



Aplicação de sensores proximais no monitoramento e diagnóstico físico do solo



Prof. Bruno Montoani Silva

Eng. Agrônomo, Doutor em Ciência do Solo
Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq
Universidade Federal de Lavras



Pós-Graduação
**Ciência
do Solo**

Funções do solo

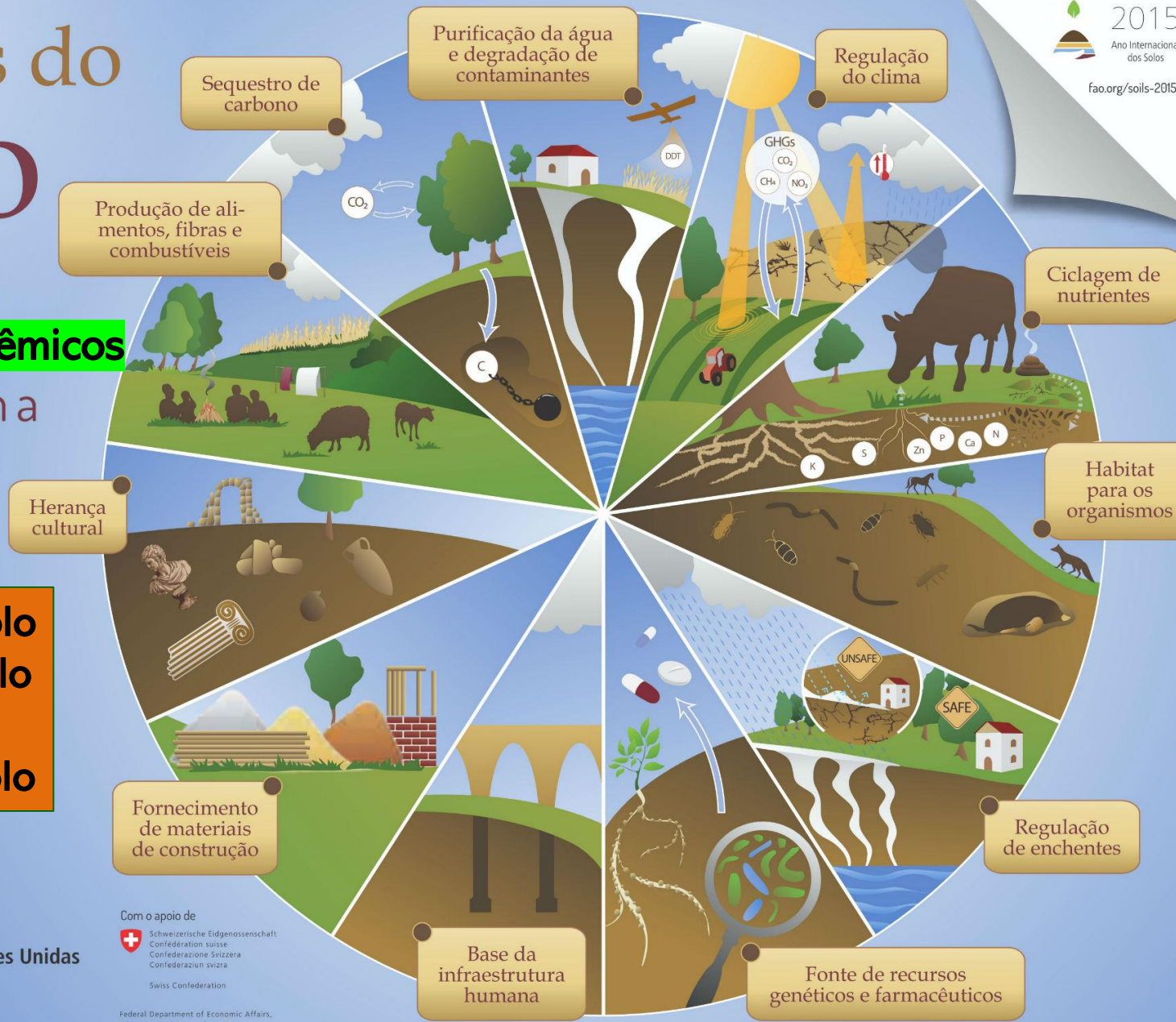
Solos fornecem

Serviços ecossistêmicos

que possibilitam a vida na Terra

Fertilidade do solo
Qualidade do solo
Saúde do solo
Segurança do Solo

2015
Ano Internacional
dos Solos
fao.org/soils-2015



Organização das Nações Unidas
para a Alimentação
e a Agricultura

Com o apoio de
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra
Swiss Confederation

Federal Department of Economic Affairs,
Education and Research EAER
Federal Office for Agriculture FOAG

Relações entre serviços ecossistêmicos prestados pelo solo e suas ameaças

Ameaças ao solo

Erosão
Redução da MO
Contaminação
Selamento
Compactação
Perda da biodiversidade
Salinização
Deslizamento e inundação



Funções do solo

Habitat para raízes e organismos
Ciclagem de elementos
Decomposição
Manut. da estrutura do solo
Regulação da pop. biológica
Ciclo da água (inf., retenção, percolação)
Ciclagem da MO (sequestro de C, form. Húmus)

Serviços ecossistêmicos que o solo interfere

Produção de biomassa
Conservação da biodiversidade
Controle da erosão
Controle de pragas e doenças
Fornecimento e qualidade da água
Regulação climática

Qual a relação entre a Física do Solo e a Produtividade das Culturas?

(Produção de biomassa)

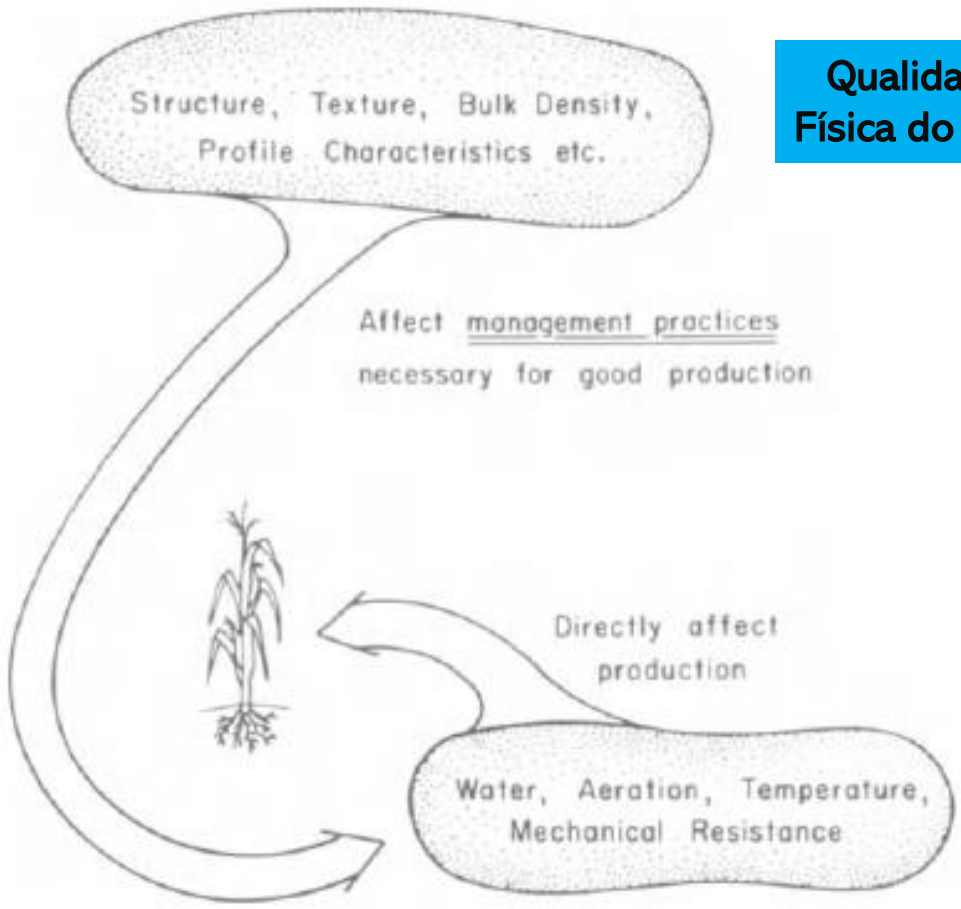


Relationship between soil physical properties and crop production

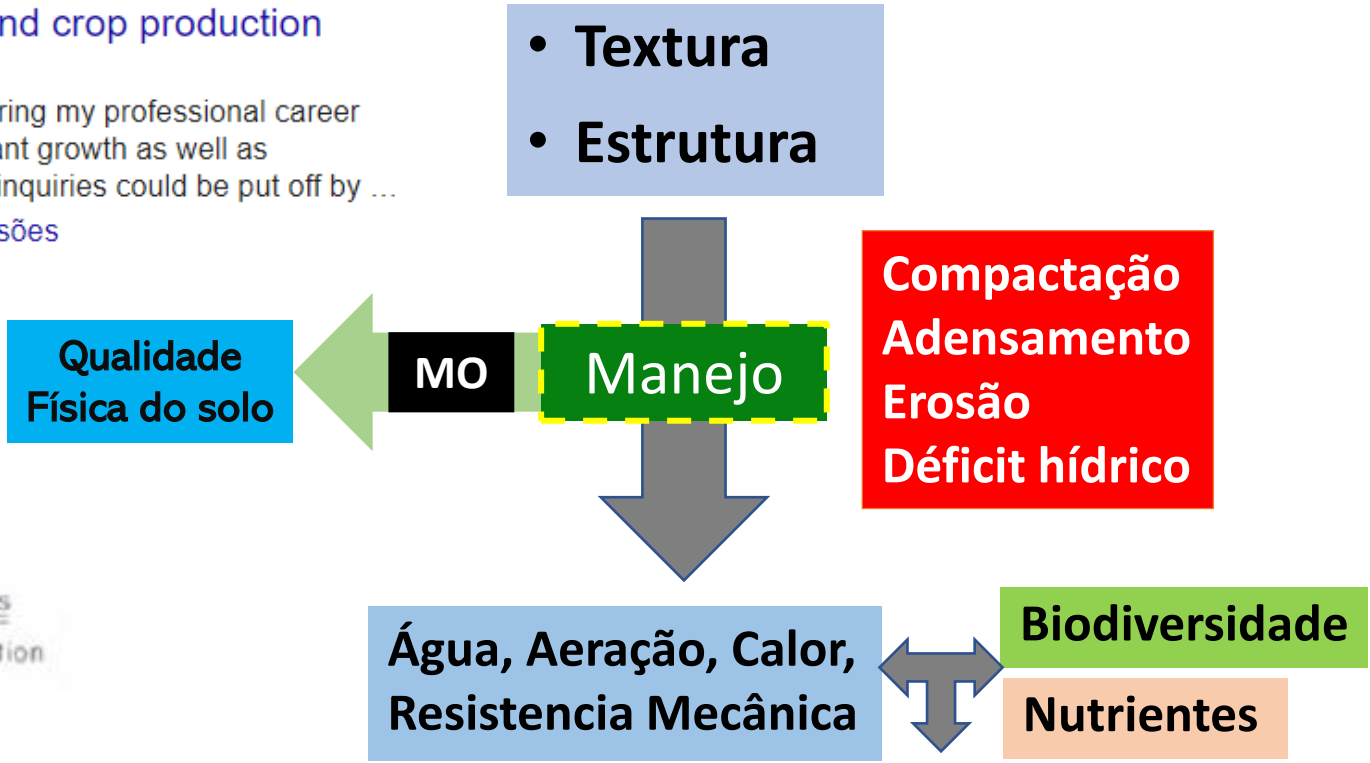
J Letey - Advances in soil science, 1958 - Springer

Having been labeled a soil physicist, I have received inquiries during my professional career concerning relationships between soil physical properties and plant growth as well as question on what constitutes good soil physical properties. Most inquiries could be put off by ...

☆ 📄 Citado por 929 Artigos relacionados Todas as 7 versões



Letey, 1985 – Advances in soil science



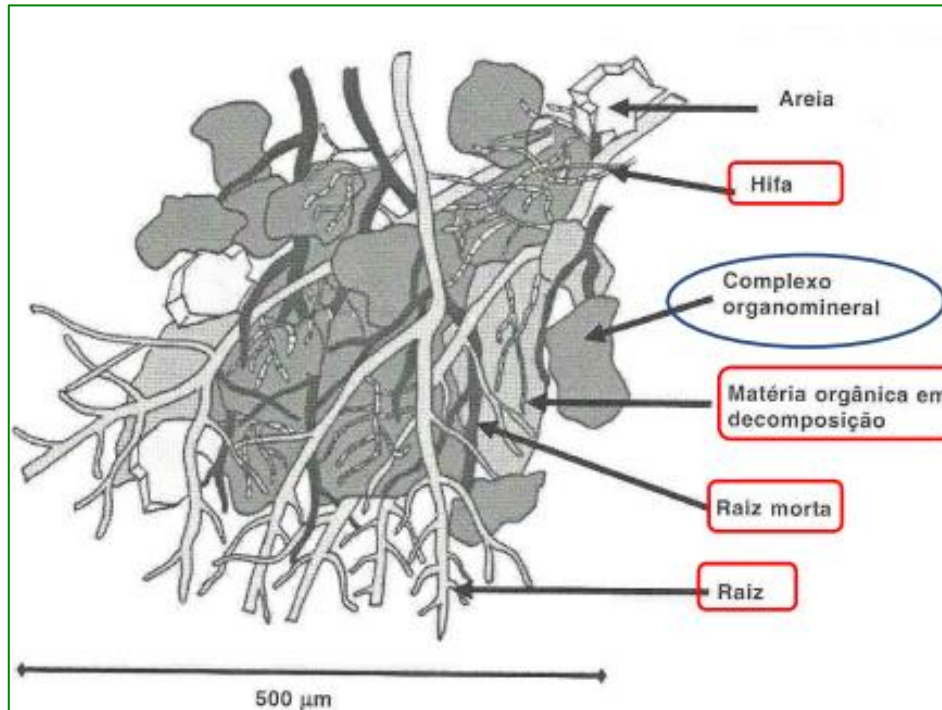
Produtividade



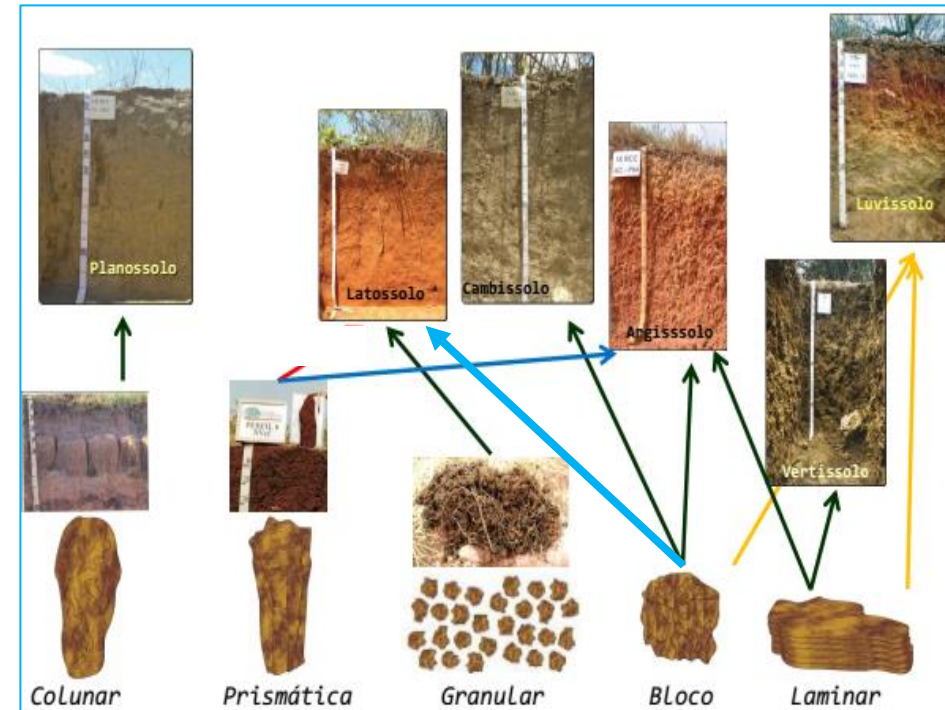
Silva, 2019

Qualidade física do solo: Conceitos iniciais

Agregação do solo: união das partículas primárias (areia, silte, argila - Textura - e matéria orgânica) para formar **agregados**



Estrutura do solo: arranjo das partículas (areia, silte, argila - Textura - e matéria orgânica) e do **espaço poroso** entre elas



De forma simples, um solo com boa qualidade física:

- Agregados grandes (próximos a 5 cm de \varnothing) e estáveis
- Poros distribuídos em diferentes tamanhos (macro, meso e microporos)

Quais as funções associadas a Física do Solo?

Como a avaliar a qualidade física do solo (estado da estrutura)?

> Indicadores de qualidade física do solo

- Refletir o estado das funções associadas a física do solo:

A) Armazenamento, fluxo e disponibilidade de água:

Prover a infiltração de água da chuva, retenção e adequado fornecimento de água para as plantas e demais organismos, bem como recarga do lençol freático

B) Aeração:

Permitir adequada trocas de gases entre solo e atmosfera, garantindo adequada difusão e suprimento de oxigênio aos processos biológicos

C) Resistência mecânica não impeditiva:

Proporcionar condições físicas adequadas para sustentação e crescimento de raízes, bem como habitat favorável para demais organismos vivos

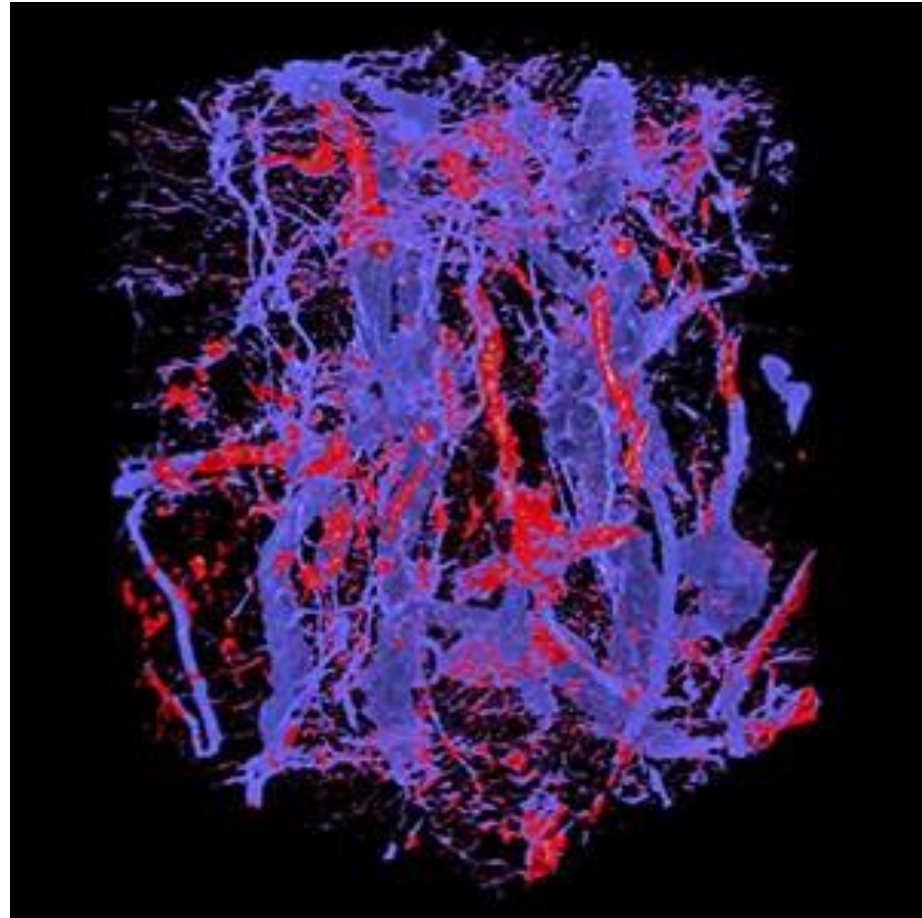
D) Resistência e resiliência à degradação:

Resistir a, e recuperar-se de, forças ou agentes internos ou externos que induzam degradação; resistência ao manejo e a erosão

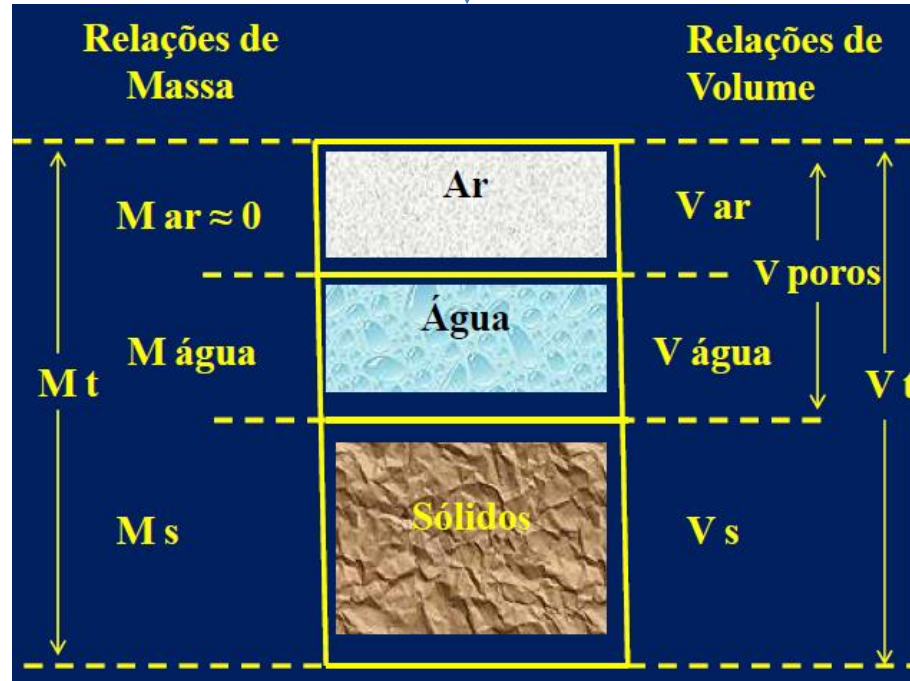
E) Regulação térmica:

Armazenar e deixar fluir calor

Como a avaliar a **qualidade física do solo** (estado da estrutura)?



→ Representação da porosidade do solo



$V_t = \text{Vol. cilindro}$

> Indicadores de qualidade física do solo

- Densidade do solo
- Distribuição dos poros por tamanho
- Curva de retenção de água no solo
- Porosidade de aeração
- Resistência a penetração
- Capacidade de água disponível
- Capacidade de aeração
- Infiltração de água no solo
- Condutividade hidráulica
- Estabilidade de agregados
- Pressão de pré-consolidação
- Intervalo hídrico ótimo

Imagem 3D criada com tomografia de raios-X de macroporos cheios de água e ar em uma amostra de solo saturada de água.

O vermelho indica o ar e o azul a água

Como a avaliar a **qualidade física do solo** (estado da estrutura)? E **umidade volumétrica**?

Há alternativa à amostragem de cilindros?

Sensores proximais

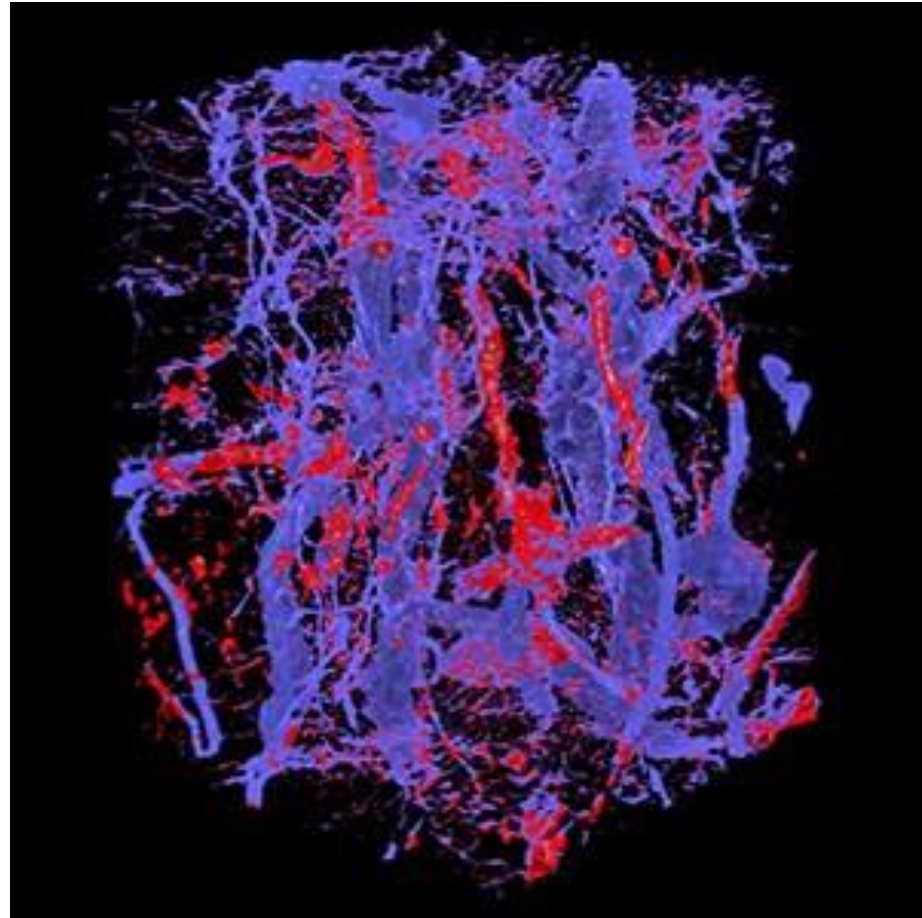


Imagem 3D criada com tomografia de raios-X de macroporos cheios de água e ar em uma amostra de solo saturada de água. O vermelho indica o ar e o azul a água



Determinação da umidade volumétrica do solo

- **Método direto** e padrão: método da estufa ou termogravimétrico
- **Métodos indiretos**: vários, dentre os quais destacam sensores TDR e FDR
- **Métodos baseados nas propriedades eletromagnéticas do solo** -> Emissão de sinal elétrico e a medição da resposta a este sinal (geralmente o tempo de reflexão ou a frequência), que ocorre em razão de mudanças na constante dielétrica (ϵ_a) do solo (Evet et al., 2006)

Time Domain Reflectometry (TDR)



Frequency Domain Reflectometry (FDR)



Vantagens:

- Método instantâneo
- Não destrutivo
- Precisão aceitável
- Não emissão de radiação ionizante
- Possibilidade de várias medições simultâneas e do armazenamento contínuo de dados (monitoramento)

Desvantagens:

- Custo alto
- Necessita de calibração!

