



Mestrado Profissional em
Tecnologia de Processos
Sustentáveis



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG-CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Jose Rodrigo dos Santos Silva

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE SISTEMA RADICULAR NO SOLO ATRAVÉS DE
MÉTODO DE PROSPECÇÃO GEOELÉTRICO**

Goiânia, 2016

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG-CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Jose Rodrigo dos Santos Silva

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE SISTEMA RADICULAR NO SOLO ATRAVÉS DE
MÉTODO DE PROSPECÇÃO GEOELÉTRICO**

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPGTGS- IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Tecnologia de Redução e Gerenciamento de Resíduos.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria Carolina da Cruz Miranda
Coorientador: Prof. Wesley Pacheco Calixto

Goiânia, 2016

S5861a Silva, Jose Rodrigo dos Santos.

Análise da influência do sistema radicular no solo através de método de prospecção geométrico / José Rodrigo dos Santos Silva. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2016.
83 f. : il.

Orientadora: Profª. Drª. Maria Carolina da Cruz Miranda.
Coorientador: Prof. Wesley Pacheco Calixto.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Condutividade elétrica – solos – sistema radicular. 2. Prospecção geométrica. I. Miranda, Maria Carolina da Cruz (orientadora). II. Calixto, Wesley Pacheco (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 631.4



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

ALUNO
JOSÉ RODRIGO DOS SANTOS SILVA

Título da Dissertação

“ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE SISTEMA RADICULAR NO SOLO
ATRAVÉS DE MÉTODO DE PROSPECÇÃO GEOELÉTRICO ”

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG
(PPGTPS - IFG). - Dissertação de Mestrado
Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de
Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa:
Tecnologia de Redução e Gerenciamento de
Resíduos

Prof(a). Dra(a) MARIA CAROLINA DA CRUZ MIRANDA (orientadorA IFG)

Maria Carolina da Cruz Miranda

Prof(a). Dr(a). WESLEY PACHECO CALIXTO (coorientador/avaliador IFG)

Prof(a). Dr(a). MARCELO GONÇALVES NARCISO (avaliador externo EMBRAPA)

Marcelo Gonçalves Narciso

Prof(a). Dr(a). FERNANDO DCHIMIDT (suplente)

Fernando Dchmidt

Aprovado em: 22/03/2016

À minha mãe Maria das Graças, guerreira incansável, que lutou para que eu pudesse ter sucesso na vida e me tornasse uma pessoa do bem. Esta dissertação não somente é resultado do meu esforço, mas também da sua dedicação por mim. À minha amada Luciana Helena, que já a considero como esposa, mas que será sempre minha eterna namorada. Ela me ensina, a cada dia, mais sobre o verdadeiro amor. Com ela pude finalmente enxergar que o amor tudo sofre, tudo crê, tudo espera, tudo suporta. O amor que nunca falha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me abençoou e me guiou durante a execução deste trabalho, que me fez superar todos os obstáculos.

A professora e orientadora Maria Carolina da Cruz Miranda e ao professor e coorientador Wesley Pacheco Calixto.

Aos professores do Núcleo de Estudos e Pesquisas Experimentais e Tecnológicas (NExT/IFG).

Aos colegas Antônio Marcelino, Fabiana, Francisco, Michelle e Taynara, Roberta. Pela ajuda nos estudos e nos experimentos em campo, minha eterna gratidão.

Aos colegas do programa de mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis (PPTPS/FG), que se colocaram dispostos a me auxiliar.

À EMBRAPA, na pessoa do Dr. Marcelo Goncalves Narciso, pelo apoio na consecução das atividades em campo e de laboratório referente a caracterização das amostras de solo e pela disponibilização de parte do campo de pesquisa para os experimentos.

Agradeço aos membros da banca examinadora, que dispuseram do seu tempo para avaliar este trabalho.

E finalmente agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pela bolsa de estudos, que foi de grande auxílio para mim.

“Mas aqueles que esperam no Senhor renovam as suas forças. Voam bem alto como águias; correm e não ficam exaustos, andam e não se cansam”.

(Isaías 40:31)

TÍTULO: Análise da influência de sistema radicular no solo através de método de prospecção geométrico

AUTOR: Jose Rodrigo dos Santos Silva

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Maria Carolina da Cruz Miranda

COORIENTADOR: Prof. Wesley Pacheco Calixto

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo da relação entre a condutividade elétrica aparente do solo e o sistema radicular, levando em consideração a influência do teor de umidade do solo. O intuito é utilizar a condutividade elétrica como ferramenta de mapeamento do sistema radicular. Os valores da condutividade elétrica são obtidos através de métodos de prospecção geométricos que detectam os efeitos produzidos pelo fluxo de corrente elétrica no solo. Utiliza-se o arranjo de Wenner e a técnica do Caminhamento Elétrico para coleta dos dados. Realiza-se medições da condutividade elétrica em recipientes contendo solo cultivado com *Pennisetum glaucum L.* e em campo com solo cultivado com *Zea mays*, *Phaseolus vulgaris L.*, *Sorghum bicolor L.* Moench e *Pennisetum glaucum L.* Os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

PALAVRAS-CHAVE: CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE, SOLOS, SISTEMA RADICULAR, PROSPECÇÃO GEOELÉTRICA.

TITLE: Analysis of the influence of the root system in the soil through geoelectrical prospecting method

AUTHOR: Jose Rodrigo dos Santos Silva

ADVISER: Prof^a. Dr^a. Maria Carolina da Cruz Miranda

CO-ADVISER: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto

ABSTRACT

This work presents the study of the relationship between the apparent electrical conductivity of the soil and root system, taking into account the influence of soil moisture content. The aim is to use the electrical conductivity as mapping tool of the root system in soil. The values of electrical conductivity are obtained by geoelectric prospecting methods that detect the effects produced by the flow of electric current in the soil. It uses the Wenner arrangement and technical Lateral Profiling for data collection. Carried out measurements of electrical conductivity in containers of soil cultivated with *Pennisetum glaucum L.* and in field with cultivated soil with *Zea mays*, *Phaseolus vulgaris L.*, *Sorghum bicolor L. Moench* and *Pennisetum glaucum L.* The results are presented and discussed.

KEYWORDS: APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY, SOILS, SYSTEM ROOT, GEOELECTRICAL PROSPECTING.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito da compactação do solo no sistema radicular.	24
Figura 2 – Métodos destrutivos para estudos do sistema radicular.	29
Figura 3 – Método da trincheira.	29
Figura 4 – Método do monólito.	30
Figura 5 – Técnica do minirhizotron.	32
Figura 6 – Técnica da Microtomografia Computadorizada de Raio X.	33
Figura 7 – Caminho da corrente elétrica do solo.	37
Figura 8 – Método dos três eletrodos.	38
Figura 9 – Arranjo do eletrodo central.	40
Figura 10 – Arranjo de Lee.	41
Figura 11 – Arranjo de Wenner.	42
Figura 12 – Arranjo de Schlumberger.	43
Figura 13 – Método do Caminhamento Elétrico.	44
Figura 14 – Ilustração dos recipientes de PEAD com suas dimensões, utilizados no experimento de bancada.	47
Figura 15 – Ilustração dos recipientes com o esquema de coleta de dados de resistência elétrica aparente e umidade do solo.	48
Figura 16 – Posição e delimitação da região para aplicação do método do Caminhamento Elétrico.	49
Figura 17 – Recipientes de PEAD utilizados para o cultivo de plantas de milho (<i>Pennisetum glaucum L.</i>).	51
Figura 18 – Variação da condutividade elétrica aparente do solo σ_a na profundidade P_1 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (R_1 e R_2).	53
Figura 19 – Raízes de milho após 30 dias da semeadura.	54
Figura 20 – Variação da condutividade elétrica aparente do solo σ_a na profundidade P_2 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (R_1 e R_2).	54
Figura 21 – Variação da condutividade elétrica aparente do solo σ_a na profundidade P_3 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (R_1 e R_2).	55
Figura 22 – Raízes das plantas de milho após 60 dias da semeadura.	56
Figura 23 – Variação média da condutividade elétrica aparente do solo σ_a nas profundidades P_1 , P_2 e P_3 dos recipientes cultivados com plantas de milho.	57
Figura 24 – Variação média da condutividade elétrica aparente do solo σ_a nas profundidades P_1 , P_2 e P_3 dos recipientes de referência.	59
Figura 25 – Variação média da condutividade elétrica aparente do solo σ_a nas profundidades P_1 , P_2 e P_3 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (curvas com linhas tracejadas).	59
Figura 26 – Variação do teor de umidade do solo w na profundidade P_1 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (R_1 e R_2).	62
Figura 27 – Variação do teor de umidade do solo w na profundidade P_2 dos recipientes cultivados com plantas de milho e de referência (R_1 e R_2).	63
Figura 28 – Variação do teor de umidade do solo w na profundidade P_3 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (R_1 e R_2).	64
Figura 29 – Variação média do teor de umidade do solo w nas profundidades P_1 , P_2 e P_3 dos recipientes cultivados com plantas de milho.	66
Figura 30 – Variação média do teor de umidade do solo w nas profundidades P_1 , P_2 e P_3 dos recipientes de referência.	66

Figura 31 – Variação média do teor de umidade do solo w nas profundidades P ₁ , P ₂ e P ₃ dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (curvas com linhas tracejadas).	67
Figura 32 – Correlação da massa radicular com a condutividade elétrica aparente do solo σ_a	68
Figura 33 – Esquema de coleta de dados para o mapeamento do sistema radicular no solo através da σ_a e de acordo com o método do Caminhamento Elétrico.	69
Figura 34 – Distribuição espacial da condutividade elétrica aparente do solo σ_a para o mapeamento do sistema radicular no solo.	70
Figura 35 – Esquema de coleta de dados para o mapeamento do sistema radicular de diferentes culturas no solo, através da σ_a e de acordo com o método do Caminhamento Elétrico. ..	71
Figura 36 – Mapas de distribuição da condutividade elétrica aparente do solo σ_a	74
Figura 37 – Mapa de distribuição da condutividade elétrica aparente do solo σ_a com 8 semanas após a semeadura das culturas.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios de condutividade elétrica aparente do solo σ_a coletados na profundidade P_1 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência.	52
Tabela 2 – Valores médios de condutividade elétrica aparente do solo σ_a coletados na profundidade P_2 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência.	52
Tabela 3 – Valores médios de condutividade elétrica aparente do solo σ_a coletados na profundidade P_3 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência.	52
Tabela 4 – Variação dos valores médios de condutividade elétrica aparente do solo σ_a dos recipientes cultivados com plantas de milho.	56
Tabela 5 – Variação dos valores médios de condutividade elétrica aparente do solo σ_a dos recipientes de referência.	56
Tabela 6 – Valores médios de teor de umidade do solo w coletados na profundidade P_1 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência.	60
Tabela 7 – Valores médios de teor de umidade do solo w coletados na profundidade P_2 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência.	60
Tabela 8 – Valores médios de teor de umidade do solo w coletados na profundidade P_3 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência.	61
Tabela 9 – Variação dos valores médios de teor de umidade do solo w dos recipientes cultivados com plantas de milho.	64
Tabela 10 – Variação dos valores médios de teor de umidade do solo w dos recipientes de referência.	65
Tabela 11 – Massa radicular em cada profundidade dos recipientes cultivados escolhidos aleatoriamente durante o experimento.	68
Tabela 12 – Comparação dos valores de massa radicular com os valores médios de condutividade elétrica aparente do solo σ_a dos recipientes cultivados com plantas de milho.	68
Tabela 13 – Dados de condutividade elétrica aparente do solo σ_a da área delimitada.	70
Tabela 14 – Dados de condutividade elétrica aparente do solo σ_a coletados em campo cultivado com diferentes culturas no período de maio a julho.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
IFG – Instituto Federal de Goiás
TDR – Reflectometria no Domínio do Tempo

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ	– Índice de vazios do solo
P	– Profundidade dos eletrodos
P_1	– Profundidade 1
P_2	– Profundidade 2
P_3	– Profundidade 3
R	– Resistência elétrica
R_m	– Resistência elétrica aparente
R_1	– Recipiente 1
R_2	– Recipiente 2
R_3	– Recipiente 3
R_4	– Recipiente 4
R_5	– Recipiente 5
R_6	– Recipiente 6
R_7	– Recipiente 7
R_8	– Recipiente 8
R_9	– Recipiente 9
R_{10}	– Recipiente 10
R_{11}	– Recipiente 11
ρ	– Resistividade elétrica do solo
$\rho_a(a)$	– Resistividade elétrica aparente do solo em função do espaçamento “a”
$\rho_a(d)$	– Resistividade elétrica aparente do solo em função do espaçamento “d”
σ	– Condutividade elétrica
σ_a	– Condutividade elétrica aparente do solo
q	– Ponto de injeção de corrente elétrica
V_{med}	– Tensão elétrica
w	– Umidade do solo

SUMÁRIO

CDD 631.4	3
CAPÍTULO 1	16
INTRODUÇÃO	16
CAPÍTULO 2	20
CARACTERÍSTICAS DO SOLO	20
2.1 COMPOSIÇÃO DO SOLO	20
2.1.1 COMPONENTES DO SOLO	21
2.1.2 UMIDADE DO SOLO	22
2.1.3 COMPACTAÇÃO DO SOLO	23
2.2 CONSIDERAÇÕES	24
CAPÍTULO 3	25
SISTEMA RADICULAR	25
3.1 SISTEMA RADICULAR E SUA RELAÇÃO COM ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO	25
3.2 ESTUDOS PARA ANÁLISE DO SISTEMA RADICULAR	28
3.2.1 <i>Métodos destrutivos</i>	28
3.2.2 <i>Métodos não destrutivos</i>	31
3.2.3 <i>Métodos não-invasivos</i>	33
3.3 CONSIDERAÇÕES.....	35
CAPÍTULO 4	36
MÉTODOS GEOELÉTRICOS	36
4.1 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO	36
4.2 MÉTODO DO CAMINHAMENTO ELÉTRICO	43
4.3 CONSIDERAÇÕES.....	44
CAPÍTULO 5	46
METODOLOGIA	46
5.1 APARATO EXPERIMENTAL DE BANCADA.....	46
5.1.1 <i>Preparação da amostra de solo</i>	47
5.1.2 <i>Coleta de dados</i>	47
5.1.3 <i>Quantificação da massa radicular</i>	48
5.2 APARATO EXPERIMENTAL DE CAMPO	49
CAPÍTULO 6	50
RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
6.1 INSTRUMENTOS UTILIZADOS	50
6.2 PREPARO DOS RECIPIENTES	50
6.3 ESTUDO DE CASO 1: RELAÇÃO DO SISTEMA RADICULAR COM A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO	51
6.4 ESTUDO DE CASO 2: RELAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE COM O SISTEMA RADICULAR DO SOLO	60
6.5 ESTUDO DE CASO 3: RELAÇÃO DA MASSA RADICULAR COM A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO	67
6.6 ESTUDO DE CASO 4: MAPEAMENTO DO SISTEMA RADICULAR NO SOLO.....	69
6.7 ESTUDO DE CASO 5: MONITORAMENTO DO SISTEMA RADICULAR NO SOLO COM DIFERENTES CULTURAS	71
CAPÍTULO 7	76
CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS	77
RESUMO DO CURRÍCULO LATTES	84
ENDEREÇO PARA ACESSAR:	84

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O manejo sustentável do solo é importante para a produtividade agrícola. Este manejo é possível através da aplicação de ferramentas tecnológicas que permitam gerenciamento do sistema agrícola baseado na variabilidade espacial e temporal do solo, bem como da unidade produtiva, visando o aumento de retorno econômico e a redução do impacto ao meio ambiente. Isto é o que se pode chamar de Agricultura de Precisão (MAPA, 2013).

Um dos princípios da Agricultura de Precisão baseia-se na propriedade do solo de variar a condutividade elétrica aparente σ_a de acordo com as suas propriedades físico-químicas. Os valores da σ_a são obtidos através de métodos geoeletricos que baseiam-se na injeção de corrente elétrica no solo. O solo tem a propriedade de variar a condutividade elétrica aparente σ_a dependendo de alguns parâmetros e da relação destes parâmetros com as propriedades físico-químicas do solo (EMBRAPA, 2009).

Ao mapear a σ_a , identificam-se áreas com características físico-químicas homogêneas. De posse destes valores mapeados geograficamente dentro de um terreno, é possível dividir as regiões do terreno em áreas de manejo e então proceder à coleta de algumas amostras para serem analisadas e, em função das suas propriedades físico-químicas, tomar decisões de como e quanto intervir com os insumos, defensivos e irrigação. O mapeamento da σ_a tornou-se assim uma ferramenta eficiente na investigação do comportamento e da variabilidade espacial do solo, permitindo identificar áreas com propriedades semelhantes e delimitar unidades de gerenciamento diferenciado (EISENREICH, 2001). Porém, não somente o conhecimento da dinâmica de fertilidade do solo de áreas agrícolas através de métodos geoeletricos é importante na Agricultura de Precisão, mas também a presença e dinâmica de crescimento radicular das culturas no solo.

O sistema radicular é o órgão que desempenha as funções de absorção de água e nutrientes e de fixação da planta. Podem apresentar outras funções como, armazenamento de substâncias de reserva, propagação e dispersão, nicho para simbioses e organismos livres associados, produção de metabólitos secundários e síntese de reguladores vegetais. O sistema radicular possui assim uma relação importante com o solo, e este fornece os meios para desenvolvimento das raízes bem como da parte aérea das plantas (RAVEN *et al.*, 1996).

Os estudos para avaliar a distribuição, o volume e a massa radicular das culturas no solo são de suma importância para o manejo agrícola, ou seja, são fundamentais para o aperfeiçoamento dos tratamentos culturais como adubação, irrigação localizada e subsolagem (NEVES *et al.*, 1998), (CARVALHO *et al.*, 1999) e (MACHADO; COELHO, 2000). Os métodos mais empregados em estudos de escala de campo são os que envolvem a escavação do solo para exposição das raízes, conhecidos como métodos destrutivos. Existem também os métodos não-destrutivos que são os empregados em estudos

de pequena escala e os métodos não invasivos. Estes últimos são uma alternativa aos outros métodos, pois evitam danos as plantas e ao solo, quando comparado aos métodos destrutivos e não-destrutivos. Apesar desta variedade de métodos, existem poucos estudos sobre sistema radicular, principalmente devido as desvantagens apresentadas pelos métodos destrutivos.

Segundo Brasil, Zonta e Oliveira (2007), as razões para a carência de dados sobre sistema radicular de plantas residem principalmente nas dificuldades metodológicas de estudos e características inerentes de crescimento e dinâmica das raízes. Os sistemas radiculares são estruturas ramificadas complexas que variam no espaço e no tempo (BENGOUGH *et al.*, 2000). No seu período de desenvolvimento, as raízes crescem naturalmente dentro do volume poroso do solo, distribuindo-se neste volume segundo direções não uniformes e pelos padrões endógenos de ramificação. Além disto, o solo é um meio de crescimento opaco, o que torna difícil a observação e a avaliação *in loco* das raízes (MATTA, 1999), o que significa que o pesquisador trabalha constantemente “no escuro” (BENGOUGH *et al.*, 2000). Isto tem implicações diretas nos aspectos metodológicos dos estudos.

A maior parte dos estudos do sistema radicular em condições de campo é de natureza destrutiva, tanto para as plantas, como para o solo. Extrair raízes do solo através de métodos que envolvem a escavação do solo ainda continua a ser um dos procedimentos mais usados nos estudos de sistemas radiculares e o principal entrave para os pesquisadores. Tradicionalmente, os métodos destrutivos, mediante uso do trado, anel volumétrico (*soil core*), monólito, anéis de crescimento (*in-growth cores*) e abertura de trincheiras têm sido os mais utilizados na investigação do sistema radicular de culturas (BÖHM, 1979), (VOGT *et al.*, 1998), (OLIVEIRA *et al.*, 2000), (BRASIL *et al.*, 2002).

