polo-Polo	Polo-Dipolo
Sensibilidade horizontal de estruturas	++++	++	+	++	++
Sensibilidade vertical de estruturas	+	++	++++	++	+
Profundidade de investigação	+	++	+++	++++	+++
Cobertura de dados horizontalmente	+	++	+++	++++	+++
Intensidade do sinal	++++	+++	+	++++	++

Nota: Os sinais de (+) a (++++), indicam de baixa sensibilidade a alta sensibilidade respectivamente. Fonte: (Samouëlian *et al.*, 2005) Adaptado.

2.0.1.2 Tomografia Elétrica

Quando o objetivo da investigação geofísica necessita da identificação de variações laterais de resistividade elétrica em subsuperfície, a técnica Tomografia Elétrica é recomendada. No contexto brasileiro, essa abordagem é tradicionalmente conhecida como caminhamento elétrico, sendo amplamente utilizada para mapeamentos em duas dimensões (Borges, 2007). A técnica consiste na aquisição e interpretação de parâmetros geoeletricos, como a resistividade elétrica e/ou a cargabilidade, por meio de medições realizadas na superfície do terreno. Esses dados permitem avaliar as variações laterais desses parâmetros ao longo de uma seção, considerando uma ou múltiplas profundidades de investigação. Os resultados podem ser apresentados sob a forma de mapas pontuais em níveis específicos ou seções contínuas com diferentes profundidades de penetração e resolução (Braga, 2006).

Para obter uma imagem em 2D da subsuperfície, utilizando a técnica de tomografia elétrica, deve-se realizar uma sequência de operações a fim de se obter uma pseudo seção geoeletrica (Borges, 2007). O arranjo de quatro eletrodos, sendo dois de corrente e dois de potencial, deve percorrer o eletrodos para se obter medidas em subsuperfície. Quando o arranjo se altera, em termos de distância entre os eletrodos de potencial, outros níveis mais profundos são atingidos e adquiridos na pseudo seção.

É necessário salientar que a profundidade de investigação não depende unicamente da configuração geométrica do sistema de medidas, mas também dos contrastes das resistivida-

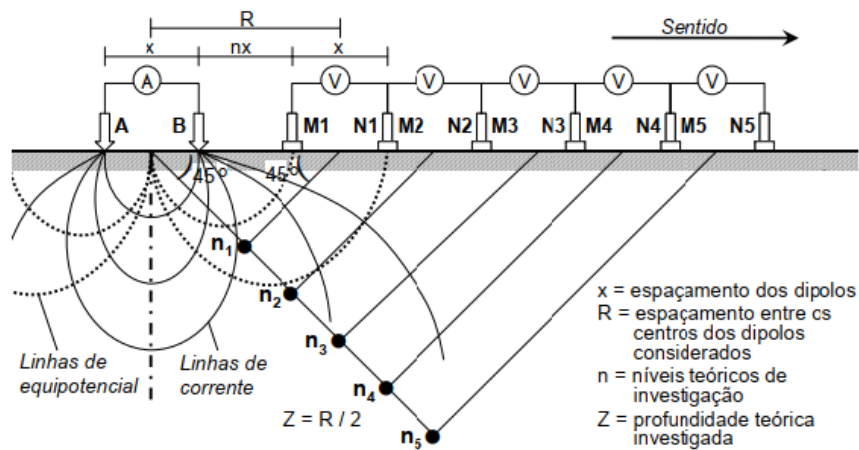


Figura 2.6 – Esquema sequencial de aquisição de dados utilizado em tomografia elétrica com o arranjo dipolo-dipolo. Fonte: (Braga, 2006) Adaptado.

des nas litologias em subsuperfície, topografia e ruídos naturais e artificiais (Gallas, 2000; Borges, 2007).

Após a plotagem de todos os parâmetros geoeletricos obtidos em perfil, os dados de campo são geralmente apresentados sob a forma de uma seção, onde as resistividades aparentes estão distribuídas espacialmente em subsuperfície. Porém, é necessário entender que essas distribuições não possuem correspondência com a verdadeira posição e geometria das estruturas em subsuperfície. Para que seja gerada uma seção geoeletrica real esses dados devem passar por uma nova sequência de tratamento de dados (Braga, 2006):

- Análise quantitativa;
- Processamento de dados (inversão de dados);
- Associação com a geologia;
- Modelagem final.

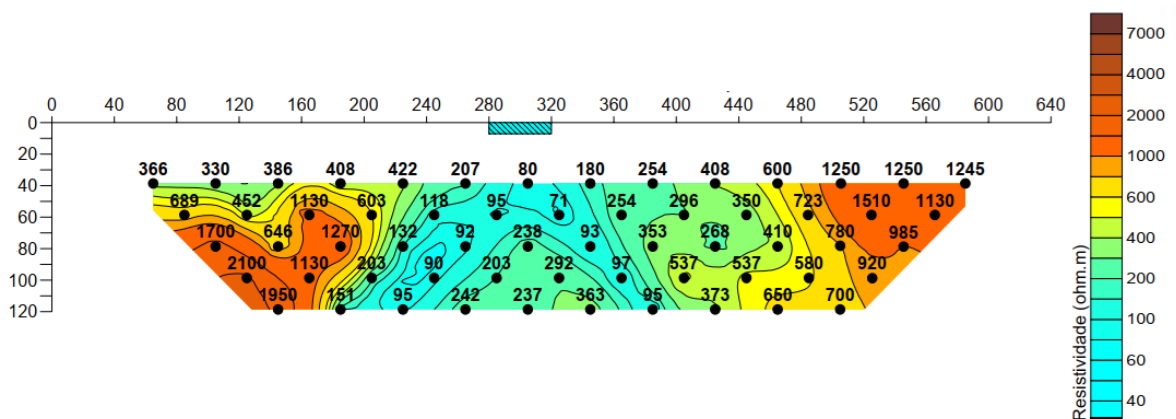


Figura 2.7 – Pseudo seção de resistividade aparente. Fonte: (Braga, 2006) Adaptado.

3 Artigo Científico

VARIAÇÃO SAZONAL DA UMIDADE RELATIVA EM ORGANOSSOLOS UTILIZANDO TOMOGRAFIA ELÉTRICA NA FAZENDA ÁGUA LIMPA (FAL - UnB)

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil

Benevides, C.; Cunha, S. L.

2025

Resumo

Com a crescente preocupação em relação às variações ambientais, a compreensão dos processos que controlam a variação da umidade do solo ao longo do tempo é crucial para entender a dinâmica da água subterrânea na zona vadosa e na zona radicular. A tomografia elétrica com lapso de tempo é um método eficaz, sensível às variações de umidade no solo, permitindo um monitoramento rápido, não invasivo e de baixo custo, o que a torna uma ferramenta valiosa para estudos em solos orgânicos de áreas preservadas e degradadas. Assim, o objetivo desta pesquisa é monitorar a umidade relativa do solo por meio da variação da resistividade elétrica em uma área de cerrado degradada com organossolo, além de identificar novas funções de pedotransferência entre parâmetros elétricos e propriedades do solo. O estudo foi realizado na Fazenda Água Limpa – UnB, em uma área degradada por atividades antropogênicas com organossolo, solo com altos teores de matéria orgânica, esse solo tem baixa ocorrência no bioma Cerrado. A região, localizada no Distrito Federal, é marcada por duas estações climáticas distintas, sendo que o período de seca se prolonga consideravelmente, afetando a dinâmica de umidade no solo. A aquisição de dados foi feita utilizando tomografia elétrica com um eletorresistivímetro SuperSting R8, utilizando os arranjos Dipolo-Dipolo, com espaçamento de 1m e 5m, 28 eletrodos e aplicando uma corrente de 2A. O processamento dos dados foi iniciado no software SSAdim, seguido da inversão pelo Res2dinvx64 utilizando o método de mínimos quadrados. Os perfis de tomografia elétrica foram realizados em momentos estratégicos ao longo de 2023 a 2025, permitindo a identificação de variações na resistividade aparente nos diferentes meses do ano. As principais características associadas a essas variações incluem a extensão da seca no Cerrado, a alternância entre os períodos de chuva e seca, além da densidade vegetativa. Esses resultados contribuem para o entendimento da dinâmica do carbono no bioma Cerrado. Dessa forma, a tomografia elétrica se mostra eficaz no monitoramento da variação de umidade relativa em uma área degradada do Cerrado, influenciando diretamente a dinâmica da água na zona vadosa e radicular, e, consequentemente, na dinâmica do carbono.