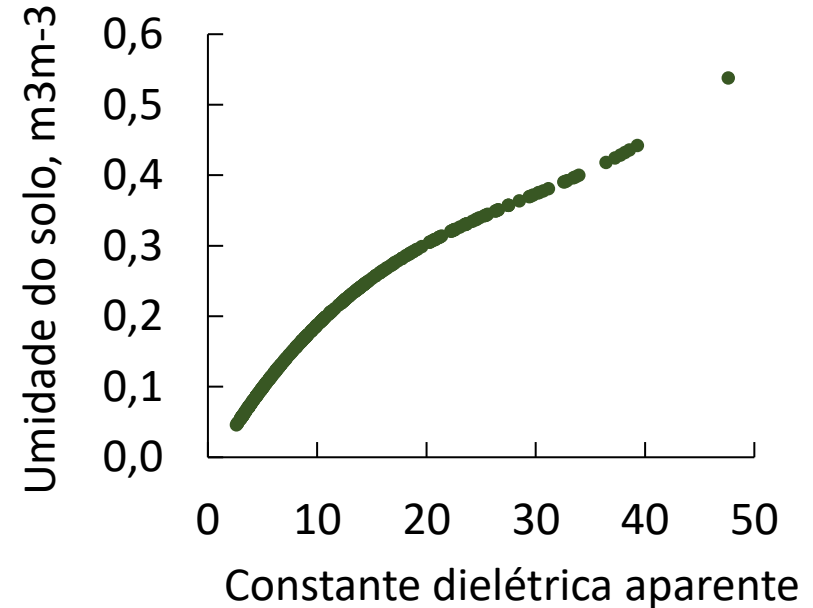
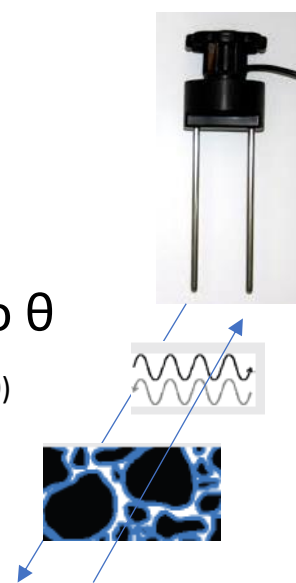
Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in ...
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.../WVR016i003p00574> Traduzir esta página
 de GC Topp - 1980 - Citado por 5055 - Artigos relacionados
 The effect of varying the texture, bulk density, temperature, and soluble salt content on this relationship was also determined. Time-domain reflectometry (TDR) was used to measure the dielectric constant of a wide range of granular specimens placed in a coaxial transmission line. The water or salt solution was cycled ...

Determinação da umidade volumétrica do solo

- Métodos baseados nas propriedades eletromagnéticas do solo

Princípio do método

A água é o componente com maior influência sobre a ϵ_a , o que possibilita a estimativa do θ pela medição da ϵ_a (Topp et al., 1980)



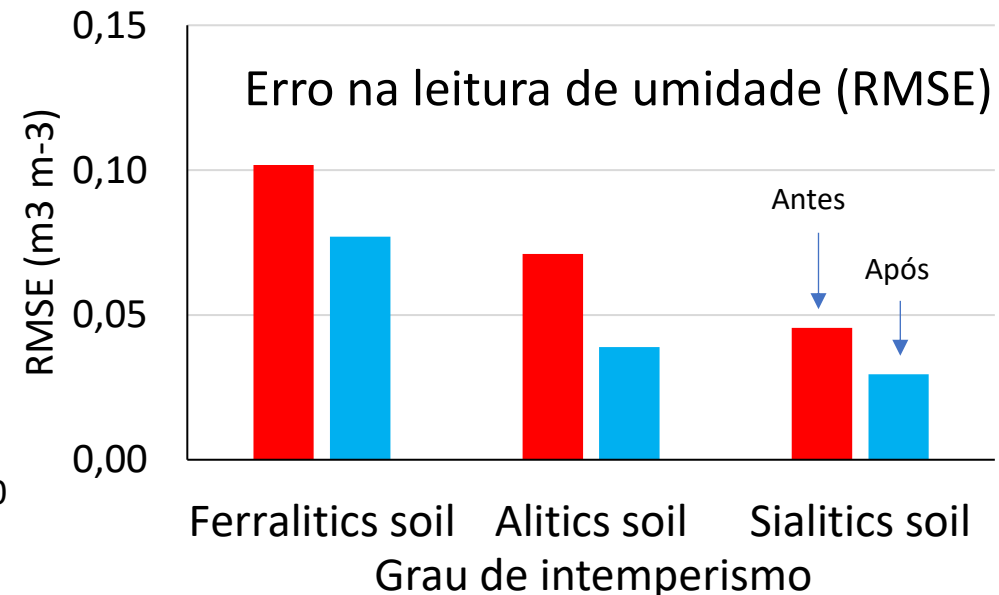
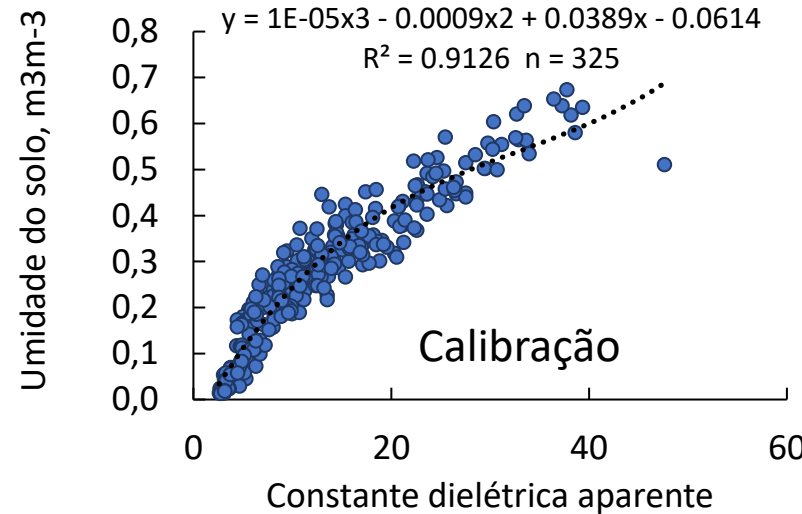
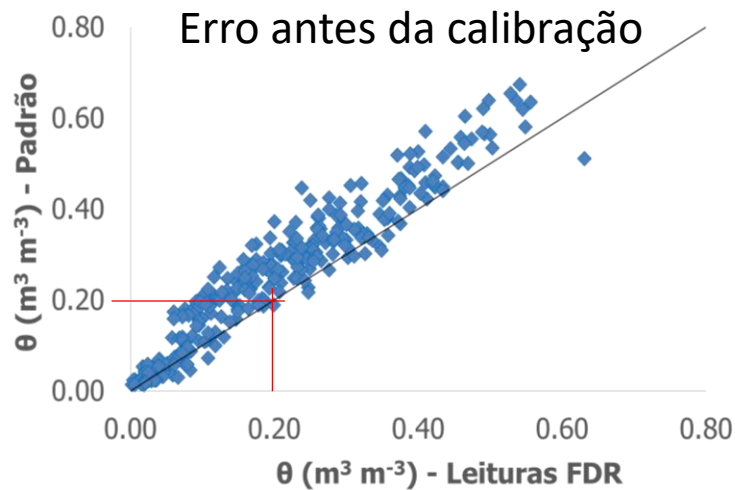
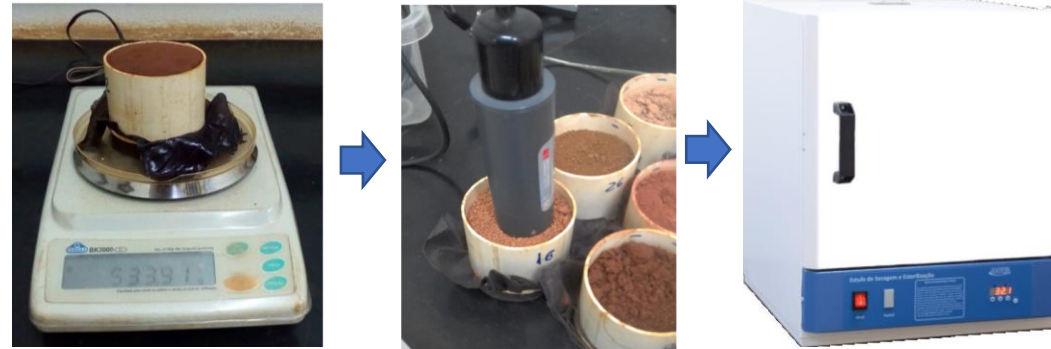
Constante dielétrica aparente (K ou ϵ):

- 1 para o ar
- 2-7 para o solo
- **81 para água** → Variação de θ

matéria orgânica (Veldkamp e O'Brien, 2000)
 textura => argila (Sá et al., 2008; Kaiser et al., 2010)
 mineralogia – óxidos de Ferro (Prevedello et al., 2007; Kaiser et al., 2010)
 condutividade elétrica (Tomaselli & Bacchi, 2001)
 temperatura (Evelt et al., 2006)
 densidade do solo (Malicki et al., 1996; Huang et al., 2004)

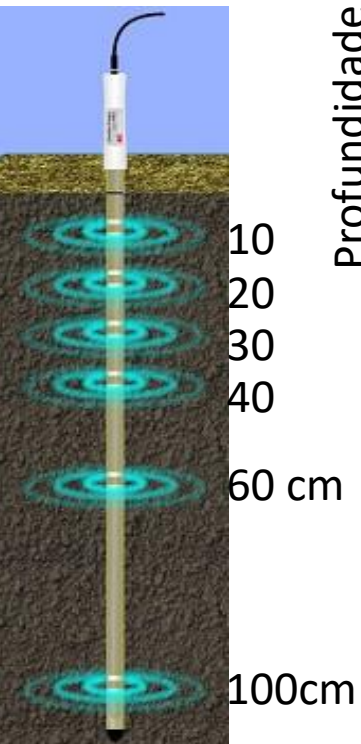
Determinação da umidade volumétrica do solo

➤ **Calibração:** metodologia para reduzir diferenças para o método padrão; diferenças não removidas pela calibração são consideradas como devido a precisão do método ou sensor. (Evelt et al, 2006)

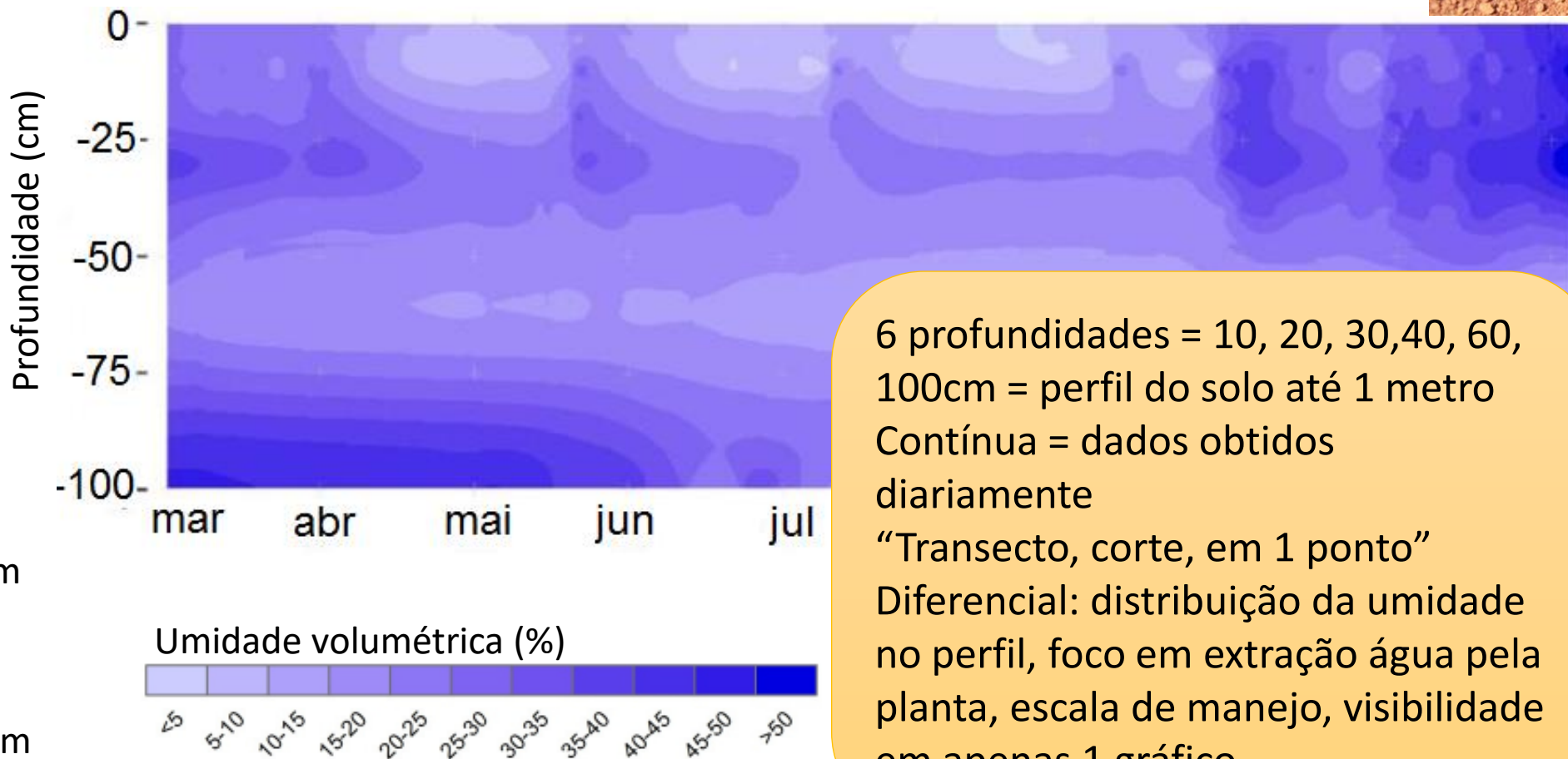


Modelagem geoestatística do conteúdo de água no perfil do solo mostrando variabilidade temporal e espacial simultaneamente

Sonda de multi-sensores de capacitância (FDR) (Profile probe PR2- Deta T, Cambridge, UK)



Superfície Contínua Profundidade x Tempo (Silva, 2012)

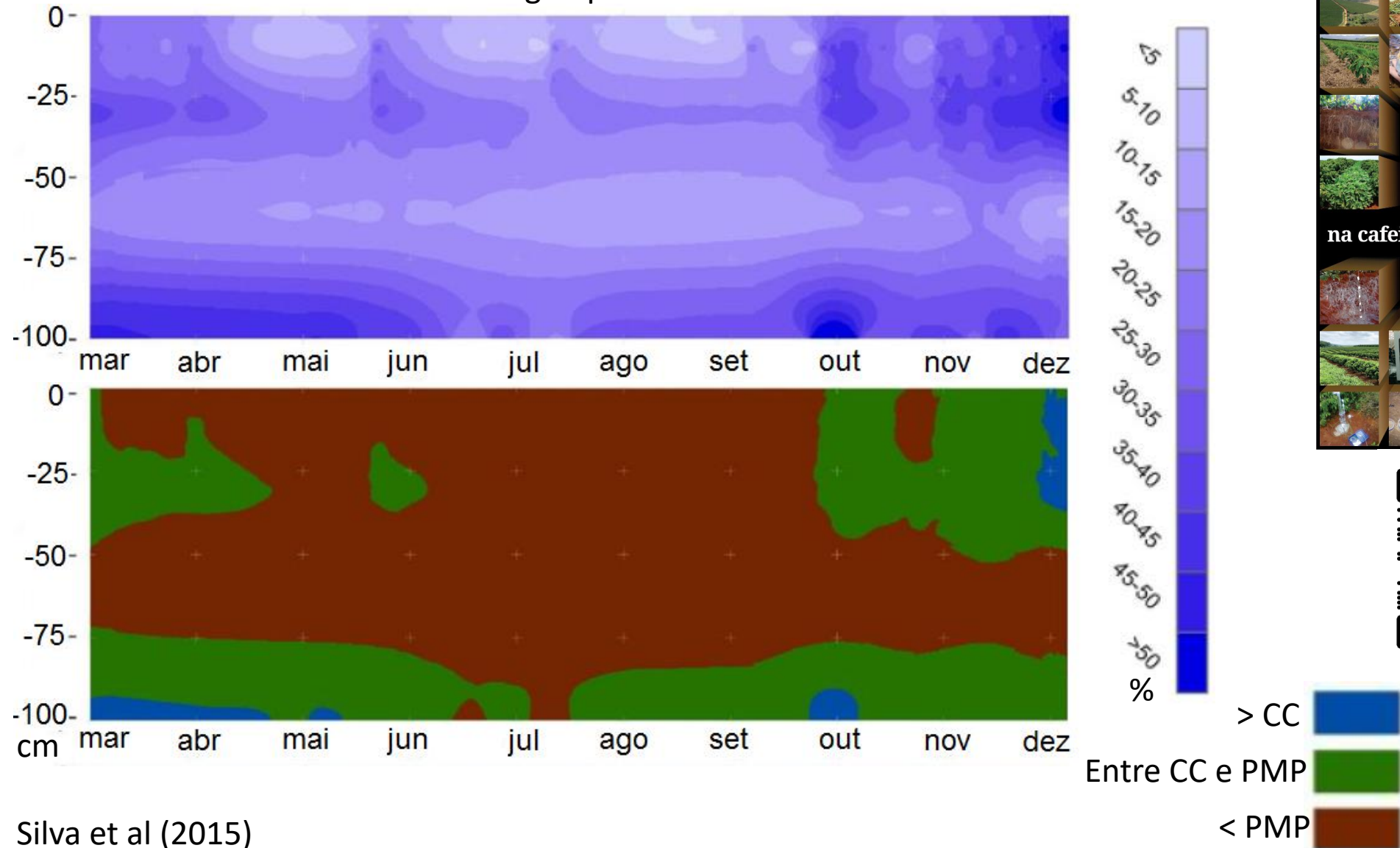


6 profundidades = 10, 20, 30, 40, 60, 100cm = perfil do solo até 1 metro
Contínua = dados obtidos diariamente
“Transecto, corte, em 1 ponto”
Diferencial: distribuição da umidade no perfil, foco em extração água pela planta, escala de manejo, visibilidade em apenas 1 gráfico



Superfície contínua de profundidade x tempo para umidade no Cerrado

- Em qual **camada do solo** as **raízes** mais extraem água?
- Em qual camada a raiz precisa chegar para encontrar **água disponível (no inverno)**?
- O **Veranico** de novembro atingiu qual camada?



Silva et al (2015)



Exemplos de Aplicações

Correlacionar as **respostas espectrais da vegetação**, por meio de **índices de vegetação**, com os dados da **umidade do solo na zona radicular**.

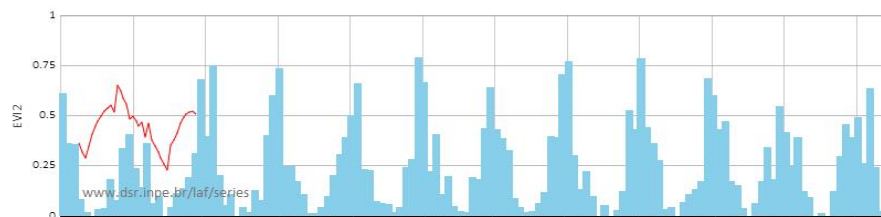


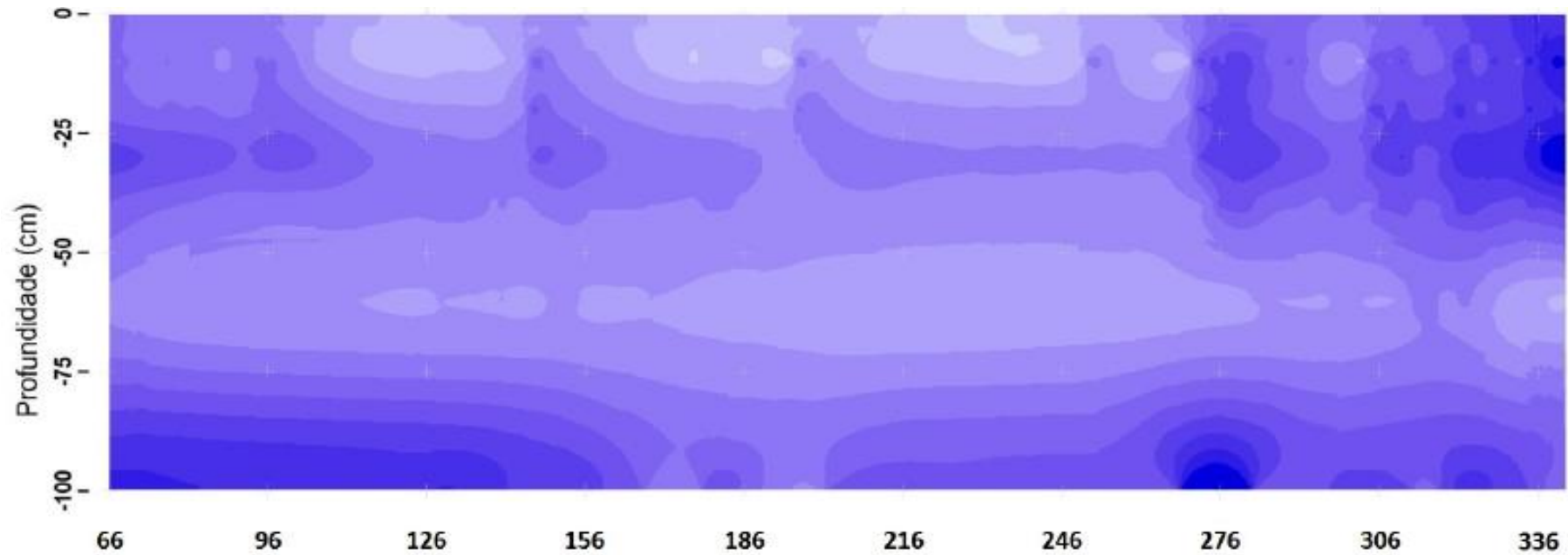
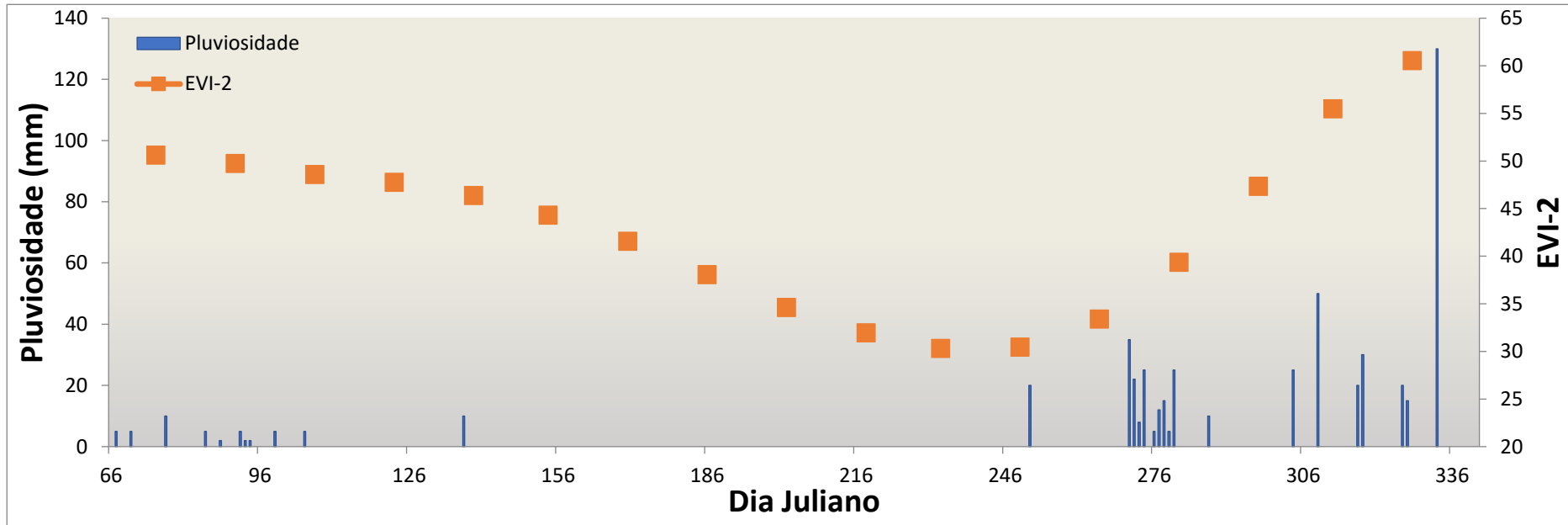
Geoderma 221–222 (2014) 91–95