Com relação aos métodos não-destrutivos, a maioria deles são aplicáveis somente para experimentos de pequena escala e são limitados para condições do solo e tamanho das raízes, além de serem métodos invasivos (AMATO *et al.*, 2008). Mas tem surgido o desenvolvimento de novas tecnologias não-invasivas. Algumas delas foram testadas, tais como: Radar de Penetração no Solo (BUTNOR *et al.*, 2003), (HRUSKA; CERMÁK; SUSTEK, 1999), imagens de raio X (MAIRHOFER *et al.*, 2013), (GREGORY *et al.*, 2003), (MORAN; PIERRET; STEVENSON, 2000) e métodos de prospecção geoeletricos (PAGLIS, 2013), (ZANETTI *et al.*, 2011), (AMATO *et al.*, 2008), (AMATO *et al.*, 2009), (LOPERTE *et al.*, 2006), (CORWIN; LESCH, 2005), (MICHOT *et al.*, 2003), (WEIHS *et al.*, 1999). Todavia, quase todos estes métodos são também aplicados em pequena escala e nem sempre representam as condições de campo, exceto os métodos de prospecção geoeletrica, que além da simplicidade e baixo custo, podem ser aplicados em maior escala. Os métodos que se baseiam na injeção de corrente elétrica no solo podem ser aplicados em campo sem que haja a necessidade de modificação do ambiente edáfico, diferente de outros métodos invasivos e não-destrutivos que necessitam de aparato experimental construído previamente.

Paglis (2013), utilizando método geoeétrico, pesquisou a relação da massa radicular de plantas de cafeeiros com a condutividade elétrica do solo em condições de campo e os resultados indicaram que os valores de condutividade elétrica correlacionaram quantitativamente com a massa radicular, sendo possível avaliar e quantificar a distribuição das raízes no solo. Amato *et al.* (2008), Loperte *et al.* (2006), Corwin e Lesch (2005) e Michot *et al.* (2003) também estudaram a relação da condutividade elétrica do solo com a massa radicular de plantas herbácea e arbórea em escala de campo e laboratório, concluindo que o efeito das raízes no solo é quantitativamente detectável.

Portanto o desenvolvimento de tecnologias não-invasivas baseadas na injeção de corrente elétrica no solo para avaliar e quantificar o sistema radicular de culturas poderá vir a ser uma ferramenta importante para otimizar a aplicação de insumos, e até mesmo reduzir os danos causados ao solo pelos métodos destrutivos, visando a redução do impacto ambiental devido a escavação de volumes expressivos de solo. Mas devido a pequena quantidade de estudos que procuraram desenvolver métodos de prospecção geoeétricos para esse fim, é necessário que haja mais estudos de forma a contribuir para o aperfeiçoamento das técnicas existentes, pois segundo Amato *et al.* (2008), o efeito que as raízes causam na condutividade elétrica do solo pode ser da mesma ordem de magnitude de efeitos causados por outras propriedades do solo como umidade e textura, por exemplo.

Considerando que o sistema radicular de culturas no solo pode limitar ou facilitar a passagem de corrente elétrica, o emprego de método de prospecção geoeétrica poderá servir para detecção dos efeitos produzidos pelo fluxo de corrente elétrica no solo quando da presença de raízes e os valores de σ_a obtidos podem indicar a localização das raízes no solo. Assim é possível mapear a localização das raízes das culturas até mesmo em determinadas profundidades.

Com isso, o mapeamento indireto de sistema radicular no solo poderá evitar o emprego de métodos destrutivos e facilitar a aplicação localizada e correta de insumos no solo. O emprego de métodos destrutivos para avaliação do sistema radicular no solo pode acarretar impactos para as plantas e para o ecossistema solo, ou seja, podem causar impactos ambientais. Dependendo da espécie de planta a ser estudada, é necessário a retirada de quantidade significativas de solo para exposição do seu sistema radicular. Depois de removido o solo, o mesmo procedimento destrutivo para avaliação do sistema radicular de determinada planta não pode ser realizado novamente no mesmo local, ou seja, repetidos estudos não podem ser realizados depois da destruição do ambiente edáfico, pois as características intrínsecas do solo, importantes para se estudar em conjunto com o sistema radicular, podem ser alteradas. Com isso há a necessidade de se estudar o sistema radicular de uma mesma planta em outros locais, causando novos impactos.

Os métodos geoeétricos, por não serem invasivos, podem evitar impactos ao solo, como também trazer retorno econômico, pois esses métodos podem mapear a distribuição horizontal e vertical do solo, podendo indicar a localização das raízes, com isso é possível gerenciar de forma adequada

a aplicação de água, defensivos e fertilizantes, contribuindo na redução de impactos ambientais como a erosão do solo e a lixiviação de nutrientes aplicados em excesso no solo.

Diante do contexto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência de sistema radicular de culturas no solo, através da aplicação de método de prospecção geoeletrico, com a finalidade de aperfeiçoar o método para o desenvolvimento de uma metodologia para monitoramento indireto do crescimento e distribuição de sistema radicular no solo. Os objetivos específicos são: i) monitorar a σ_a durante o desenvolvimento do sistema radicular de culturas por meio de experimentos de escala de bancada; ii) verificar a relação da massa radicular das culturas com os valores de σ_a ; iii) desenvolver metodologia para mapeamento e monitoramento indireto do crescimento do sistema radicular de culturas por meio de método de prospecção geoeletrico.

Este trabalho será dividido em 7 capítulos. O Capítulo 2 e 3 discorre sobre algumas características do solo e sua relação com o sistema radicular. No Capítulo 4 é apresentada uma explanação sobre métodos geoeletricos. O Capítulo 5 descreve todo o procedimento adotado neste trabalho para analisar a influência de sistema radicular no solo. O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos e o Capítulo 7 as conclusões deste trabalho.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS DO SOLO

Neste capítulo é apresentado o conceito de solo, alguns dos fatores de formação e algumas características básicas. São apresentados também os conceitos de umidade e compactação do solo.

2.1 Composição do solo

Os solos são materiais resultantes do intemperismo das rochas por desintegração mecânica ou decomposição química (CAPUTO, 2011). Por desintegração mecânica, através de agentes como água, temperatura, vegetação e vento, são formados os pedregulhos e areias (solos de partículas grossas) e até mesmo os siltes (partículas intermediárias), e, somente em condições especiais, são formadas as argilas (partículas finas).

Por decomposição química entende-se o processo em que há modificação química ou mineralógica das rochas de origem. O principal agente é a água e os outros agentes mais importantes são a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação. A formação das argilas são o resultado final do processo de intemperismo (CAPUTO, 2011). Através do intemperismo a rocha pode transformar-se em material solto no qual torna-se possível a vida vegetal e animal. Restos como folhas caídas vão sendo adicionados e decompõem formando o húmus (LEPSCH, 2002). Ao mesmo tempo, alguns dos minerais menos resistentes ao intemperismo, vão se transformando em argilas. As águas que se infiltram no terreno podem translocar material de uma parte superficial para outra mais profunda (LEPSCH, 2002).

O estudo da aparência do solo é chamado de “morfologia do solo”. Diversas características são observadas na descrição morfológica do perfil do solo, como cor, textura, estrutura, consistência e espessura dos horizontes (LEPSCH, 2002).

Os horizontes são seções paralelas à superfície do solo, com características produzidas pelos processos pedogenéticos. As várias tonalidades de cor existentes no perfil são muito úteis na delimitação e identificação dos horizontes e, às vezes, ressaltam certas condições importantes. Por exemplo, solos escuros, podem indicar altos teores de material orgânico. Solos de cor vermelha são bem drenados e com altos teores de óxido de ferro. Tons cinza com pequenas manchas indicam que há permanentemente excesso de água no perfil do solo (LEPSCH, 2002). Em pedologia, o termo “textura” refere-se à proporção relativa das frações de areia, silte e argila no material do solo (LEPSCH, 2002).

O estudo dos solos, denominado pedologia, visa conhecer sua gênese, classificação e distribuição geográfica. Assim, os solos são estudados não apenas por meio dos seus perfis verticais, mas também pelo entendimento das variações laterais dos horizontes. Os horizontes que compõem os perfis de solo, quando refletem a ação da pedogênese, são denominados horizontes pedogenéticos; quando

não refletem esta ação, convém denominá-los de camadas (OLIVEIRA; BRITO, 1998). Entende-se por camada uma seção de constituição mineral ou orgânica, aproximadamente paralela à superfície do solo, possuindo um conjunto de propriedades não resultantes ou pouco influenciadas pela atuação dos processos pedogenéticos (EMBRAPA, 1988).

Em condições naturais, as partículas de areia, silte e argila encontram-se aglomeradas em unidades que são referidas como “agregados” e podem ser classificados conforme a dimensão de suas partículas. O termo “estrutura”, portanto, refere-se ao tamanho, forma e aspecto do conjunto de agregados que aparecem no solo (LEPSCH, 2002). No interior dos agregados, as partículas de areia, silte e argila aderem umas às outras, sendo assim mantidas com maior ou menor grau de adesão. A resistência do material do solo em estado natural, a alguma força que tende rompê-los é conhecida como “consistência” (LEPSCH, 2002).

2.1.1 Componentes do solo

Os horizontes do solo são constituídos de minerais, materiais orgânicos, ar e água. As partículas minerais e o material orgânico formam a fase sólida, enquanto que o ar e a água ocupam o espaço poroso do solo. Suas proporções, ao contrário do que ocorre com a fase sólida, podem variar em espaço de tempo relativamente curto, como por exemplo, após forte chuva (LEPSCH, 2002). As partículas minerais do solo podem ser classificadas tanto quanto a seu tamanho como sua origem e composição (LEPSCH, 2002). Em relação a origem, existem dois tipos: os remanescentes da rocha que deu origem ao solo e os produtos secundários, decompostos e/ou recompostos depois da intemperização dos minerais da rocha-mãe.

A proporção desses componentes, ou seja, a quantidade de areia, silte e argila, pode ser precisamente determinada no laboratório pela análise granulométrica (LEPSCH, 2002). Os minerais da fração cascalho e areia são quimicamente inertes e constituem o “esqueleto mineral do solo”. A argila, ao contrário da areia, é bastante ativa quimicamente. A grande atividade dessa fração deve-se ao pequeno tamanho de suas partículas, o que faz com que tenham propriedades coloidais. A mais importante propriedade coloidal da argila é afinidade pela água e por elementos químicos nela dissolvidos (LEPSCH, 2002).

Com a presença de água no solo, pode-se estabelecer três estados de umidade do solo: molhado, úmido e seco. No solo molhado, todos os poros são preenchidos com água e o ar está praticamente ausente. Em condições naturais, depois que todos os poros são preenchidos com água, e cessa seu fornecimento, o líquido que está contido nos poros maiores drena para baixo. Essa água é denominada gravitativa, porque se infiltra no solo sob a ação da gravidade (LEPSCH, 2002). Depois que a água gravitativa infiltra-se no solo, ele se torna úmido e contém ar nos macroporos e água nos microporos. O líquido contido nos microporos é chamado de água capilar. Mesmo depois de seco, o solo

pode conter ainda certa quantidade de água, mas sob a forma de películas extremamente finas, ao redor das partículas coloidais. Essa água é retida nas partículas sólidas do solo com força superior à capacidade de extração das raízes das plantas e, por essa razão, é denominada água higroscópica (LEPSCH, 2002).

Por outro lado, a água no solo pode ser classificada em (CAPUTO, 2011):

- Água de constituição: é a que faz parte da estrutura molecular da partícula sólida;
- Água adesiva ou adsorvida: é aquela película de água que envolve e adere fortemente a partícula sólida;
- Água livre: é a que se encontra em determinada zona do terreno, enchendo todos os seus vazios (seu estudo rege-se pelas leis da Hidráulica);
- Água higroscópica: é a que ainda se encontra em um solo seco ao ar livre.

A água livre, higroscópica e capilar são as que podem ser totalmente evaporadas pelo efeito do calor, a temperatura superior à 100° C. O ar situa-se nos poros do solo tanto entre agregados como entre partículas unitárias de argila e silte (LEPSCH, 2002). Encontra-se livre, em forma de espaços vazios, ou subdividido em pequenas bolhas dissolvidas na água. Existe, portanto, relação dinâmica entre as fases líquidas e gasosas do solo. À medida que o volume de água aumenta, o volume de ar decresce, variando assim suas quantidades com o tempo.

2.1.2 Umidade do solo

O teor de umidade w é a quantidade de líquidos contida no espaço poroso do solo. A parte líquida do solo constitui-se essencialmente de água, contendo minerais dissolvidos e materiais orgânicos solúveis. Ela ocupa parte (ou quase o todo) do espaço vazio entre as partículas sólidas, dependendo da umidade do solo (REICHARDT, 1990).

O teor de umidade é dado em porcentagem da massa de solo seco que é o resultado do processo de secagem por um período entre 12 e 24 horas. Além desse procedimento para a determinação do teor de umidade, existem técnicas que podem ser utilizadas diretamente no campo.

Dentre os diversos tipos de técnicas e sensores de umidade conhecidos, a sonda espiral de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) é especialmente adequada devido algumas vantagens sobre as demais técnicas de medida da umidade dos solos. As principais vantagens da TDR são a não utilização de radiação ionizante, a possibilidade de automação das análises, a multiplexação de diversas sondas num único equipamento e a pouca influência da textura e da densidade do solo na determinação da umidade. O funcionamento da TDR para a medida da umidade é baseado na medida da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em uma guia de onda metálica (sonda) inserida no solo. O

equipamento mede o tempo de trânsito t das ondas eletromagnéticas na sonda, o qual é dependente da constante dielétrica do solo ε (NETO LADISLAU; VAZ, 2007).

2.1.3 Compactação do solo

Sobre o tema “compactação do solo”, observa-se a utilização de vários termos e definições relacionados com este fenômeno físico do solo. Dentre os principais conceitos, destacam-se a compactação, o adensamento, a compressibilidade e a resistência do solo a penetração. Verifica-se também que estas definições variam de acordo com o enfoque dado. Por exemplo, pode-se dizer que a compactação vista pela ótica da Engenharia Civil se preocupa com determinadas questões que talvez não fossem tão importantes para a Agricultura de Precisão, e vice-versa.

A compactação do solo é caracterizada pela redução de volume do solo quando uma pressão externa é aplicada. A compactação induz aumento de densidade do solo, diminuição da porosidade total e alteração na distribuição dos tamanhos dos poros e das propriedades hidráulicas do solo (IMHOFF; SILVA; TORMENA 2000). Compactação é o processo de aumentar a densidade do solo agrupando as partículas com redução do volume de ar; não há mudança significativa no volume de água do solo (CRAIG, 2011).

Dessa forma, o grau de compactação do solo é medido em termos da massa específica aparente seca, ou seja, apenas a massa de sólidos por unidade de volume do solo. A massa específica seca de determinado solo depois da compactação depende do teor de umidade e da energia fornecida pelo equipamento de compactação, denominada energia (ou esforço) de compactação (CRAIG, 2011). O teor de umidade correspondente a massa específica aparente seca máxima é conhecido como o teor de umidade ótimo (DAS, 2011).

Ao ser adicionada água ao solo durante a compactação, ela atuará como agente amolecedor nas partículas do solo, que deslizam umas sobre as outras e se posicionam em uma formação compacta de alta densidade (DAS, 2011). A densidade do solo é a relação entre a massa de sólidos e o seu volume e pode ser usada como medida direta do estado de compactação do solo (SECCO, 2003). Além do teor de umidade w , outros fatores significativos que afetam a compactação são: o tipo de solo e o esforço de compactação (energia por unidade de volume) (DAS, 2011). O tipo de solo tem grande influência sobre o peso específico seco máximo e o teor de umidade ótimo. A maioria dos solos argilosos, por exemplo, apresenta curvas de compactação típicas em forma de sino. Para areais, o peso específico seco apresenta tendência de, primeiro, decrescer à medida que aumenta o teor de umidade e, depois, elevar-se até valor máximo, enquanto a umidade continua a aumentar (DAS, 2011).

A avaliação da compactação é importante no estudo das condições físicas do solo, podendo ser utilizadas para orientar o manejo e o controle da qualidade física do solo e pode ser utilizada para

fazer inferências sobre as condições estruturais do solo, em relação as resistências críticas para o crescimento do sistema radicular das plantas.

A Figura 1 apresenta a vista de uma raiz de nabo forrageiro desenvolvida em uma área sem problema de compactação (à esquerda) e uma raiz desenvolvida em área compactada (à direita) (SANTI *et al.*, 2006).



Figura 1 – Efeito da compactação do solo no sistema radicular.

2.2 Considerações

Os solos são formados através do intemperismo das rochas que formam, através de processos pedogenéticos, camadas e diversos horizontes do solo, assim diferentes rochas formam diferentes solos, com diferentes estruturas e arranjos das partículas do solo e determinadas características químicas. Essas características físico-químicas causam influência no crescimento e distribuição do sistema radicular no solo.

CAPÍTULO 3

SISTEMA RADICULAR

Neste Capítulo é apresentada a relação de algumas características do solo com o sistema radicular e os métodos destrutivos, não destrutivos e não invasivos para amostragem, avaliação e quantificação de massa radicular.

3.1 Sistema radicular e sua relação com algumas características do solo

De acordo com Vasconcelos e Garcia (2005), a arquitetura e distribuição do sistema radicular no solo dependem de fatores genéticos e de fatores ambientais, como clima e o próprio solo. Este além de interferir na arquitetura e distribuição das raízes, causa influência no desenvolvimento do sistema radicular por meio de três fatores: pedogenéticos, atributos físicos e atributos químicos.

Os fatores pedogenéticos são os responsáveis pela constituição granulométrica (argila, silte, areia fina, areia grossa) e sua dinâmica no perfil do solo, determinando seus atributos físico-químicos e a profundidade de cada horizonte, que por sua vez causam influência no desenvolvimento do sistema radicular (VASCONCELOS; GARCIA, 2005).

Se os solos são profundos apresentando camadas de impedimento, são pobres em nutrientes, e o suprimento de água é irregular nas diversas fases de crescimento radicular, o estoque de água e os nutrientes realmente disponíveis para as plantas passam a ser regulados, em grande parte, pelas características do sistema radicular da espécie cultivada (CINTRA *et al.*, 1999). Já em solos rasos com essas mesmas características, a eficiência do sistema radicular em aproveitar água e os nutrientes também parece ser mais importante, até mais importante do que o volume e a massa radicular (KORDÖRFER *et al.*, 1989) e (MATHIEU, 1987).

Com relação a solos compactados, pode-se esperar redução da extensão do sistema radicular. Esse mesmo efeito é também esperado em solos ácidos devido à diminuição de absorção de nutrientes pela ocorrência de elementos tóxicos como o alumínio (Al), ou pela própria deficiência de nutrientes, principalmente fósforo (P) e cálcio (Ca) (ANGHINONI; MEURER, 1999).

Já em solos bem drenados, tem sido observado que o crescimento das raízes pode atingir profundidades maiores, porém as maiores concentrações de raízes se encontram em profundidades menores (MOREIRA, 1983).

Quanto aos atributos físicos, o que mais interfere no desenvolvimento radicular é a densidade do solo, que pode apresentar aumento de valores devido à compactação resultante de pressões exercidas pelo tráfego de máquinas, veículos, implementos e animais. O aumento na densidade do solo ocorre simultaneamente à redução da macroporosidade, redução da aeração, redução da condutividade hidráulica e gasosa e aumento da resistência à penetração. Diferente de solos com alto teor de matéria

orgânica e boa estruturação física, que permitem o armazenamento de água e aeração adequados, os quais são favorecidos pela presença de redes de canais formados pela decomposição de raízes velhas, e/ou de galerias resultantes da atividade de insetos do solo. Isso pode facilitar o crescimento das raízes, em decorrência de menor resistência física, maior disponibilidade de nutrientes e menor toxicidade de Al (GASSEN; KOCHHANN, 1998).

Em referência aos atributos químicos, a presença dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) podem ser absorvidos por todas as partes do sistema radicular, porém a maior parte do Ca é absorvida somente pelas raízes finas, responsáveis também pela maior absorção de água. Além disso, as raízes finas são estruturas onde naturalmente ocorrem as colonizações por fungos micorrízicos, e a partir do crescimento micelial acontece a melhoria do processo de transferência de nutrientes e água para a planta hospedeira, aumentando, principalmente, a absorção de P (RUSSEL, 1981). Entre os fatores químicos, os mais estudados são os relacionados ao Al e Ca (MILLER, 1986). O Al é um dos elementos mais tóxicos às plantas e conseqüentemente ao sistema radicular, enquanto Ca é nutriente essencial para o crescimento radicular da planta.