Palavras-chaves: tomografia elétrica com lapso de tempo. zona vadosa. organossolo.

SEASONAL VARIATION OF RELATIVE MOISTURE IN ORGANIC SOILS USING ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY AT FAZENDA ÁGUA LIMPA (FAL - UnB)

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil

Benevides, C.; Cunha, S. L.

2025

Abstract

With the growing concern about environmental variations, understanding the processes that control soil moisture variation over time is crucial for comprehending groundwater dynamics in the vadose and root zones. Time-lapse electrical resistivity tomography (ERT) is an effective method that is sensitive to soil moisture variations, enabling rapid, non-invasive, and low-cost monitoring, making it a valuable tool for studies in organic soils in both preserved and degraded areas. Thus, the objective of this research is to monitor soil relative moisture through variations in electrical resistivity in a degraded Cerrado area with Organossolo, as well as to identify new pedotransfer functions between electrical parameters and soil properties. The study was conducted at Fazenda Água Limpa – UnB, in a degraded area due to anthropogenic activities, with Organossolo soil, which has high organic matter content and low occurrence in the Cerrado biome. The region, located in the Federal District of Brazil, is marked by two distinct climatic seasons, with a prolonged dry period that significantly affects soil moisture dynamics. Data acquisition was carried out using electrical tomography with a SuperSting R8 resistivimeter, employing Dipole-Dipole and Wenner-Schlumberger arrays, with 1 m and 5 m spacing, 28 electrodes, and a 2A current. Data processing began with the SSAdim software, followed by inversion using Res2dinvx64 with the least-squares method. Electrical tomography profiles were obtained at strategic times from 2023 to 2025, allowing the identification of variations in apparent resistivity across different months of the year. The main characteristics associated with these variations include the extent of the dry season in the Cerrado, the alternation between rainy and dry periods, and vegetative density. These results contribute to the understanding of carbon dynamics in the Cerrado biome. Therefore, electrical tomography proves to be effective in monitoring relative moisture variation in a degraded area of the Cerrado, directly influencing water dynamics in the vadose and root zones, and consequently, carbon dynamics.

Key-words: time-lapse electrical resistivity tomography. vadose zone. organic soil.

Artigo a ser submetido à revista **Brazilian Journal of Geophysics**, após incorporação das sugestões e correções da banca examinadora.

3.1 Introdução

O uso de métodos não invasivos em solos tem sido objeto de estudo em diversas áreas, devido à sua aplicabilidade em diferentes finalidades. Na geofísica aplicada, a tomografia elétrica (TE) é um método de resistividade de corrente contínua que pode ser usado para estimar a distribuição da resistividade elétrica (o inverso da condutividade elétrica) no subsolo (Robinson *et al.*, 2010).

Por ser uma técnica não destrutiva, de metodologia ágil e resolução espacial variável, a TE é amplamente utilizada em agricultura, hidrogeologia e estudos de bacias, uma vez que é sensível a parâmetros físicos e químicos da matéria, como umidade, teor de carbono, compactação, porosidade e composição do solo (Corwin; Lesch, 2003; Binley *et al.*, 2015; Miller *et al.*, 2008). Quando aplicada para monitorar a variação da resistividade elétrica do solo ao longo de alterações na umidade, a TE é capaz de delimitar horizontes do solo e identificar zonas de retenção de umidade na zona radicular (Michot *et al.*, 2003).

Este estudo foi realizado em um solo do tipo Organossolo, segundo a classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), caracterizado por preponderância dos atributos dos constituintes orgânicos sobre os dos constituintes minerais (Santos *et al.*, 2018). Outra característica verificada nesses solos são os elevados teores de água em sua constituição devido ao seu desenvolvimento ocorrer em ambientes mal a muito mal drenados ou úmidos de altitude elevada, que ficam saturados com água por poucos dias no período chuvoso (Santos *et al.*, 2018). No bioma Cerrado, presente na região do Distrito Federal, o clima predominante, segundo a classificação de Köppen, é "tropical de Savana", com a concentração da precipitação pluvial no verão, variando de 2.000 a 1.500 mm. O clima é marcado por dois períodos onde um possui com baixas taxas de precipitação, nebulosidade e umidade relativa com alta taxa de evaporação no período de maio a setembro (Campos, 2004). A estação chuvosa começa em outubro e termina em abril, representando 84 % do total anual. O trimestre mais chuvoso é de novembro a janeiro, sendo dezembro o mês de maior precipitação do ano (Ferrante; Rancan; Netto, 2001). Essas condições climáticas afetam diretamente as características e o comportamento do solo.

Assim, o objetivo deste trabalho é monitorar a umidade relativa do solo por meio da variação da resistividade elétrica em uma área de cerrado degradada com organossolo. Como também, busca-se identificar novas funções de pedotransferência entre parâmetros elétricos e propriedades do solo.

3.2 Material

3.2.1 Área de Estudo

O trabalho de campo foi realizado na Fazenda Experimental Água Limpa (FAL-UnB), uma área de aproximadamente 4.500 hectares, localizada no Distrito Federal (Figura 3.1 - A). Geologicamente, a área da FAL-UnB desenvolveu-se sobre litologias do Grupo Paranoá, sendo caracterizada por duas unidades principais: a ardósia (MNPpa), composta por ardósias roxas e vermelhas com faixas brancas; e o metarritmito arenoso (MNPpr3), que consiste em intercalações irregulares de quartzitos finos e brancos, laminados, com camadas de metassiltitos, metalamitos e metassiltitos argilosos (Freitas-Silva; Campos, 1998).

A geomorfologia da área da FAL é marcada por três grandes superfícies geomorfológicas (SG) (Martins; Baptista, 1998):

- SG1 - Chapadas Elevadas, com altitudes variando entre 1.200 e 1.342 metros;

- SG2 - Planos Intermediários e Rebordos, com altitudes entre 1.150 e 1.200 metros;
- SG3 - Planícies, com altitudes inferiores a 1.150 metros.

Os tipos de solos encontrados na Fazenda Água Limpa ([Junior et al., 2015](#)) são (Figura 3.1 - A):

- LATOSSOLO VERMELHO ácrico típico;
- LATOSSOLO VERMELHO AMARELO ácrico petroplântico;
- GLEISSOLO HÁPLICO Tb distrófico típico;
- ORGANOSSOLO HÁPLICO sáprico típico.

A área de estudo se localiza geologicamente na unidade de ardósia do Grupo Paranoá e geomorfologicamente em uma planície dissecada, onde na área monitorada com tomografia elétrica foi possível a verificação dos horizontes do solo (Organossolo) por meio de uma trincheira escavada. Logo, os perfis de aquisição de dados geofísicos foram posicionados para que a trincheira estivesse centralizada aos perfis.

Além disso, foi realizada uma análise elementar do solo por meio do método de combustão seca (CHNS-O) utilizando o equipamento Eurovector EuroEA 3000, que determina as concentrações de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio por meio de combustão de amostras em atmosfera controlada, seguida de detecção por cromatografia gasosa. A técnica fornece estimativas precisas de carbono total (%C), nitrogênio total (%N) ([Gatto et al., 2009](#)). Os resultados obtidos nas amostras do Organossolo revelaram teores de %C entre 14,869 e 30,160 e %N entre 0,603 e 0,961. Os resultados de matéria orgânica podem ser efetivamente determinados com o forno Mufla (MO-Mufla). Onde uma quantidade previamente pesada da amostra de solo seca em estufa é submetida à combustão em forno mufla (com precisão de $\pm 5^{\circ}\text{C}$) a 600°C durante 6 horas. O teor de matéria orgânica foi determinado pela diferença de massa em relação à amostra original do solo ([Pereira et al., 2006](#)). Os teores obtidos de %MO variaram entre 25,630 e 52,000.

Atualmente, a vegetação no local tem sofrido supressão parcial, ainda apresenta arbustos, árvores de porte médio e gramíneas, típicos do Campo Sujo, uma formação campestre característica do Bioma Cerrado ([Jardim Botânico de Brasília, 2024](#)) (Figura 3.1 - B).