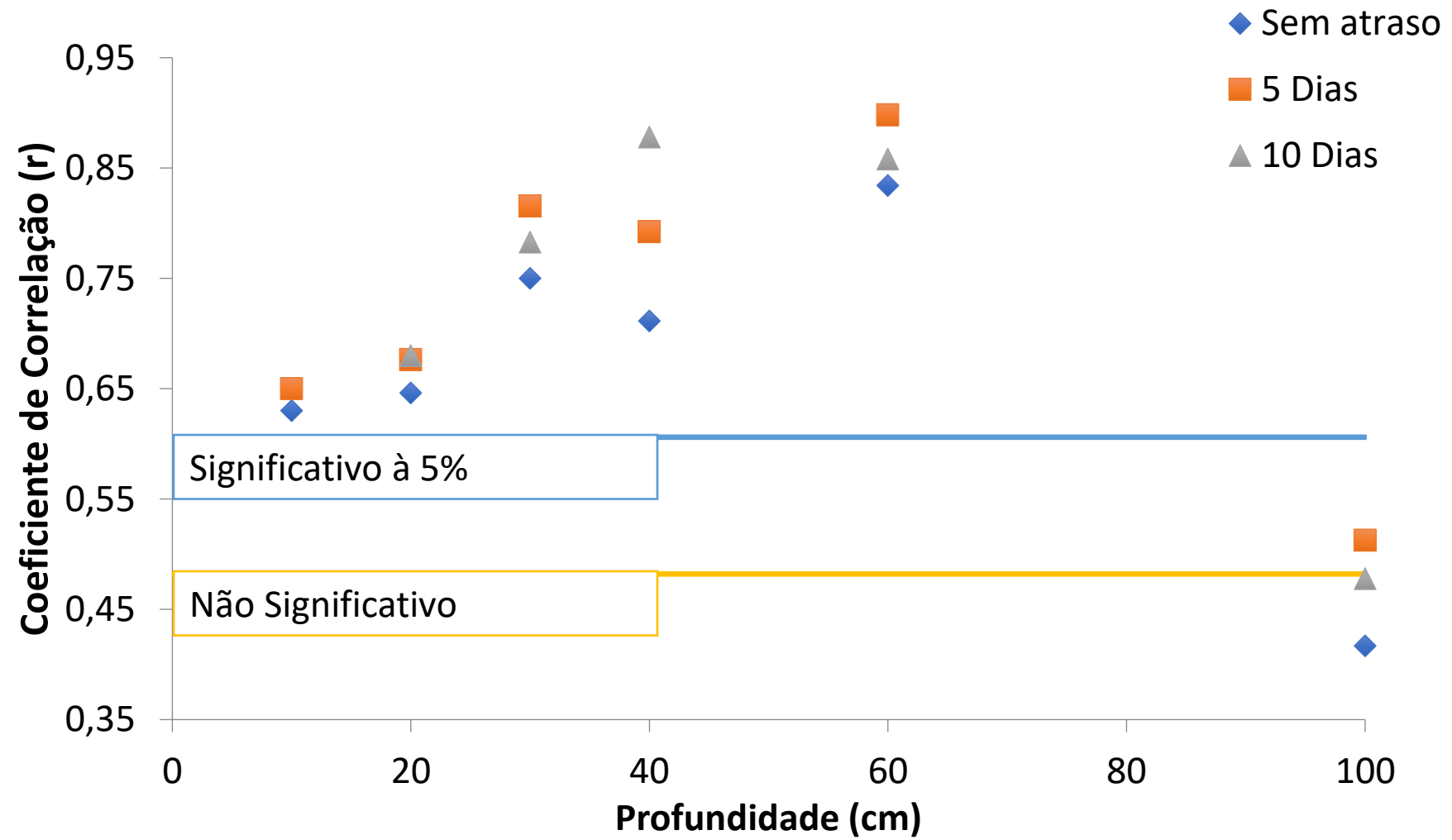
Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale

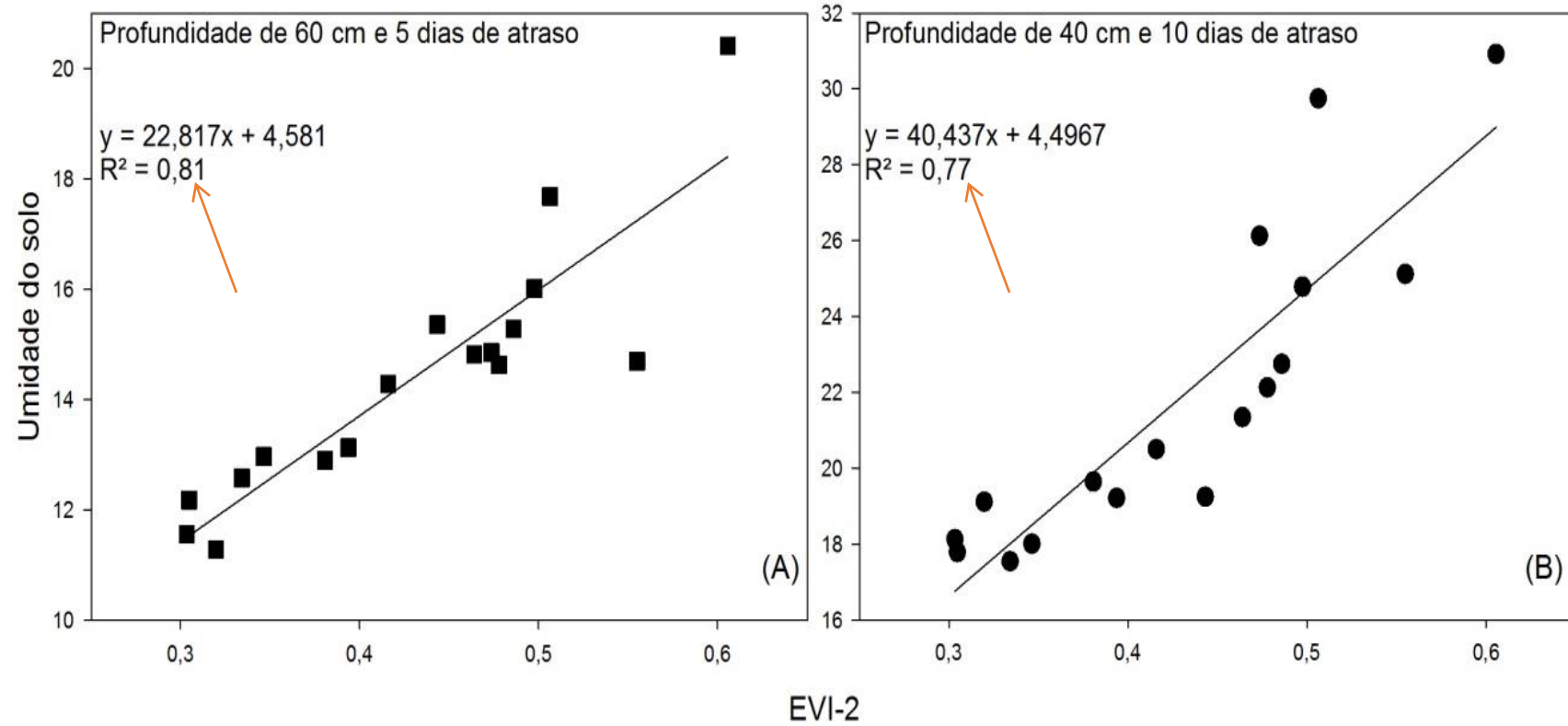


Walbert Júnior Reis Santos ^{a,b,*}, Bruno Montoani Silva ^a, Geraldo César Oliveira ^a,
Margarete Marin Lordelo Volpato ^c, José Maria Lima ^a, Nilton Curi ^a, João José Marques ^a



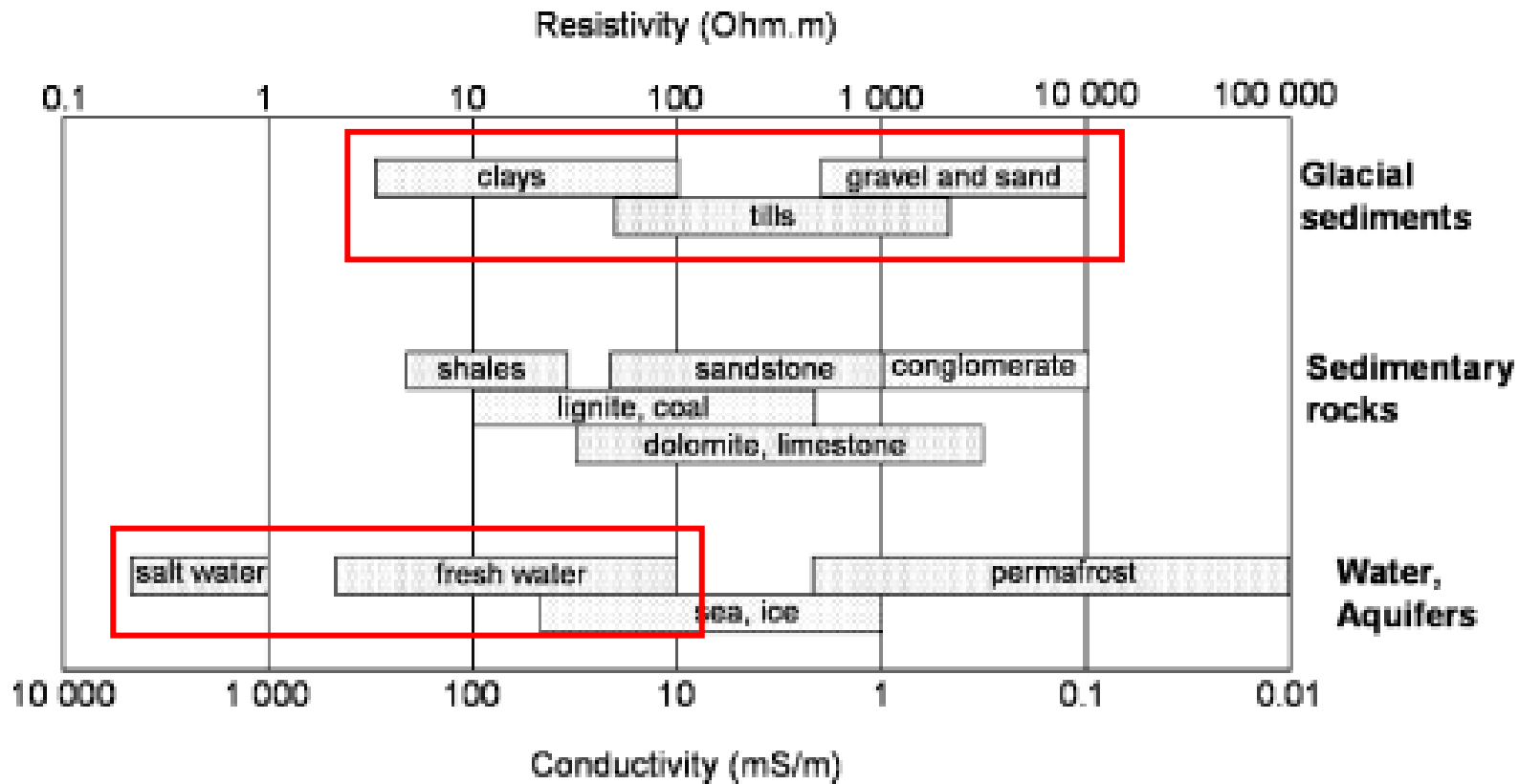




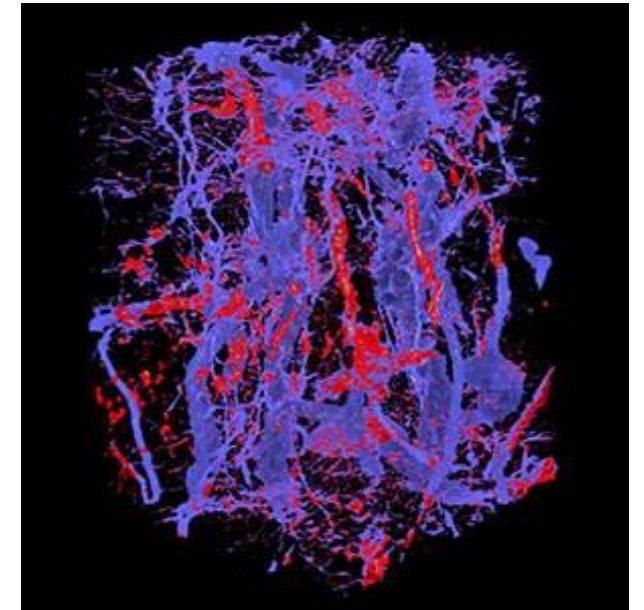


Métodos baseados na resistividade elétrica do solo (RES)

Qual a diferença entre RESISTIVIDADE X CONDUTIVIDADE?
Com o que varia a resistividade?



Solo é um meio trifásico:
Sólidos, água e ar



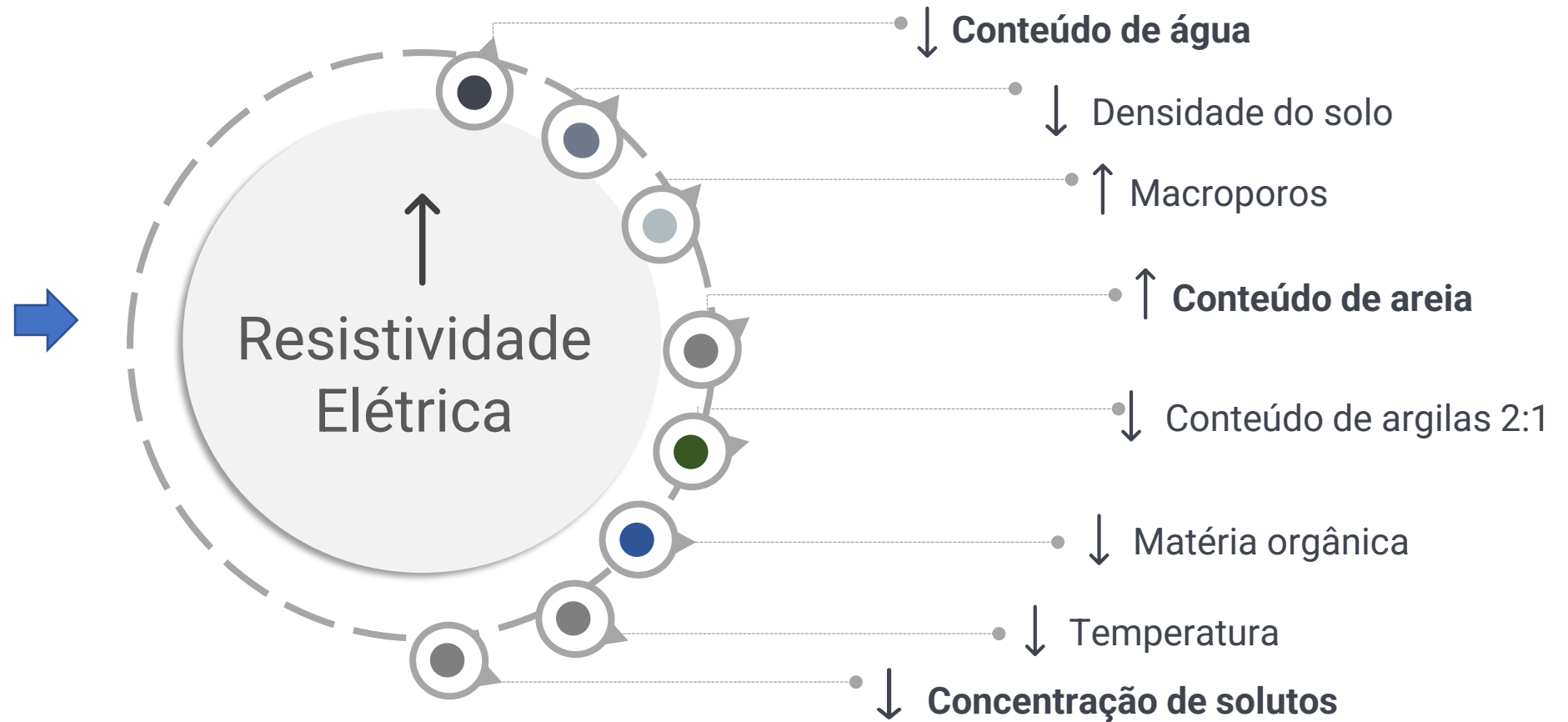
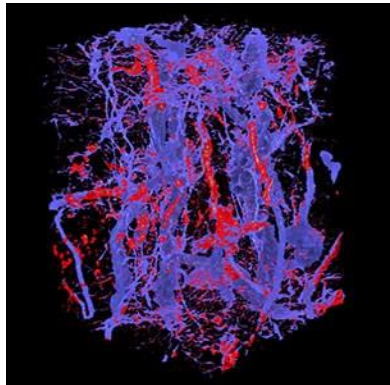
RES

Faixas de valores típicos de resistividade elétrica dos materiais
(after modified Palacky, 1987)

Métodos baseados na resistividade elétrica do solo (RES)

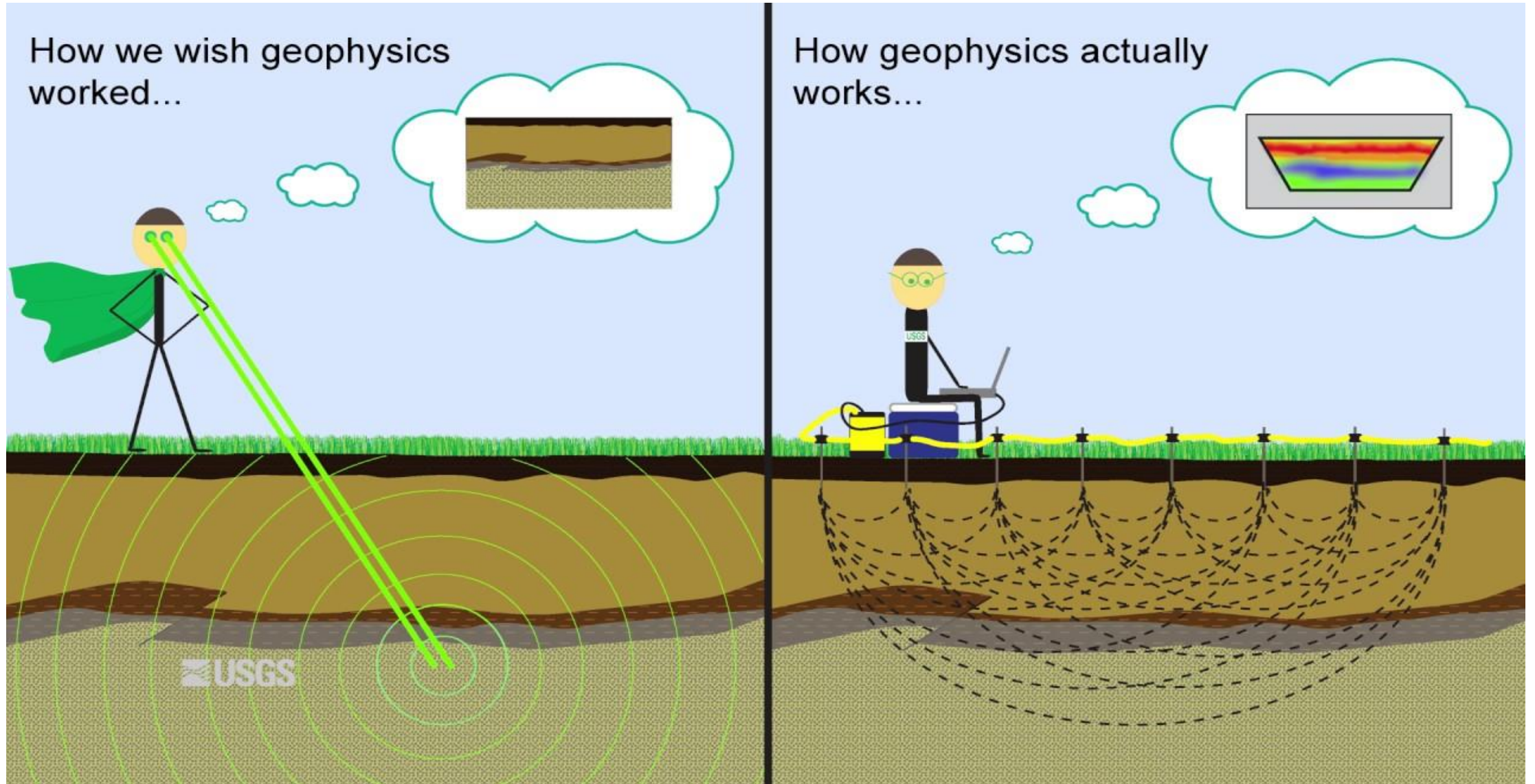
Uma das principais aplicações é para Determinação da umidade do solo

RES no Solo



Adaptado de: Samouelian et al., (2005)

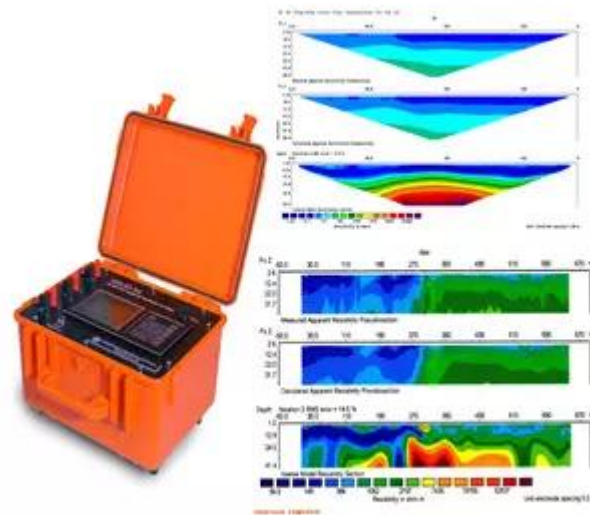
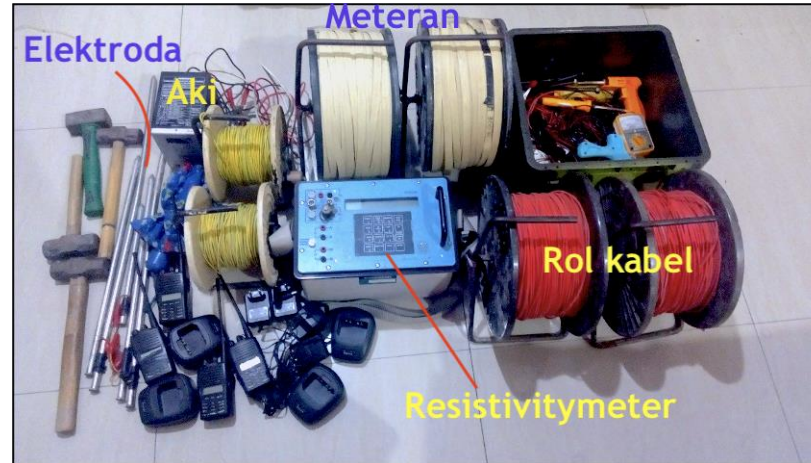
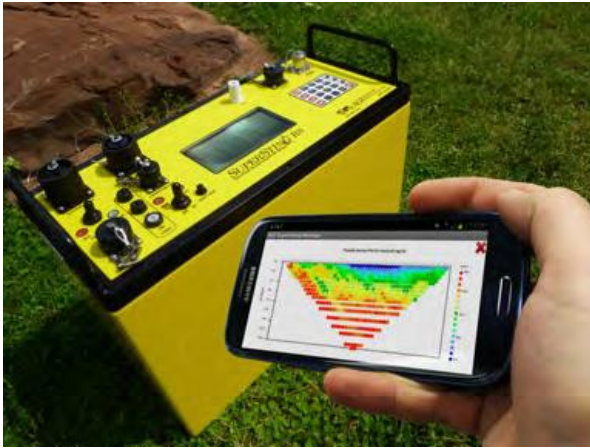
Métodos baseados na resistividade elétrica do solo (RES)



Source: <https://www.youtube.com/watch?v=3WK1YJotbfw>

Métodos baseados na resistividade elétrica do solo (RES)

Resistivímetros

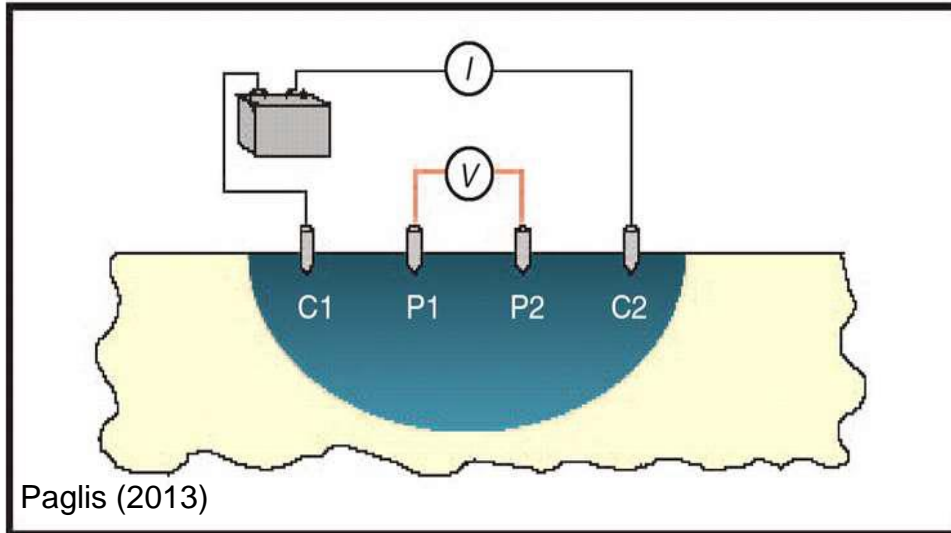


Métodos baseados na resistividade elétrica do solo (RES)

A Resistividade Elétrica do solo pode ser calculada através da diferença de potencial elétrico entre eletrodos como

$$\rho = K * \frac{V}{I}$$

onde V é a diferença no potencial elétrico, K é um coeficiente geométrico (função da configuração dos eletrodos), e I corrente.