A toxicidade do Al é o principal fator limitante ao estabelecimento de diferentes culturas em solos ácidos. O Al tóxico reduz o crescimento radicular, especialmente o ápice das raízes. Nas raízes, o excesso de Al interfere na divisão celular causando danos, o que reduz a alongação do eixo principal, tornando-as espessas, de coloração castanha, quebradiças e às vezes com manchas necróticas, além de inibir seu crescimento. Assim, o sistema radicular não apresenta raízes finas, é reduzido em tamanho, e de aparência coriáide. As raízes secundárias são pouco numerosas, com desenvolvimento limitado e ausência de pêlos radiculares, tendo como consequência pouca eficiência na absorção de água e nutrientes (KOCHIAN, 1995) e (FURLANI, 1989).

Com relação ao Ca, este é um nutriente com papel preponderante no crescimento radicular das plantas. A solubilidade do Al diminui com a calagem e quando o pH do solo atinge valores superiores a 5,4 e 5,5, o Al precipita-se completamente e deixa de prejudicar as plantas (ERNÂNI; ALMEIDA, 1986).

Quando a saturação de Ca no complexo de troca é inferior a 20%, há forte limitação ao crescimento das raízes no solo, na maioria das espécies cultivadas. Portanto, a presença de Ca na solução do solo, em contato com o sistema radicular, é essencial à sobrevivência das plantas, pois esse nutriente não se transloca da parte aérea para as porções novas das raízes em crescimento (QUAGGIO, 2000).

Devido à absorção de Ca ocorrer apenas nas partes mais novas, ainda não suberizadas das raízes, há a necessidade de absorção contínua desse nutriente para assegurar o desenvolvimento do sistema radicular, o que implica que o Ca deve estar distribuído adequadamente no solo. É importante acrescentar que estes fatores químicos que afetam o crescimento radicular são muito importantes nas

áreas tropicais, tendo em vista que grande parte dos solos desta região apresenta reação ácida, com alta concentração de Al tóxico e baixo conteúdo de Ca. Além disso, sucessivas aplicações de fertilizantes de reação ácida, como os adubos nitrogenados, causam forte acidificação dos solos.

O crescimento radicular geralmente é favorecido em solos um pouco ácidos, com pH variando entre 5,5 e 6,5, já a faixa compreendida entre 4,0 e 5,0 é a mais provável de ocasionar problemas para o crescimento das plantas (VAN ZYL, 1988) e (PEARSON, 1975).

Outros elementos que podem influenciar no desenvolvimento do sistema radicular são o P e o manganês (Mn) e suprimento de oxigênio (O₂). A toxidez de Mn ocorre com menor frequência do que a toxidez de Al, já que as plantas podem tolerar altos níveis de Mn solúvel. A toxidez de Mn geralmente afeta mais a parte aérea das plantas do que a raiz (FOY, 1974).

Com relação ao P, a sua mobilidade no solo é muito baixa. Com isso, a sua absorção pelas plantas se processa a pequenas distâncias em torno da raiz. Quanto maior o desenvolvimento do sistema radicular, mais favorável será a absorção do nutriente. Considerando a pequena mobilidade do P no solo em direção as raízes, a sua absorção depende de um amplo sistema radicular e ela aumenta na razão direta do volume de solo ocupado pelas raízes (BARBER; CHEN, 1990).

Quanto ao suprimento de O₂ fornecido pela respiração aeróbia, as raízes necessitam de 10% de volume de ar no solo. O suprimento ineficiente de oxigênio terá influência direta na absorção dos elementos essenciais: N, P, K, S, Ca, Mg, Cl, B, Mn, Zn, Mo, Cu e Fe (KIRKHAM, 1987).

Percebe-se diante desse contexto, que o sistema radicular das plantas possui uma relação muito importante com os atributos do solo. O conhecimento dessa relação solo-raiz é de fundamental importância para aperfeiçoamento dos tratamentos culturais como adubação, irrigação localizada e subsolação (NEVES *et al.*, 1998), (CARVALHO *et al.*, 1999), (MACHADO; COELHO, 2000).

Apesar da importância do sistema radicular, muito pouco ainda é conhecido a respeito de sua dinâmica, comparativamente à parte aérea. Esse fato é decorrente da dificuldade intrínseca relacionada à amostragem e observação de raízes, as quais são realizadas, frequentemente, por métodos destrutivos (SANTOS JUNIOR *et al.*, 2007).

O solo provê uma barreira para a observação e avaliação *in loco* dos processos fisiológicos associados à raiz, e a planta ou segmentos da raiz quando removidos do substrato através de métodos destrutivos promove a perda de continuidade física com a rizosfera adjacente e a comunidade microbiana associada (MATTA, 1999).

Além disso, segundo Amato *et al.* (2009), existem inconvenientes quanto ao tempo e labor dispendiosos no emprego de métodos destrutivos, e outros como a não possibilidade de fazer repetidas medições através das técnicas destrutivas bem como realizar observações simultâneas de fenômenos relacionados ao desenvolvimento das raízes no mesmo local. Desta forma, a coleta de informações sobre o crescimento das raízes no campo é uma missão árdua, e às vezes sem o devido rigor científico.

Esta situação contribui para que se tenham bem menos estudos sobre raízes do que sobre a parte aérea (GUIMARÃES *et al.*, 1997).

3.2 Estudos para análise do sistema radicular

Os métodos para estudos do sistema radicular são divididos em: métodos destrutivos, não destrutivos e não invasivos. Os métodos destrutivos são métodos empregados para análise de distribuição e quantificação do solo mediante a escavação do solo. Os métodos não destrutivos não envolvem a escavação do solo, porém são métodos invasivos que envolvem a utilização de dispositivos para análise de crescimento das raízes. Os métodos não invasivos são aqueles que avaliam o sistema radicular de forma indireta com pouco contato com o solo e as raízes.

3.2.1 Métodos destrutivos

A maioria dos estudos para a avaliação e quantificação do sistema radicular é feita através da coleta de raízes, onde se usam os métodos destrutivos que exigem a separação dos componentes das amostras de raízes e solo, e diretamente no perfil do solo, que são os métodos qualitativos. Segundo Böhm (1979), os métodos destrutivos para estudos de raízes são:

- Métodos de escavação;
- Métodos do monólito;
- Métodos da verruma ou trado;
- Métodos da parede como perfil;
- Métodos da parede de vidro.

A escavação é o mais velho método usado na pesquisa de ecologia de raízes. É utilizado para expor o sistema radicular da planta *in situ* (PAGLIS, 2013), removendo o solo que cerca as raízes (Figura 2). A retirada deve ser muito cuidadosa com instrumentos especiais, tais como: jatos de ar ou água (para as raízes finas recomenda-se instrumento delicado, como pincéis de pelo da cauda de camelo) (QUADROS, 2001).



Figura 2 – Métodos destrutivos para estudos do sistema radicular.

Essa técnica também é conhecida como método da trincheira. Para a abertura da trincheira geralmente escolhe-se uma linha representativa da cultura a ser estudada com determinado comprimento, em seguida corta-se a parte aérea das plantas. Depois abre-se uma trincheira lateralmente a linha da cultura a uma determinada distância do centro tronco das plantas (BRASIL; ZONTA; OLIVEIRA, 2007). A profundidade da trincheira deve ser até onde não se encontra mais raízes (Figura 3). A largura da trincheira (cerca de 1m) deve ser suficiente para que dois operários trabalhem e manejem livremente as suas ferramentas (FRANCO; INFORZATO, 1946).



Figura 3 – Método da trincheira.

Após a exposição das raízes no perfil também pode-se colocar uma moldura subdividida em quadrículas, nas quais podem ser avaliadas individualmente e depois em conjunto. Depois da tomada de imagens em cada quadrícula, existem programas analisadores de imagens, que diferenciam as

raízes por comprimentos, vitalidade e até mesmo os diâmetros das raízes. Essas técnicas são conhecidas como “métodos de parede como perfil”. A tomada de imagem pode ser utilizada em vários métodos, como o desenho, a fotografia e a filmagem, com objetivo maior, nesse caso, de mensurar a distribuição das raízes no perfil do solo, verificando a profundidade total e as camadas de maior concentração (BÖHM, 1979).

Também pode ser fixada no perfil da trincheira uma placa de madeira atravessada com pregos de 10 cm de comprimento espaçados igualmente, formando uma malha. Em seguida a placa é retirada e lavada com água para retirar o solo com um mínimo de perdas de raízes, sendo estas posteriormente retiradas do sistema em camadas de 10cm e lavadas e colocadas em estufa a 60°C por 24h para a obtenção da massa seca radicular (FANTE JUNIOR *et al.*, 1999).

Ainda a partir da parede do perfil, podem ser destacados volumes prefixados de solo + raiz, com estrutura indeformada (Figura 4), usando-se um conjunto de técnicas chamadas por Böhm (1979) de “métodos de monólito”. Os monólitos possuem tamanho e formas variadas, sendo escavados diretamente a partir da parede do perfil, ou extraídos com moldes metálicos (BRASIL; ZONTA; OLIVEIRA, 2007).

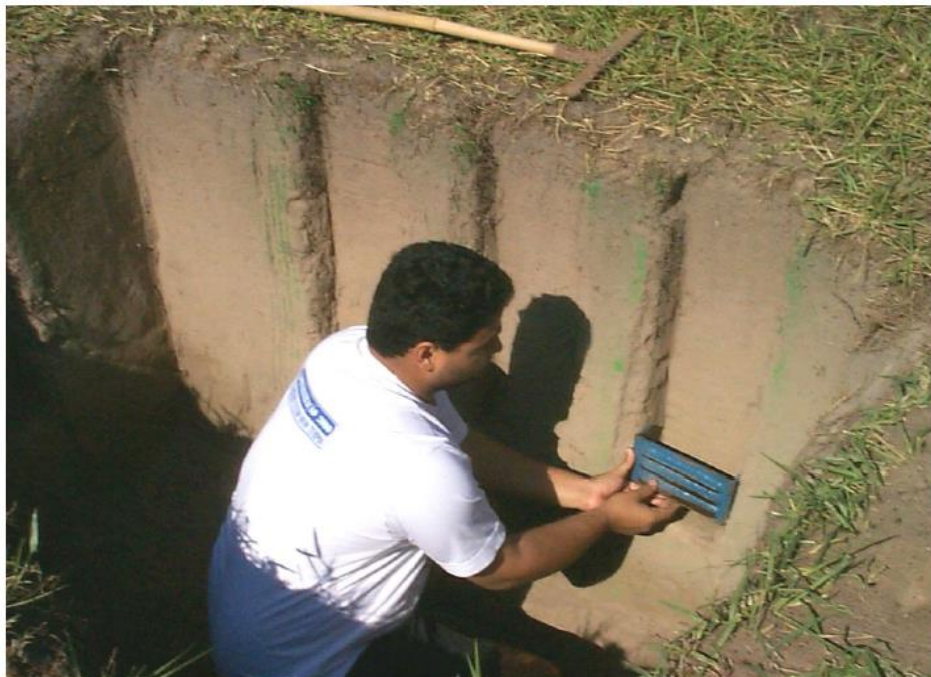


Figura 4 – Método do monólito.

Quando não é conveniente ou necessária a abertura de trincheiras, o método mais apropriado, em termos de facilidade de execução, consiste na extração de amostras com cilindros metálicos de volume conhecido, com ajuda de um trado operado manualmente, ou com uso de amostradores mecanizados (BÖHM, 1979). Esse método tem ampla aceitação devido a possibilidade de obter-se um elevado número de repetições com um investimento de tempo e labor menor que nos outros métodos,

o que pode significar uma vantagem em termos estatísticos. Entretanto, há a possibilidade de perdas significativas de raízes finas (até 30%) com a utilização deste método (BENGOUGH *et al.* 2000).

Com relação ao método parede de vidro, este é o mais dispendioso, pois, para boas observações, envolve a construção de um laboratório subterrâneo, profundo com as paredes de vidro. Nos arredores do laboratório são plantadas as culturas para estudos. Entretanto, essa técnica pode ser usada em menores proporções, montando as paredes de vidros não tão profundas, em "janelas de campo", em uma espécie de trincheira coberta, para evitar a penetração de raios solares. A espessura do vidro é fundamental para o sucesso do estudo, recomendando-se de 5 a 10mm, com paredes internas reforçadas, para evitar a quebra (BÖHM, 1979). Este método permite a visualização do desenvolvimento e da dinâmica das raízes, sem que tenha que destruí-las a cada amostragem.

Diante das descrições destes métodos, percebe-se que são técnicas que causam impactos tanto para as plantas como para o ambiente edáfico. Além de ser para o pesquisador um trabalho árduo, trabalhoso, cansativo e moroso, mas são métodos que não deixam ter sua importância.

Segundo Quadros (2001), o conhecimento da distribuição e massa de raízes são fundamentais no estudo da dinâmica de raízes; os métodos de escavação com tomada de imagens e monólito devem caminhar juntos. A maior vantagem do monólito é que por meio dele pode ser calculada a massa de raízes. A área, comprimento, diâmetro e densidade de raízes serão conhecidos por ambos os métodos. A representatividade da área na parede do perfil escolhido é importante nesse método. A maior vantagem do método da parede como perfil é a maior rapidez na obtenção dos resultados. Entretanto apenas com bons analisadores de imagens se consegue resultados confiáveis.

3.2.2 Métodos não destrutivos

Para superar as dificuldades metodológicas relacionadas aos métodos destrutivos para avaliação, amostragem e quantificação de raízes em campo, tem surgido o desenvolvimento de técnicas não destrutivas, empregadas em estudo de pequena escala, como uso de contêineres e sacos telados, e as técnicas com o uso de rizotrons e minirhizotrons.

A técnica com utilização de sacos telados consiste na escavação estratégica de buracos de 30cm de profundidade por 10cm de diâmetro, nos quais são inseridas justamente sacolas de malha, preenchida de solo. Após um período pré-determinado, as sacolas são retiradas e as raízes são separadas por meio de lavagem. Esse teste pode ser usado em larga escala e nesses sacos devem ser colocados diferentes tipos de solos, diferentes daquele no qual a planta estava inserida, verificando a "preferência" da planta (QUADROS, 2001).

Com relação ao método do contêiner, este é utilizado para estudos de morfologia, fisiologia, bioquímica e ecologia de raiz. Os contêineres isolam os fatores ambientais que influenciam o crescimento de raízes em perfis naturais. A facilidade de manuseio e uniformidade de ambientes entre

as parcelas são vantagens do método, pois esses trabalhos são conduzidos em laboratório e, mais comumente, em casa de vegetação, com temperatura, umidade e luminosidade controladas. Algumas desvantagens são condições limitadas ao crescimento das raízes no volume dos vasos, ausência de competição, distribuição anormal e a densidade do solo não traduz as condições de campo (QUADROS, 2001).

Com relação ao rizotron, este é um tipo de recipiente de vidro inserido no solo, no qual a planta se desenvolve e por meio do qual é possível visualizar o desenvolvimento das raízes *in vivo*. Devido à facilidade que as raízes encontram para desenvolvimento próximo à parede de vidro, este é um estudo mais adequado para estudos fenológicos do que para distribuição de raízes (BÖHM, 1979).

Um outro método baseado na técnica do rizotron, é o minirhizotron que consiste de um tubo transparente previamente instalado no perfil do solo, através do qual são obtidas imagens de raízes (Figura 5). A técnica permite, de maneira não-destrutiva, observações *in situ* do sistema radicular, possibilitando mensurações simultâneas das taxas de produção e desaparecimento de raízes, o que não é possível com a utilização de métodos destrutivos. Em virtude do fato de que raízes individuais podem ser medidas de maneira não-destrutiva e repetida no tempo, o minirhizotron é a ferramenta ideal para responder questões relacionadas aos efeitos da disponibilidade de recursos na longevidade de raízes, minimizando o componente espacial do erro amostral (MAJDI, 1996; JOHNSON *et al.*, 2001).

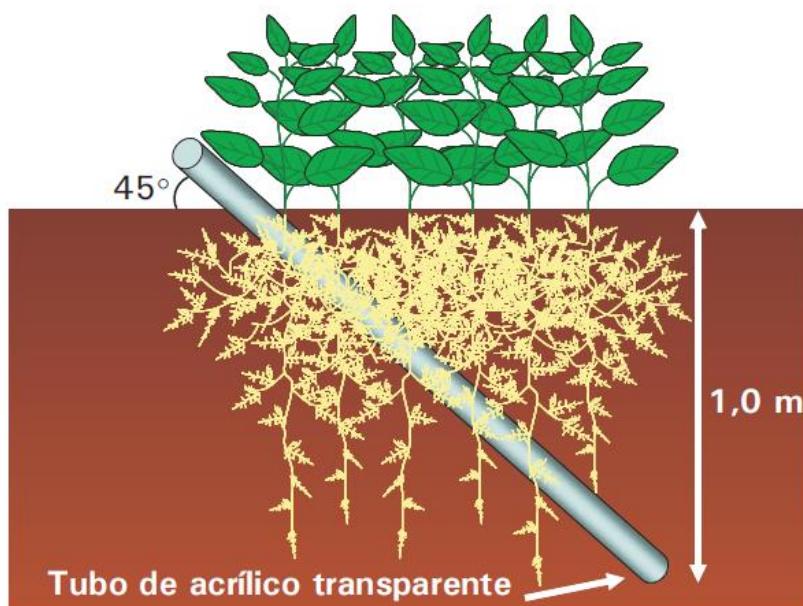


Figura 5 – Técnica do minirhizotron.

De acordo com Amato *et al.* (2009), os métodos não-destrutivos disponíveis têm consideravelmente melhorado a quantidade de informações que se pode obter sem destruir o solo sob investigação, mas eles têm significativas limitações. Apesar de ser possível realizar repetidas coletas de dados em campo, são técnicas que podem ser aplicadas somente em estudos de pequena escala nem sempre

representando as condições de campo e possuem um certo grau de invasividade, como no caso da técnica do minirhizotron, o qual é inserido no solo um tubo transparente com lentes ou câmeras. No caso do rizotron, contêineres, sacos telados, estes possuem a desvantagem de serem métodos de pequena escala que também não representam as condições de campo de forma satisfatória, e no final do experimento sempre é necessária a obstrução desses sistemas para avaliação das raízes, com isso acabam que também se tornando métodos destrutivos.

3.2.3 Métodos não invasivos

Recentemente tem surgido o desenvolvimento de métodos não invasivos para avaliação do sistema radicular, como a Microtomografia Computadorizada de Raio X, Radar de Penetração no Solo e métodos baseados na aplicação de corrente elétrica no solo.

A Microtomografia Computadorizada de Raio X é uma técnica não invasiva que permite o mapeamento tridimensional de forma não-destrutiva de materiais heterogêneos (HEERAMAN *et al.*, 1997). Por meio de escaneadores dos aparelhos de microtomografia são obtidas uma série de projeções de diferentes ângulos do objeto investigado, com medições dos valores de atenuação da radiação ionizante que passa através do objeto alvo. Essas projeções são recombinadas para reconstrução tridimensional do conjunto de dados. Os dados registrados pelo aparelho de microtomografia refletem a densidade do material escaneado e são mapeados em escalas de tons de cinza (Figura 6). Essa técnica é utilizada para o mapeamento de raízes finas das plantas, com diâmetro menor que 1mm; esta técnica também pode ser utilizada com emprego de contêineres para os experimentos (PIERRET; MORAN; DOUSSAN, 2005).