Uma importante ferramenta são as imagens de satélite junto ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NVDI), que utiliza a divisão de bandas visando o realce das variações de densidade da cobertura vegetal. O índice varia de -1.0 e +1.0, onde os valores $> 0,2$ significam vegetação densa e saudável e valores baixos $< 0,2$ representam solo exposto, baixa vegetação e áreas urbanas. É apropriado quando se pretende fazer comparações ao longo do tempo de uma mesma área, pois é esperado ser menos influenciado pelas variações das condições atmosféricas ([Meneses; Almeida, 2012](#)). Com uso do índice é possível verificar que a área de estudo é alvo de intervenção humana comparando os índices do ano de 1986 e 2022. As imagens de satélites são provenientes dos satélites Landsat 4-5 TM (29/03/1986), e Landsat 8-9 OLI/TIRS (18/10/2022) (Figura 3.2 - A e B).

3.2.2 Tomografia Elétrica

A Tomografia Elétrica (TE) utiliza a injeção de corrente elétrica contínua no solo através de eletrodos para mapear a resistividade do subsolo. A corrente se adapta ao padrão de resistividade local, e a diferença de potencial é medida com outro par de eletrodos. Em um meio condutor uniforme, a corrente forma um padrão semelhante a um dipolo, e a resistividade é calculada usando uma configuração de quatro eletrodos. Durante a coleta de dados em campo, múltiplos eletrodos são conectados ao equipamento, onde o gradiente

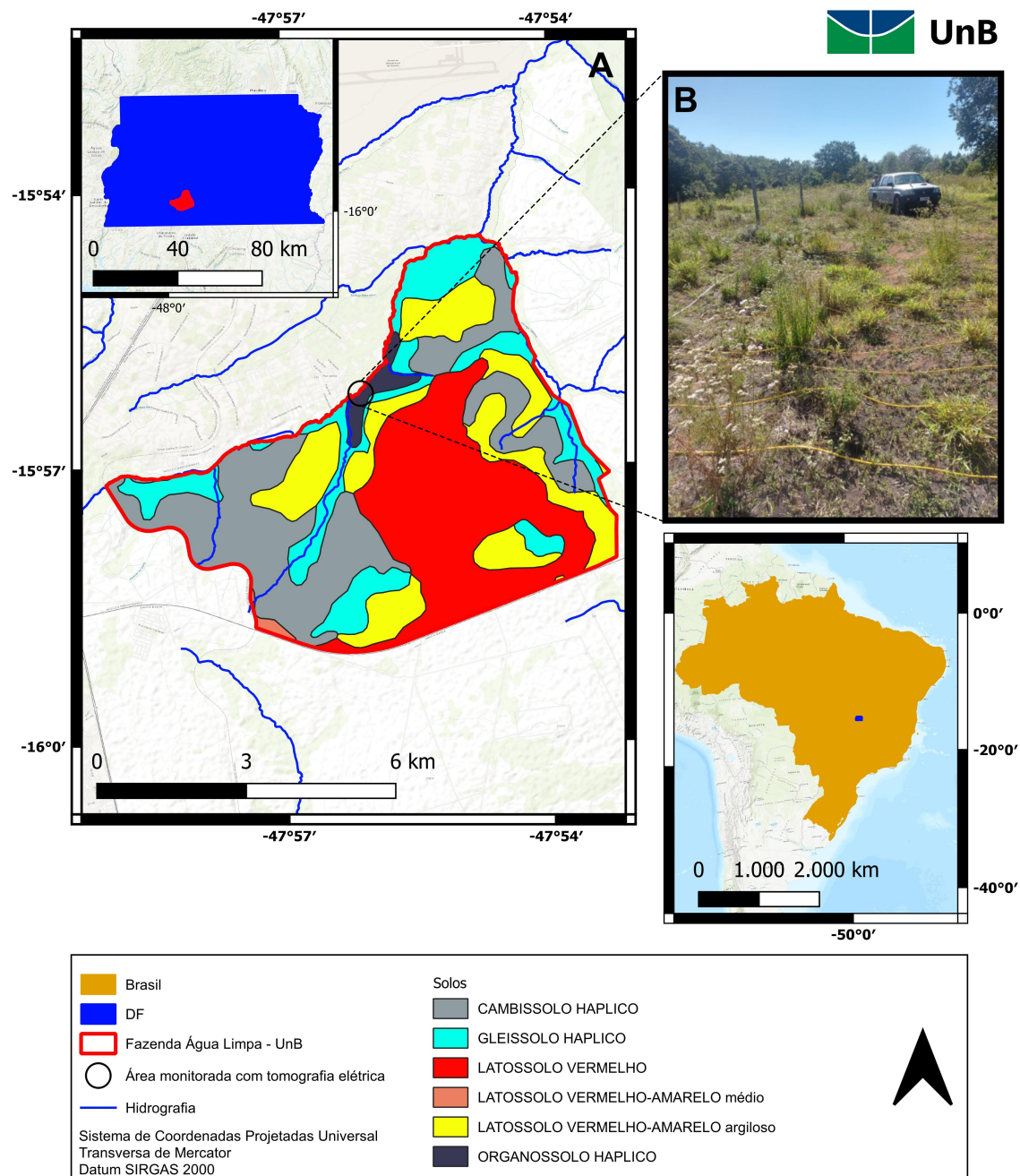


Figura 3.1. A - Mapa de Localização da Fazenda Experimental Água Limpa (FAL-UnB) com informação de solos. Fonte: EMBRAPA/SISDIA adaptado.

B - Fotografia da área monitorada com tomografia elétrica com vegetação local. Fonte: Elaboração própria.

de voltagem é estabelecido entre dois eletrodos de fonte e o potencial gerado é medido em receptores, permitindo determinar a resistividade do solo. Esse processo é repetido com várias combinações de eletrodos, gerando um grande número de medições. Essas medições são então combinadas para criar um perfil 2D da distribuição de resistividade, que representa as propriedades tridimensionais do subsolo, já que a corrente elétrica flui em padrões esféricos e não planos (Nijland *et al.*, 2010; Robinson *et al.*, 2010).

A resistividade elétrica do solo é função das características texturais, estruturais e da composição como litologia, porosidade, estrutura e é particularmente sensível à temperatura,