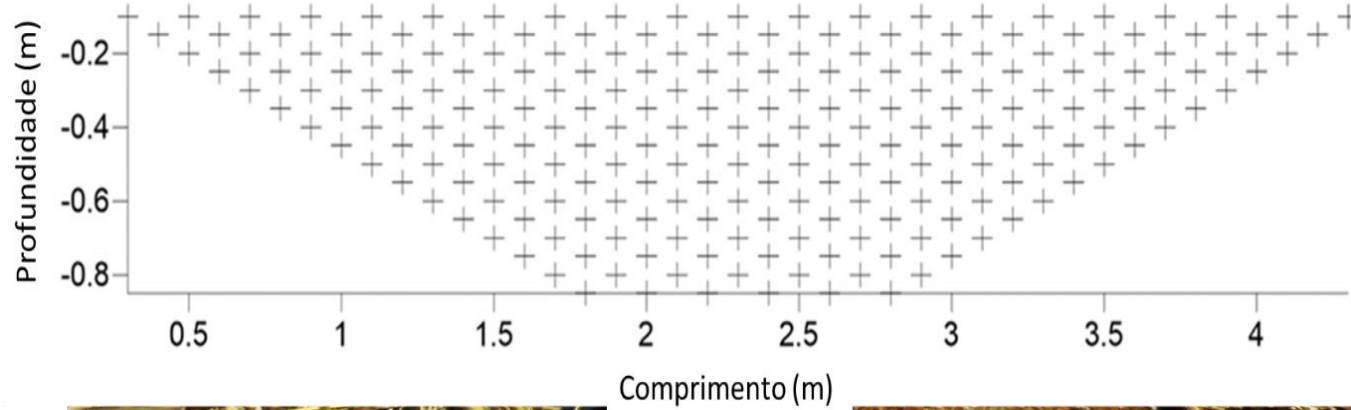


	Electrodes array	K
2D	Wenner	$2\pi a$
	Wenner-Schlumberger	$\pi n(n+1)a$
	Dipole-Dipole	$\pi n(n+1)(n+2)a$
	Pole-Pole	$2\pi a$
	Pole-Dipole Forward	$2\pi n(n+1)a$
	Pole-Dipole Reversed	$2\pi n(n+1)a$
3D	Square	$\frac{2\pi a}{2 - \sqrt{2}}$

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

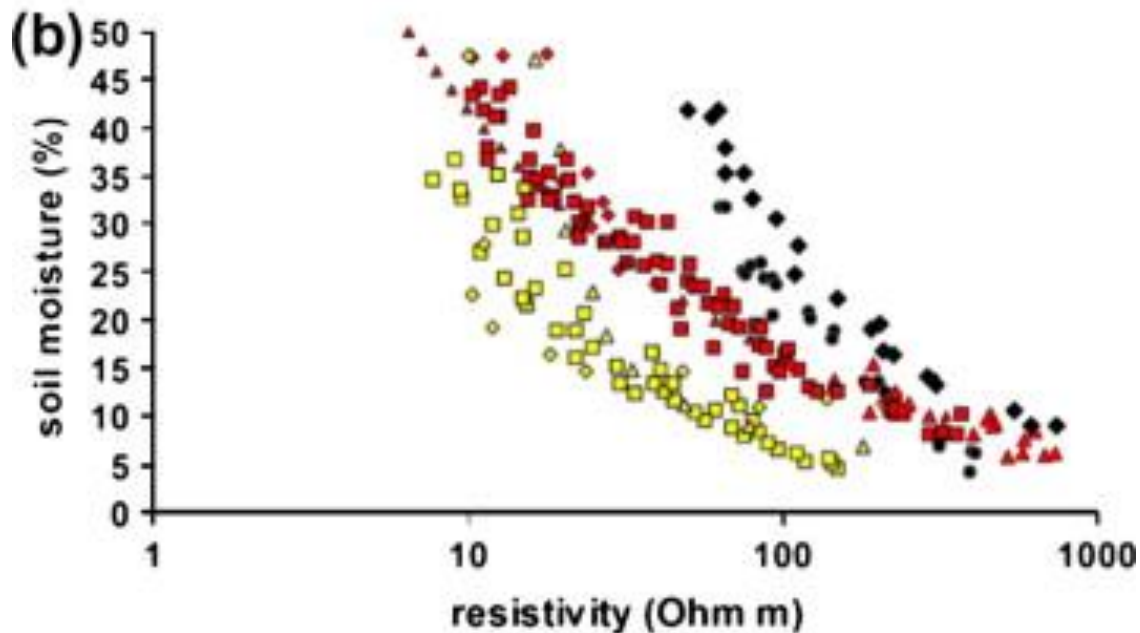
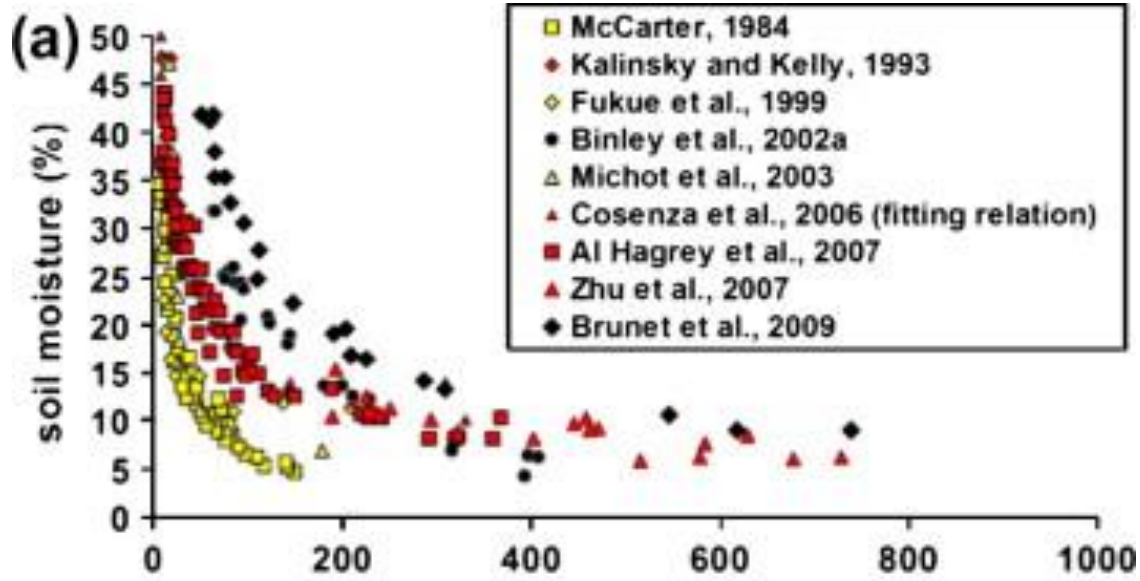
Exemplo de configuração de arranjo de eletrodos em linha 2D e dispositivo de eletrodo 3D. Samouelian et al. (2005).

Métodos baseados na resistividade elétrica do solo (RES)



Métodos baseados na resistividade elétrica do solo (RES)

Determinação da umidade do solo



Relação entre a resistividade elétrica e a umidade volumétrica do solo para diferentes estudos relatados na literatura.

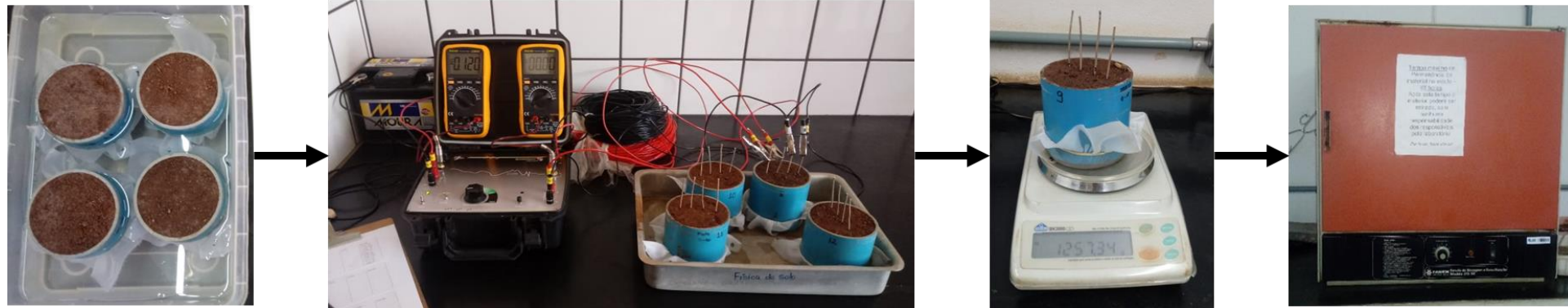
Cores representam a classe textural dos solos, sendo **Amarelo: argiloso**. **Vermelho: siltoso**. **Preto: arenoso**. Calamita et al. (2012).

Necessidade de calibração!

Métodos baseados na resistividade elétrica do solo (RES)

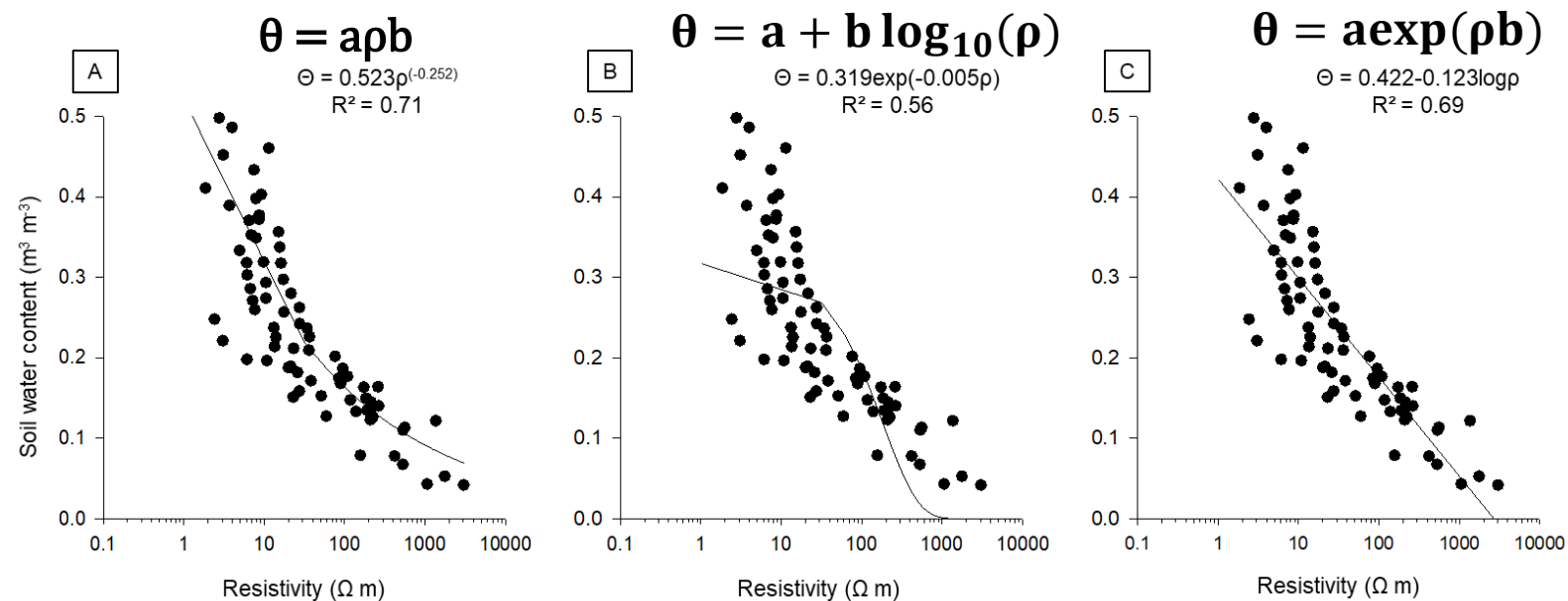
Determinação da umidade do solo

Calibração em laboratório para solos tropicais (Melo et al., 2021)



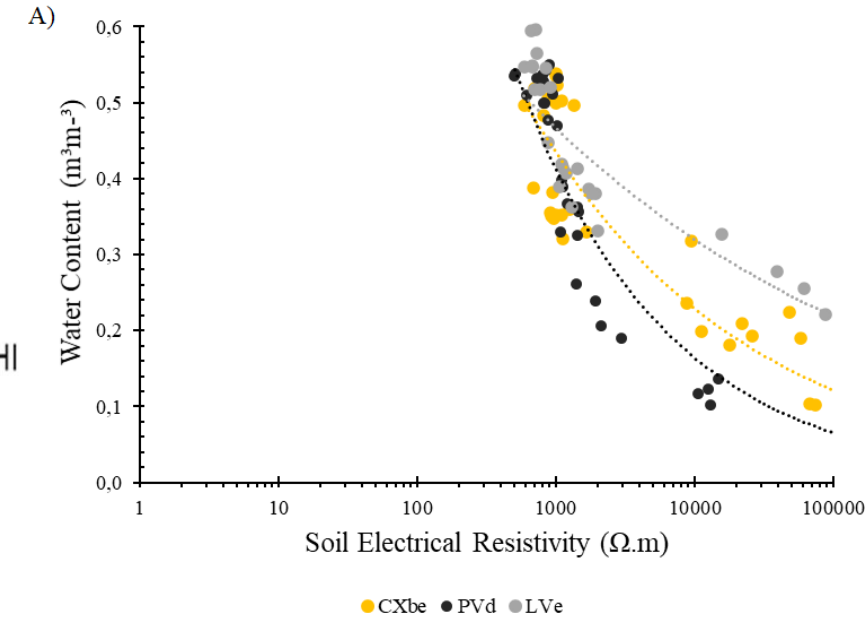
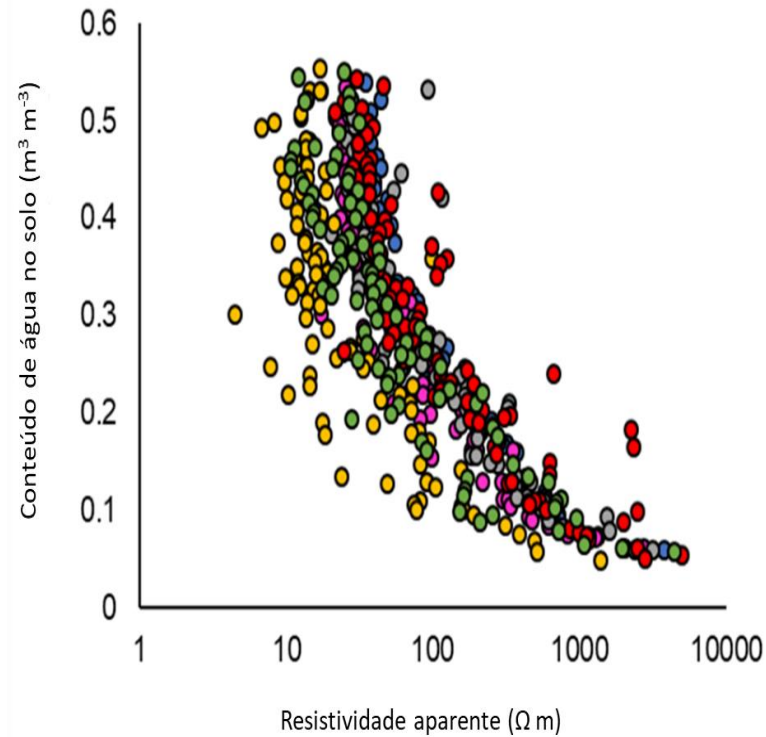
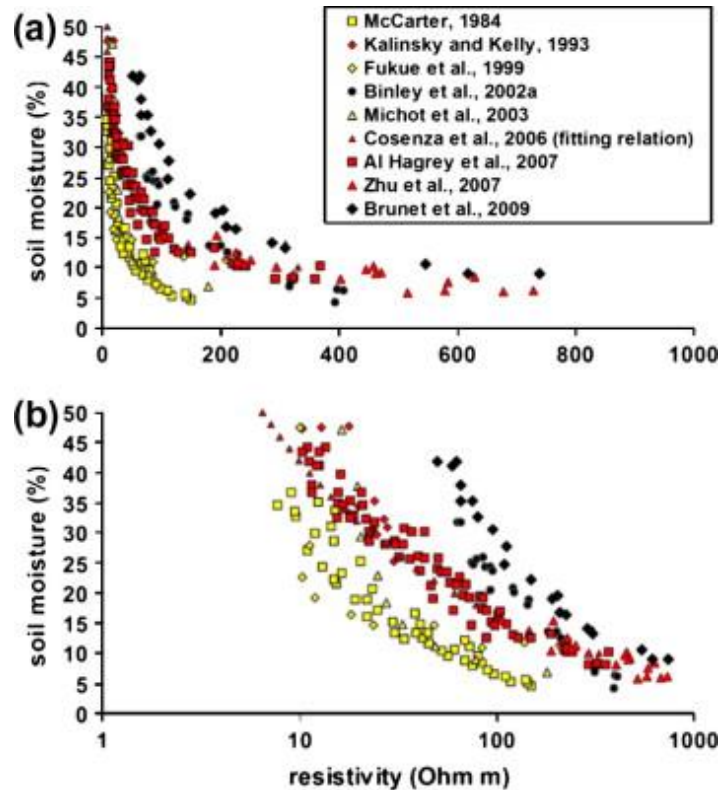
Arranjo Wenner

Espaçamento entre eletrodos: 1.9 cm



Métodos baseados na resistividade elétrica do solo (RES)

Determinação da umidade do solo



Relação entre a resistividade elétrica e a umidade volumétrica do solo para diferentes estudos relatados na literatura. Cores representam a classe textural dos solos, sendo **Amarelo: argiloso**. **Vermelho: siltoso**. **Preto: arenoso**. Calamita et al. (2012).

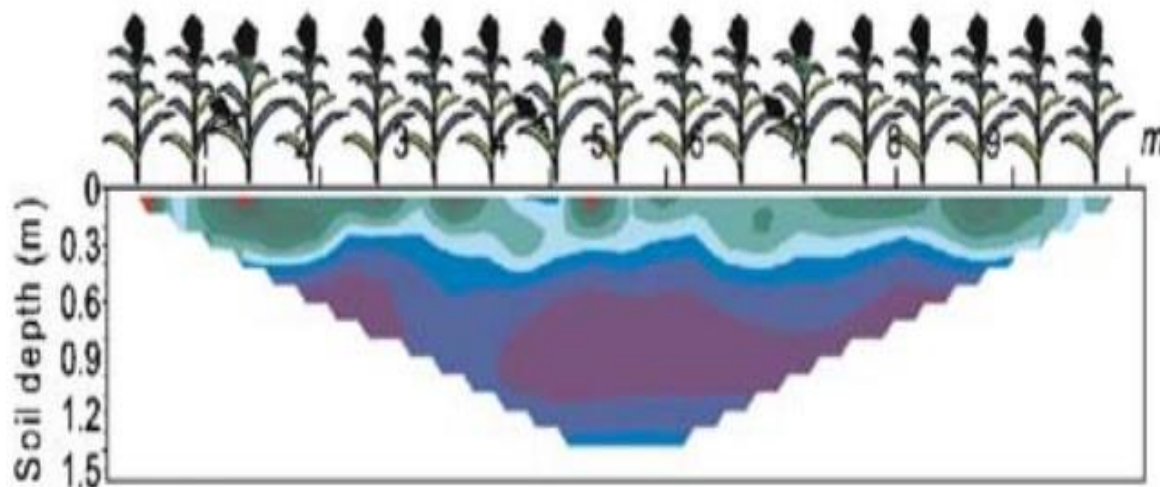
Efeito do manejo sobre a relação resistividade-umidade do solo (Silva, 2020)

Efeito do tipo (ordem) de solo sobre a relação resistividade-umidade do solo (Feitosa, 2022)

Necessidade de calibração!

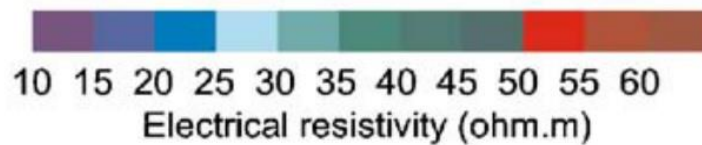
Determinação da umidade volumétrica do solo

Irrigação completa

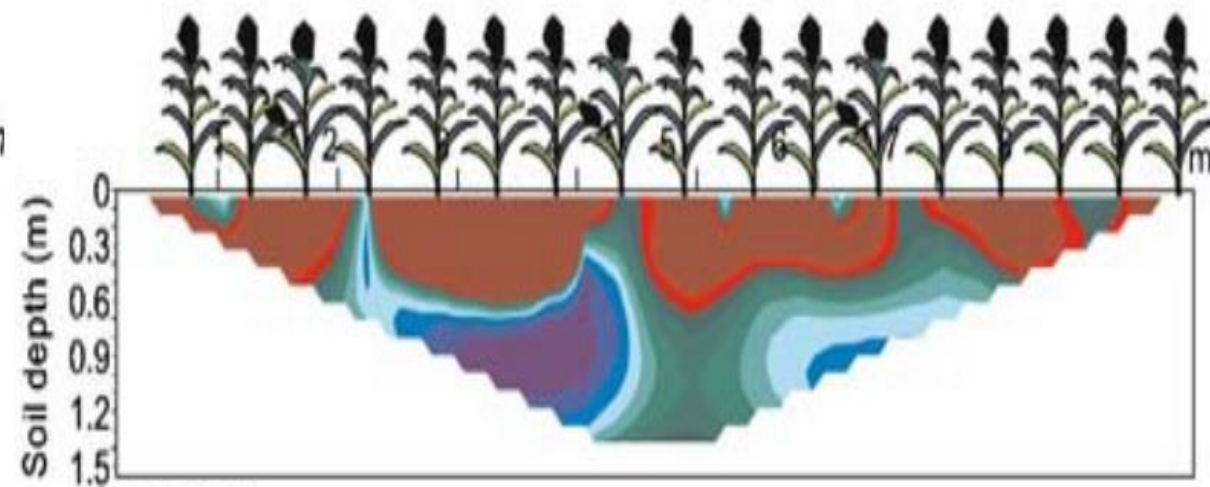


RMS=3%

Sorghum 91 DAS

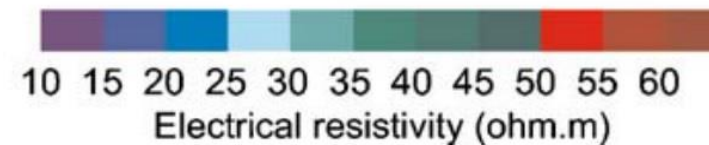


Irrigação deficitária



RMS=6.1%

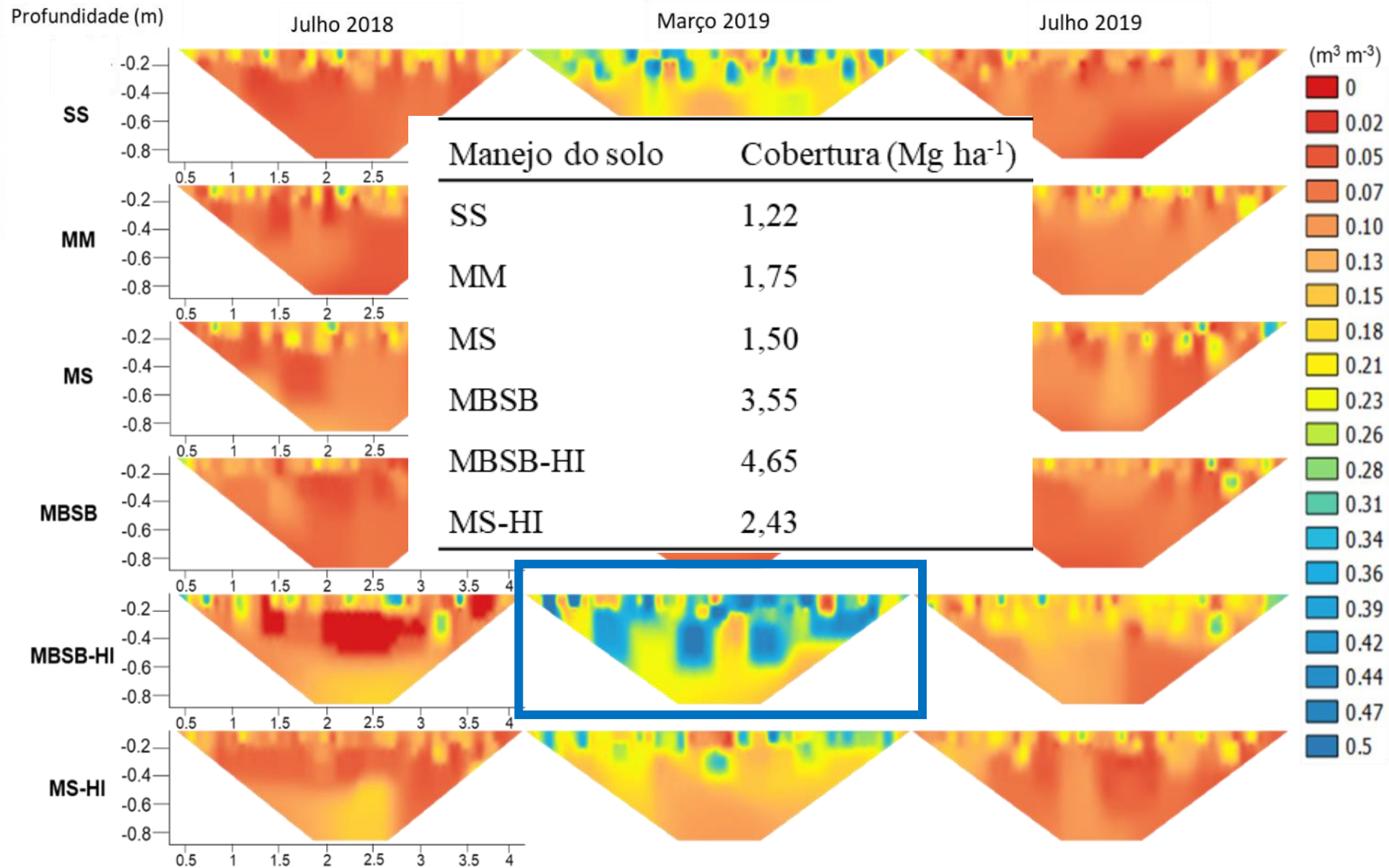
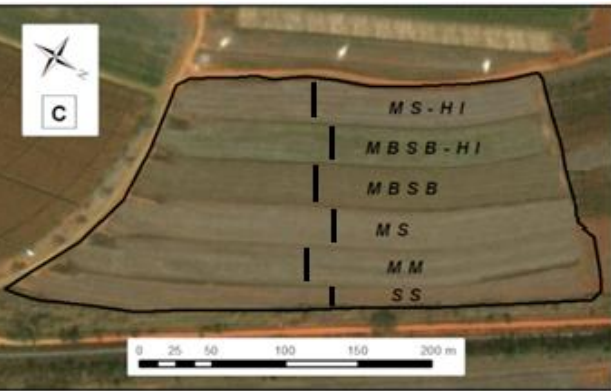
Sorghum 91 DAS