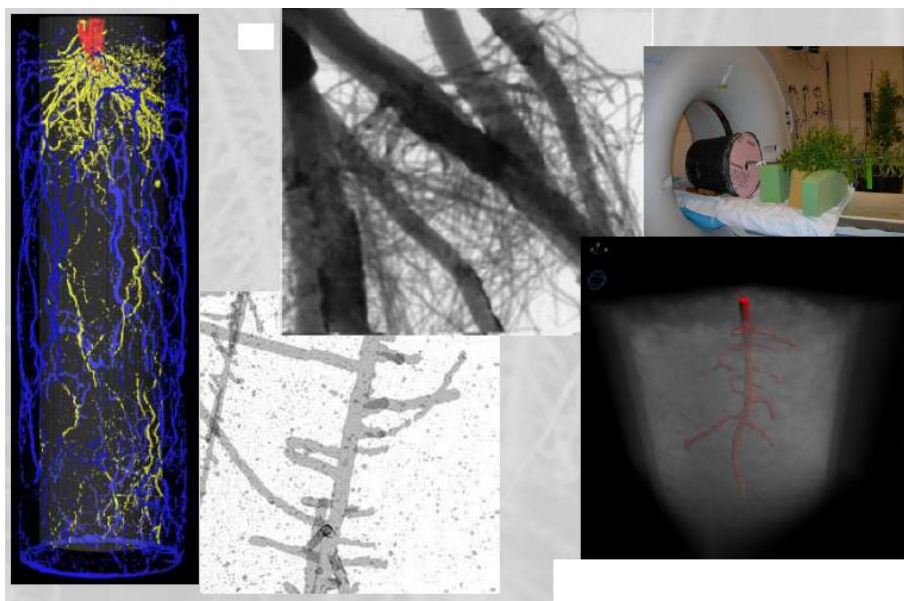


Figura 6 – Técnica da Microtomografia Computadorizada de Raio X.

Apesar de ser uma técnica inovadora na visualização do sistema radicular no solo a microtomografia de raio X ainda apresenta desvantagens tais como:

- A variação dos valores de atenuação de raio X como resultado do diferencial de retenção de umidade no solo;
- A sobreposição de valores de atenuação de raio X da matéria orgânica e das raízes, dificultando a identificação do sistema radicular em meio a fração orgânica do solo; e
- Dificuldades de identificação devido as mudanças na densidade de raízes com o tempo. (MAIRHOFER *et al.*, 2013).

Outra técnica utilizada para mapeamento não-invasivo de sistema radicular é o Radar de Penetração no Solo ou georradar. É uma técnica de aquisição de informação espacial que se utiliza para investigar ou detectar objetos e estruturas em subsuperfície no solo. O georradar gera uma série de ondas eletromagnéticas que são emitidas para o solo através de uma antena. À medida que as ondas se deslocam através do solo, elas podem ser refletidas, defletidas ou absorvidas por diferentes materiais (minerais, água, rochas, raízes etc.). Um receptor localizado na antena capta os sinais de retorno, ou seja, as ondas eletromagnéticas refletidas pelos diferentes materiais do solo, e esses sinais são digitalizados para geração de imagens com auxílio de softwares (CONYERS; GOODMAN, 1997).

Porém a desvantagem desse método, é que a atenuação das ondas emitidas depende da permeabilidade magnética e condutividade elétrica do meio. No solo, o teor de água e mineralogia podem ter um grande impacto, dependendo do teor de umidade, conteúdo de argila e sal elevados, atenuando assim mais fortemente os sinais emitidos. Em condições desfavoráveis, como solo encharcado, calcários ou solos ricos em argila, a profundidade máxima de penetração do georradar pode ser menor que 1m, independentemente da frequência da antena utilizada, porém sistemas de maior frequência com os seus comprimentos de onda mais curtos podem ter maior resolução (CONYERS; GOODMAN, 1997), porém essa técnica tem aplicação somente pontual, sendo dispendiosa a aplicação em maior escala.

Com relação aos métodos baseados na aplicação de corrente elétrica no solo, estes são empregados para o mapeamento da σ_a . As propriedades físico-químicas do solo têm a propriedade de influenciar na passagem de corrente elétrica. A parte biológica do solo representada pelas raízes podem também causar essa influência. Com isso com o mapeamento da σ_a do solo é possível identificar áreas homogêneas em terrenos agrícolas, ou seja, áreas com características físico-químicas semelhantes, com isso é possível definir áreas de manejo no terreno e com isso otimizar a coleta de dados em campo e facilitar as tomadas de decisões de como e quanto intervir com os insumos, defensivos e irrigação. Para o mapeamento da σ_a do solo, através de métodos geoeletricos, antes é necessário a obtenção dos valores de resistividade elétrica aparente (ρ_a) do solo, pois a σ_a é simplesmente o inverso da ρ_a .

3.3 Considerações

Existem diversos métodos para estudo de avaliação de massa, volume e distribuição das raízes no solo. Os métodos mais empregados são os que envolvem a escavação do solo para exposição das raízes e amostragem de raízes, os chamados métodos destrutivos que causam impactos tanto para as plantas como para o solo. Existem, porém, os métodos não destrutivos, mas que nem sempre representam as condições de campo assim como os métodos não invasivos, exceto os métodos geoeletricos que podem ser empregados em estudos de pequena e grande escala.

CAPÍTULO 4

MÉTODOS GEOELÉTRICOS

Neste capítulo são apresentados os fundamentos da condutividade elétrica aparente do solo σ_a , sua relação com as propriedades do solo e os métodos geoeletricos para sua obtenção.

4.1 Condutividade elétrica aparente do solo

Os principais métodos geoeletricos são: eletrorresistividade, eletromagnético, polarização induzida e potencial espontâneo. A investigação geofísica através de métodos geoeletricos envolve a detecção, na superfície dos terrenos, dos efeitos produzidos pelo fluxo de corrente elétrica na subsuperfície. Os métodos geoeletricos são amplamente empregados para: determinação da posição e geometria do topo rochoso; caracterização de estratos sedimentares; identificação de zonas de falhas, zonas alteradas e/ou fraturadas, contatos litológicos, cavidades e diques; caracterização de materiais impermeáveis e permeáveis, o que permite delimitar zonas potenciais de contaminação; localização de corpos condutores e corpos resistentes e separação das diversas camadas no subsolo (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

O solo é um meio composto por diversos materiais, cada um possuindo condutividade própria. A condução de corrente elétrica através do solo se deve à presença de sais livres na solução do solo e íons trocáveis das partículas (FRIEDMAN, 2005) e (CORWIN; LESCH; FARAHANI, 2008).

Diferente do que ocorre com um fio condutor de eletricidade, a corrente elétrica no solo pode percorrer diversos caminhos, como ilustrado na Figura 7. Em solos suficientemente úmidos, a condução de corrente se dá principalmente através do conteúdo de sal na água do solo que ocupa os poros maiores, região 1 da Figura 7. Entretanto, também há contribuição da fase sólida para a condutividade elétrica em solos úmidos principalmente através de cátions trocáveis associados com minerais de argila, região 2 da Figura 7 (SILVA FILHO, 2015). Um terceiro caminho para a corrente elétrica no solo existe por meio de partículas em contato direto e contínuo uma com a outra, região 3 da Figura 7. Estes três caminhos do fluxo de corrente contribuem para a condutividade elétrica global do solo, conhecida como condutividade elétrica aparente do solo σ_a (CORWIN; LESCH, 2003).

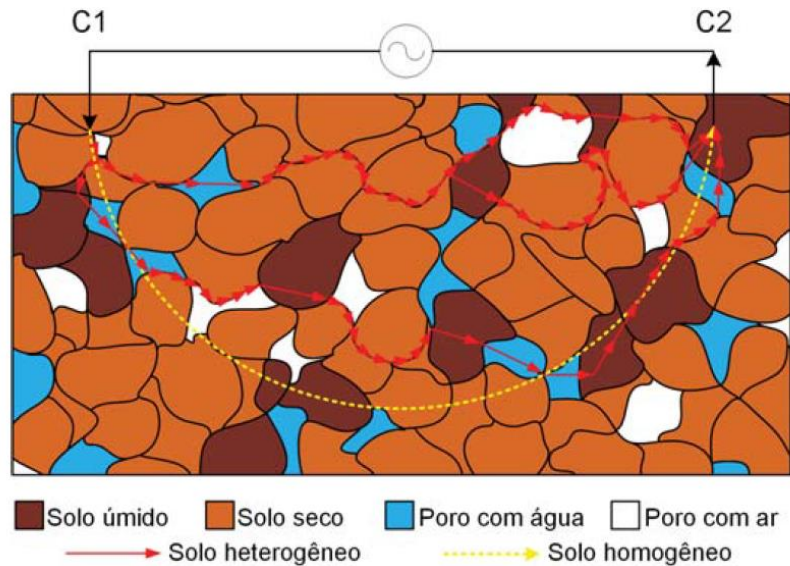


Figura 7 – Caminho da corrente elétrica do solo.

A σ_a do solo pode ser mensurada utilizando sistemas de indução eletromagnética e de contato direto. A técnica da indução eletromagnética é utilizada para medir a condutividade elétrica em solos sem contato com o mesmo, ao contrário do sistema por contato direto que penetra no solo geralmente utilizando eletrodos de corrente de metal que captam a condutividade elétrica a uma profundidade diretamente proporcional aos espaçamentos entre os eletrodos. Diferentes métodos podem ser empregados para obter medidas da σ_a , como métodos magnéticos e resistivos, sendo que os métodos resistivos (contato direto) apresentam maior expressão em função da simplicidade (MOLIN; RABELLO, 2011).

Por meio dos métodos resistivos, como os de eletrorresistividade, correntes elétricas são introduzidas no solo e a diferença de potencial é quantificada. Através da relação com a lei de Ohm e considerando a geometria dos eletrodos utilizados se obtém valores de resistividade elétrica aparente do solo ρ_a (inverso da σ_a) representativos de um volume proporcional à distância de separação entre os eletrodos (ALLRED *et al.*, 2008).

A unidade da resistividade é dada por [$\Omega.m$] seu valor é influenciado diretamente por diversos fatores, onde os que se destacam são: umidade, compactação, temperatura, composição e concentração dos sais dissolvidos. A literatura indica que os valores da resistividade para diferentes tipos de solos podem variar de valores menores que 1 $\Omega.m$ para solos embebidos na água do mar até valores de $10^9 \Omega.m$ para o arenito (IEEE, 2012).

A medição da resistividade elétrica do solo é realizada diretamente no local. Para isto, podem ser empregados diversos métodos. Devido ao fato do solo possuir característica anisotrópica, as medidas devem ser realizadas em diversas direções, atribuindo à resistividade elétrica aparente ρ_a valor médio dos valores obtidos (VISACRO, 2002).

O método que utiliza informações geológicas e amostras do solo consiste em realizar trabalho de geotécnica no local, o qual envolve prospecção geológica do solo, onde são retiradas amostras para serem examinadas em laboratório. Além do tipo de solo em cada camada, este método também obtém as seguintes informações: teor de umidade, pH do solo e até a profundidade de águas subterrâneas (IEEE, 2012).

A obtenção da resistividade do solo e dos demais dados obtidos por este método não apresenta aproximação útil devido à dificuldade na coleta das amostras representativas de solo homogêneo e que mantenham as mesmas características em laboratório do solo original (IEEE, 2012).

Os métodos que se destacam para mensurar parâmetros de estratificação do solo, são os métodos geoeletricos, como por exemplo, o método de três eletrodos. Neste método são realizadas diversas medidas da resistência elétrica do solo com o eletrodo de teste cravado no solo em diferentes profundidades, sendo a configuração de montagem ilustrada na Figura 8. Para cada profundidade do eletrodo de teste, o eletrodo de corrente é mantido a distância d_2 fixa e são realizadas medidas com o eletrodo de potencial em diferentes posições d_1 , de forma a encontrar a região de patamar da curva da resistência de terra em relação ao eletrodo de teste. A resistência R_m do solo é obtida através da divisão da tensão medida com o eletrodo de tensão V_{med} na região do patamar pela corrente I aplicada no solo através do terrômetro.

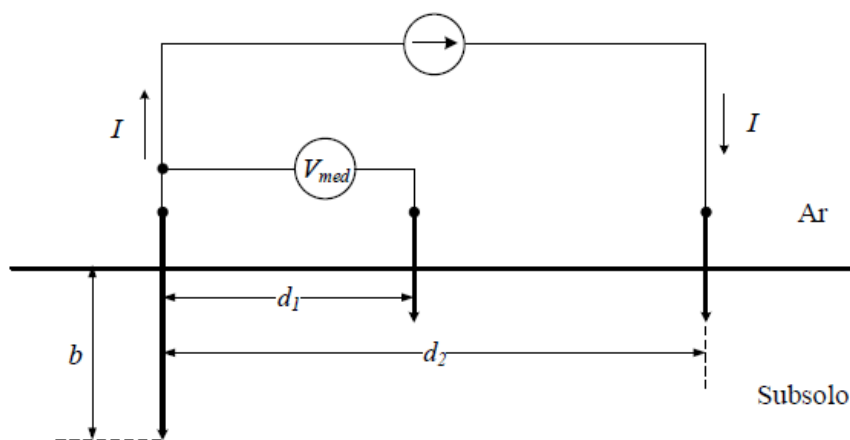


Figura 8 – Método dos três eletrodos.

O método tem como propósito induzir corrente maior no solo mais profundo, onde as medidas das resistências R_m refletem a resistividade aparente em cada profundidade. Assim, a resistividade aparente do solo calculada a partir da resistência elétrica da haste de raio a [m] cravada verticalmente no solo a profundidade b [m] é dada dada por (4.1). Onde ρ_a [$\Omega.m$] é a resistividade aparente e R_m [Ω] é a resistência elétrica medida no terrômetro.

$$\rho_a = \frac{2\pi b R_m}{\ln\left(\frac{8b}{a}\right) - 1} \quad (4.1)$$

O método dos dois eletrodos é utilizado para pequenos volumes de solos e fornece valores com baixa aproximação, servindo apenas para estimar a ordem de grandeza da resistividade elétrica do solo. Neste método são cravados dois eletrodos no solo na mesma profundidade b a distância maior ou igual a cinco vezes a profundidade. Os eletrodos são interligados através de cabo isolado e é realizada a medição da resistência em série com terrômetro (ABNT, 2012).

A resistividade elétrica aparente do solo entre os dois eletrodos é dada por (4.2).

$$\rho_a = \frac{\pi b R_m}{\ln\left(\frac{2b}{a}\right)} \quad (4.2)$$

Vários arranjos que utilizam quatro eletrodos foram desenvolvidos, basicamente, são cravados os quatro eletrodos perpendicularmente no solo a pequena profundidade, alinhados e espaçados em intervalos não necessariamente iguais (ABNT, 2012). Desta forma, a corrente elétrica é conduzida entre os dois eletrodos das extremidades e a tensão induzida é medida através dos dois eletrodos internos. Com a relação da tensão pela corrente obtém-se a resistência elétrica aparente da porção do solo medida e conseqüentemente a resistividade elétrica aparente pode ser calculada.

O arranjo do eletrodo central é utilizado no caso de prospecções a grandes profundidades ou em solos com resistividade elevada (ABNT, 2012). Neste arranjo, um dos eletrodos de corrente é fixado no centro da área em que será realizada a medição e varia-se a posição dos demais eletrodos, como ilustra a Figura 9. Neste arranjo, $d_3 \gg d_2$.

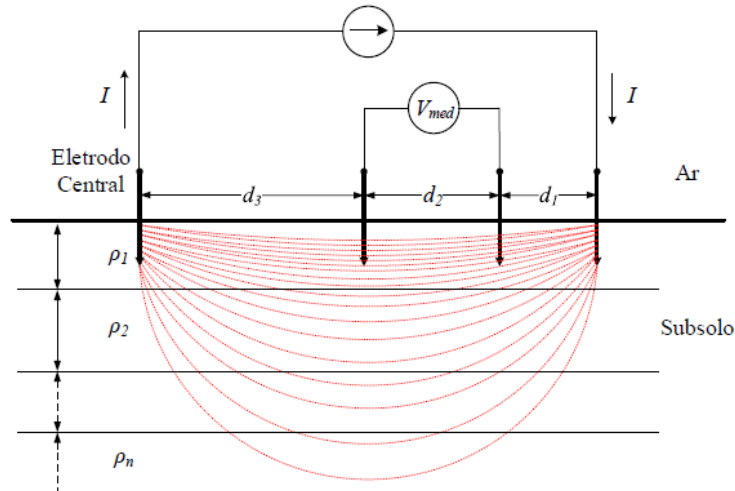


Figura 9 – Arranjo do eletrodo central.

A resistividade aparente do solo para profundidade h é dada por (4.3).

$$\rho_a(h) = \frac{2\pi d_1 (d_1 + d_2) R}{d_2} \quad (4.3)$$

onde:

$$h = \frac{(d_1 + d_2 + d_3)}{3} \quad (4.4)$$

Para o arranjo de Lee, conforme a ABNT (2012), são utilizados cinco eletrodos, requerendo duas medições e utilizando quatro eletrodos por espaçamento por vez, possibilitando detectar as variações nas espessuras das camadas. Na Figura 10 é ilustrado o diagrama do arranjo em que primeiramente é realizada a medição da resistência elétrica do solo entre os eletrodos A e B, R_{AB} , e posteriormente entre os eletrodos B e C, R_{BC} .

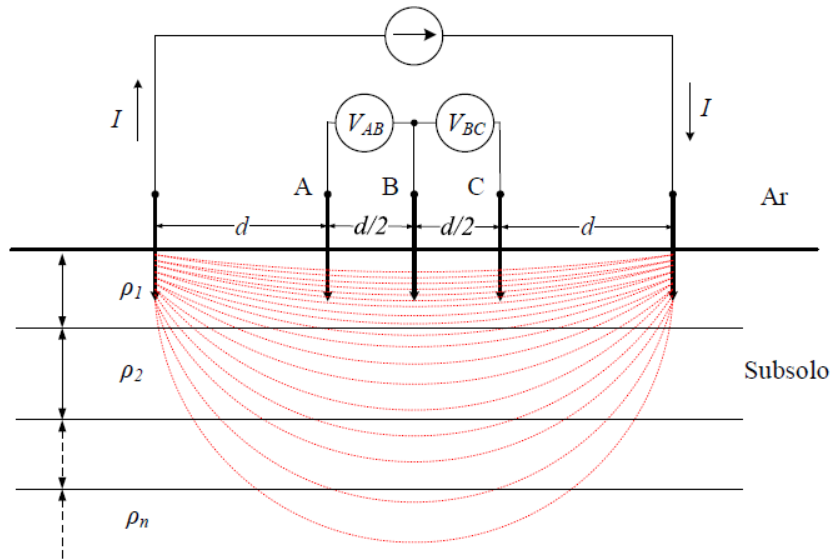


Figura 10 – Arranjo de Lee.

A resistividade aparente para cada medição em função da distância entre os eletrodos é dada por (4.5) e (4.6).

$$\rho_{1d} = 4\pi d R_{AB} \quad (4.5)$$

$$\rho_{2d} = 4\pi d R_{BC} \quad (4.6)$$

No caso de ρ_{1d} ser igual a ρ_{2d} indica que o solo não possui camadas com variação de espessura. Já no caso de ρ_{1d} diferente de ρ_{2d} indica solo com camadas de espessuras variáveis.

No arranjo proposto por (WENNER, 1916) os eletrodos são espaçados igualmente a distância d e cravados a profundidade b , como ilustrado na Figura 11. A resistividade elétrica aparente em função do espaçamento e da profundidade dos eletrodos é dada por (4.7).

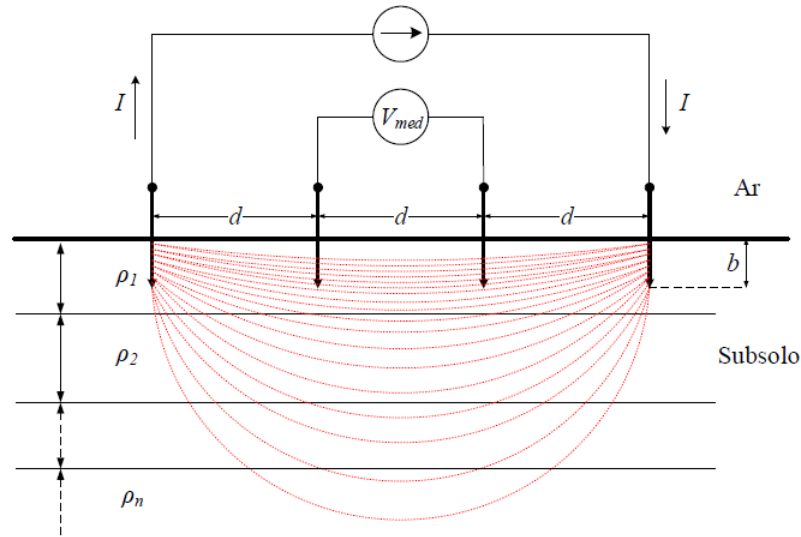


Figura 11 – Arranjo de Wenner.

$$\rho_a(d) = \frac{4\pi d R_m}{1 + \frac{2d}{\sqrt{d^2 + 4b^2}} - \frac{2d}{\sqrt{4d^2 + 4b^2}}} \quad (4.7)$$

Realizando a medição da tensão elétrica entre os eletrodos internos, calcula-se a resistência elétrica aparente e de posse do valor desta resistência, é possível encontrar a curva de resistividade aparente para diferentes espaçamentos d . Desta forma, obtém-se o conjunto de dados que, após a estratificação, poderá representar a quantidade de camadas do solo e suas respectivas resistividades e profundidades.