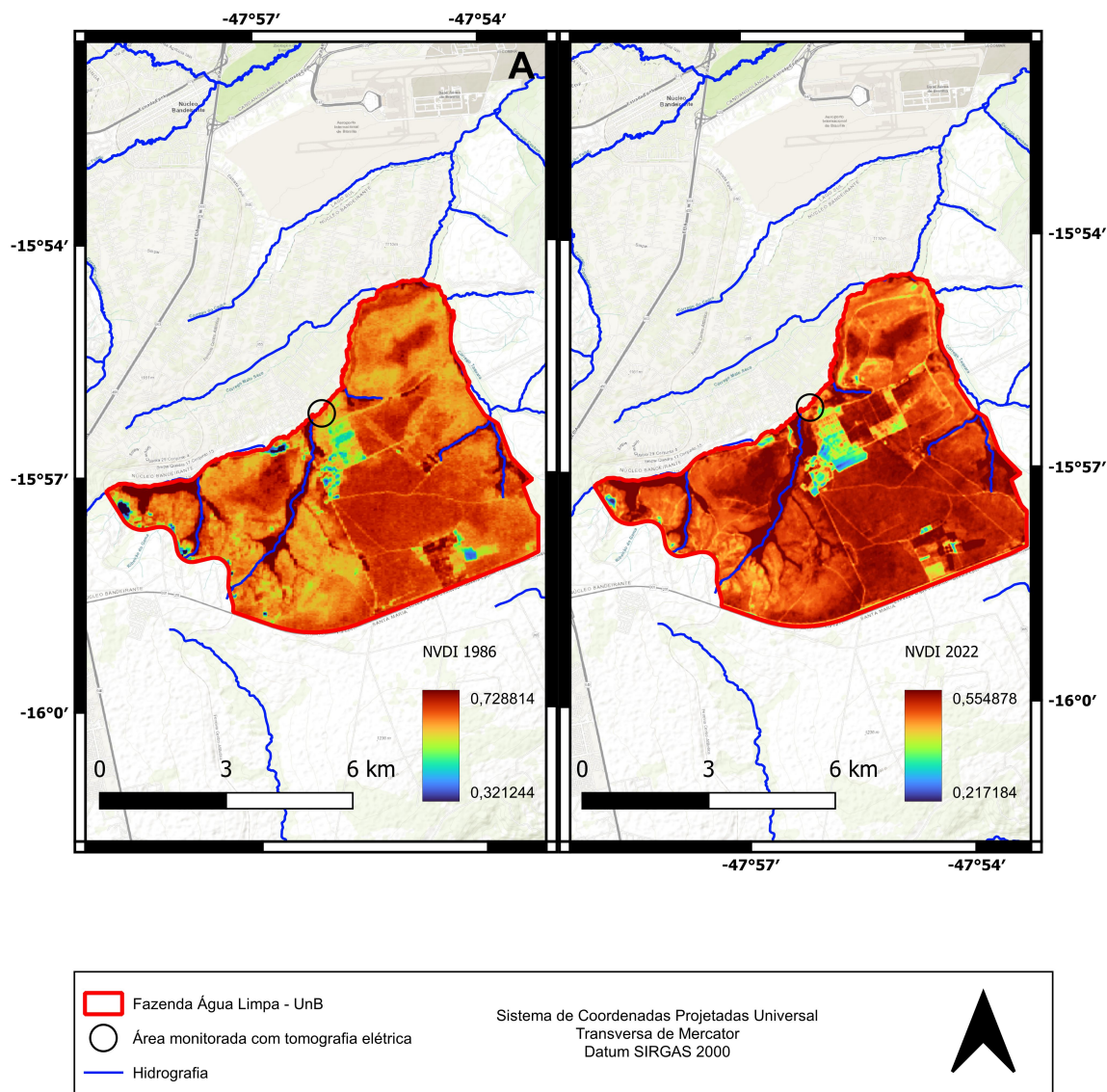


Figura 3.2. A e B - NVDI da FAL-UnB do ano de 1986 e 2022 respectivamente. Fonte: USGS adaptado.

densidade de raízes e conteúdo de água (Sheets; Hendrickx, 1995; Lowrie, 2007). Solos são meios porosos, compostos de partículas sólidas não condutivas e contendo uma solução eletrolítica que pode conduzir corrente elétrica pelo movimento de íons livres na solução e íons adsorvidos na superfície da matriz. A precipitação e as variações sazonais de temperatura e de conteúdo de água no solo causam mudanças significativas na resistividade elétrica do solo (Aaltonen, 1997; Benderitter; Schott, 1999).

3.2.2.1 Tomografia Elétrica com Lapso de Tempo

A sensibilidade da resistividade do solo às diferenças de densidade e litologia do solo apresenta uma dificuldade na detecção de umidade, pois muitos solos mostram grande variabilidade espacial. Uma comparação de medições de resistividade em momentos diferentes

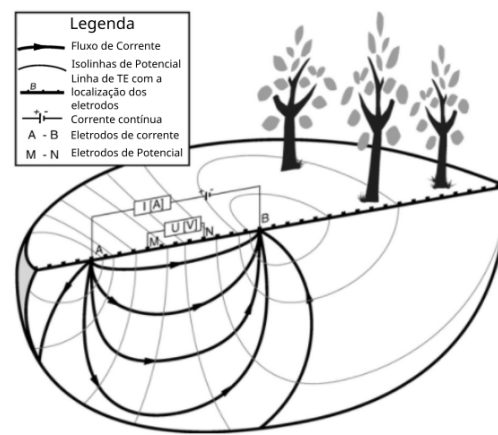


Figura 3.3. Diagrama esquemático de medição de resistividade em meio uniforme. Adaptado (Nijland *et al.*, 2010)

permite filtrar o sinal da TE pelas características estacionárias do solo, destacando assim as mudanças no teor de umidade do solo. Das variáveis que influenciam a resistividade de um mesmo solo, a umidade é a única que varia significativamente em uma escala temporal inferior a um ano e, conseqüentemente, as medições de TE em diferentes momentos do ano fornecem a base para o mapeamento do conteúdo de água no solo (Nijland *et al.*, 2010). Na escala de tempo investigada, a resistividade do solo também pode variar devido às mudanças de temperatura; o efeito é de cerca de 2% por 1 °C (Friedman, 2005).

3.2.3 Aquisição de Dados

A aquisição dos dados utilizou uma técnica dos métodos elétricos, a tomografia elétrica com um equipamento eletrorresistivímetro SuperSting R8 (AGI Inc.). Os perfis de monitoramento foram realizados com a trincheira centralizada no perfil, onde a Tabela 3.1 detalha todos os perfis realizados.

Tabela 3.1. Tabela de parâmetros utilizados nos perfis de monitoramento com tomografia elétrica.

Perfil	Mês/ano	Nº de eletrodos	Distância entre eletrodos (m)	Corrente elétrica (A)	Profundidade (m)	Arranjo
1	05/2023	28	1,0	2,0	3,96	Dipolo-Dipolo
2	06/2023	28	1,0	2,0	3,69	Dipolo-Dipolo
3	09/2023	28	5,0	2,0	32,8	Dipolo-Dipolo
4	06/2024	28	5,0	2,0	32,8	Dipolo-Dipolo
5	11/2024	28	5,0	2,0	31,3	Dipolo-Dipolo
6	04/2025	28	5,0	2,0	33,8	Dipolo-Dipolo

3.2.4 Método

O processamento dos dados de campo seguiu as seguintes etapas procedimentais:

- a) Transferência dos dados: a partir do equipamento por meio do software SSDim (AGI Instruments). As informações obtidas incluem a posição dos eletrodos,

a resistência de contato entre os eletrodos e o solo, a tensão, a corrente elétrica, a resistividade aparente e o arranjo eletródico.

- b) Filtragem inicial: avaliar a variação dos parâmetros de resistência de contato e desvio padrão e eliminar dados de resistividade elétrica associados a uma baixa razão sinal/ruído.
- c) Conversão de formato: converter os dados do formato .stg para .dat;
- d) Inversão regularizada com a técnica dos mínimos quadrados do tipo suavizada (L2 norm) com o software Res2Dinv v.4.08(by Geotomo).

Os principais parâmetros utilizados na inversão foram: i. Larguras das células: metade do espaçamento; ii. Sem realce para estruturas verticais ou horizontais (Figura 3.4);

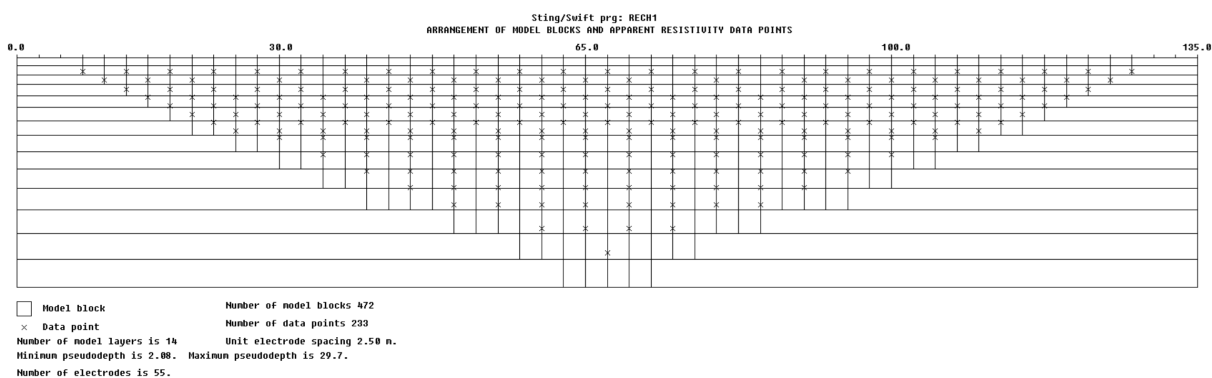


Figura 3.4. Modelo de blocos do Perfil 3 com espaçamento entre eletrodos de 5 m.

3.3 Resultados

A Figura 3.5 apresenta a variação de resistividade aparente em perfil 2D onde a aquisição ocorreu no mês de Maio de 2023 com o espaçamento entre eletrodos de 1,0 m. O perfil atingiu a profundidade de aproximadamente 4,0 m com variações de resistividade ao longo do perfil. No perfil em sua parte superior concentram-se os valores de maiores resistividade elétrica ($> 8.000 \text{ Ohm.m}$), com uma zona menos resistiva na posição de (+) 16,5 m com espessura média de 0,872 m. Deste patamar ocorre a transição para outra camada geoeletrica menos resistiva ($8000 - 4000 \text{ Ohm.m}$) com espessura média de 1,0 m. Abaixo identifica-se uma outra camada geoeletrica com os menores valores de resistividade ($4000 - 500 \text{ Ohm.m}$) se estendendo até a base do perfil.