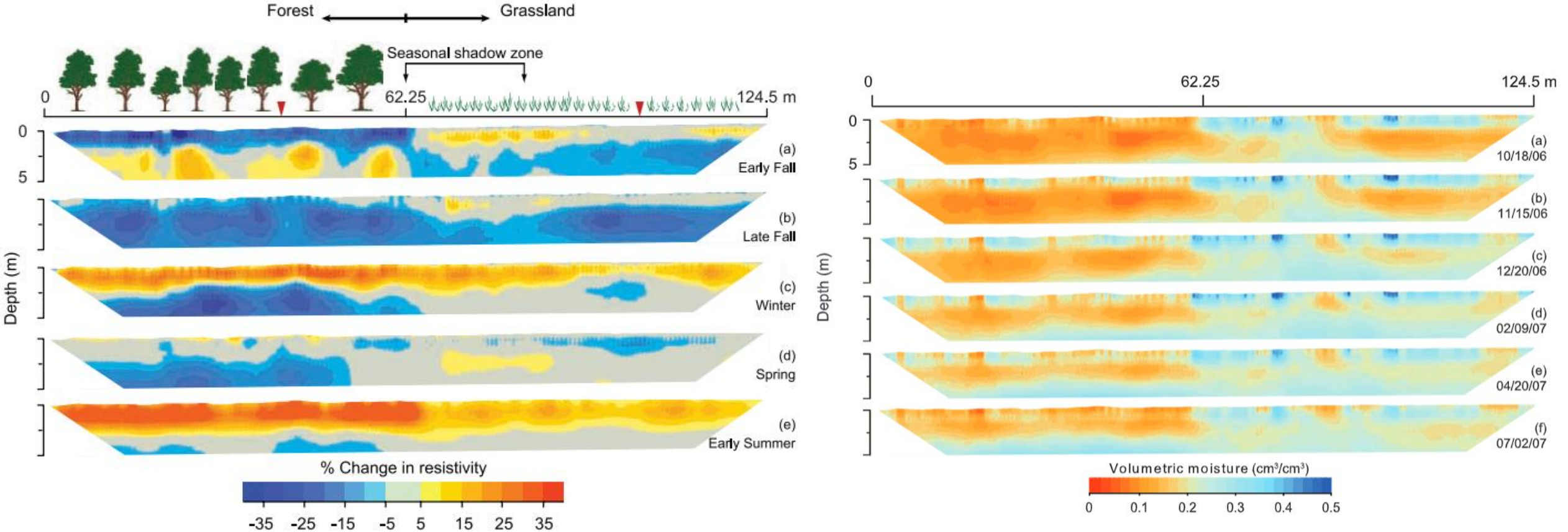
Srayedin e Doussan (2009)

Determinação da umidade volumétrica do solo

$$PMP_{\min} = 0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$$



Determinação da umidade volumétrica do solo

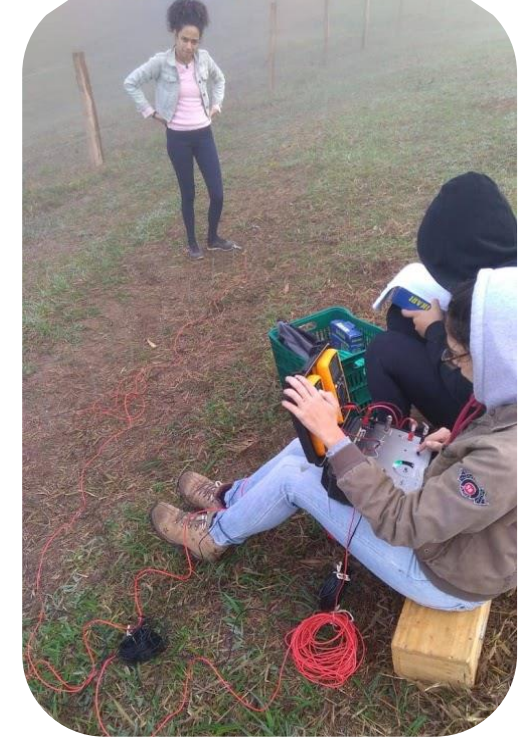


Jayawickreme et al. 2008

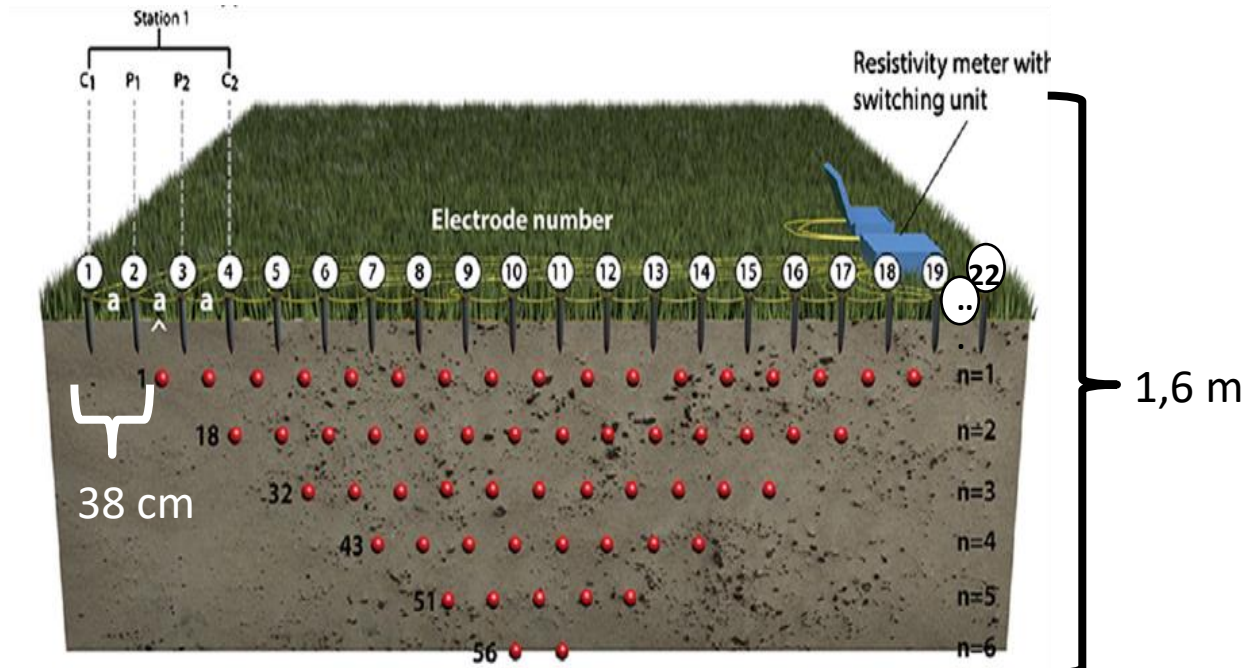
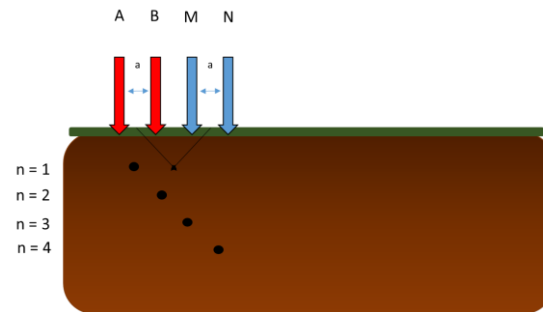
Figure 2. Differential resistivity panels for approximately one-month periods. (a) Early fall (10/18 – 11/15), (b) late fall (11/22 – 12/20), (c) winter (1/5 – 2/9), (d) spring (3/16 – 4/20), and (e) summer (6/10 – 7/2). Trees are not to scale; 80 cm of relief along the array is included in the inversion. Red triangles locate moisture probes and temperature arrays. A decrease in resolution with depth and associated smoothing artifacts can cause resistivity differences below the water table.

Avaliação da dinâmica temporal do armazenamento de água do solo no Sistema Cantareira

Santana, 2022



- ❖ 7.78 m transect
- ❖ 184 data
- ❖ 16 data level
- ❖ 10 cm resolution
- ❖ 22 electrodes
- ❖ Electrodes array: dipole-dipole
- ❖ Calibration
- ❖ 3x4x4



RR 2019

Neossolo regolítico

Joanópolis, SP



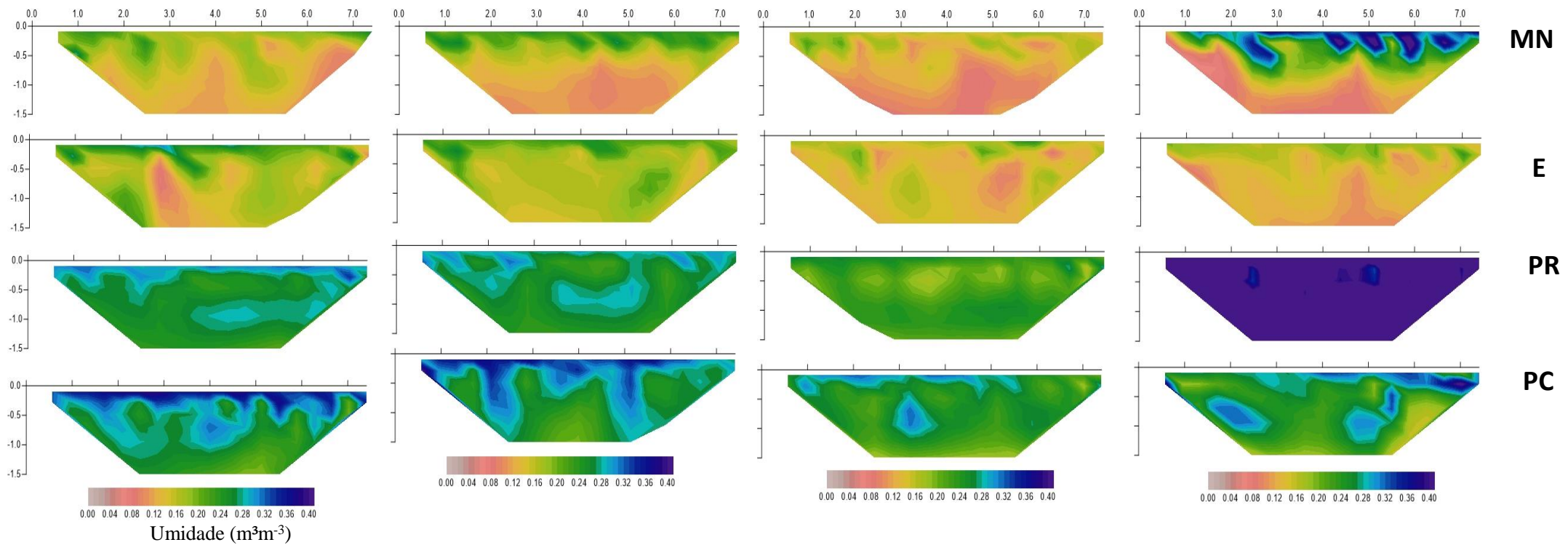
RR

Verão

Outono

Inverno

Primavera





RR

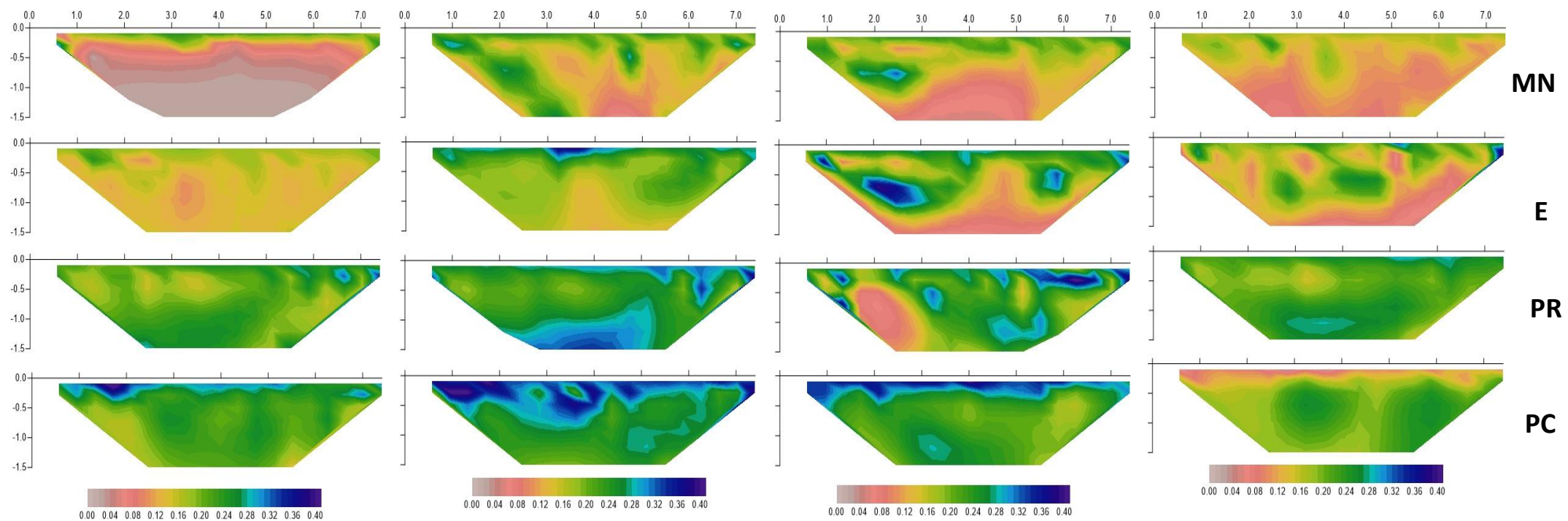
RR 2020/21

Inverno

Primavera

Verão

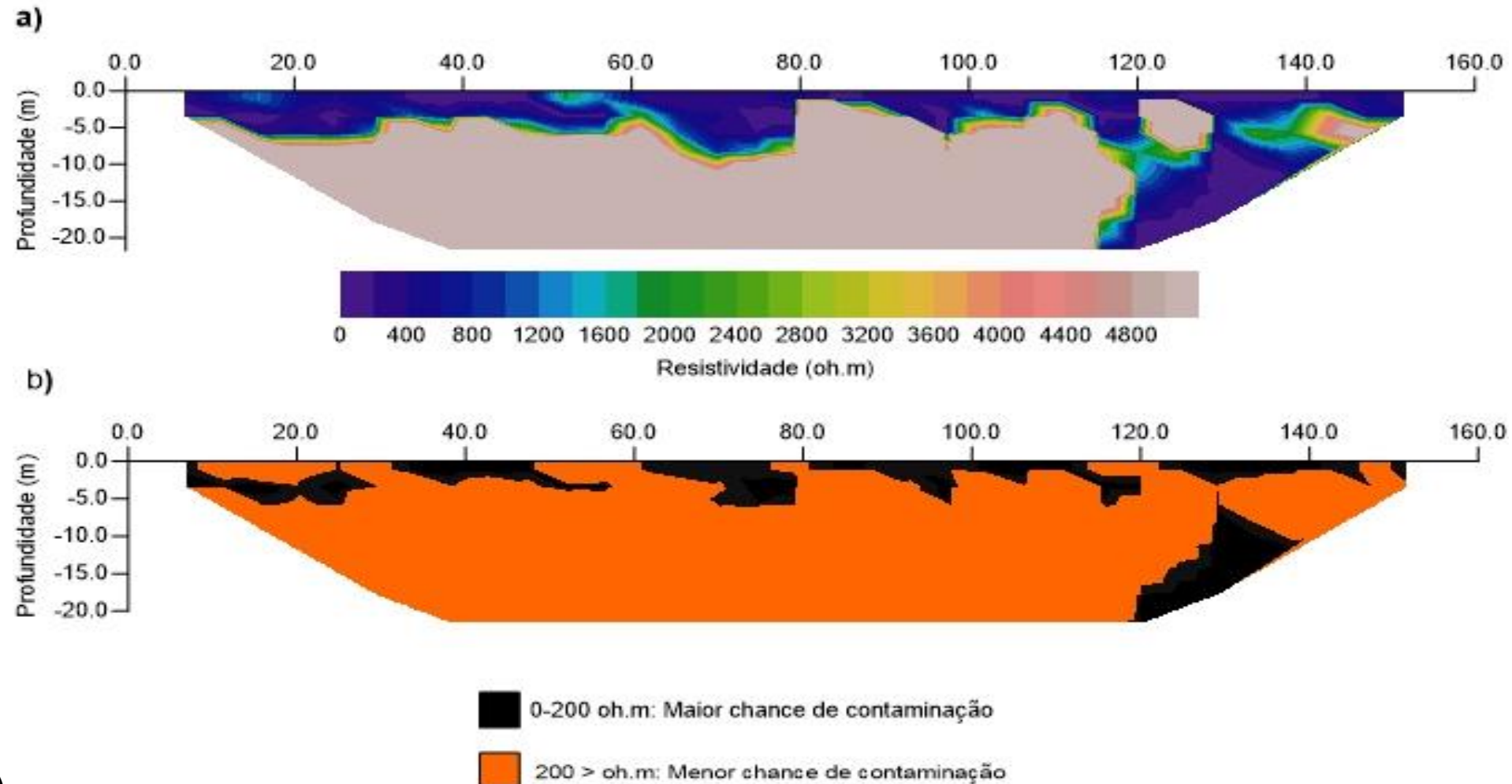
Outono

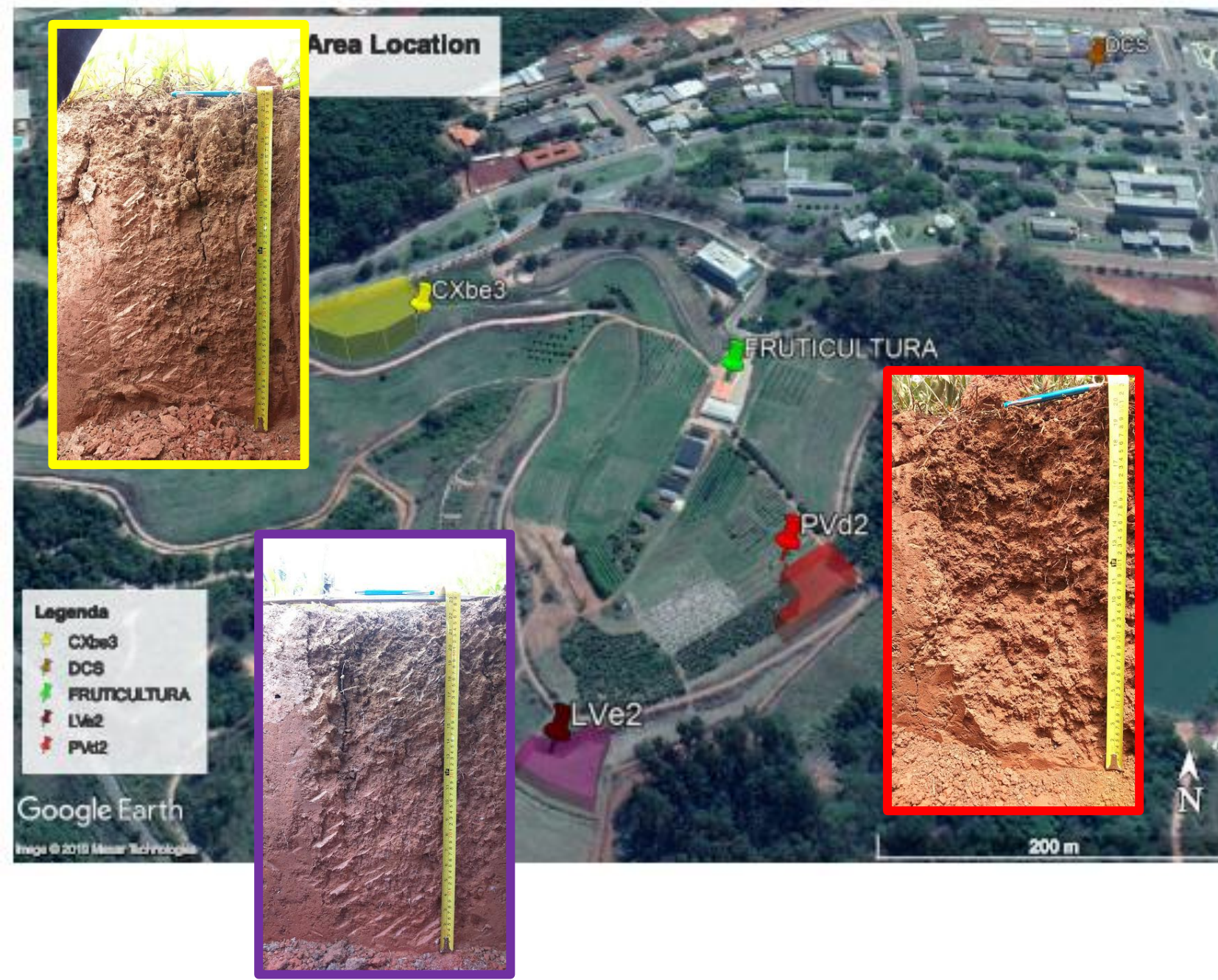


Umidade (m^3m^{-3})

Avaliação de plumas de contaminação

Transecto 4





Embrapa

Latosolos – 31,6%

Argissolos e Cambissolos – 26,9%

Soil Taxonomy

Inceptisol – 15%

Ultisol – 8%

Oxisol – 8%

Curi et al. (2017)
Santos et al. (2013)
Quéméneur (1995)
Sawe (2017)

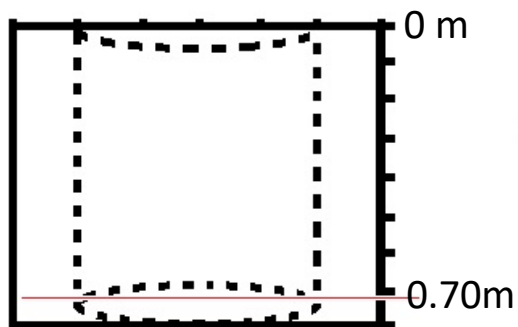
Estratégias de manejo do solo testadas para condicionamento físico-químico do solo

Em área total:

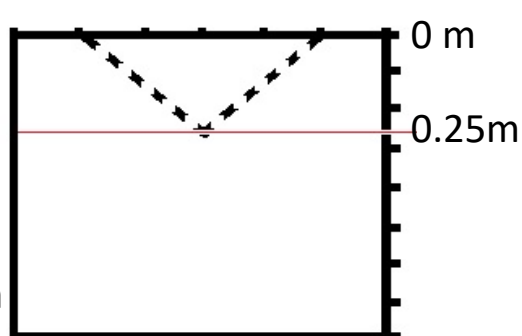
- Calcário para V% de 80%;
- Aração a 0.4 m e Gradagem a 0.15 m