A maior desvantagem do arranjo de Wenner é o rápido decréscimo na magnitude do potencial entre os eletrodos de tensão com o aumento do espaçamento. Assim, para valores de espaçamentos relativamente altos, os valores baixos dos potenciais podem ser inadequados para os equipamentos. Outra desvantagem é a necessidade de relocação de todos os eletrodos a cada medição (IEEE, 2012).

No arranjo de Schlumberger os eletrodos de tensão (eletrodos internos) são colocados em espaçamento d_1 fixo e inferior ao espaçamento para os eletrodos de corrente (eletrodos externos), como ilustrado na Figura 12. Para executar a medição a diferentes profundidades, apenas o espaçamento d_2 dos eletrodos de corrente são alterados.

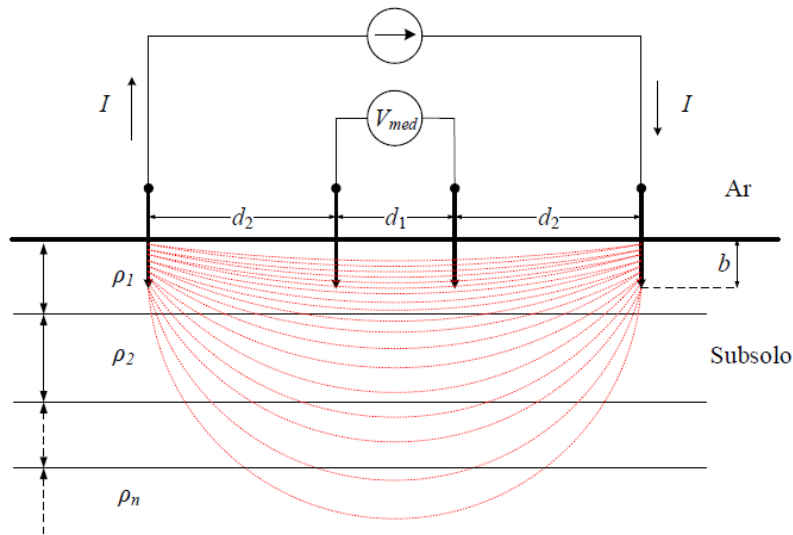


Figura 12 – Arranjo de Schlumberger.

Quando a profundidade b do eletrodo é pequena em comparação com a distância d_1 e $d_2 > 2d_1$, a resistividade aparente pode ser calculada por (4.8) (PALMER, 1959). No arranjo de Wenner a profundidade de coleta é de aproximadamente $\frac{3d}{2}$ e no arranjo de Schlumberger é de aproximadamente $\frac{2d_2+d_1}{2}$. Observe que nos métodos de coletas apresentados, é cometido o equívoco quando se considera R_m sendo a resistência elétrica do solo dada pela Lei de Ohm. Nestes métodos, ao dividir a diferença do potencial medido V_{med} pela corrente injetada I para obter R_m , a magnitude R_m medida pelo terrômetro é dimensionalmente igual a resistência elétrica de Ohm, mas não é a resistência elétrica fornecida por esta Lei, podendo ser definida como a resistência elétrica aparente medida pelo terrômetro, R_m [Ω], pois o local de injeção de corrente é diferente do local de medida da tensão (CALIXTO *et al.*, 2010).

$$\rho_a = \frac{\pi d_2 (d_1 + d_2) R_m}{d_1} \quad (4.8)$$

4.2 Método do caminhamento elétrico

Existem basicamente duas maneiras de se realizar o método de eletrorresistividade: vertical ou horizontal. Isso independentemente do tipo de arranjo de eletrodos utilizados em medições de prospecção geométrica. A escolha do método está relacionada com o objetivo do estudo. Para estudos onde se busca identificar variações do solo em profundidade, utiliza-se a vertical. Para o estudo da distribuição horizontal do parâmetro condutividade elétrica aparente do solo σ_a a uma ou várias profundidades, aproximadamente constantes, utiliza-se o caminhamento elétrico (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

O método do caminhamento, também conhecido como Prospecção Lateral (do inglês *Lateral Profiling*) é técnica de investigação geolétrica utilizada no mapeamento horizontal de σ_a , que consiste na movimentação dos elétrodos lateralmente através da superfície enquanto mantém fixo espaçamento entre os eletrodos. Nesta técnica pode ser utilizado tanto o arranjo de *Wenner* como o de *Schlumberger* para aplicação. Em ambas as situações, a σ_a é determinada no ponto central do arranjo, entre os eletrodos de potencial. Dessa forma, pode-se mapear toda área, identificando estes pontos e, conseqüentemente, delimitando regiões de condutividade distintas (TELFORD; GELDART, 1990).

A Figura 13 ilustra a técnica do caminhamento elétrico de investigação do solo, na qual os pontos A B, C e D representam os pontos de medição da condutividade elétrica aparente sobre a linha 1. Neste exemplo utiliza-se o método de *Wenner* para aplicação do Caminhamento Elétrico, onde os eletrodos de corrente e de tensão são representados por pontos azuis na Figura 13, enquanto que os pontos em vermelho são os locais de medição de σ_a . Realizando o Caminhamento Elétrico sobre as linhas 2, 3 e 4, determina-se o mapeamento horizontal da σ_a (SILVA FILHO, 2015).

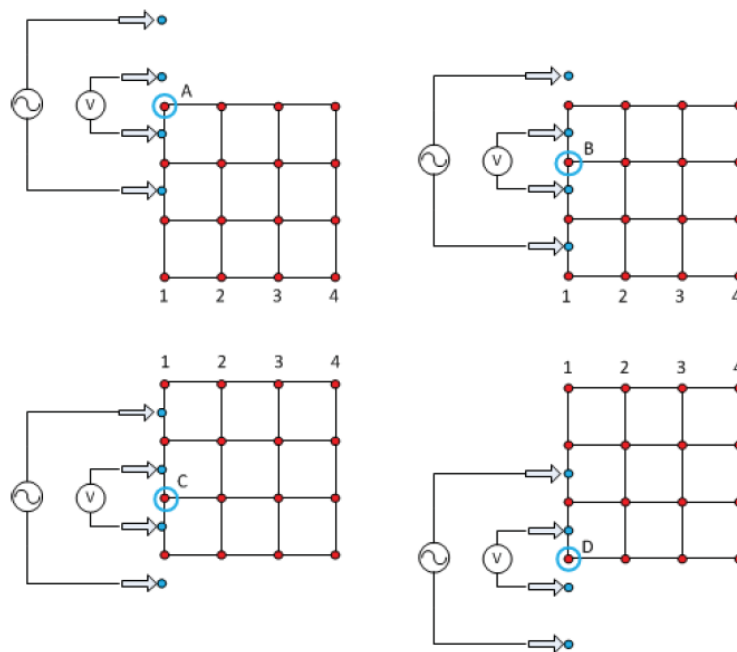


Figura 13 – Método do Caminhamento Elétrico.

4.3 Considerações

Diversos materiais que compõe o solo possuem condutividade elétrica própria, assim as propriedades elétricas do solo podem ser influenciadas por diversas características do solo, sejam elas físicas e químicas. Os sais presentes na solução do solo, bem como o arranjo de suas partículas, podem facilitar ou limitar a passagem de corrente elétrica do solo, indicando características importantes para o manejo agrícola. Diversos métodos geolétricos podem ser utilizados para mensurar a condutividade

elétrica aparente do solo, em destaque o método de eletrorresistividade que introduz corrente elétrica no solo através de eletrodos de metal cravados e arrançados na superfície do solo.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia para o estudo da relação da condutividade elétrica aparente do solo σ_a com o sistema radicular de plantas de milho (*Pennisetum glaucum L.*), milho (*Zea mays*), feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) e sorgo (*Sorghum bicolor L. Moench*). O objetivo deste capítulo é empregar os conceitos de geoprospecção elétrica no desenvolvimento de metodologia para monitoramento indireto do crescimento radicular no solo por meio do valor da σ_a , em estudos de escala de bancada e campo.

5.1 Aparato experimental de bancada

Para a aplicação do método proposto são necessários recipientes cilíndricos de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), cada um com superfície interna de 0,36m de diâmetro e 0,45m de altura, e conter aproximadamente 0,045m³ de solo. Para inserção dos eletrodos do medidor de resistência elétrica aparente R_m e das hastes do medidor de teor de umidade w , devem haver orifícios ao longo do perímetro dos recipientes em três diferentes profundidades, ou seja, em cada profundidade os orifícios devem ser feitos em cada quadrante ao redor dos recipientes. Para aplicação do arranjo de *Wenner*, cada quadrante em cada profundidade deve ter 4 orifícios espaçados igualmente em 0,07m, para inserção de dois eletrodos de corrente e dois de potencial, para as medições de R_m do solo. São necessários também, em cada quadrante, dois orifícios espaçados em 0,035m para inserção das hastes do medidor de umidade do solo w (Figura 14).

A Figura 14 também mostra os locais de plantio de sementes e de aplicação de fertilizante no solo dos recipientes. As sementes deverão ser plantadas na profundidade de 0,02m a uma distância de 0,03m da borda dos recipientes, em cada quadrante e centro da superfície do solo, para melhor distribuição das raízes. Em cada quadrante aplica-se fertilizante a 0,02m de profundidade, em círculo, ao redor do centro dos recipientes, distante dos locais de plantio de sementes. Para evitar o acúmulo de água, orifícios devem ser feitos no fundo dos recipientes.

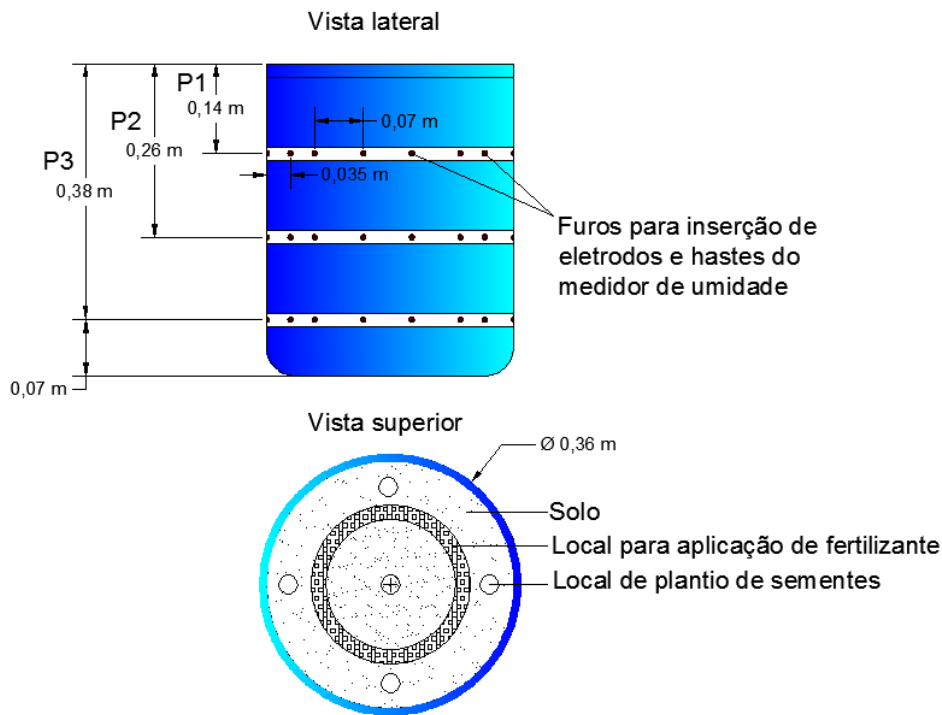


Figura 14 – Ilustração dos recipientes de PEAD com suas dimensões, utilizados no experimento de bancada.

5.1.1 Preparação da amostra de solo

Para o preenchimento dos recipientes com solo é necessário a coleta de amostra a uma profundidade de 1m da superfície para que se obtenha um solo com o mínimo de matéria orgânica, para que se evite a influência desse parâmetro nos resultados dos experimentos. A amostra de solo também deverá ser peneirada em peneira de malha de 2,80mm e em seguida misturada com 10% de areia, também peneirada com a mesma peneira. Esse procedimento é necessário para obtenção de uma amostra uniforme e para evitar a formação de torrões e selagem do solo, pois, nestas condições, pode haver a má distribuição do fertilizante e das raízes das plantas durante o desenvolvimento ao longo do perfil do solo.

Depois de preparada, a amostra deverá ser transferida para os recipientes que deverão ser dispostos em local adequado de modo que recebam incidência da luz solar. Em seguida, fazer o plantio das sementes conforme ilustrado na Figura 14. Os recipientes durante o experimento devem receber o mesmo volume de água e devem ser identificados, e alguns não devem ser cultivados, servindo como referência.

5.1.2 Coleta de dados

O método proposto para detectar a presença e monitorar o crescimento de sistema radicular no solo através do valor da σ_a , consiste em realizar medidas de R_m em três profundidades e em cada

quadrante dos recipientes. A umidade, assim como as raízes das plantas, pode influenciar na σ_a , portanto devem ser conhecidos os valores de w .

Para obtenção dos dados de R_m e w dos recipientes, as medições deverão ser realizadas nos quatro quadrantes em cada uma das três profundidades dos recipientes: $P_1=0,14$ m; $P_2= 0,26$ m e $P_3=0,38$ m. Os valores R_m serão obtidos através de método de prospecção geoeletrico que detectam os efeitos produzidos pelo fluxo de corrente elétrica no solo. O método de prospecção geoeletrico utiliza o arranjo de *Wenner* para coleta de dados, onde a corrente elétrica é injetada e capturada no solo pelos eletrodos de corrente, e mede-se a tensão em dois pontos da circunvizinhança por meio dos eletrodos de potencial (Figura 15). A coleta de dados deverá ser realizada semanalmente durante o ciclo de desenvolvimentos das plantas.

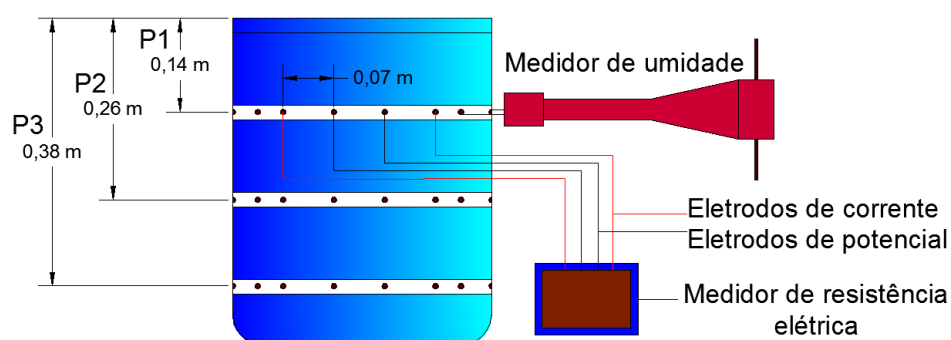


Figura 15 – Ilustração dos recipientes com o esquema de coleta de dados de resistência elétrica aparente e umidade do solo.

Como a coleta de dados é realizada nos quatro quadrantes nas três profundidades dos recipientes, obtém-se a média desses quatro valores a cada medição. A coleta de dados de R_m e w , realizadas quatro vezes em cada profundidade, é para minimizar os erros nas medições.

Os cálculos de resistividade e condutividade elétrica aparente (ρ_a e σ_a) devem ser realizados utilizando (4.7).

5.1.3 Quantificação da massa radicular

A cada ciclo de 15 dias deverá ser avaliado o perfil de distribuição das raízes no perfil do solo de alguns recipientes e quantificada a massa radicular, para que seja verificada a relação da massa radicular com σ_a .

Nesses recipientes deverá ser realizado um corte longitudinal com auxílio de um serrote. Em seguida, para quantificar a massa de raízes, inicialmente retira-se a parte aérea das plantas, depois, as raízes das plantas são separadas do solo com a utilização de peneira com malha de 2,80mm e água

corrente. Depois as raízes são secadas em estufa a 60°C por 12 horas para retirada do excesso de água. Em seguida, quantificada a massa de raízes com a utilização de balança eletrônica.

5.2 Aparato experimental de campo

Este experimento tem como objetivo demonstrar que σ_a pode ser utilizada como informação de apoio na detecção de sistema radicular no solo, para o aperfeiçoamento dos tratos culturais. Para este procedimento, escolhe-se uma área onde parte dela é cultivada, com uma cultura qualquer, e outra não, a fim de verificar a capacidade de utilização de σ_a como metodologia de identificação de sistema radicular na área cultivada. Utiliza-se o arranjo de *Wenner* e o método do Caminhamento Elétrico para determinação de σ_a .

Como apresentado na Figura 16, o Método do Caminhamento Elétrico será aplicado sempre na orientação da linha 1 para a linha 8 e da coluna A para G. Desta forma, tem-se a aplicação de 1A,1B, 1C, 1D, 1E, 1F e 1G, depois tem-se a aplicação 2A, 2B, 2C, 2D, 2E, 2F e 2G, e assim sucessivamente, até 8G.

Após a limitação da área, com região parcialmente cultivada, e o posicionamento dos eletrodos de corrente e de potenciais, realiza-se o levantamento da σ_a . Toda a área deverá então ser mapeada como mostra a Figura 16.

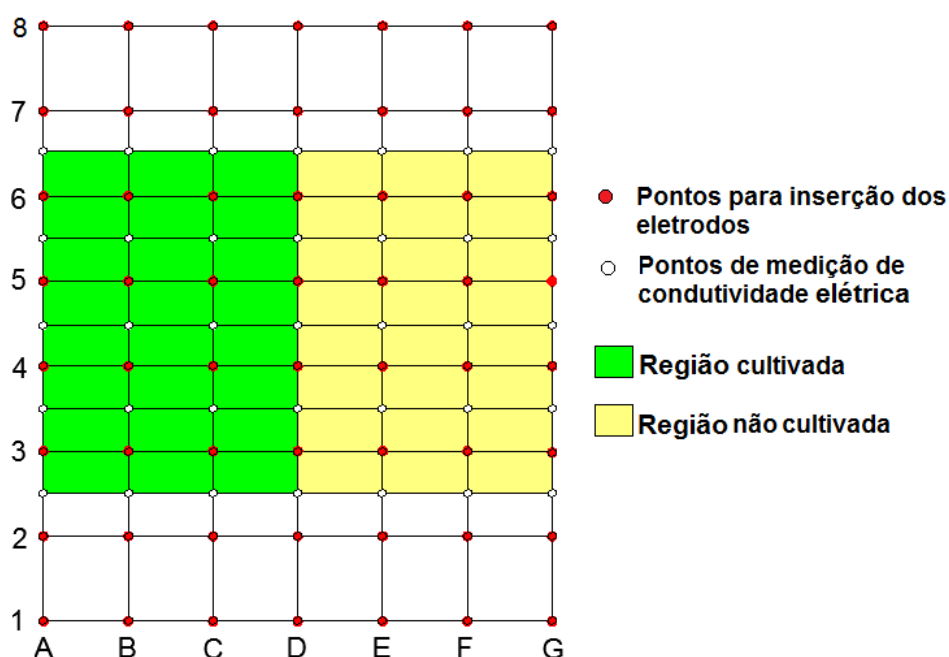


Figura 16 – Posição e delimitação da região para aplicação do método do Caminhamento Elétrico.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos, utilizando as metodologias descritas no Capítulo 5, em quatro estudos de caso: i) relação de sistema radicular com a condutividade elétrica aparente do solo σ_a ; ii) relação de sistema radicular com o teor de umidade do solo w ; iii) relação de massa radicular com a σ_a ; iv) mapeamento de sistema radicular no solo e v) mapeamento de sistema radicular no solo de diferentes culturas. Para avaliar a relação de sistema radicular com σ_a e w , necessitou-se do plantio de culturas de milheto (*Pennisetum glaucum L.*) em 9 recipientes. Destes 9 recipientes, 4 foram abertos aleatoriamente durante os experimentos para verificar a relação de massa radicular com a σ_a . No quarto e quinto estudo de caso foi realizado o mapeamento de sistema radicular no solo através dos valores de σ_a em áreas cultivadas com plantas de milho (*Zea mays*), feijão (*Phaseolus vulgaris L.*), sorgo (*Sorghum bicolor L. Moench*) e milheto (*Pennisetum glaucum L.*).