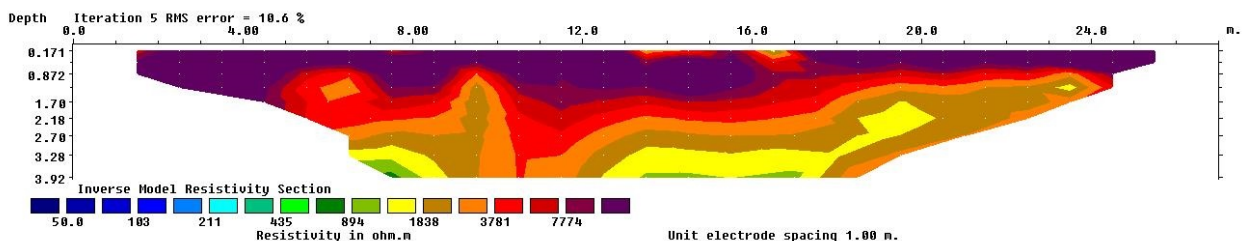


Figura 3.5. Seção de tomografia elétrica após inversão com espaçamento de 1 m entre os eletrodos. Perfil 1 realizado em Maio/2023.

A Figura 3.6 apresenta a variação de resistividade aparente em perfil 2D onde a aquisição ocorreu no mês de Junho de 2023 com o espaçamento entre eletrodos de 1,0 m.

O perfil atingiu a profundidade de aproximadamente 3,7 m com variações de resistividade ao longo do perfil. No perfil em sua parte superior concentram-se os valores de maiores resistividade elétrica ($> 8.000 \text{ Ohm.m}$), ao longo de todo o perfil com espessura média de 0,676 m. Na posição de (+) 8,0 e 14,0 m essa camada mais resistiva atingiu profundidades maiores chegando a profundidade de 3,13 m. Deste patamar ocorre a transição para outra camada geoeletrica menos resistiva ($8000 - 4000 \text{ Ohm.m}$) com espessura variável no perfil. Abaixo identifica-se uma outra camada geoeletrica com os menores valores de resistividade ($4000 - 500 \text{ Ohm.m}$) se estendendo até a base do perfil.

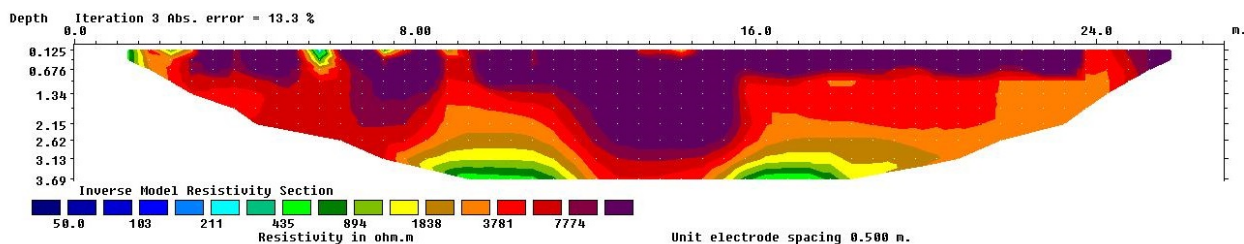


Figura 3.6. Seção de tomografia elétrica após inversão com espaçamento de 1 m entre os eletrodos. Perfil 2 realizado em Junho/2023.

A Figura 3.7 apresenta a variação de resistividade aparente em perfil 2D onde a aquisição ocorreu no mês de Setembro de 2023 com o espaçamento entre eletrodos de 5,0 m. O perfil atingiu a profundidade de aproximadamente 33,0 m com variações de resistividade ao longo do perfil. No perfil, em sua parte superior, concentram-se os valores de maiores resistividade elétrica ($2000 - 8.000 \text{ Ohm.m}$), ao longo do perfil com espessura média de 3,38 m. Na posição de (+) 0,0 até 55,0 m os valores de resistividade se mantêm em uma continuidade em resistividade (4000 Ohm.m). Na posição de (+) 55,0 e 60,0 m essa camada mais resistiva atingiu as maiores resistividades de forma isolada. Na posição de (+) 80,0 a 135,0 m os valores de resistividade se reduziram. Deste patamar, ocorre a transição para outra camada geoeletrica menos resistiva ($2000 - 1000 \text{ Ohm.m}$) com espessura média de 12,2 m. Abaixo, identifica-se uma outra camada geoeletrica com resistividade um pouco mais alta ($2000 - 4000 \text{ Ohm.m}$) se estendendo até a base do perfil.

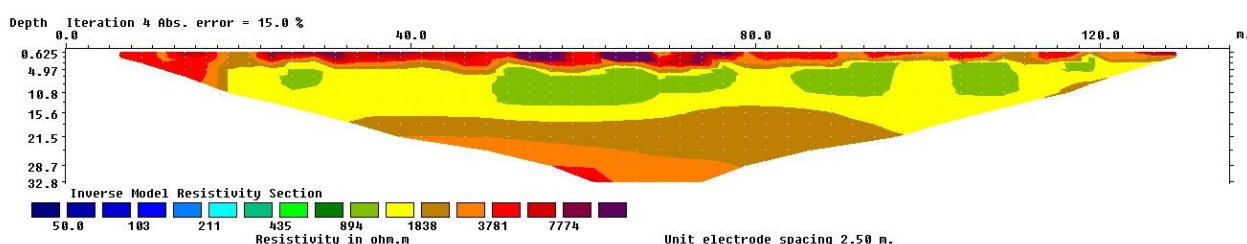


Figura 3.7. Seção de tomografia elétrica após inversão com espaçamento de 5 m entre os eletrodos. Perfil 3 realizado em Setembro/2023.

A Figura 3.8 apresenta a variação de resistividade aparente em perfil 2D onde a aquisição ocorreu no mês de Junho de 2024 com o espaçamento entre eletrodos de 5,0 m. O perfil atingiu a profundidade de aproximadamente 33,0 m com variações de resistividade ao longo do perfil. No perfil em sua parte superior concentram-se os valores de maiores resistividades elétricas ($2.000 - 8.000 \text{ Ohm.m}$), ao longo do perfil com espessura menor

que 5,00 m. Nesse patamar na posição de (+) 85,0 até 125,0 m os valores de resistividade se mantêm em uma continuidade em resistividade (2.000 - 4.000 Ohm.m) com uma zona de resistividade mais alta na posição de (+) 102,5 m (4.000 Ohm.m). Na posição de (+) 0,0 até 85,0 m essa camada atingiu as maiores resistividades do perfil (< 4.000 Ohm.m). Deste patamar ocorre a transição para outra camada geoeletrica menos resistiva (900 – 1800 Ohm.m) com espessura média de 10,0 m com uma faixa contínua na posição (+) 45,0 m até 117,5 com a resistividade mais baixa do perfil (900 Ohm.m) e até o fim do perfil uma uniformidade ligeiramente mais resistivo (1800 Ohm.m). Abaixo identifica-se uma outra camada geoeletrica com resistividade um pouco mais alta (2000 – 4000 Ohm.m) se estendendo até a base do perfil.

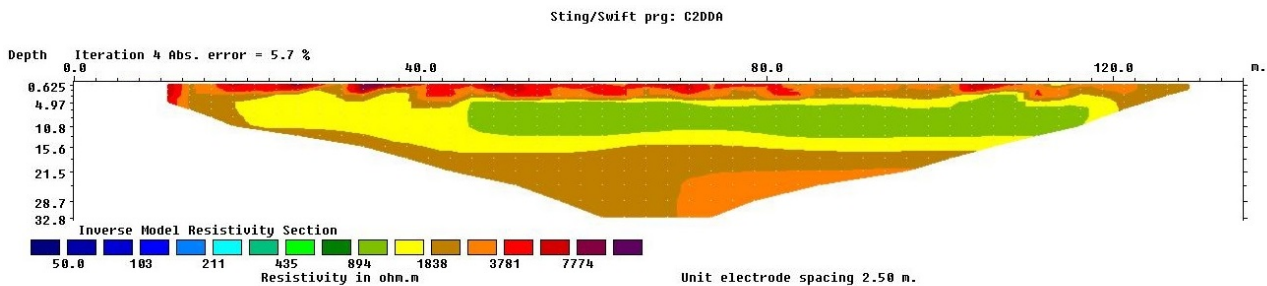


Figura 3.8. Seção de tomografia elétrica após inversão com espaçamento de 5 m entre os eletrodos. Perfil 4 realizado em Junho/2024.