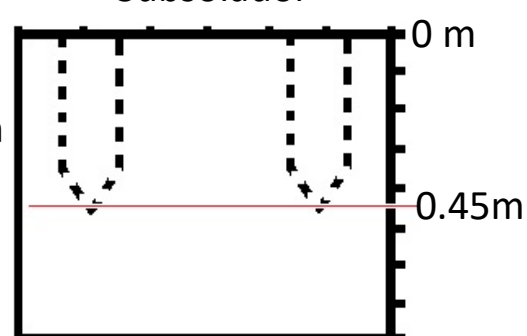
Plantio direto e cova



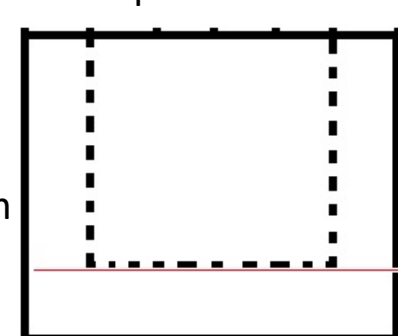
Sulcador



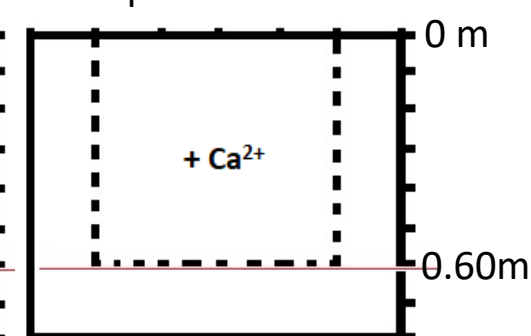
Subsolador



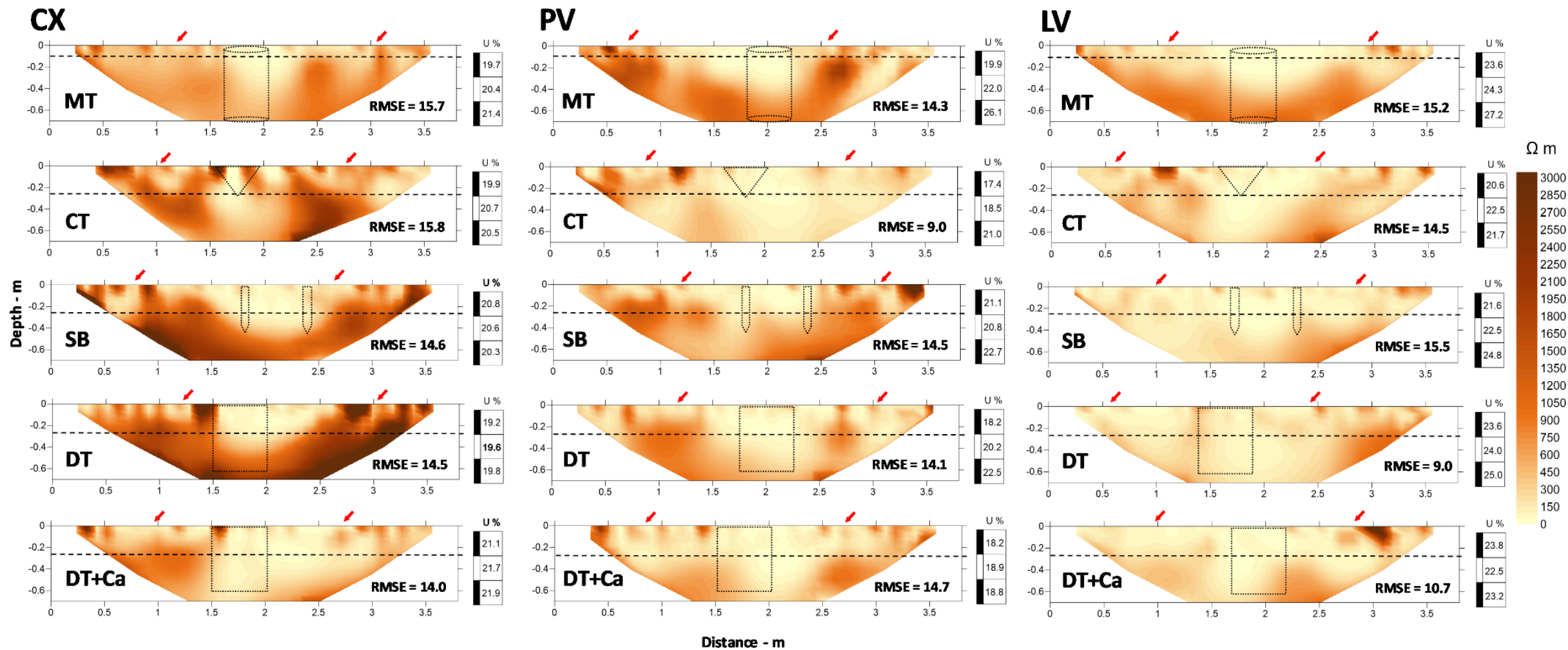
Preparador cova



Preparador cova

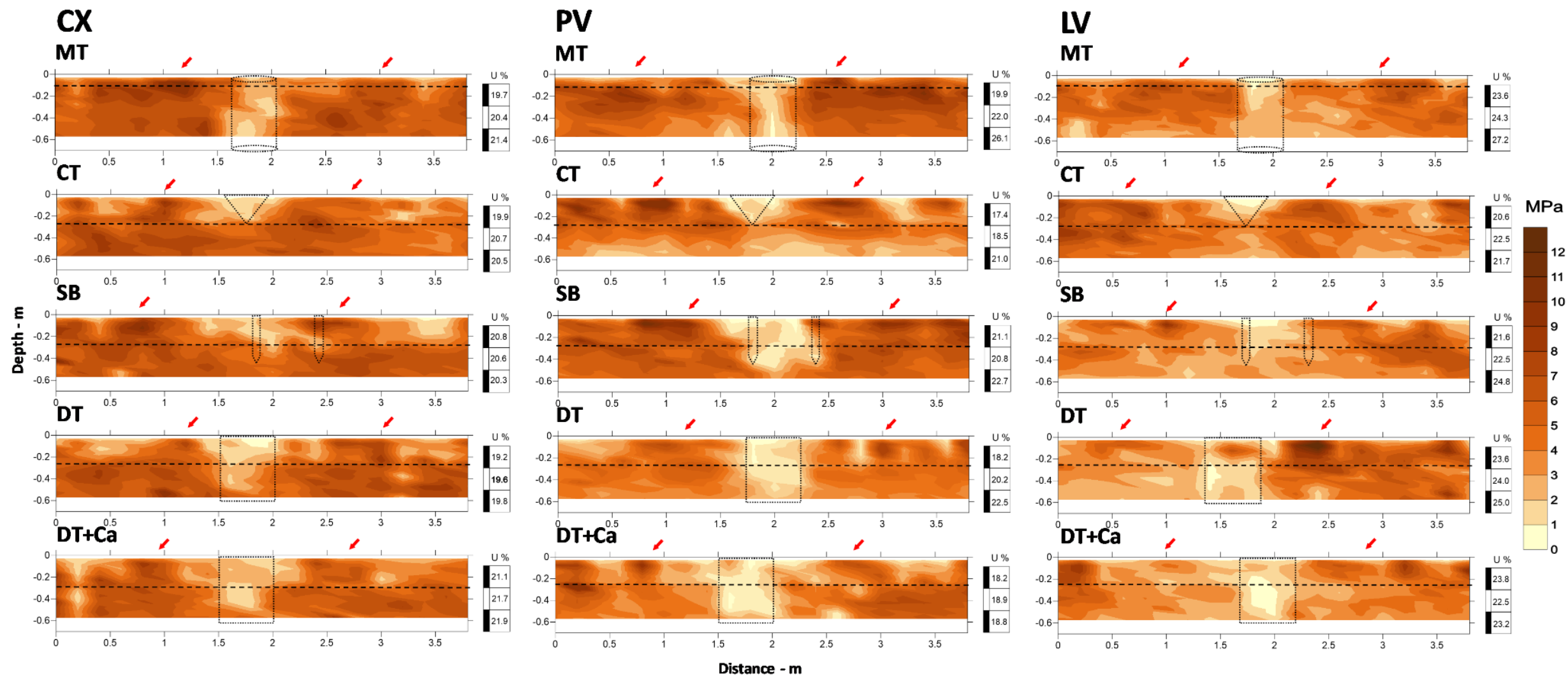


2D maps of soil electrical resistivity for three soil classes (CX, PV, and LV) under five different soil tillage treatments



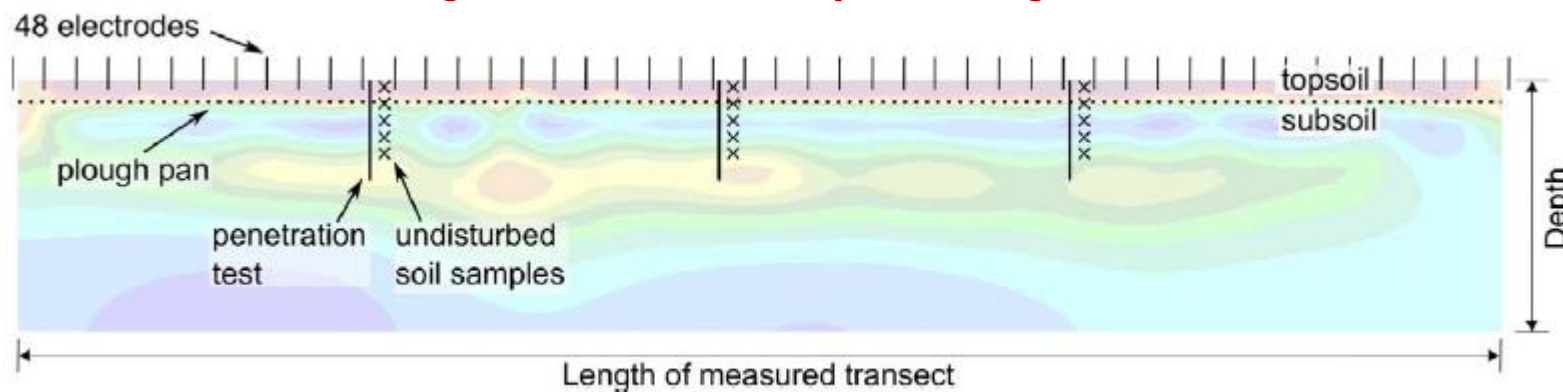
[MT: minimum tillage with a pit (0.4 m in diameter by 0.7 m deep); CT: conventional tillage (0.25 m deep); SB: subsoiler with booted ripper points on two shanks (0.45 m deep); DT: deep mixing tillage with rotary hoe tiller (0.5 wide by 0.6 m deep); DT + Ca: deep mixing tillage with rotary hoe tiller (0.5 wide by 0.6 m deep) + additional liming. The horizontal dashed line demarcates the working depth of the plow (approximately 0.25 m); dotted lines project the working area of the implements used in each tillage treatment; U soil moisture based on the weight (U, %) of each layer at the time of data collection. Measurements were performed eight months after tillage operations. Azevedo et al. (2022)

2D maps of soil penetration resistance for three soil classes (CX, PV, and LV) under five different soil tillage treatments

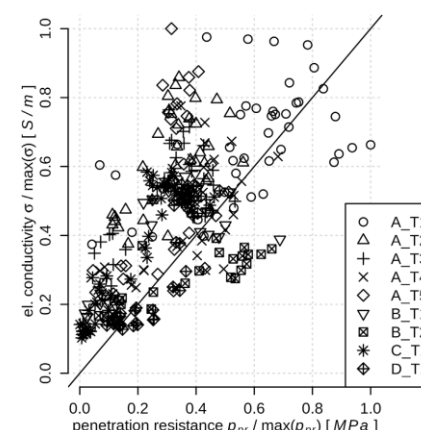
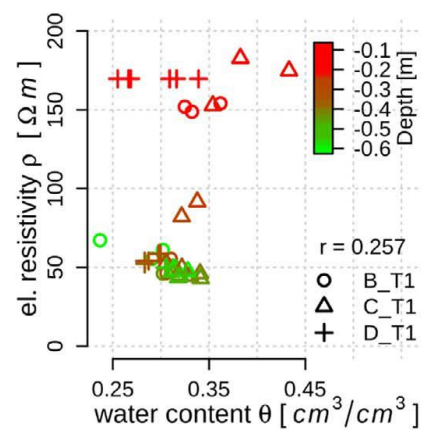
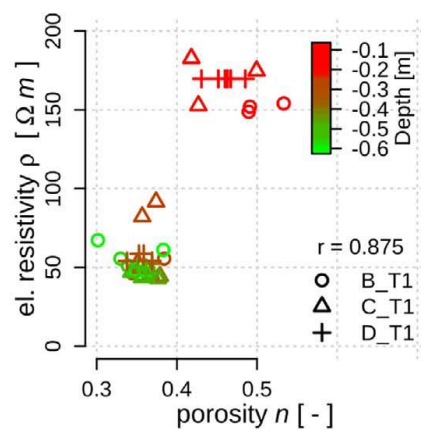
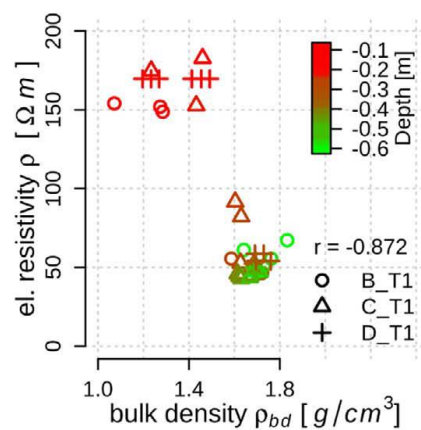
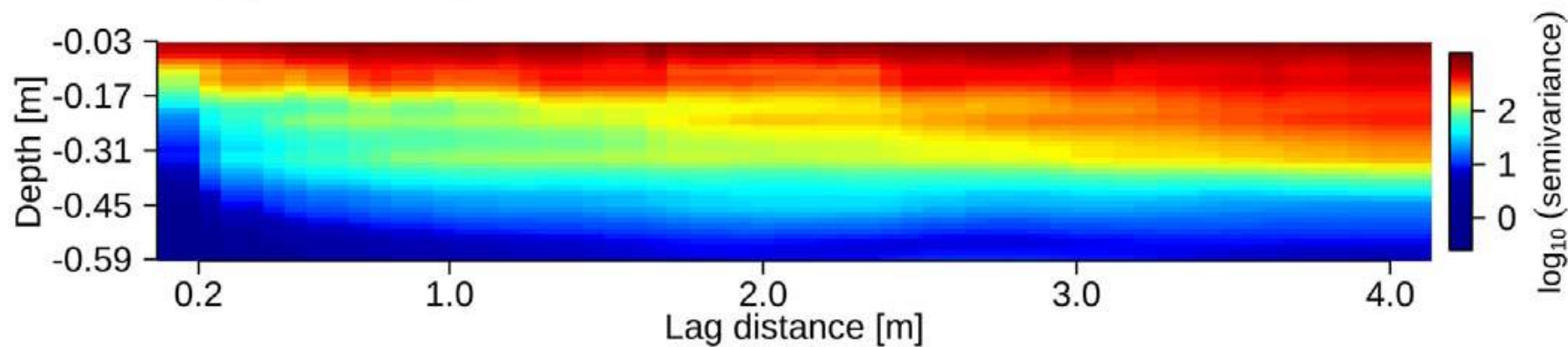


[MT: minimum tillage with a pit (0.4 m in diameter by 0.7 m deep); CT: conventional tillage (0.25 m deep); SB: subsoiler with booted ripper points on two shanks (0.45 m deep); DT: deep mixing tillage with rotary hoe tiller (0.5 wide by 0.6 m deep); DT + Ca: deep mixing tillage with rotary hoe tiller (0.5 wide by 0.6 m deep) + additional liming. The horizontal dashed line demarcates the working depth of the plow (approximately 0.25 m); dotted lines project the working area of the implements used in each tillage treatment; U soil moisture based on the weight (U, %) of each layer at the time of data collection. Measurements were performed eight months after tillage operations. Azevedo et al. (2022)

Avaliação da compactação do solo



(c) Semivariogram of the electrical resistivity in transect C_T1





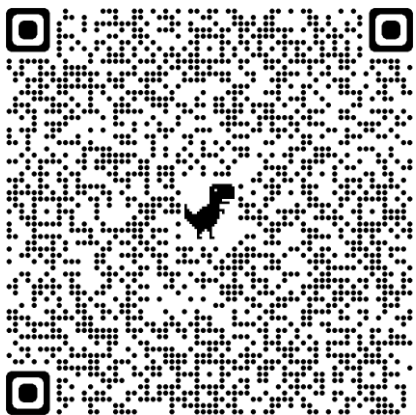
Núcleo Regional Leste
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Manejo do solo em sistemas integrados de produção

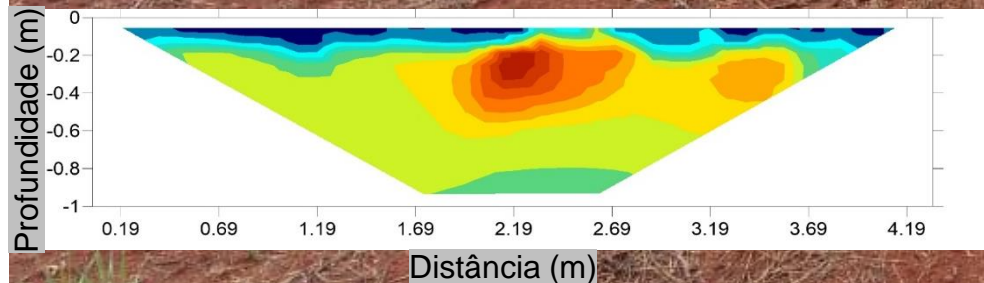
André Guarçoni Martins | Araina Hulmann Batista | Beno Wendling
Marcos Gervasio Pereira | Wedisson Oliveira Santos
(Editores)



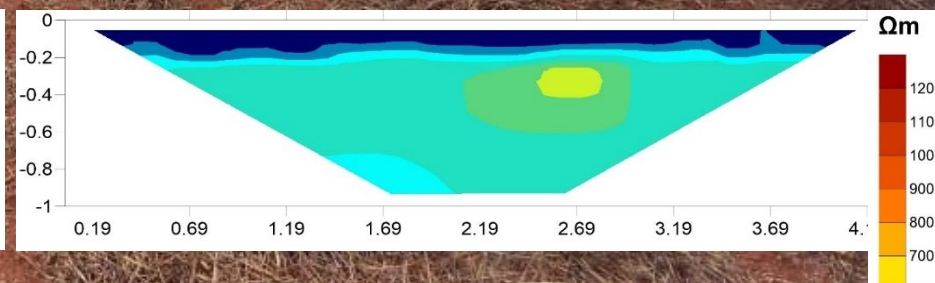
Capítulo 9



Peixoto, DS, Silva, BM, Melo, LBB, Moreira, SG.
Soil electrical resistivity as indicator of changes caused by occasional tillage in continuous no-tillage system. 5th Brazilian Soil Physics Meeting. May 26 – 29, 2019 – Lavras, MG.



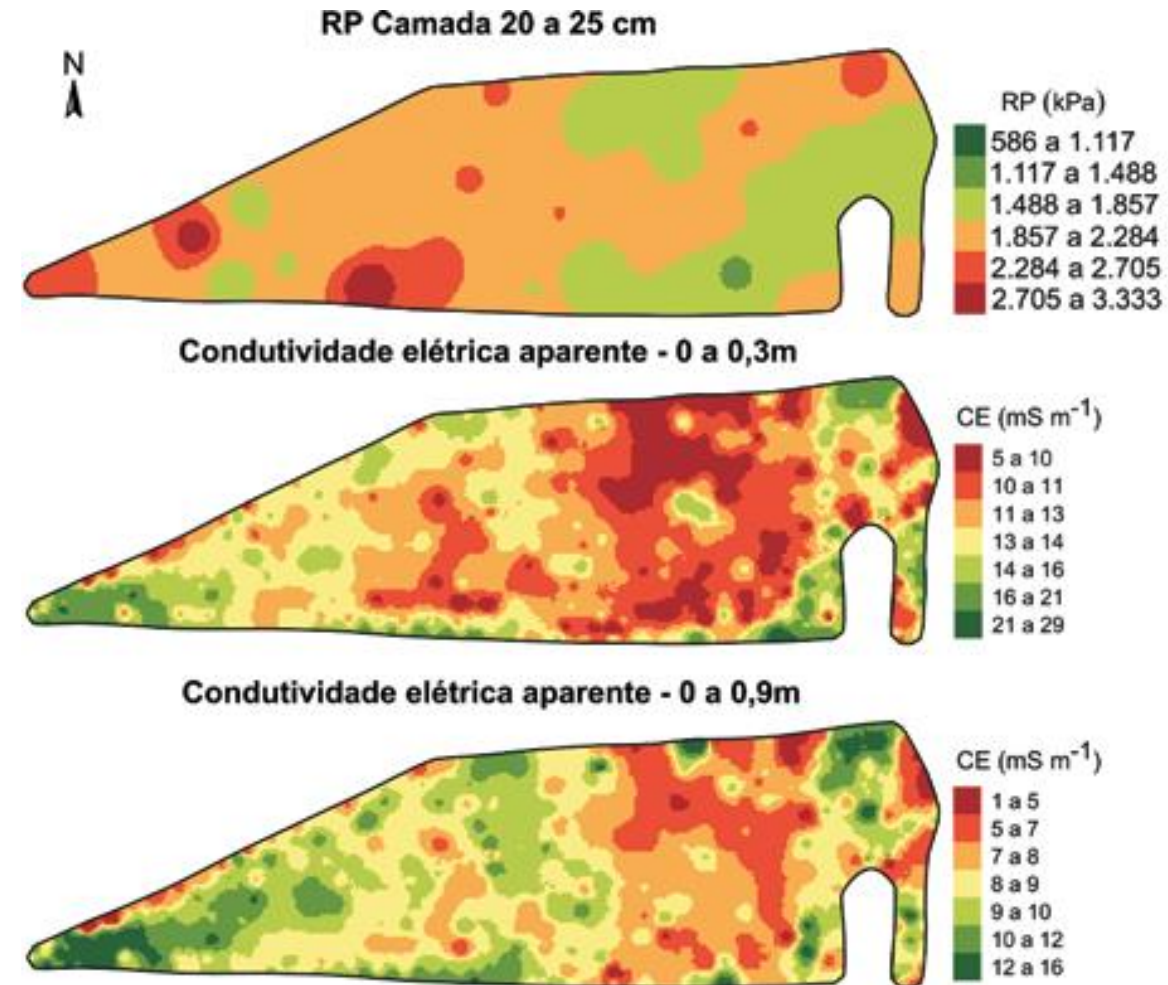
Plantio direto após subsolagem



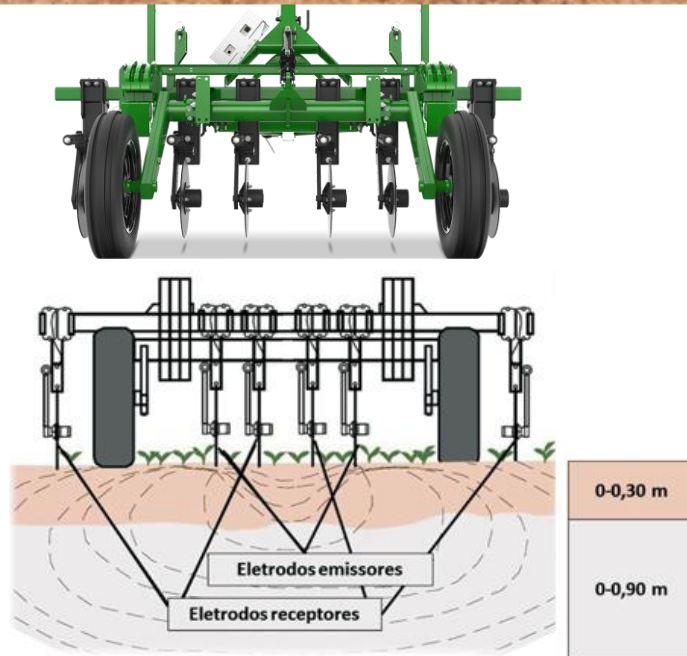
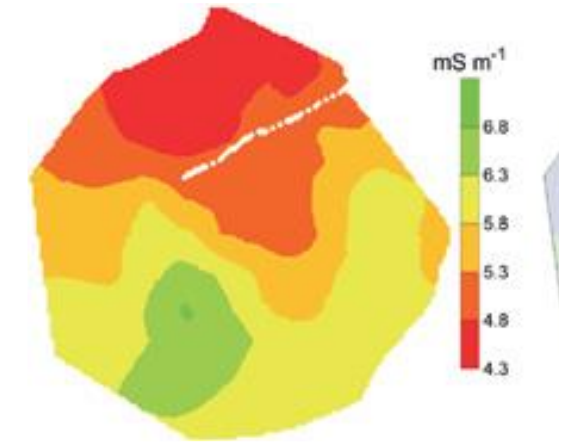
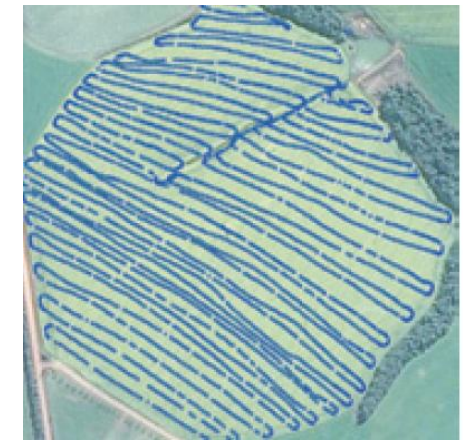
Plantio Direto contínuo compactado

Avaliação da compactação do solo

Uso de RP e sensores de condutividade elétrica combinados



Uso de sensores de condutividade elétrica para definição de Zonas Homogêneas de Manejo