6.1 Instrumentos utilizados

Para as medições de resistência elétrica aparente do solo R_m , utilizou-se o terrômetro digital microcontrolado modelo EM-4055 Megabras. Este opera na frequência de 270Hz, apresenta capacidade de medição de resistividade entre 0 k Ω m e 50k Ω m e 0 k Ω a 20 k Ω para medição de resistência elétrica. O aparelho tem precisão de $\pm 2\%$ do valor medido, seja para de medições de resistência ou resistividade elétrica. Já para as medições de teor de umidade do solo w utilizou-se o medidor de umidade T.D.R., modelo *Field Scout* TDR-300, com precisão de $\pm 3\%$ e resolução de 0,1%.

6.2 Preparo dos recipientes

Para os três primeiros estudos de caso, preparou-se 11 recipientes de PEAD, que foram identificados como R₁, R₂, R₃, R₄, R₅, e assim sucessivamente, até R₁₁. Estes foram preenchidos com solo LATOSSOLO VERMELHO quartzarênico e dispostos em local aberto nas dependências do IFG – Campus Goiânia, para que recebessem incidência da luz solar (Figura 17). Em cada quadrante e centro da superfície do solo dos recipientes foram plantadas 10 sementes de milheto, exceto nos recipientes de referência (R₁ e R₂), e cada recipiente com solo cultivado recebeu a aplicação de 14 ml do fertilizante Fosfato Monoamônico (MAP). Durante o período de desenvolvimento das plantas de milheto, cada recipiente cultivado, inclusive os de referência, receberam a aplicação de cerca de 3 litros de água a cada dois dias. O período do experimento foi de maio a julho de 2015.



Figura 17 – Recipientes de PEAD utilizados para o cultivo de plantas de milho (*Pennisetum glaucum L.*).

Os recipientes R₃, R₅, R₇, R₈, R₉ e R₁₀ foram os principais utilizados para a coleta de dados de σ_a e w , e os recipientes R₄, R₆, R₈ e R₁₁ foram abertos no decorrer do experimento para a quantificação de massa radicular. O recipiente R₈ embora foi aberto para a quantificação de massa radicular, também foi destinado a coleta de dados de σ_a e w durante o período do experimento, pois este foi aberto no último dia de coleta de dados.

6.3 Estudo de Caso 1: Relação do sistema radicular com a condutividade elétrica aparente do solo

A coleta de dados de σ_a em cada um dos recipientes cultivados com plantas de milho e em cada um dos recipientes de referência, foram realizadas em três profundidades diferentes ($P_1=0,14$ m; $P_2=0,26$ m e $P_3=0,38$ m). Em cada profundidade foram feitas quatro medições de resistência elétrica aparente do solo R_m , em torno do perímetro dos recipientes, ou seja, em cada quadrante, e calculada a média dos quatro valores obtidos nas medições. Em seguida, utilizando (4.7), calculou-se a resistividade elétrica aparente do solo ρ_a e, pelo inverso de (4.7), a condutividade elétrica aparente do solo σ_a , respectivamente. A Tabela 1, Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam os valores médios de σ_a obtidos durante o período do experimento das três profundidades dos recipientes.

Tabela 1 – Valores médios de condutividade elétrica aparente do solo σ_a coletados na profundidade P₁ dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência.

Período (dias)	7	13	20	27	32	39	47	56	62	74
Recipiente	Condutividade elétrica aparente do solo σ_a (mS m ⁻¹)									
R ₁	2,904	3,086	4,158	4,240	3,758	3,161	3,317	5,443	13,427	2,904
R ₂	1,255	1,404	1,870	2,153	2,300	2,612	2,430	2,792	3,515	3,039
R ₃	32,369	19,733	7,269	8,641	1,679	1,679	0,946	0,703	1,751	1,381
R ₅	21,562	7,536	7,757	6,409	1,655	1,111	0,864	0,712	1,047	1,095
R ₇	25,229	13,915	22,685	18,878	4,427	1,699	0,597	0,634	1,235	1,249
R ₈	50,365	23,556	18,290	21,391	12,030	4,012	1,551	1,380	1,405	1,899
R ₉	58,686	6,281	6,235	19,119	6,007	2,287	1,287	0,521	0,961	1,380
R ₁₀	25,182	12,171	10,537	6,904	4,990	2,915	1,840	1,044	1,235	1,042

Tabela 2 – Valores médios de condutividade elétrica aparente do solo σ_a coletados na profundidade P₂ dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência.

Período (dias)	7	13	20	27	32	39	47	56	62	74
Recipiente	Condutividade elétrica aparente do solo σ_a (mS m ⁻¹)									
R ₁	3,153	4,330	6,542	6,307	5,094	4,581	8,600	9,125	17,616	9,380
R ₂	1,711	3,682	3,827	4,295	5,282	5,950	3,990	4,951	7,596	4,572
R ₃	11,556	21,323	40,292	26,781	10,335	3,426	0,742	0,923	2,523	1,677
R ₅	2,950	7,789	14,002	25,277	9,341	4,080	0,974	0,754	1,521	0,723
R ₇	5,879	26,414	39,011	39,011	27,104	8,255	0,971	1,260	1,517	1,290
R ₈	3,547	8,378	37,494	62,780	47,360	36,579	5,518	3,732	2,682	2,116
R ₉	2,496	15,461	50,935	54,426	40,534	34,968	2,767	1,232	0,658	0,619
R ₁₀	3,982	31,390	48,905	41,026	31,685	25,419	4,941	3,904	1,767	0,610

Tabela 3 – Valores médios de condutividade elétrica aparente do solo σ_a coletados na profundidade P₃ dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência.

Período (dias)	7	13	20	27	32	39	47	56	62	74
Recipiente	Condutividade elétrica aparente do solo σ_a (mS m ⁻¹)									
R ₁	0,604	13,357	14,014	11,599	14,951	22,343	17,937	22,154	24,263	0,604
R ₂	1,596	7,105	15,557	15,376	15,821	20,507	14,212	15,727	15,878	1,596
R ₃	4,642	2,482	2,328	6,042	2,824	1,865	4,741	3,124	3,028	3,523
R ₅	4,753	2,037	13,207	12,650	5,808	1,324	6,361	2,488	3,419	3,501
R ₇	4,803	7,304	21,189	27,490	23,272	20,236	5,416	3,848	4,388	5,003
R ₈	0,871	10,628	21,357	26,209	23,352	34,345	34,610	28,062	11,546	4,630
R ₉	0,325	3,389	9,095	23,680	28,004	26,260	12,818	6,166	1,696	1,332
R ₁₀	3,599	10,296	24,276	35,994	43,966	50,743	22,347	16,643	4,552	1,938

Observa-se nas tabelas acima que durante o experimento, os valores médios de σ_a na profundidade P₁ dos recipientes cultivados com plantas de milho variaram de 0,521 a 58,686 mS m⁻¹ e na profundidade P₂, a variação foi 0,610 a 62,780 mS m⁻¹, enquanto que na profundidade P₃, foi de 0,325 a 50,743 mS m⁻¹. Com relação aos recipientes de referência, a variação média dos valores na profundidade P₁ foi de 2,080 a 8,471 mS m⁻¹, na profundidade P₂ de 2,432 a 12,606 mS m⁻¹ e na profundidade P₃ de 1,100 a 21,425 mS m⁻¹.

Percebe-se que os valores máximos de σ_a nos recipientes cultivados com plantas de milho foram maiores do que os valores máximos dos recipientes de referência. Isso provavelmente ocorreu devido a aplicação de fertilizante no solo dos recipientes cultivados, que provocou o aumento da σ_a . O efeito do fertilizante na σ_a foi mais acentuado no início do experimento, portanto os valores maiores de σ_a obtidos dos recipientes cultivados, principalmente nas profundidades P₁ e P₂, são devido ao efeito do fertilizante, que ainda estava no processo inicial de assimilação pelo solo e pelas raízes das plantas de milho nos primeiros dias do experimento. O fertilizante foi aplicado na superfície do solo dos recipientes cultivados, por isso a σ_a nos primeiros dias foi maior nas profundidades P₁ e P₂.

A Figura 18 apresenta a variação da σ_a durante o período do experimento na altura P₁ dos recipientes que tiveram o solo cultivado com plantas de milho e dos recipientes de referência. É possível observar na Figura 9 que a σ_a da maioria dos recipientes cultivados é maior do que dos recipientes de referência até por volta do trigésimo dia do período do experimento. Os recipientes de referência, por não terem recebido aplicação de fertilizante, tiveram os valores de σ_a menores nos primeiros dias do experimento. E por volta do quinquagésimo dia, a σ_a dos recipientes de referência passou a ser maior do que dos recipientes cultivados com plantas de milho.

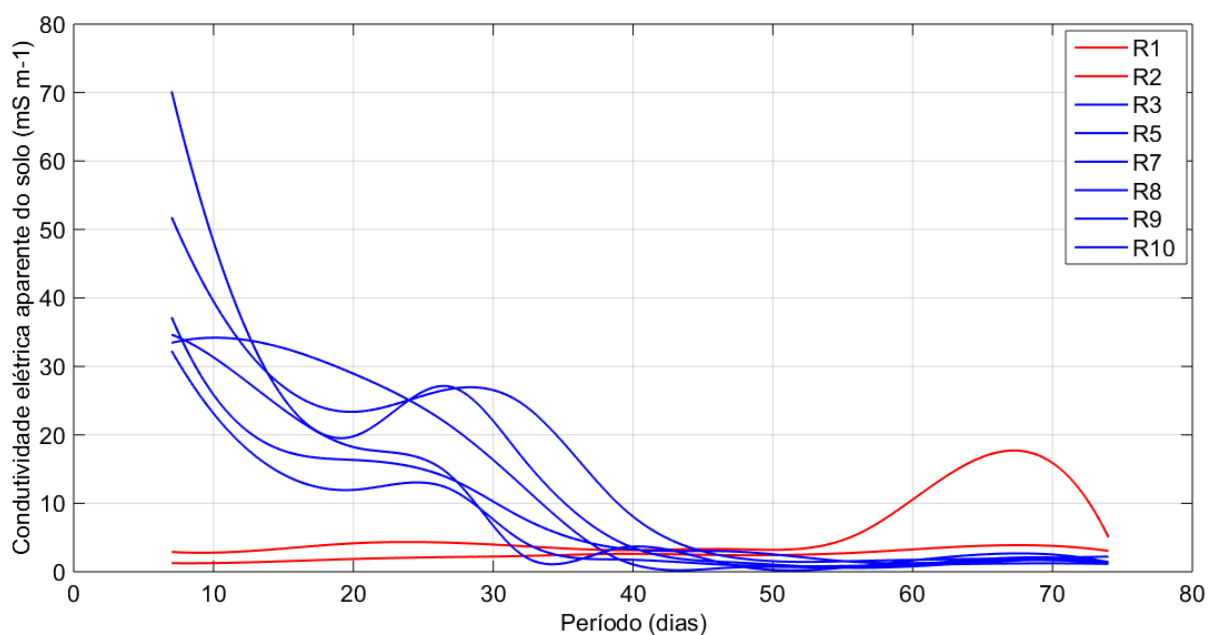


Figura 18 – Variação da condutividade elétrica aparente do solo σ_a na profundidade P₁ dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (R₁ e R₂).

O desenvolvimento das raízes plantas de milho provavelmente influenciaram nas propriedades elétricas do solo, reduzindo σ_a a partir do trigésimo dia (os maiores valores de σ_a nos dias anteriores foram maiores possivelmente devido ao efeito da fertilização do solo), quando as raízes das plantas de milho atingiram a profundidade de cerca de 0,12 m de comprimento (Figura 19), próximo do valor da profundidade de medição P_1 (0,14 m).



Figura 19 – Raízes de milho após 30 dias da sementeira.

A Figura 20 apresenta a variação da σ_a durante o período do experimento na profundidade P_2 dos recipientes que tiveram o solo cultivado com plantas de milho e dos recipientes de referência.

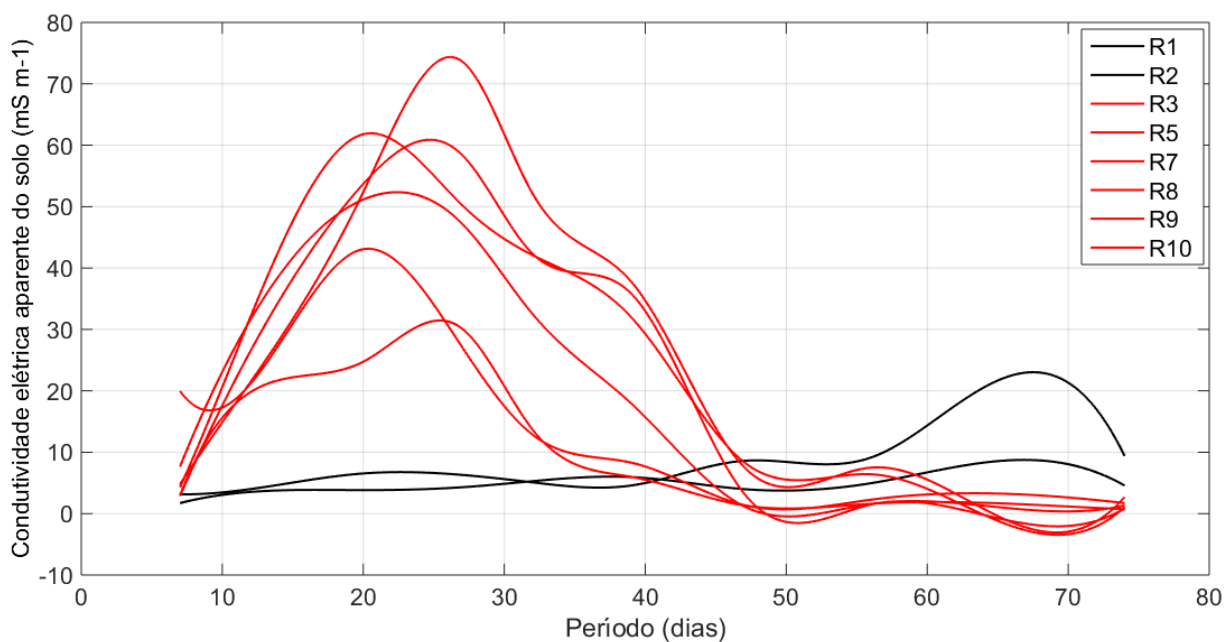


Figura 20 – Variação da condutividade elétrica aparente do solo σ_a na profundidade P_2 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (R_1 e R_2).

Observa-se na Figura 20 que nos primeiros dias do experimento, os valores de σ_a dos recipientes cultivados estiveram próximos dos valores dos recipientes de referência, diferente do que ocorreu na profundidade P_1 como mostrado na Figura 9. Mas os valores de σ_a dos recipientes cultivados aumentaram até por volta do vigésimo e trigésimo dia, ficando acima dos valores dos recipientes de referência. Portanto, é possível ter havido a lixiviação do fertilizante da profundidade P_1 para a profundidade P_2 entre o vigésimo e trigésimo dia, provocando o aumento da σ_a na profundidade P_2 , mas após esse período, a σ_a teve redução ficando com os valores abaixo dos valores dos recipientes de referência após o quadragésimo dia, permanecendo assim até o último dia do experimento. Portanto, é provável que o crescimento das raízes das plantas de milho começaram a influenciar na σ_a , na profundidade de medição P_2 , entre o vigésimo e trigésimo dia.

Com relação a variação da σ_a na profundidade P_3 , os valores dos recipientes de referência estiveram dentro da faixa de variação dos valores dos recipientes com solo cultivado, até por volta do sexagésimo dia do período do experimento. A partir deste dia, os valores de todos os recipientes cultivados ficaram abaixo dos valores dos recipientes de referência, como mostra a Figura 21.

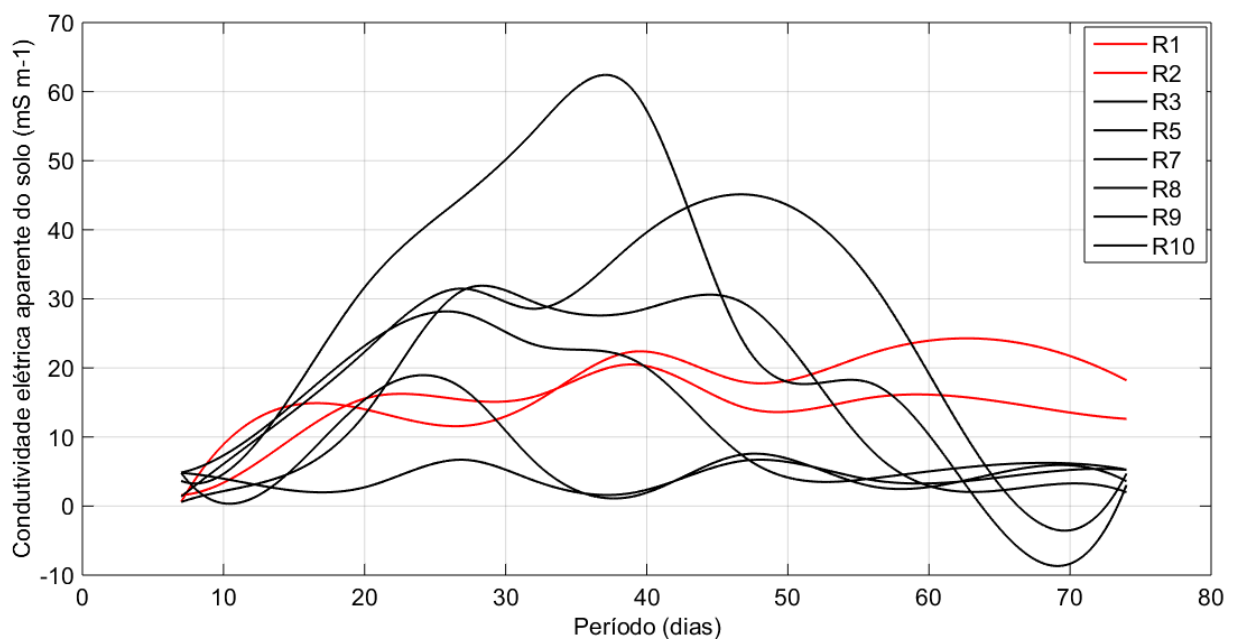


Figura 21 – Variação da condutividade elétrica aparente do solo σ_a na profundidade P_3 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (R_1 e R_2).

As raízes das plantas de milho podem ter crescido o suficiente para influenciar na σ_a na profundidade de medição P_3 , pois no sexagésimo dia do experimento as raízes das plantas de milho haviam crescido até o fundo dos recipientes (Figura 22).



Figura 22 – Raízes das plantas de milho após 60 dias da sementeira.

Para verificar melhor a dinâmica de variação da σ_a dos recipientes cultivados com plantas de milho, foi realizado o cálculo da média dos valores obtidos de cada uma das profundidades dos recipientes de cada dia de coleta de dados. Por exemplo, foram separados todos os valores de σ_a obtidos na profundidade P₁ de todos os recipientes cultivados até o final do experimento, e calculado o valor médio para cada dia de coleta, o mesmo procedimento foi realizado para as demais profundidades P₂ e P₃ como mostra a Tabela 4. O mesmo procedimento foi realizado para os recipientes de referência conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 4 – Variação dos valores médios de condutividade elétrica aparente do solo σ_a dos recipientes cultivados com plantas de milho.