A Figura 3.9 apresenta a variação de resistividade aparente em perfil 2D onde a aquisição ocorreu no mês de Novembro de 2024 com o espaçamento entre eletrodos de 5,0 m. O perfil atingiu a profundidade de aproximadamente 31,0 m com variações de resistividade ao longo do perfil. No perfil, em sua parte superior, concentram-se os valores de maiores resistividades elétricas (2.000 - 8.000 Ohm.m) distribuídos em aglomerados de alta resistividade ao longo do perfil com espessura menor que 6,76 m. Nesse patamar na posição de (+) 10,0 m, 40,0 m, 65,0 m, 80,0 m, 100,0 m e 120,0 m os valores de resistividade estão no patamar mais alto de resistividade do perfil (< 4.000 Ohm.m) com zonas de mesma resistividade, se intercalando com resistividades ligeiramente mais baixas (< 2000 Ohm.m). Deste patamar ocorre a transição para outra camada geoeletrica menos resistiva (900 – 1800 Ohm.m) com espessura média de 10,0 m com uma sequência de zonas com baixa resistividade até o fim do perfil. Na posição de (+) 45,0 m a 90,0 m tem-se uma grande zona com esse patamar de resistividade baixa. Abaixo identifica-se uma outra camada geoeletrica com resistividade um pouco mais alta (2000 – 4000 Ohm.m) se estendendo até a base do perfil.

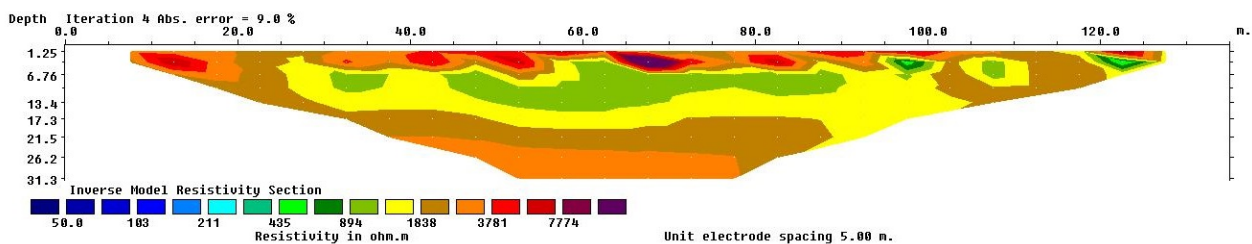


Figura 3.9. Seção de tomografia elétrica após inversão com espaçamento de 5 m entre os eletrodos. Perfil 5 realizado em Novembro/2024.

A Figura 3.10 apresenta a variação de resistividade aparente em perfil 2D onde a

aquisição ocorreu no mês de Abril de 2024 com o espaçamento entre eletrodos de 5,0 m. O perfil atingiu a profundidade de aproximadamente 33,8 m com variações de resistividade ao longo do perfil. No perfil, em sua parte superior, concentram-se os valores de maiores resistividades elétricas (2.000 - 7.000 Ohm.m) distribuídos em aglomerados de alta resistividade ao longo do perfil com espessura menor que 6,76 m. Nesse patamar na posição de (+) 0,0 m, 40,0 a 65,0 m, 80,0 m e 120,0 m os valores de resistividade estão no patamar mais alto de resistividade do perfil (> 3.800 Ohm.m) com zonas de mesma resistividade, se intercalando com resistividades ligeiramente mais baixas (< 2000 Ohm.m). Deste patamar ocorre a transição para outra camada geoeletrica menos resistiva (900 – 1800 Ohm.m) com espessura média de 10,0 m com uma sequência de zonas com baixa resistividade até o fim do perfil. Na posição de (+) 30,0 m tem-se uma pequena zona e de (+) 45,0 a 110,0 m tem-se uma grande zona com esse patamar de resistividade baixa. Abaixo identifica-se uma outra camada geoeletrica com resistividade um pouco mais alta (2000 – 4000 Ohm.m) se estendendo até a base do perfil.

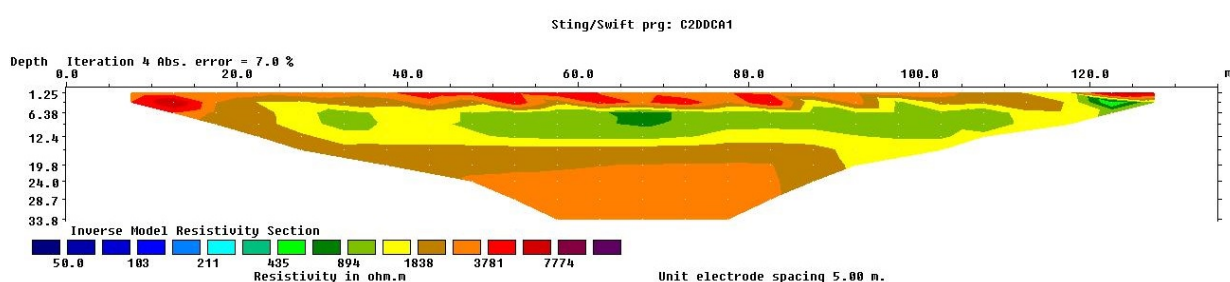


Figura 3.10. Seção de tomografia elétrica após inversão com espaçamento de 5 m entre os eletrodos. Perfil 6 realizado em Abril/2025.

3.4 Discussões

O monitoramento de solos utilizando tomografia elétrica apresenta certas limitações, pois a resposta da resistividade elétrica está fortemente associada às propriedades físicas e químicas da matéria. Assim, a análise de amostras de solo em laboratório foi uma ferramenta valiosa para complementar a determinação e quantificação dessas variáveis no sistema investigado.

Os resultados obtidos a partir dos perfis de resistividade aparente foram coletados em campanhas realizadas durante os meses de seca e chuva. Observou-se um efeito sazonal claro nos perfis de resistividade aparente, com o perfil de Junho/2024 e Abril/2025 mostrando uma redução significativa nas resistividades nas camadas mais superficiais em comparação com os meses de seca. Esse comportamento reflete o aumento da umidade do solo, resultante das precipitações.

Nos perfis de Maio e Junho/2023, os perfis são de espaçamento entre eletrodos de 1,0 m e foram realizados para verificar com mais precisão a variação de resistividade nas proximidades da trincheira, região com solo exposto verticalmente. Onde o perfil 1, realizado em Maio, marca o início do período, enquanto o perfil 2, em Junho, representa uma seca prolongada, o que resulta em resistividades mais elevadas, indicativas de um solo mais seco e com menor condutividade elétrica.

Os perfis 3, 4, 5 e 6 realizados com espaçamento de 5 metros entre os eletrodos, foi possível verificar a variação de resistividade em uma escala maior. Nessa abordagem, fatores ambientais adicionais influenciaram os resultados. Na parte inicial do perfil, onde

há menor presença de vegetação, as resistividades foram consistentemente altas. No centro do perfil, coincidindo com a abertura de uma trincheira de 0,9 metros de profundidade, as resistividades aumentaram devido à maior exposição do solo. Já na parte final do perfil, que contém maior densidade de vegetação rasteira e pequenas árvores, observou-se uma redução nas resistividades, indicando maior umidade, possivelmente devido à cobertura vegetal.

No perfil 5 realizado em Novembro/2024 observa-se que o perfil exhibe zonas de baixa resistividade nas camadas superficiais, sugerindo uma maior retenção de umidade. Esse comportamento não foi observado no perfil 4 onde, no mesmo patamar, o solo apresenta o menor patamar de resistividade com maior capacidade de retenção de umidade.