Uso da resistividade elétrica para monitoramento da compactação

Soil & Tillage Research 208 (2021) 104876



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

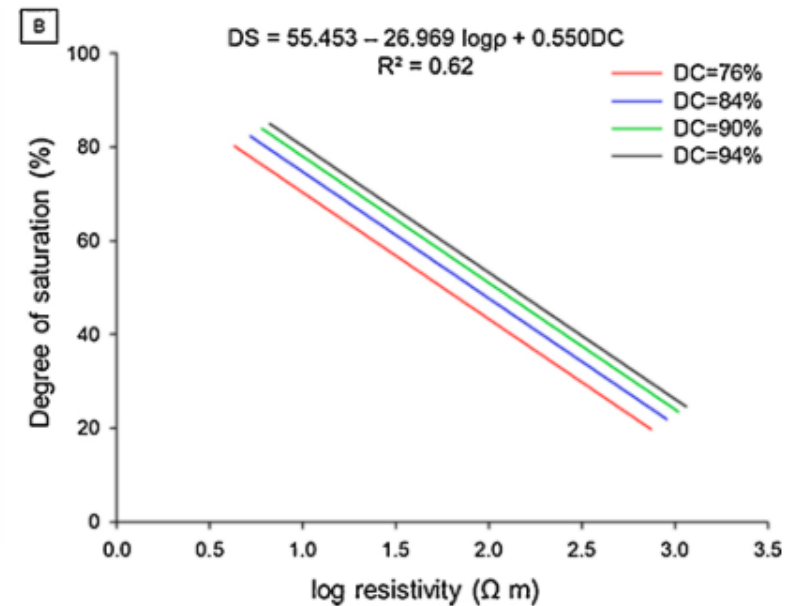
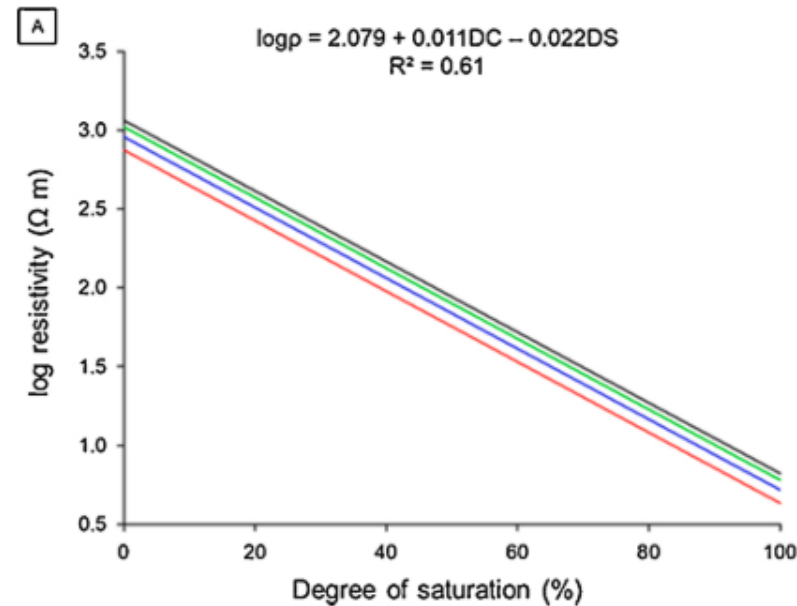
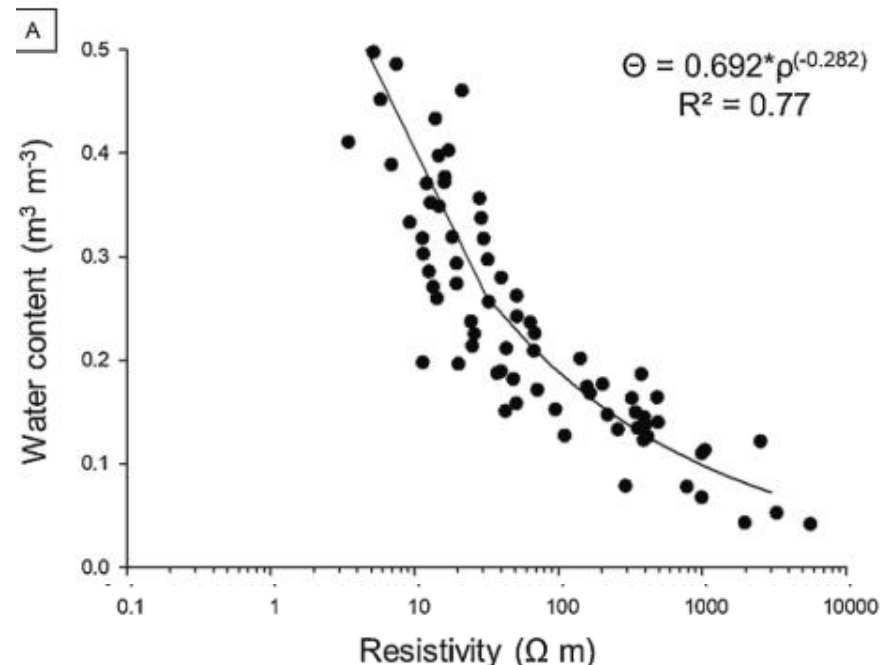
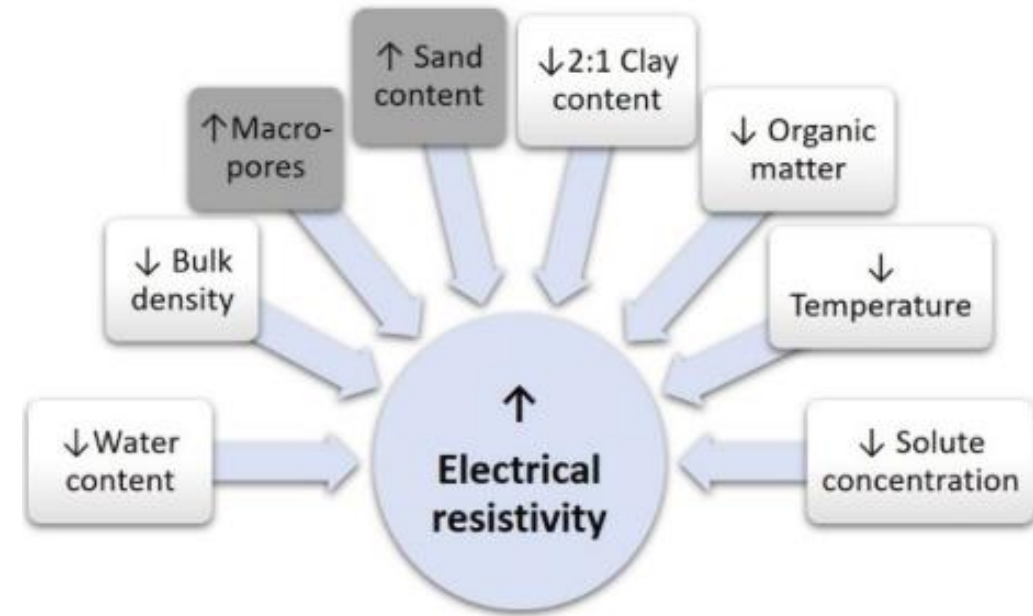
Soil & Tillage Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/still



Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol

Laura Beatriz Batista de Melo, Bruno Montoani Silva*, Devison Souza Peixoto, Thayná Pereira Azevedo Chiarini, Geraldo César de Oliveira, Nilton Curi



Efeito do grau de compactação sobre a resistividade elétrica do solo

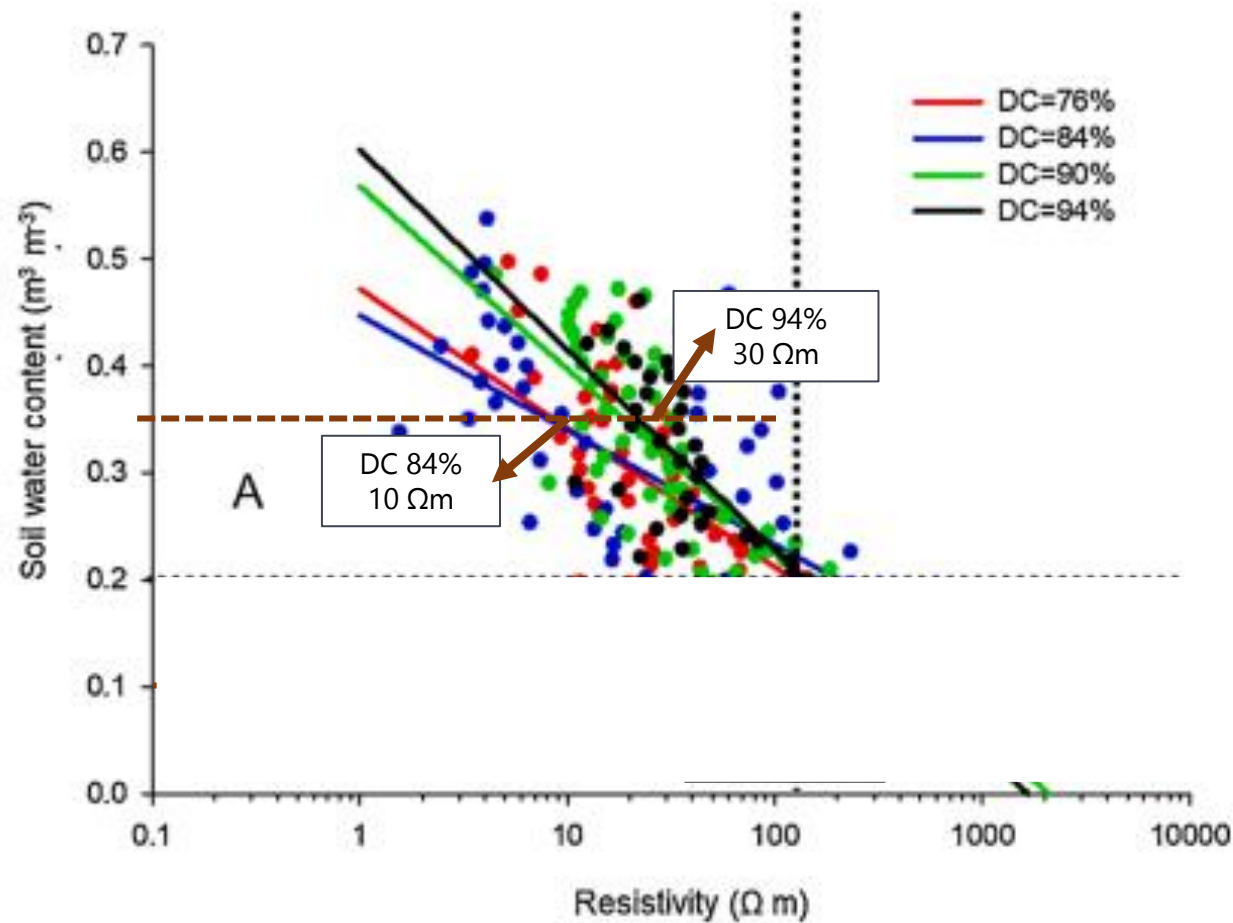


Fig. 3: Relationship between soil water content and soil electrical resistivity by means of logarithmic models (lines) and observed values (points) in accordance with the degree of compaction (DC) in a Typical Hapludox of clay texture. The horizontal line drawn near $0 = 0.20 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ represents the point at which there is a reversal in the θ - ρ relationship, which is influenced by the DC, thus delimiting regions A and B.

➤ Correlação entre propriedades do solo e resistividade elétrica do solo

Porosidade total
Grau de compactação
Densidade do solo

Resistividade
p/ umidade <20% v/v

-0.293

-0.433

-0.439

Resistividade
p/ umidade >20% v/v

-0.368

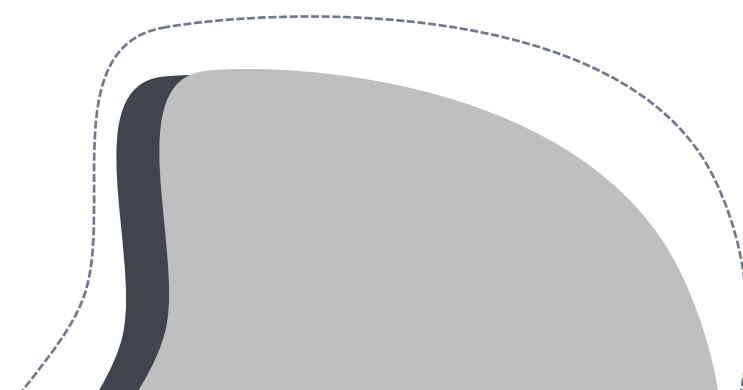
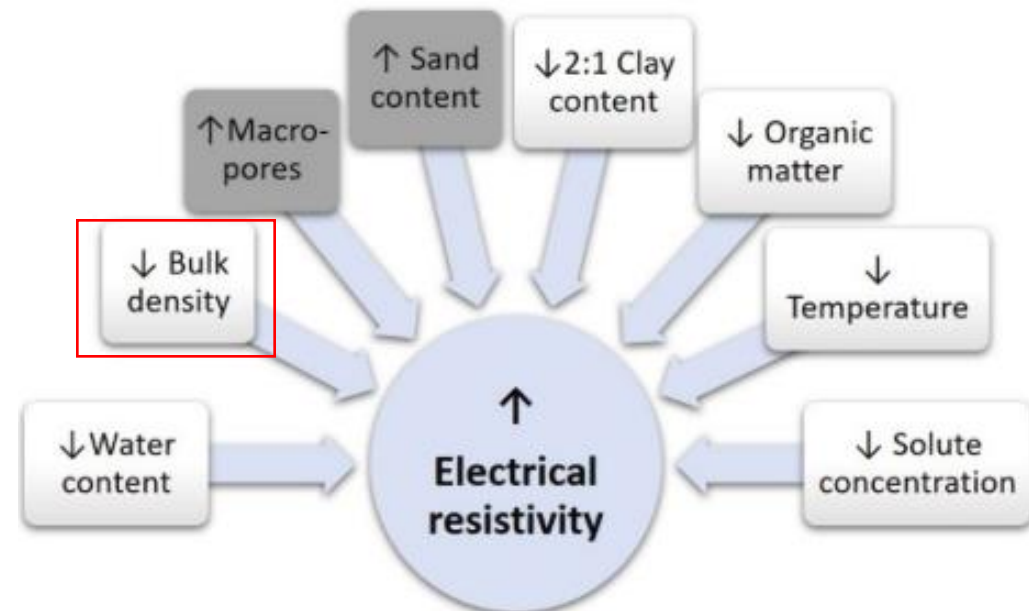
0.058

0.055

Padrão B

Padrão A

Diagnóstico da compactação deve ser realizado em condição de solo menos úmido



Considerações finais

O esforço amostral para análise qualidade física do solo e umidade volumétrica é elevado e oneroso;

Os sensores proximais são alternativas com bom custo-benefício, maior agilidade, não destroem o alvo e possibilitam de aumento de área amostrada e repetições no tempo;

O procedimento de calibração dos sensores é imperativo para sua adequada utilização!

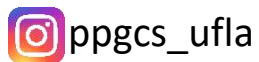
Demanda por produtores quanto a soluções aos desafios decorrentes do manejo físico inadequado é crescente;

Grato pela atenção!

Às pessoas e instituições de apoio a pesquisa, agradeço!



Convite:



Pós-Graduação
**Ciência
do Solo**

Dúvidas?

Lançamento:

FÍSICA DO SOLO



Moacir de Souza Dias Junior
Mozart Martins Ferreira
Geraldo César de Oliveira

Bruno Montoani Silva
Paula Cristina Caruana Martins
Érika Andressa da Silva



EDITORA
UFPA



**Entusiastas
do Solo**

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
brunom.silva@ufla.br

Correlation between soil physical and chemical properties and ECa and yield of yam for TDa 00/00194.

Soil Properties	ECa			Yield		
	Soil depth (cm)					
	0 – 15	15 – 30	30 – 45	0 – 15	15 – 30	30 – 45
Clay	0.95**	0.55*	0.63*	0.731**	0.59*	0.26 ^{NS}
Silt	0.55*	0.62*	0.47 ^{NS}	0.64*	0.20 ^{NS}	0.61*
Sand	- 0.71**	- 0.55*	- 0.39 ^{NS}	- 0.73**	0.44 ^{NS}	0.49 ^{NS}
BD	- 0.71**	- 0.52*	- 0.48 ^{NS}	- 0.79**	0.50 ^{NS}	0.25 ^{NS}
FC	0.85**	0.37 ^{NS}	0.44 ^{NS}	0.76**	0.33 ^{NS}	0.16 ^{NS}
Porosity	0.89**	0.64*	0.38 ^{NS}	0.95**	0.61*	0.59*
OM	0.93**	0.59*	0.26 ^{NS}	0.72**	0.55*	0.63*
Na	0.85**	0.20 ^{NS}	0.61*	0.78**	0.62*	0.47 ^{NS}
Mn	0.36 ^{NS}	0.44 ^{NS}	0.49 ^{NS}	0.62*	0.55*	0.39 ^{NS}
Fe	0.435 ^{NS}	0.50 ^{NS}	0.25 ^{NS}	0.61*	0.52*	0.48 ^{NS}
Cu	0.38 ^{NS}	0.33 ^{NS}	0.16 ^{NS}	0.74**	0.37 ^{NS}	0.44 ^{NS}
Zn	0.75**	0.61*	0.59*	0.60*	0.64*	0.38 ^{NS}
Av. P	.86**	0.18 ^{NS}	0.28 ^{NS}	0.86**	0.18 ^{NS}	0.25 ^{NS}
Ph	0.35 ^{NS}	0.36 ^{NS}	0.24 ^{NS}	0.35 ^{NS}	0.36 ^{NS}	0.16 ^{NS}
EA	0.62*	0.34 ^{NS}	0.28 ^{NS}	0.62*	0.34 ^{NS}	0.59*
Ca	0.79**	0.63*	0.25 ^{NS}	0.55*	0.63*	0.28 ^{NS}
Mg	0.79**	0.44 ^{NS}	0.30 ^{NS}	0.59*	0.44 ^{NS}	0.24 ^{NS}
K	0.85**	0.20 ^{NS}	0.52*	0.68*	0.20 ^{NS}	0.28 ^{NS}
TN	0.79**	0.28 ^{NS}	0.47 ^{NS}	0.52*	0.28 ^{NS}	- 0.48 ^{NS}
SHC	0.87**	0.60*	0.364 ^{NS}	0.91**	0.60*	0.44 ^{NS}

OM: Organic Matter, EA: Exchangeable Acidity, BD: Bulk Density, FC: Field Capacity, TN: Total Nitrogen, SHC: Saturated Hydraulic Conductivity.

** = Significant (test for $|r| = 0$) at the $P \leq 0.01$ level.

* = Significant (test for $|r| = 0$) at the $P \leq 0.05$ level. NS = Not Significant.

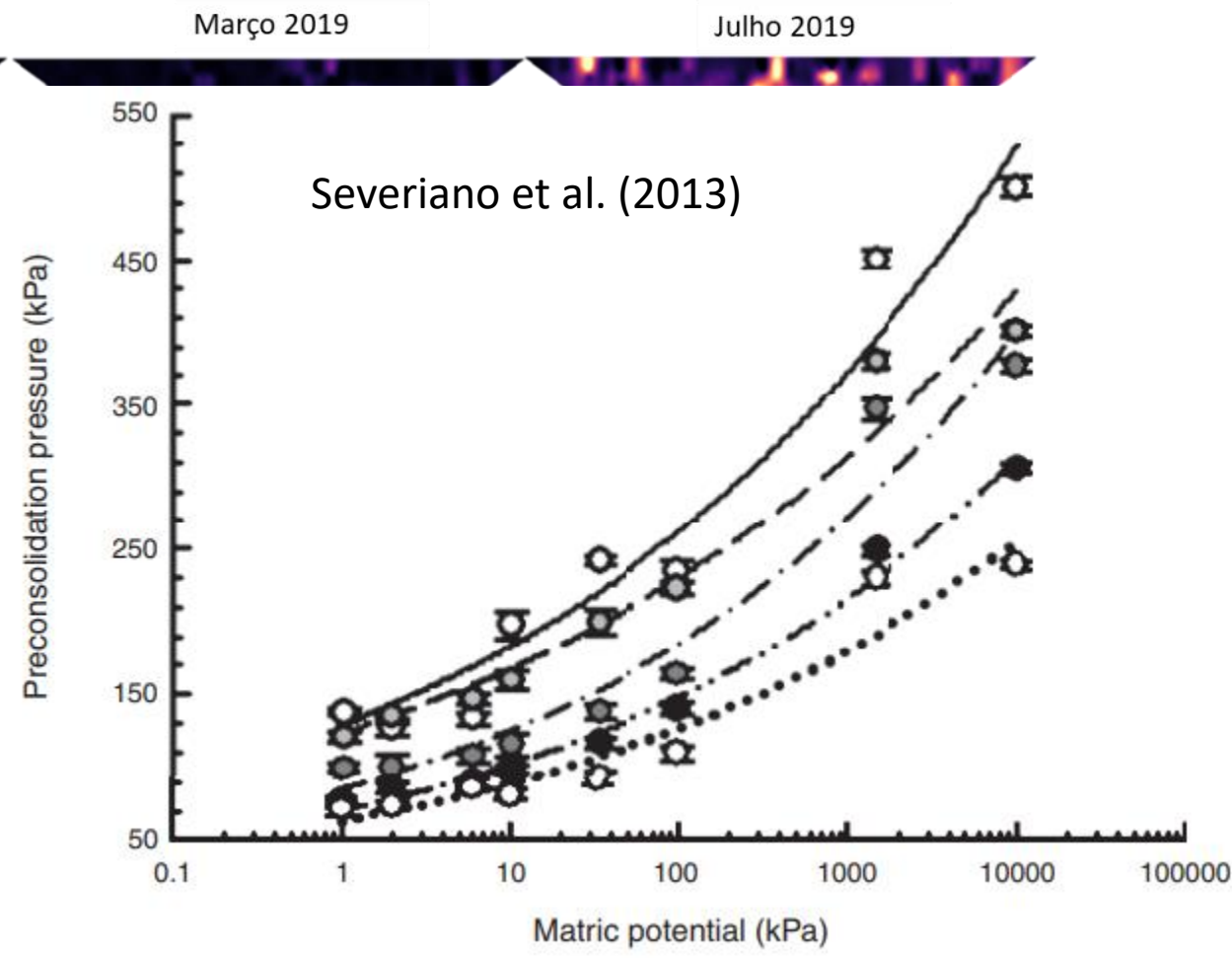
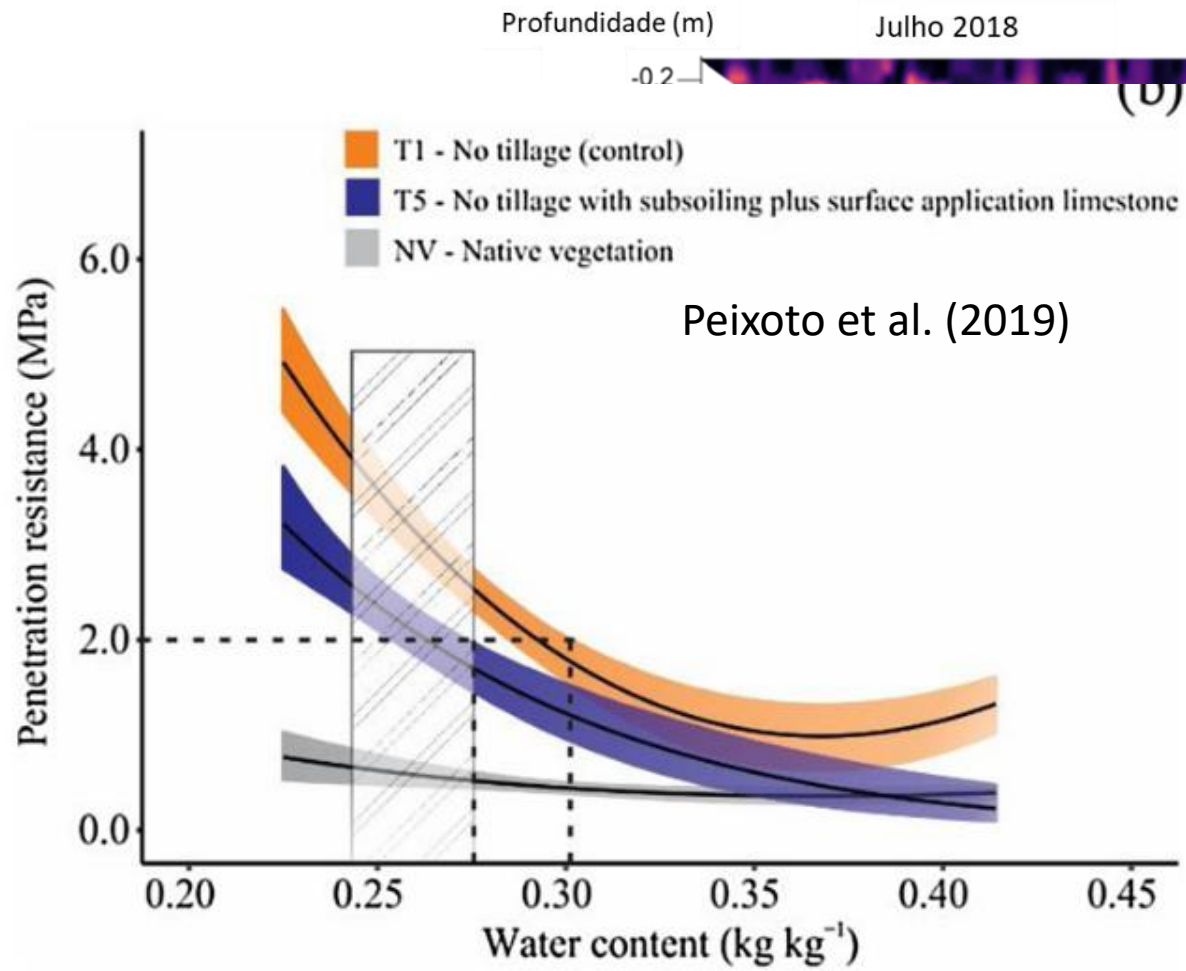
Fonte: Akanji; Oshunsanya; Alomran, 2018.

Neural models characteristics.