Recipientes cultivados com plantas de milho	Período (dias)	7	13	20	27	32	39	47	56	62	74
	Profundidade	Condutividade elétrica aparente do solo σ_a (mS m ⁻¹)									
Média	P ₁	35,565	13,866	12,129	13,557	5,131	2,284	1,181	0,832	1,272	1,341
	P ₂	5,068	18,459	38,440	41,550	27,726	18,788	2,652	1,968	1,778	1,172
	P ₃	3,166	6,023	15,242	22,011	21,204	22,462	14,382	10,055	4,772	3,321

Tabela 5 – Variação dos valores médios de condutividade elétrica aparente do solo σ_a dos recipientes de referência.

Recipiente de referência	Período (dias)	7	13	20	27	32	39	47	56	62	74
	Profundidade	Condutividade elétrica aparente do solo σ_a (mS m ⁻¹)									
Média	P ₁	2,080	2,245	3,014	3,197	3,029	2,886	2,873	4,118	8,471	4,043
	P ₂	2,432	4,006	5,185	5,301	5,188	5,265	6,295	7,038	12,606	6,976
	P ₃	1,100	10,231	14,786	13,488	15,386	21,425	16,074	18,941	20,071	15,414

Por meio da plotagem dos dados da Tabela 4, como mostra a Figura 23, é possível verificar como a variação da σ_a nos recipientes cultivados com plantas de milho se comportou nas profundidades P₁, P₂ e P₃. No sétimo dia, após a semeadura das plantas de milho, a σ_a do solo na profundidade P₁ foi maior do que nas demais profundidades P₂ e P₃, pois a água e o fertilizante, aplicado no início do experimento, se concentraram melhor na profundidade P₁, provocando aumento da σ_a , mas após 7 dias a tendência foi de queda do valor da σ_a de P₁ até o último dia do experimento. A emergência das plantas de milho ocorrem após 7 dias da semeadura, portanto a queda do valor de σ_a em P₁ após 7 dias pode ser atribuída ao surgimento das primeiras raízes nos primeiros centímetros do solo e à diminuição do efeito do fertilizante, pois este foi lixiviado pela aplicação periódica de água às demais profundidades.

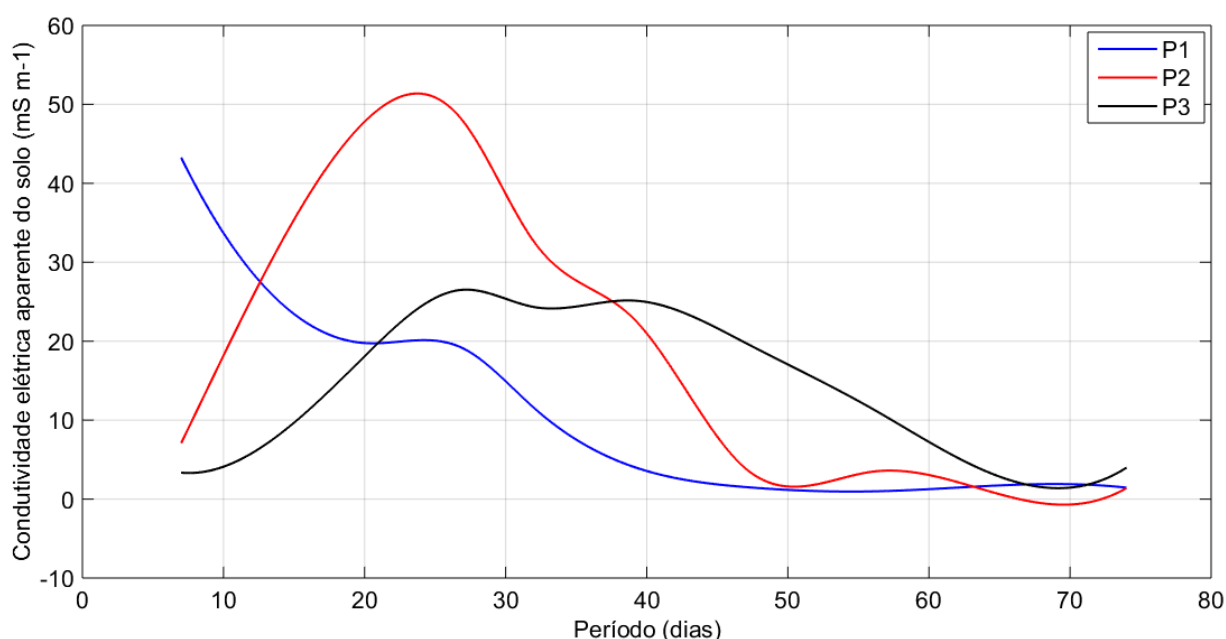


Figura 23 – Variação média da condutividade elétrica aparente do solo σ_a nas profundidades P₁, P₂ e P₃ dos recipientes cultivados com plantas de milho.

Enquanto a tendência da σ_a foi de queda durante o experimento na profundidade P₁, na profundidade P₂ a tendência foi de aumento até por volta do trigésimo dia, e o valor de σ_a ficou acima do valor da profundidade P₁. Isso pode ter ocorrido devido a retenção de água e do fertilizante lixiviado da profundidade P₁. Mas após o trigésimo dia, a tendência foi de queda da σ_a em P₂, mas ainda assim o valor de σ_a foi maior do que na profundidade P₁. Mas a partir do quinquagésimo dia os valores de σ_a das profundidades P₁ e P₂ quase se igualaram, permanecendo assim até o último dia do experimento. A presença de raízes nas duas profundidades P₁ e P₂ podem ter causado o mesmo efeito na σ_a do solo.

Na profundidade P₃, ao sétimo dia, o valor da σ_a do solo esteve significativamente abaixo do valor da profundidade P₁ e um pouco abaixo do valor da profundidade P₂, mas após 7 dias da

semeadura das plantas de milho, a tendência também foi de aumento da σ_a até por volta do trigésimo dia, com o valor de σ_a ficando acima do valor da profundidade P₁ e abaixo do valor da profundidade P₂. Esse aumento pode ser atribuído ao fertilizante lixiviado da profundidade P₂, cujo o efeito deste foi menor devido a assimilação pelas raízes das plantas de milho. Mas a partir do trigésimo dia a tendência também foi de queda da σ_a , ficando com o valor de σ_a acima dos valores das demais profundidades, provavelmente devido ao acúmulo de água; embora os recipientes tivessem furos no fundo, mas a aplicação periódica de água ocasionou maior retenção de umidade na profundidade P₃, mas após o sexagésimo dia os valores de condutividade elétrica aparente σ_a das três profundidades ficaram próximos, isso pode ser atribuído ao crescimento das raízes das plantas de milho até o fundo dos recipientes. Portanto ao final do experimento pode se dizer que as raízes produziram o mesmo efeito na σ_a nas três profundidades.

Com relação a plotagem dos dados da Tabela 5 referente aos recipientes de referência, a Figura 24 mostra que a σ_a do solo ao longo do experimento foi menor na profundidade P₁, devido ao menor teor de umidade do solo w retido na superfície do solo e houve maior retenção de água na profundidade P₃. Assim a σ_a na profundidade P₃ aumentou de forma significativa ao longo de período do experimento, passando de 1,100 mS m⁻¹ no início do experimento para 15,414 mS m⁻¹ no final do experimento. Nas demais profundidades o aumento mais significativo foi a partir do quinquagésimo dia. Apesar de ter havido furos nos recipientes para escoamento do excesso de água, os resultados mostraram que houve retenção maior de água no solo no fundo dos recipientes, por isso foi maior a σ_a na profundidade P₃. Apesar dos valores de σ_a na profundidade P₂ serem maiores do que na profundidade P₁, observa-se na Figura 25 que as duas curvas de variação da σ_a nessas profundidades tiveram o mesmo padrão de comportamento, indicando que o efeito da umidade provocada na profundidade P₃ foi significativamente maior na σ_a .

Como mostra a Figura 25, no final do experimento quando o volume de raízes no solo foi maior, enquanto houve aumento durante o experimento da σ_a nos recipientes de referência, houve redução da mesma nos recipientes cultivados, mostrando que enquanto as raízes das plantas reduzem a σ_a , o w eleva os valores desse parâmetro. Portanto no final do experimento as raízes demandaram e absorveram mais água, com isso reduzir w favorece redução de σ_a .

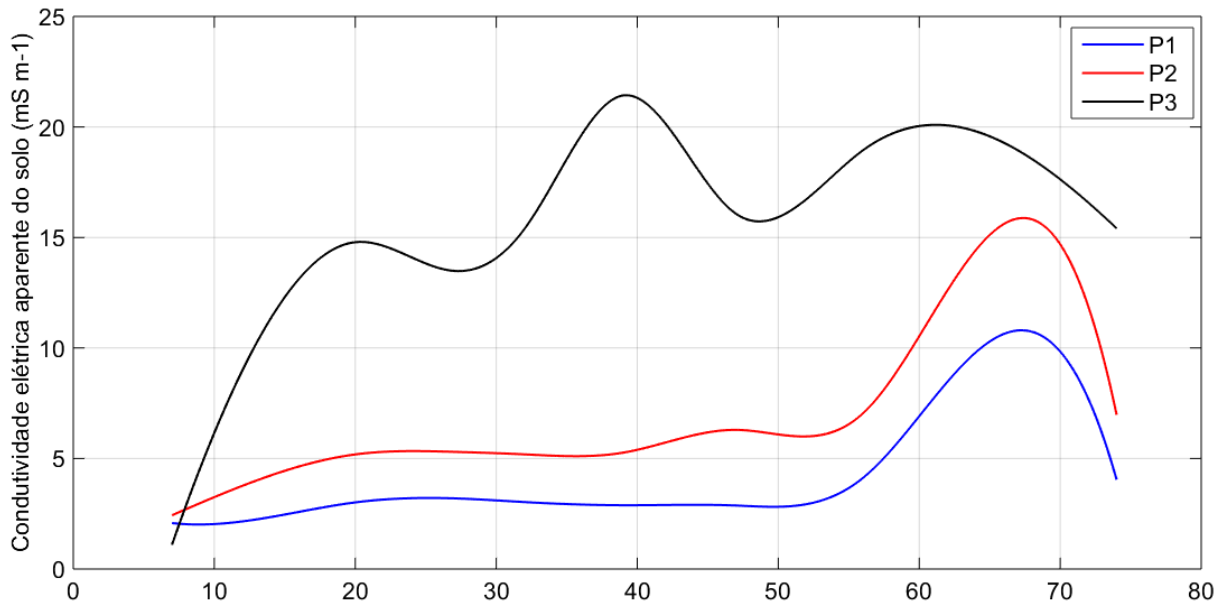


Figura 24 – Variação média da condutividade elétrica aparente do solo σ_a nas profundidades P₁, P₂ e P₃ dos recipientes de referência.

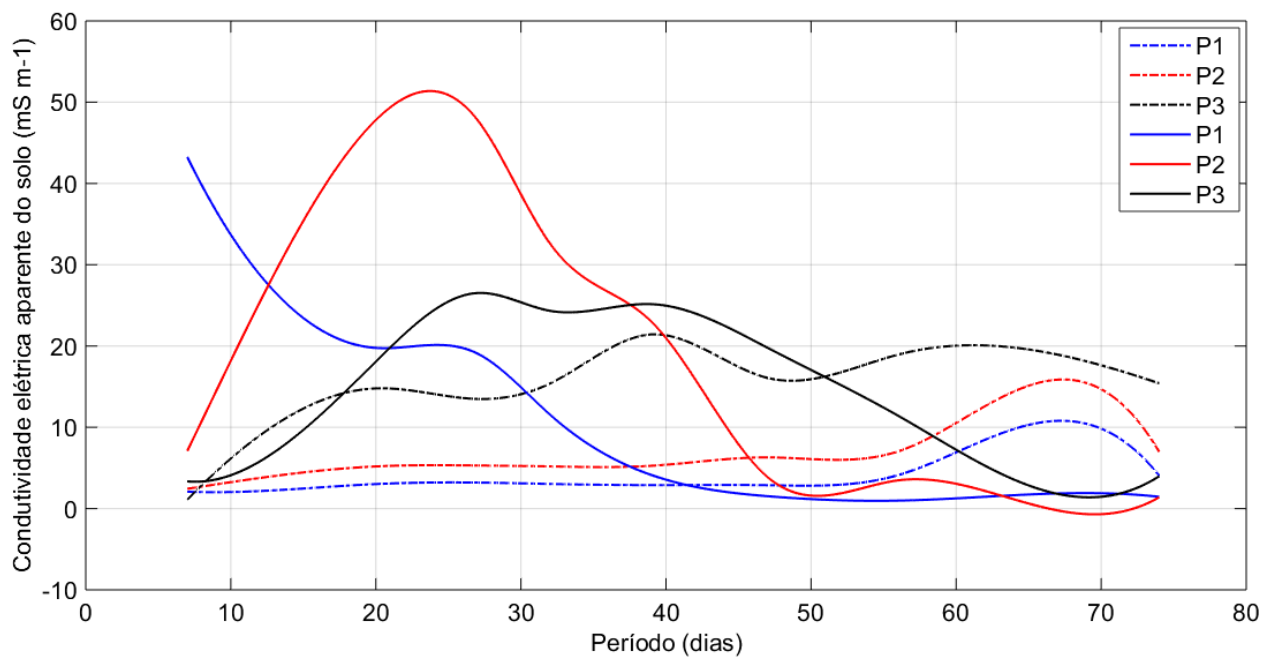


Figura 25 – Variação média da condutividade elétrica aparente do solo σ_a nas profundidades P₁, P₂ e P₃ dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (curvas com linhas tracejadas).

6.4 Estudo de Caso 2: Relação do teor de umidade com o sistema radicular do solo

Um dos fatores que podem influenciar na σ_a , além das raízes, é o teor de umidade do solo w . Portanto foi verificado a influência desse parâmetro em conjunto com a influência do sistema radicular no solo.

A coleta de dados referentes ao w em cada um dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência, foram realizadas também em três profundidades diferentes ($P_1=0,14$ m; $P_2=0,26$ m e $P_3=0,38$ m). Em cada profundidade foram feitas quatro medições de w , em torno do perímetro dos recipientes, ou seja, em cada quadrante, e calculada a média dos quatro valores obtidos nas medições. A Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8 apresentam os valores médios de w dos recipientes, obtidos durante o período do experimento em cada profundidade dos recipientes.

Tabela 6 – Valores médios de teor de umidade do solo w coletados na profundidade P_1 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência.

Período (dias)	7	13	20	27	32	39	47	56	62	74
Recipiente	Teor de umidade do solo (%)									
R ₁	5,7	11,0	8,5	7,0	10,1	11,0	14,6	14,5	13,6	12,4
R ₂	3,0	8,9	8,4	4,8	7,3	9,7	12,3	10,0	9,4	7,5
R ₃	17,7	20,4	13,4	10,7	6,9	6,7	6,0	3,9	7,6	9,1
R ₅	19,6	17,8	12,5	12,9	7,2	4,1	5,7	4,6	6,2	7,9
R ₇	17,8	22,9	13,8	8,2	9,1	4,9	1,0	2,7	5,2	7,4
R ₈	26,1	24,9	16,0	17,4	16,4	11,2	9,9	7,6	7,9	9,5
R ₉	29,0	26,6	19,7	12,3	13,6	10,3	9,1	4,7	5,5	7,0
R ₁₀	32,7	20,2	16,1	13,1	11,1	11,0	7,9	4,2	5,5	6,1

Tabela 7 – Valores médios de teor de umidade do solo w coletados na profundidade P_2 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência.

Período (dias)	7	13	20	27	32	39	47	56	62	74
Recipiente	Teor de umidade do solo (%)									
R ₁	8,8	13,6	14,3	10,9	11,9	12,7	14,7	16,6	13,9	16,5
R ₂	1,9	8,6	8,6	8,1	6,6	13,8	11,3	13,1	10,4	9,5
R ₃	14,4	29,0	27,3	13,9	12,9	13,1	5,9	4,5	6,0	4,7
R ₅	8,8	15,5	25,4	14,5	10,6	9,5	3,1	2,7	4,3	1,9
R ₇	5,7	19,5	25,3	14,8	23,2	11,2	2,1	1,1	3,1	2,4
R ₈	10,2	25,7	25,0	22,3	16,3	22,2	9,5	8,8	4,5	6,0
R ₉	14,1	24,9	28,6	23,4	23,2	17,5	11,0	5,0	2,8	3,4
R ₁₀	17,2	26,7	30,3	28,6	27,3	19,4	9,5	5,2	1,9	0,3

Tabela 8 – Valores médios de teor de umidade do solo w coletados na profundidade P_3 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência.

Período (dias)	7	13	20	27	32	39	47	56	62	74
Recipiente	Teor de umidade do solo (%)									
R ₁	1,3	21,1	17,2	13,3	11,8	15,8	21,9	23,7	22,4	22,7
R ₂	1,8	12,3	13,4	12,6	15,5	23,0	21,7	23,8	17,0	20,8
R ₃	6,4	7,1	7,3	6,3	6,2	4,0	8,6	8,0	4,6	6,1
R ₅	11,4	8,7	11,5	11,6	9,0	3,3	9,4	7,1	5,2	4,9
R ₇	5,2	15,6	21,3	18,0	18,9	17,1	7,4	5,3	3,1	5,3
R ₈	2,8	18,2	24,7	16,9	20,4	26,2	24,0	20,9	12,5	4,6
R ₉	1,6	12,6	16,9	15,2	19,5	18,0	13,8	10,6	3,3	2,1
R ₁₀	4,5	15,4	23,8	19,9	23,5	22,6	17,2	12,5	4,0	3,1

Observa-se na Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8 que a variação do w , tanto nos recipientes cultivados quanto nos de referência, teve comportamento semelhante a variação da σ_a , ou seja, o w nos recipientes de referência teve tendência de aumento, enquanto que nos recipientes cultivados, a tendência foi de queda.

Durante o experimento, os valores médios de w na profundidade P_1 dos recipientes cultivados com plantas de milho variaram de 1,0 a 32,7%, na profundidade P_2 a variação foi 0,3 a 30,3%, enquanto que na profundidade P_3 foi de 1,6 a 26,2%. Com relação aos recipientes de referência, a variação média dos valores na profundidade P_1 foi de 3,0 a 14,6%, na profundidade P_2 de 1,9 a 16,6% e na profundidade P_3 de 1,3 a 23,8%.

A Figura 26 mostra a variação do w na profundidade P_1 nos recipientes. Observa-se na Figura 26 que após 7 dias da semeadura das culturas de milho, os valores de w dos recipientes cultivados foram maiores do que os valores dos recipientes de referência e assim continuou até por volta do trigésimo dia do experimento. Após 40 dias, os valores de w dos recipientes de referência passaram a ser maiores do que os valores dos recipientes cultivados.

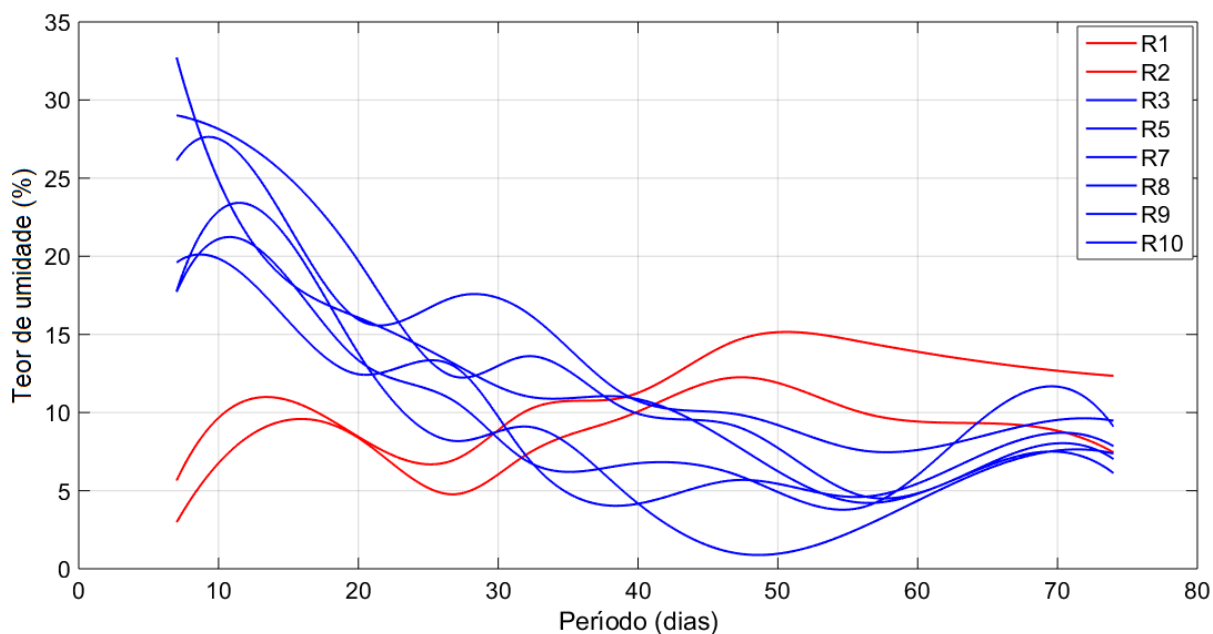


Figura 26 – Variação do teor de umidade do solo w na profundidade P_1 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (R_1 e R_2).