Estudos anteriores confirmam a eficácia do uso da tomografia elétrica (ERT) para monitorar a variação de umidade do solo em diferentes coberturas vegetais e condições ambientais. A técnica foi aplicada com sucesso em diferentes contextos, como florestas de dunas, plantações e áreas com vegetação variada, demonstrando sua capacidade de detectar a dinâmica de umidade na zona radicular, especialmente em solos arenosos e argilosos. Esses estudos mostraram como a distribuição da umidade pode ser influenciada por processos de infiltração de água, captação radicular e mudanças sazonais, corroborando a aplicabilidade da tomografia elétrica para investigações hidrológicas em várias escalas e ambientes (Cassiani *et al.*, 2016; Fan, 2015; Jayawickreme; Dam; Hyndman, 2010; Travelletti *et al.*, 2011).

Esta pesquisa destaca uma variação natural na umidade de forma acentuada associada à dinâmica do carbono no solo.

Os resultados de caracterização física dos organossolos na área foram obtidos por Rodolfo Júnior (2015), onde as análises de carbono orgânico foram realizadas de acordo com o método de Walkley-Black (1934), e a matéria orgânica estimada com base no C orgânico total, reportou valores de matéria orgânica do solo (MOS) nos horizontes H e 2H de 141,30 e 216,60 ($g.kg^{-1}$) ou 14,13 e 21,66 %, respectivamente, e valores de carbono orgânico total (COT) de 81,96 e 125,63 ($g.kg^{-1}$) ou 8,196 e 12,563 % nos mesmos horizontes (Junior *et al.*, 2015). Vale ressaltar que a metodologia Walkley-Black tende a subestimar os teores de C em relação ao método de referência, CHNS/O, tanto no que se refere às camadas superficiais quanto às mais profundas, com menores teores de C (Gatto *et al.*, 2009), fato comprovado ao comparar com as amostras obtidas nesse trabalho.

3.5 Conclusões

Os resultados deste estudo indicam que a tomografia elétrica é uma ferramenta eficaz para monitorar a variação sazonal da umidade em solos orgânicos de áreas degradadas do bioma Cerrado.

Os dados coletados ao longo das campanhas de campo mostram que a degradação do Cerrado afeta significativamente a capacidade de retenção de água no solo. As regiões centrais dos perfis, onde a trincheira se localiza, com espaçamento de 5,0 m apresentam resistividades mais elevadas, sugerindo uma maior perda de umidade em comparação com as regiões adjacentes. Este fenômeno destaca a importância da preservação do Cerrado para a manutenção da dinâmica hídrica, especialmente nas zonas vadosa e radicular.

Além disso, a preservação do Cerrado é crucial para a dinâmica do carbono no solo. Ao contrário de um ciclo recuperável, a perda de carbono em solos com altos teores de matéria orgânica (MOS) e carbono orgânico total (COT) pode ser irreversível. A degradação dessas áreas não só compromete a capacidade de retenção de água, mas também acelera a perda de carbono, impactando negativamente o equilíbrio de carbono no solo, o que reforça

a urgência de medidas de conservação para evitar danos permanentes ao ecossistema.

Assim, o uso contínuo da tomografia elétrica, aliado a estudos complementares, pode oferecer uma visão mais aprofundada dos impactos da degradação ambiental sobre o armazenamento de água e a dinâmica do carbono em ecossistemas como o Cerrado.

4 Conclusões e Considerações Finais

Este trabalho teve como propósito explorar a aplicabilidade da Tomografia Elétrica (ERT) no monitoramento sazonal de umidade em Organossolos degradados do Cerrado. Como resultado das atividades humanas, a taxa atual de erosão é maior em uma magnitude do que a taxa de erosão natural. Logo, a nossa espécie está mudando rapidamente a química do regolito e da hidrosfera (Brantley; Goldhaber; Ragnarsdottir, 2007). A interface de influência humana, chamada zona crítica, necessita cada dia mais de métodos de investigação não invasivos. As imagens de NVDI realizadas na FAL demonstram como áreas degradadas têm o seu ciclo natural de crescimento vegetativo comprometido ao longo de décadas, impactando em ciclos importantes como da água e carbono.

A resposta dos Organossolos à técnica foi coerente detectando a variação da umidade no solo em uma escala métrica com baixo custo relativo a aquisição de dados. Isso demonstra que a ERT pode capturar padrões sazonais e servir como apoio ao manejo ambiental e à avaliação de impactos.

A metodologia aplicada contou com a aplicação de conceitos teóricos e metodologia assertiva já aplicada em frentes de pesquisas similares (Brunet; Clément; Bouvier, 2010; Nijland *et al.*, 2010) mas com a necessidade da adequação em campo. Para manter a resistência de contato abaixo de $10k \cdot Ohm$, em média, proveniente do contato solo-eletrodo foi necessário furos de 15 cm de diâmetro $\times$ 20 cm de profundidade para que a água penetre no solo verticalmente com mais facilidade. Em cada furo foi adicionado doses de sal de cozinha em cada uma das campanhas. A área possui acesso fácil para uma caminhonete, o que facilitou o transporte de equipamentos e também um teste logístico de quantidade de água. Na caminhonete conectada a um reboque com um reservatório de 1000 L foi possível realizar 2 perfis de 140 m com suprimento abundante de água, logística que pode ser replicada em áreas com acesso mais restrito utilizando bombas de água 12 V e mangueiras.

Aos resultados obtidos houve diferenças significativas entre épocas secas e úmidas detectadas nas seções de tomografia elétrica. Em ambas as épocas, foi detectado zonas de baixa resistividade em um mesmo patamar de profundidade (de 5 a 10 m). Períodos onde a seca predominou, o estudo detectou que esse patamar de baixa resistividade se agrupa em zonas pequenas. Períodos onde a precipitação foi mais abundante esse patamar de baixa resistividade se estendia por todo o perfil em uma zona única.

Para estudos futuros, esse trabalho trouxe dados em uma escala temporal que abrange a mudança do período de seca para o período úmido desde 2023 a 2025. No estudo foi aplicando um espaçamento coerente, em que foi possível detectar verticalmente a variação do fenômeno. Dados quantitativos de análise de solo confirmam o tipo do solo típico de veredas e por meio das imagens de NVDI o efeito resultante da intervenção humana pode ser entendido espacialmente nesse período.

O trabalho tem potencial para ser integrado em diversas áreas do conhecimento como: Monitoramento ambiental, recuperação de áreas degradadas, planejamento agrícola, etc. O método não invasivo tem maior credibilidade quando está atrelado a informações reais, logo a realização de perfuração de furos em profundidade no solo é uma medida que pode agregar informações que não foram detectadas com essa metodologia. Os perfis foram realizados em apenas um sentido na área, se o experimento for realizado na mesma área com perfis perpendiculares as zonas de baixa resistividade serão melhor delimitadas.

Referências

- AALTONEN, J. Seasonal changes of dc resistivity measurements. *In: ENVIRONMENTAL AND ENGINEERING GEOPHYSICAL SOCIETY. **Proceedings of the 3rd EEGS-ES Conference***. Aarhus, Denmark, 1997. Citado na p. 27.
- BANWART, S. A.; NIKOLAIDIS, N. P.; ZHU, Y.; PEACOCK, C. L.; SPARKS, D. L. Soil functions: Connecting earth's critical zone. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 47, p. 333–359, 2019. DOI [10.1146/annurev-earth-063016-020544](https://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020544). Citado na p. 12.
- BENDERITTER, Y.; SCHOTT, J. J. Short time variation of the resistivity in an unsaturated soil: The relationship with rainfall. **European Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v. 4, p. 37–49, 1999. Citado na p. 27.
- BINLEY, A.; HUBBARD, S. S.; HUISMAN, J. A.; REVIL, A.; ROBINSON, D. A.; SINGHA, K.; SLATER, L. D. The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. **Water Resources Research**, v. 51, n. 6, p. 3837–3866, 2015. Citado nas pp. 12 e 24.
- BORGES, W. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: Estudo sobre sítio controlado do IAG/USP**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Citado nas pp. 9, 15, 18, 20 e 21.
- BRAGA, A. C. d. O. **Métodos da Eletrorresistividade e Polarização Induzida Aplicados nos Estudos da Captação e Contaminação de Águas Subterrâneas: Uma Abordagem Metodológica e Prática**. Tese (Tese de Livre-Docência) — Universidade Estadual Paulista – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2006. Tese apresentada ao concurso público para obtenção do título de Livre-Docente na disciplina “Métodos Geoeletricos Aplicados à Hidrogeologia” do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente. Citado nas pp. 9, 17, 19, 20 e 21.
- BRAGA, A. N. **Modelagem e Sensibilidade de Arranjos Elétricos em Tomografia de Resistividade Elétrica**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Citado nas pp. 9 e 17.
- BRANTLEY, S. L.; GOLDBERGER, M. B.; RAGNARSDOTTIR, K. V. Crossing disciplines and scales to understand the critical zone. **Elements**, v. 3, n. 5, p. 307–314, 2007. DOI [10.2113/gselements.3.5.307](https://doi.org/10.2113/gselements.3.5.307). Citado nas pp. 12 e 35.
- BRUNET, P.; CLÉMENT, R.; BOUVIER, C. Monitoring soil water content and deficit using electrical resistivity tomography (ert) – a case study in the cevennes area, france. **Jour-**