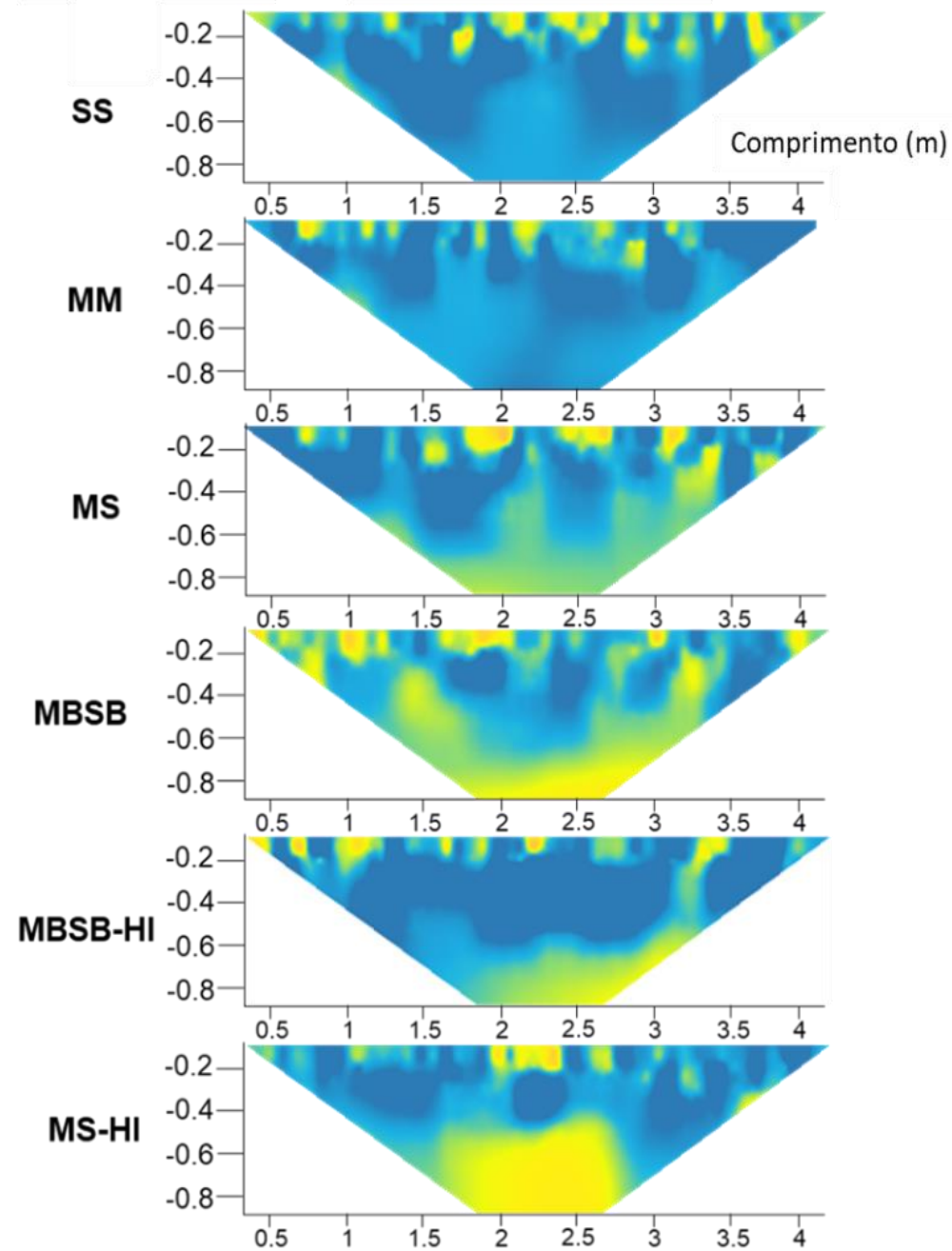
Input Parameters	Output Parameter	ANN Type	ANN Structure	R
EC _a 0.5; MS 0.5; EC _a 1; MS 1	soil compaction (0–0.5 m)	MLP	4-17-1	0.769
EC _a 0.5; MS 0.5; EC _a 1; MS 1	soil compaction (0.4–0.5 m)	RBF	4-14-1	0.826
EC _a 0.5; MS 0.5	soil compaction (0–0.5 m)	MLP	2-20-1	0.877
EC _a 0.5; MS 0.5	soil compaction (0.4–0.5 m)	MLP	2-19-1	0.846
EC _a 0.5; MS 0.5	soil compaction (0–0.4 m)	RBF	2-17-1	0.700
EC _a 0.5; MS 0.5	soil compaction (0–0.3 m)	RBF	2-24-1	0.446
EC _a 0.5; MS 0.5	soil compaction (0–0.2 m)	RBF	2-10-1	0.521
EC _a 0.5; MS 0.5	soil compaction (0–0.1 m)	RBF	2-20-1	0.615
EC _a 0.5; MS 0.5	soil compaction (0.3–0.4 m)	RBF	2-33-1	0.662
EC _a 0.5; MS 0.5	soil compaction (0.2–0.3 m)	MLP	2-12-1	0.594
EC _a 0.5; MS 0.5	soil compaction (0.1–0.2 m)	RBF	2-36-1	0.476
EC _a 0.5; EC 1	soil compaction (0–0.5 m)	RBF	2-27-1	0.759
EC _a 0.5; EC 1	soil compaction (0.4–0.5 m)	RBF	2-11-1	0.732
EC _a 0.5; EC 1	soil compaction (0–0.4 m)	RBF	2-28-1	0.656
EC _a 0.5; EC 1	soil compaction (0–0.3 m)	RBF	2-21-1	0.517
EC _a 0.5; EC 1	soil compaction (0–0.2 m)	RBF	2-15-1	0.433
EC _a 0.5; EC 1	soil compaction (0–0.1 m)	MLP	2-16-1	0.501
EC _a 0.5; EC 1	soil compaction (0.3–0.4 m)	RBF	2-21-1	0.648
EC _a 0.5; EC 1	soil compaction (0.2–0.3 m)	RBF	2-27-1	0.470
EC _a 0.5; EC 1	soil compaction (0.1–0.2 m)	RBF	2-12-1	0.471
MS 0.5; MS 1	soil compaction (0–0.5 m)	RBF	2-10-1	0.725
MS 0.5; MS 1	soil compaction (0.4–0.5 m)	MLP	2-39-1	0.790

The input parameters: Apparent soil electrical conductivity, 0.5 m; magnetic susceptibility, 0.5 m; apparent soil electrical conductivity, 1 m; and magnetic susceptibility, 1 m are marked in the table as EC_a 0.5, MS 0.5, EC_a 1, and MS 1, respectively.

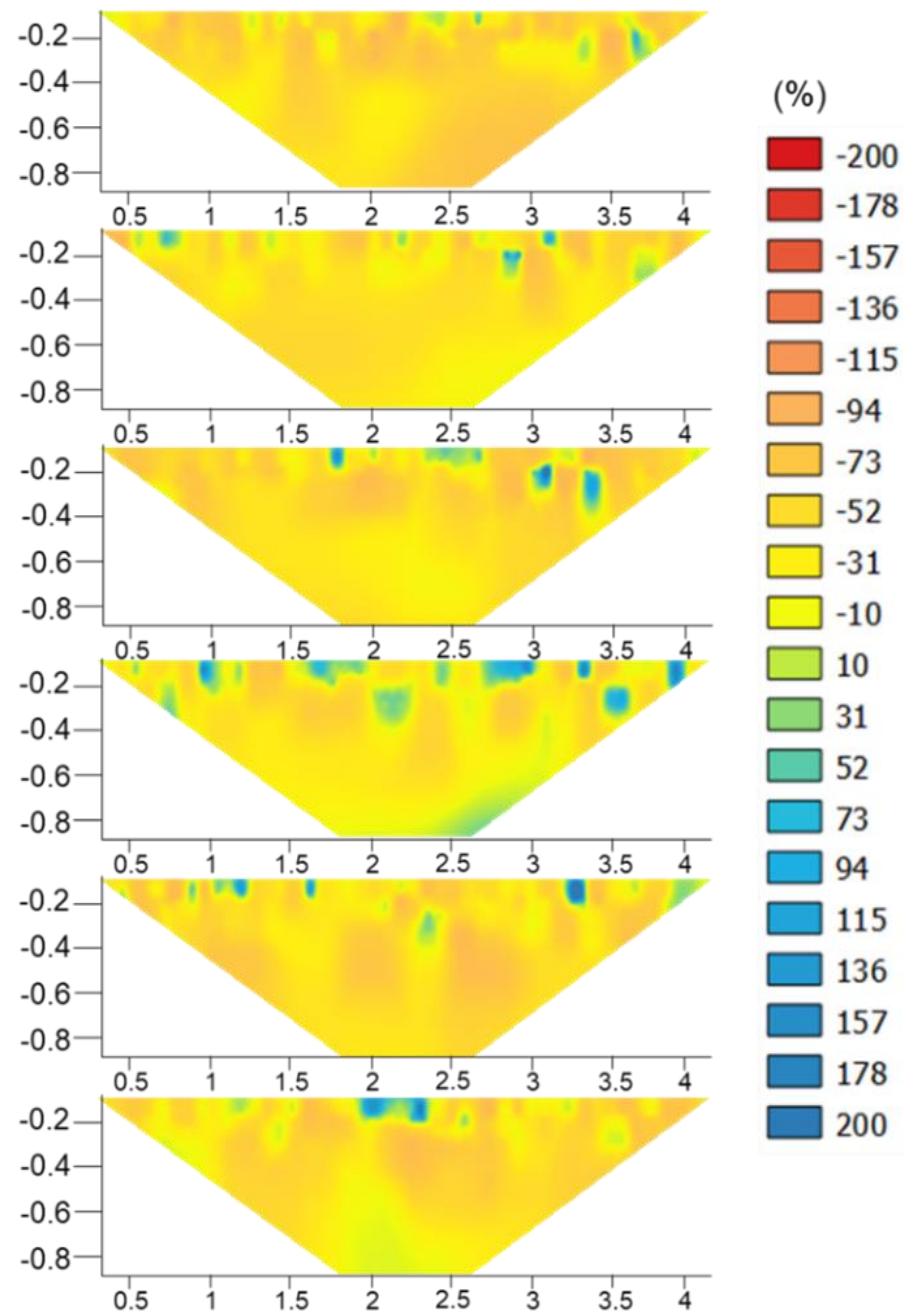
RESULTADOS E DISCUSSÃO



Profundidade (m) Julho 2018 – Março 2019



Março 2019 – Julho 2019



RESULTADOS E DISCUSSÃO

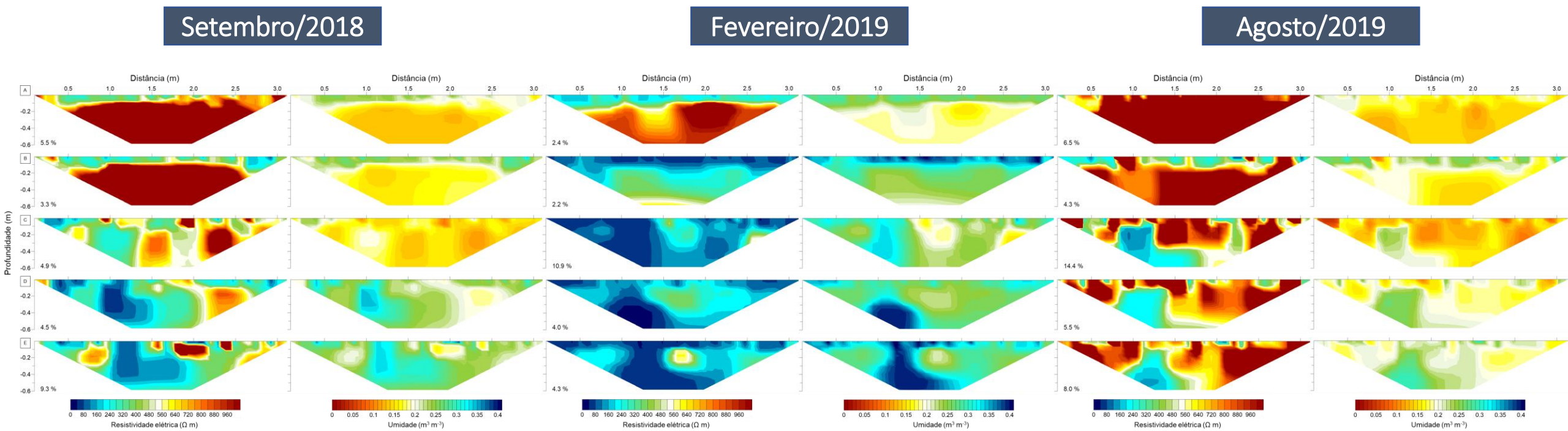
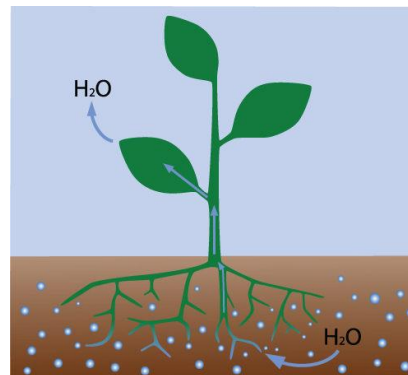


Figura 1 - Distribuição espacial da resistividade elétrica invertida (mapas da esquerda) e da umidade volumétrica (mapas da direita) para cada época de avaliação e situação avaliada: (a) mata (b) entrelinha coberta com braquiária (c) citros sob CSC (d) citros sob ST (e) citros sob CI.

EA médio: 4.76% a 7.68%



RESULTADOS E DISCUSSÃO

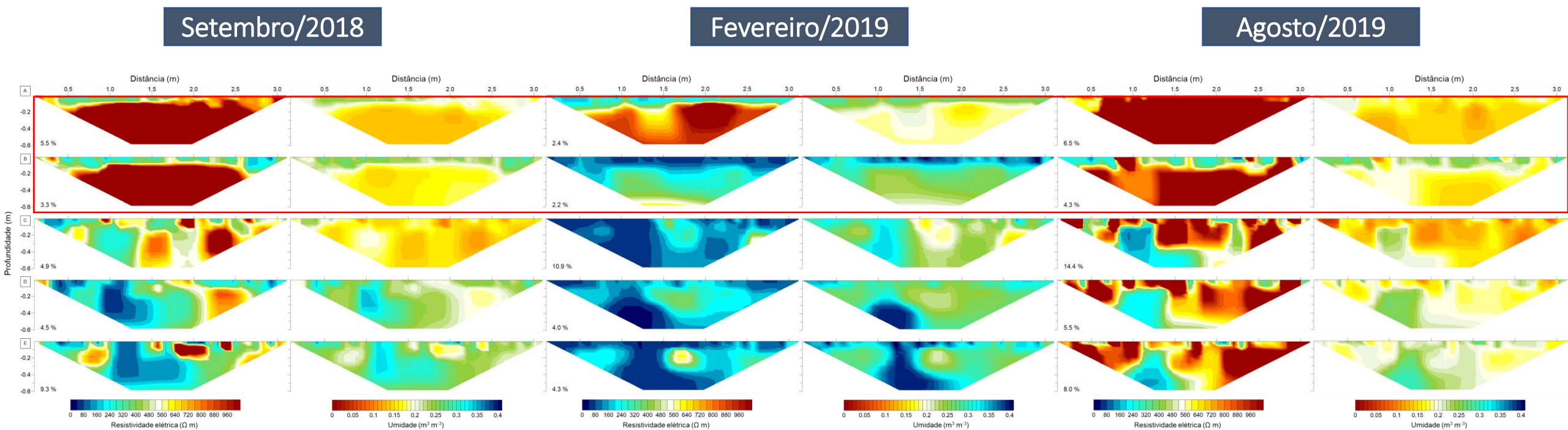


Figura 1 - Distribuição espacial da resistividade elétrica invertida (mapas da esquerda) e da umidade volumétrica (mapas da direita) para cada época de avaliação e situação avaliada: (a) mata (b) entrelinha coberta com braquiária (c) citros sob CSC (d) citros sob ST (e) citros sob CI.

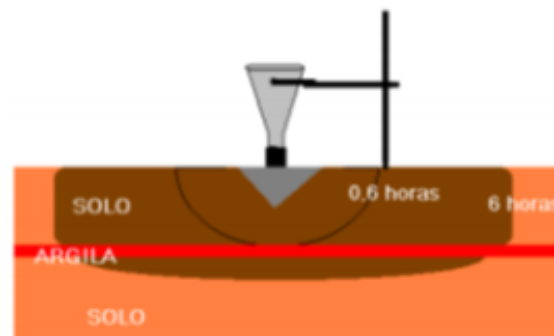


Tabela 2 – Valores de condutividade hidráulica saturada (K_s) para áreas avaliadas

Situação	Camada (m)					
	0-0.10			0.35-0.45		
	Posição					
	E	S	D	E	S	D
Mata		10.15			7.18	
Entrelinha		2.67			2.53	
CSC	7.39	20.75	23.46	27.23	15.45	7.10
ST	7.37	12.45	13.21	3.96	11.28	12.37
CI	9.85	17.84	15.80	24.52	33.59	9.72

RESULTADOS E DISCUSSÃO

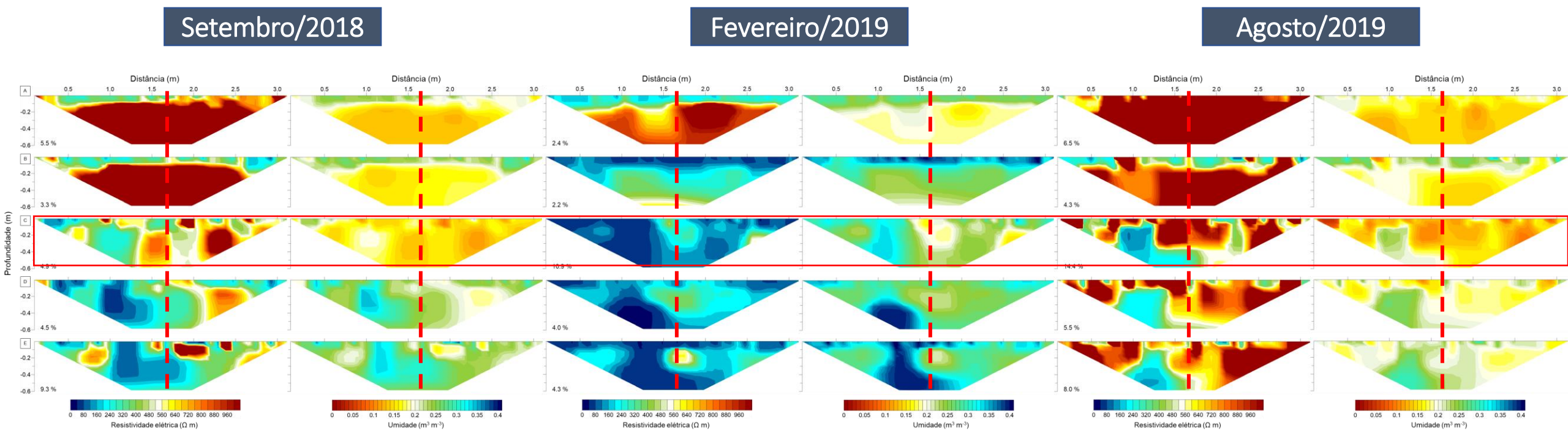


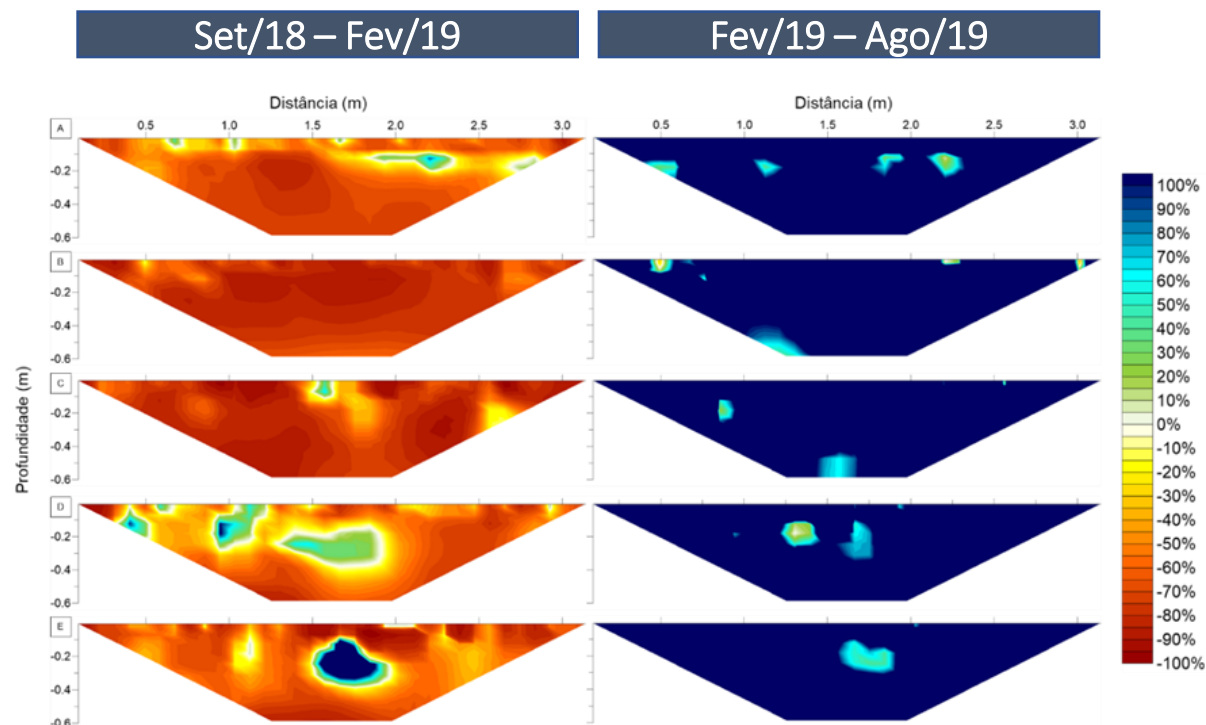
Figura 1 - Distribuição espacial da resistividade elétrica invertida (mapas da esquerda) e da umidade volumétrica (mapas da direita) para cada época de avaliação e situação avaliada: (a) mata (b) entrelinha coberta com braquiária (c) citros sob CSC (d) citros sob ST (e) citros sob CI.

CSC: maior ρ e menor θ : maior desenvolvimento radicular (Benevenute 2019)

Centro do transecto: maior ρ e menor θ : maior desenvolvimento radicular (Benevenute 2019)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variação da ρ



Variação da θ

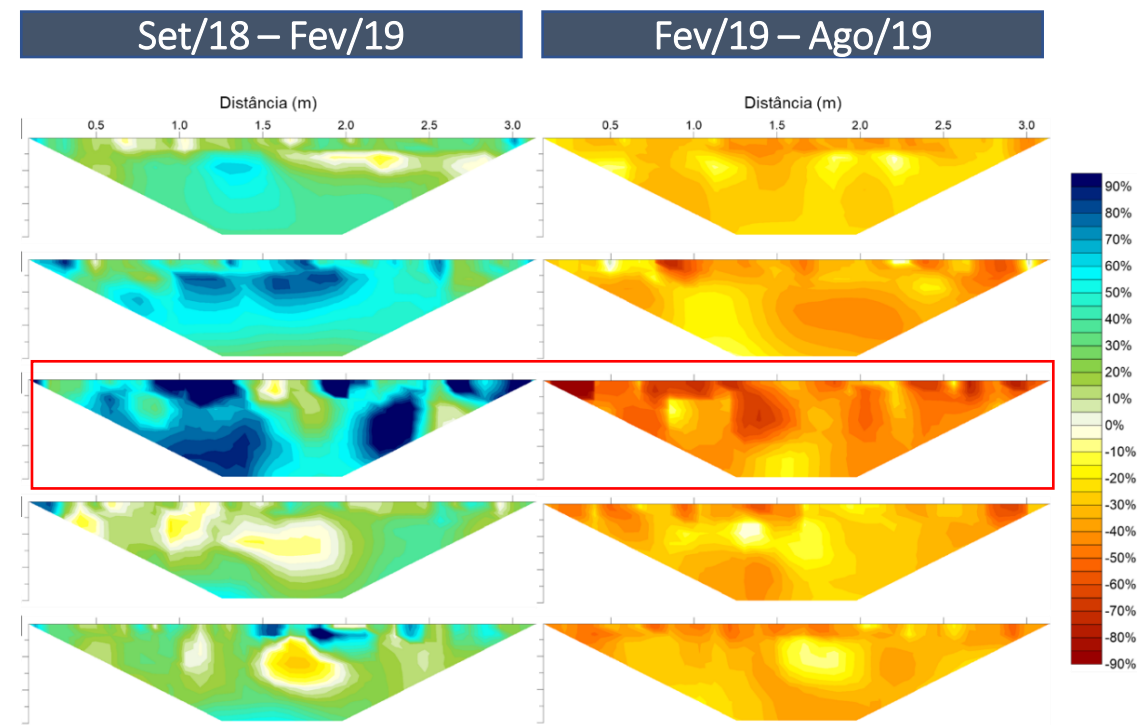
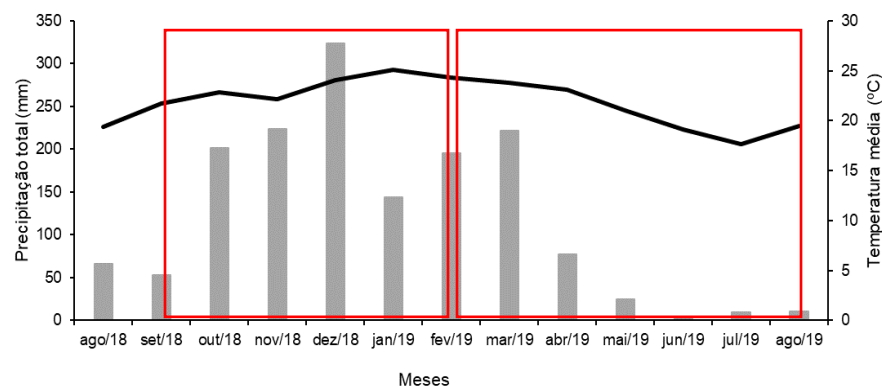


Figura 2 - Variação percentual da resistividade elétrica e umidade do solo entre setembro/2018 e fevereiro/2019 (mapas da esquerda) e entre fevereiro/2019 e agosto/2019 (mapas da direita) para cada situação avaliada: (a) mata (b) entrelinha coberta com braquiária (c) citros sob CSC (d) citros sob ST (e) citros sob CI.



CSC: maior variação de θ : maior desenvolvimento radicular

Maior produtividade das plantas sob CSC (23.5 kg/planta), diferindo de ST (10.0 kg/planta) e CI (10.5 kg/planta) (Benevenuto, 2019).