- nal of Hydrology**, v. 380, n. 1–2, p. 146–153, 2010. DOI [10.1016/j.jhydrol.2009.10.032](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.032). Citado na p. 35.
- CAMPOS, J. E. G. Hidrogeologia do distrito federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 1, p. 41–48, 2004. DOI [10.25249/0375-7536.20043414148](https://doi.org/10.25249/0375-7536.20043414148). Citado na p. 24.
- CASSIANI, G.; BOAGA, J.; VANELLA, D.; PERRI, M. T.; CONSOLI, S.; BARBAGALLO, S. Soil-plant interaction monitoring: Small scale example of an orange orchard in semi-arid environment via 3-d electrical resistivity tomography. **Science of the Total Environment**, v. 543, p. 851–861, 2016. DOI [10.1016/j.scitotenv.2015.05.033](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.033). Citado na p. 33.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 11–43, 2003. Citado na p. 24.
- DAHLIN, T. The development of dc resistivity imaging techniques. **Computers & Geosciences**, v. 27, n. 9, p. 1019–1029, 2001. Citado na p. 17.
- EVERETT, M. E. **Applied Geophysics: An Introductory Guide**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Citado nas pp. 9, 14 e 17.
- FAN, J. Quantifying spatiotemporal dynamics of root-zone soil water in a mixed forest on subtropical coastal sand dune using surface ert and spatial tdr. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 475–486, 2015. DOI [10.1016/j.jhydrol.2015.01.079](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.079). Citado nas pp. 12 e 33.
- FERRANTE, E. T.; RANCAN, L.; NETTO, P. B. Meio - físico clima. In: FONSECA, F. O. (Ed.). **Olhares sobre o Lago Paranoá**. Brasília: Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Distrito Federal, 2001. v. 1. Citado na p. 24.
- FREITAS-SILVA, F. H.; CAMPOS, J. E. G. Geologia do distrito federal. In: **Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal**. Brasília: MMA-SRH, 1998. Parte I, p. 86. Citado na p. 24.
- FRIEDMAN, S. P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 45–70, 2005. Citado na p. 28.
- GALLAS, J. D. F. **Principais Métodos Geoeletricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental**. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, SP, 2000. Pós-Graduação em Geociências, Área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente, IGCE, 174 p. Citado na p. 21.
- GATTO, A.; BARROS, N. F. d.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R. d.; MENDONÇA, E. d. S.; VILLANI, E. M. d. A. Comparação de métodos de determinação do carbono orgânico em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 739–749, 2009. DOI [10.1590/S0100-06832009000300026](https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000300026). Citado nas pp. 25 e 33.

- Jardim Botânico de Brasília. **Flora do Cerrado – Educação Ambiental**. 2024. Acesso em: 2 jun. 2025. Disponível em: <https://jardimbotanico.df.gov.br/educacao-ambiental/flora-cerrado>. Citado na p. 25.
- JAYAWICKREME, D. H.; DAM, R. L. V.; HYNDMAN, D. W. Hydrological consequences of land-cover change: Quantifying the influence of plants on soil moisture with time-lapse electrical resistivity. **Geophysics**, v. 75, n. 4, p. WA43–WA50, 2010. DOI 10.1190/1.3464760. Citado na p. 33.
- JUNIOR, F. R.; ARAÚJO, L. G.; SOUZA, R. Q. de; BATISTA, F. P. da S.; OLIVEIRA, D. N. S. de; LACERDA, M. P. C. Relações solo-paisagem em topossequências na fazenda água limpa, distrito federal. **Nativa: Pesquisas Agrárias e Ambientais**, Universidade Federal de Mato Grosso, v. 3, n. 1, p. 27–35, 2015. ISSN 2318-7670. Recebido em setembro/2014; Aceito em fevereiro/2015. DOI 10.14583/2318-7670.v03n01a05. Disponível em: <http://www.ufmt.br/nativa>. Citado nas pp. 12, 25 e 33.
- LOKE, M. H. **Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys**. June 2012 revision. [S.l.], 2012. Acesso em: 18 jul. 2025. Disponível em: <https://www.geotomosoft.com/downloads.php>. Citado na p. 16.
- LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. Citado na p. 27.
- MARTINS, E. S.; BAPTISTA, G. M. M. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfo-dinâmicos do distrito federal. In: **Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal**. Brasília: SEMATEC-IEMA-MMA-SRH, 1998. Parte II, p. 53. Citado na p. 24.
- MCNEILL, J. D. **Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers**. Ontario, Canada, 1980. Citado na p. 16.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. d. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: Organizadores, 2012. Citado na p. 25.
- MICHOT, D.; BENDERITTER, Y.; DORIGNY, A.; NICOUILLAUD, B.; KING, D.; TABBAGH, A. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. **Water Resources Research**, v. 39, n. 5, p. 1138, 2003. Citado na p. 24.
- MILLER, C. R.; ROUTH, P. S.; BROSTEN, T. R.; MCNAMARA, J. P. Application of time-lapse ert imaging to watershed characterization. **Geophysics**, v. 73, n. 3, p. G7–G17, 2008. Citado nas pp. 12 e 24.
- NIJLAND, W.; MEIJDE, M. van der; ADDINK, E. A.; JONG, S. M. de. Detection of soil moisture and vegetation water abstraction in a mediterranean natural area using electrical resistivity tomography. **Journal of Hydrology**, Utrecht, The Netherlands, v. 9, p. 80115, 2010. Citado nas pp. 9, 26, 28 e 35.

- PEREIRA, M. G.; VALLADARES, G. S.; ANJOS, L. H. C.; BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S.; SCHAEFER, C. E. G. R. Carbono orgânico em horizontes superficiais de solos com diferentes usos e manejos no estado do rio de janeiro. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 2, p. 187–193, 2006. DOI [10.1590/S0103-90162006000200012](https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000200012). Citado na p. 25.
- REYNOLDS, J. M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. Chichester: John Wiley & Sons, 1997. Citado nas pp. 9, 15, 16 e 18.
- ROBINSON, D. A.; BINLEY, A.; CROOK, N.; DAY-LEWIS, F. D.; FERRE, T. P. A.; GRAUCH, V. J. S.; KNIGHT, R.; KNOLL, M.; LAKSHMI, V.; MILLER, R.; NYQUIST, J.; PELLERIN, L.; SINGHA, K.; SLATER, L. Advancing process-based watershed hydrological research using near-surface geophysics: a vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 3293–3309, 2010. Citado nas pp. 12, 24 e 26.
- SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil and Tillage Research**, Elsevier, v. 83, n. 2, p. 173–193, 2005. DOI [10.1016/j.still.2004.10.004](https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004). Citado nas pp. 9, 19 e 20.
- SANTOS, H. G. d. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Citado na p. 24.
- SHEETS, K. R.; HENDRICKX, J. M. H. Non-invasive soil water content measurement using electromagnetic induction. **Water Resources Research**, v. 31, p. 2401–2409, 1995. Citado na p. 27.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. Citado na p. 18.
- TRAVELLETTI, J.; SAILHAC, P.; MALET, J.-P.; GRANDJEAN, G.; PONTON, J. Hydrological response of weathered clay-shale slopes: water infiltration monitoring with time-lapse electrical resistivity tomography. **Hydrological Processes**, 2011. DOI [10.1002/hyp.7983](https://doi.org/10.1002/hyp.7983). Citado na p. 33.



UnB