Como as plantas de milho emergem com 7 dias, os valores de w na profundidade P_1 dos recipientes cultivados foram maiores que os valores dos recipientes de referência, isso ocorreu possivelmente devido a absorção de água pelas primeiras raízes das plantas de milho, com isso a maior retenção de água na superfície do solo. A medida que as raízes foram se desenvolvendo maior foi a absorção de água, por isso os valores de w foram reduzindo ao longo do experimento. Já nos recipientes de referência a tendência foi de aumento do w na profundidade P_1 , indicando que as raízes nos recipientes cultivados influenciam no w . Após 50 dias, a absorção de água possivelmente foi reduzida pelas plantas de milho, pois o w aumentou, ficando com os valores de w próximos dos valores dos recipientes de referência.

Na profundidade P_2 o mesmo comportamento da curva de w da profundidade P_1 foi observado ao longo do experimento, exceto com 7 dias após a semeaduras das plantas. Com 7 dias, na maioria dos recipientes cultivados, o w na profundidade P_2 foi menor do que na profundidade P_1 , com os valores de w ficando próximos aos valores dos recipientes de referência. Por não haver raízes na profundidade P_2 , com 7 dias, que poderiam reter água, o w nessa profundidade foi menor, mas houve aumento após 7 dias e redução após 20 dias. Portanto as raízes se desenvolveram chegando a absorver a umidade do solo na profundidade P_2 após 20 dias da semeadura; embora as raízes chegaram a essa profundidade após 30 dias, mas possivelmente devido a capilaridade do solo conseguiram absorver água da profundidade P_2 . No final do experimento os valores de w dos recipientes cultivados ficaram abaixo dos valores dos recipientes de referência. Após 60 dias as raízes cresceram até a profundidade

P₃ (como mostrado na Figura 10), o que justifica maior absorção de água na profundidade P₂, devido os valores de w serem menores do que os observados nos recipientes de referência (Figura 27).

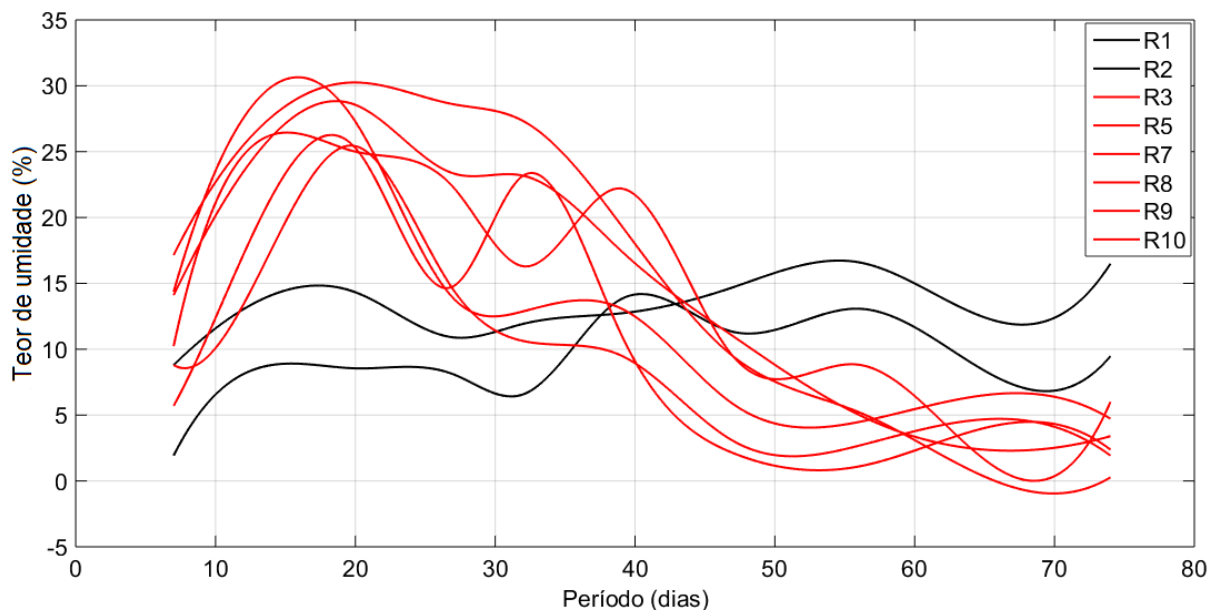


Figura 27 – Variação do teor de umidade do solo w na profundidade P₂ dos recipientes cultivados com plantas de milho e de referência (R₁ e R₂).

Na profundidade P₃, após 7 dias, os valores de w dos recipientes cultivados ficaram próximos dos valores dos recipientes de referência, mas aumentaram até por volta do vigésimo dia. Apesar de ter aumentado o valor do w até o vigésimo dia, os valores foram menores do que na profundidade P₂. A partir desse dia a tendência foi de queda dos valores apesar das oscilações. O valor máximo de w na profundidade P₁, P₂ e P₃ foram de 32,7 %; 30,3% e 26,2 %, respectivamente. Portanto quanto maior foi a profundidade do solo, menor foi o teor de umidade no início do experimento. No final do experimento os valores de w dos recipientes cultivados ficaram abaixo dos valores dos recipientes de referência (Figura 28). Mais uma vez os resultados indicaram queda de w quando da presença de raízes no solo.

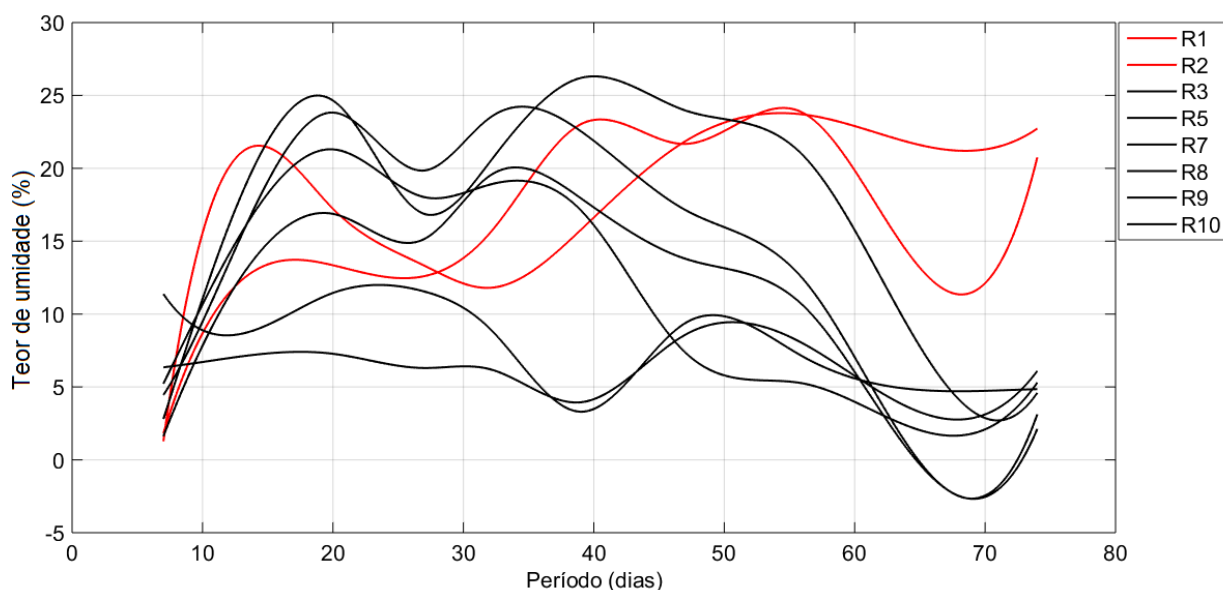


Figura 28 – Variação do teor de umidade do solo w na profundidade P_3 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (R_1 e R_2).

Assim como foi feito com os valores de σ_a , foi verificada a dinâmica de variação do w dos recipientes cultivados com plantas de milho nas três profundidades. Foi realizado o cálculo da média dos valores obtidos de cada uma das profundidades dos recipientes de cada dia de coleta de dados. Por exemplo, foram separados todos os valores obtidos na profundidade P_1 de todos os recipientes cultivados, até o final do experimento, e calculado o valor médio para cada dia de coleta, o mesmo procedimento foi realizado para as demais profundidades como mostra a Tabela 9. O mesmo procedimento foi realizado para os recipientes de referência conforme mostra a Tabela 10.

Tabela 9 – Variação dos valores médios de teor de umidade do solo w dos recipientes cultivados com plantas de milho.

Recipientes cultivados com plantas de milho	Período (dias)	7	13	20	27	32	39	47	56	62	74
	Profundidade	Teor de umidade do solo w (%)									
Média	P_1	23,8	22,1	15,3	12,4	10,7	8,0	6,6	4,6	6,3	7,8
	P_2	11,7	23,6	27,0	19,6	18,9	15,5	6,9	4,6	3,8	3,1
	P_3	5,3	12,9	17,6	14,7	16,3	15,2	13,4	10,7	5,5	4,4

Tabela 10 – Variação dos valores médios de teor de umidade do solo w dos recipientes de referência.

Recipientes de referência	Período (dias)	7	13	20	27	32	39	47	56	62	74
	Profundidade	Teor de umidade do solo w (%)									
Média	P ₁	4,3	10,0	8,4	5,9	8,7	10,3	13,4	12,3	11,5	9,9
	P ₂	5,4	11,1	11,4	9,5	9,3	13,3	13,0	14,8	12,1	13,0
	P ₃	1,6	16,7	15,3	13,0	13,7	19,4	21,8	23,8	19,7	21,7

Por meio da plotagem dos dados da Tabela 9, como mostra a Figura 29, no sétimo dia, após a semeadura das plantas de milho, o w na profundidade P₁ foi maior do que nas demais profundidades P₂ e P₃. Observou-se que quanto maior foi a profundidade do solo, menor foi o w nos primeiros dias do experimento. Até por volta do vigésimo dia o w aumentou nas profundidades P₂ e P₃ enquanto que na profundidade P₁ houve redução. A redução de w na profundidade P₁ foi devido ao surgimento das primeiras raízes das plantas de milho, que começaram a absorver água nos primeiros centímetros do solo. Mas a partir do vigésimo dia observou-se queda dos valores de w nas profundidades P₂ e P₃, e assim continuou até o término do experimento. É possível que as raízes tenham conseguido absorver água das demais profundidades P₂ e P₃ reduzindo assim o w , apesar das raízes terem alcançado 0,12 m com 30 dias.

Com relação aos recipientes de referência, a Figura 30 mostra que a tendência foi de aumento de w . A curva de variação do w das profundidades P₁ e P₂ apresentaram comportamento semelhante, com valores bem próximos. Observa-se também que na Figura 30 os valores de w na profundidade P₃ foram significativamente maiores em comparação as outras profundidades, indicando que houve maior retenção de água nessa profundidade, apesar de haver furos no fundo dos recipientes para escoamento do excesso de água.

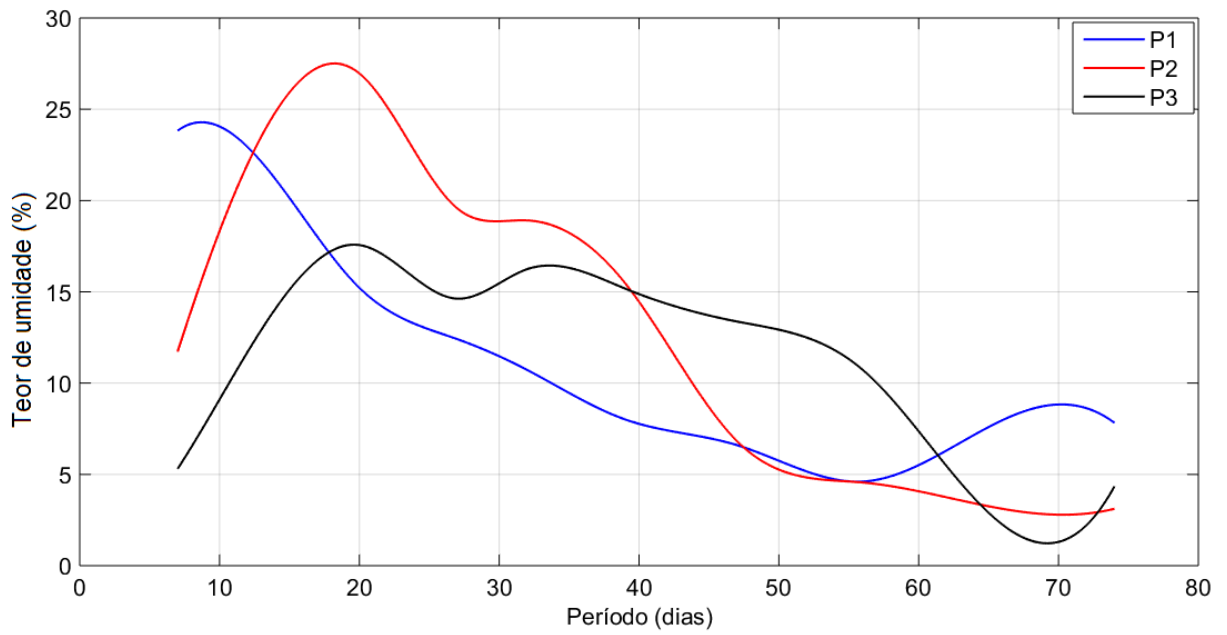


Figura 29 – Variação média do teor de umidade do solo w nas profundidades P_1 , P_2 e P_3 dos recipientes cultivados com plantas de milho.

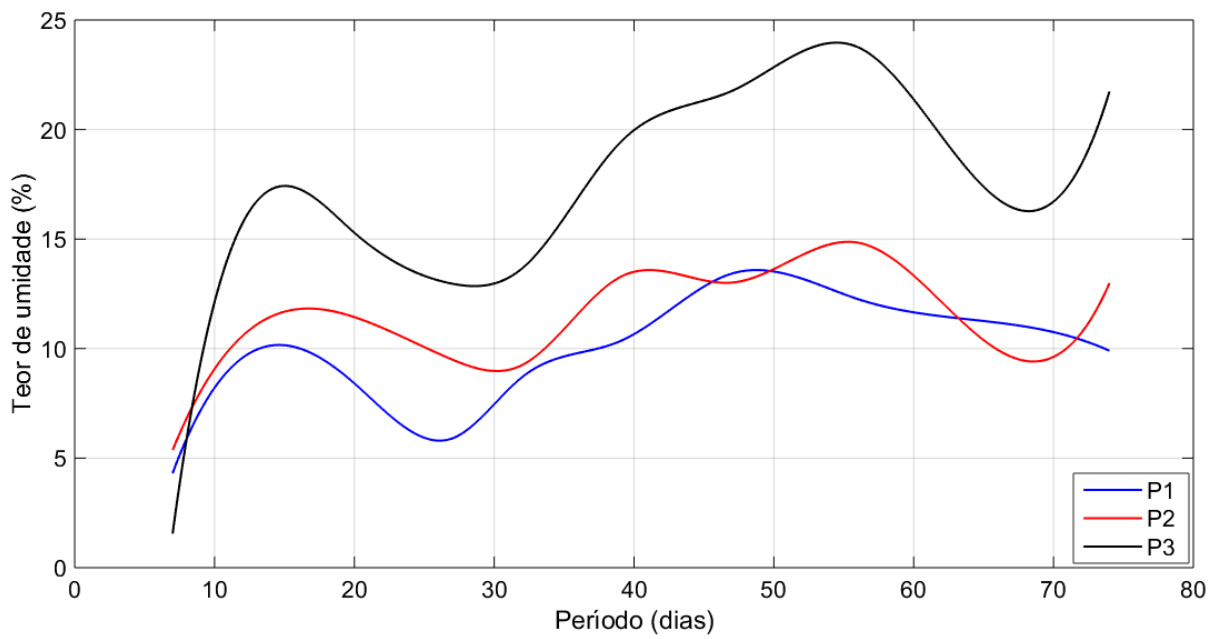


Figura 30 – Variação média do teor de umidade do solo w nas profundidades P_1 , P_2 e P_3 dos recipientes de referência.

A Figura 31 mostra a sobreposição das curvas de variação do w nas três profundidades dos recipientes cultivados e dos recipientes de referência. É possível observar na figura que durante o experimento, o w nos recipientes de referência tende a aumentar e nos recipientes cultivados tende a diminuir devido a absorção de água pelas raízes. Apesar dos recipientes cultivados terem recebido periodicamente a mesma quantidade de água, a umidade reduziu devido à maior demanda de água pelas plantas de milho ao longo do período do experimento.

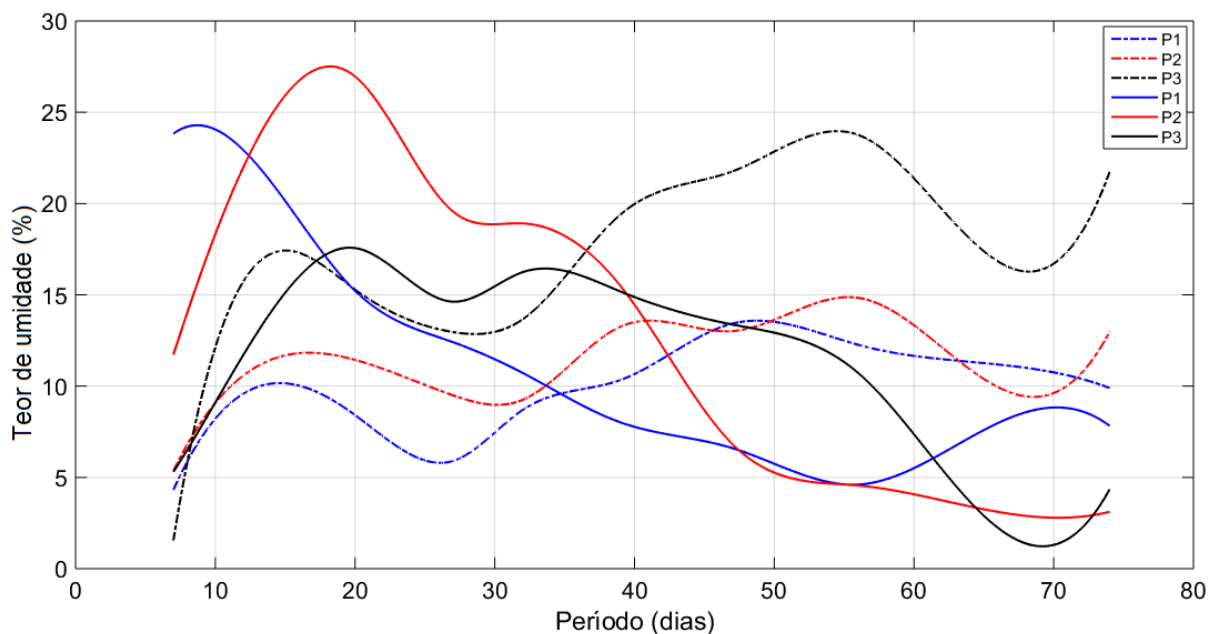


Figura 31 – Variação média do teor de umidade do solo w nas profundidades P_1 , P_2 e P_3 dos recipientes cultivados com plantas de milho e dos recipientes de referência (curvas com linhas tracejadas).

6.5 Estudo de Caso 3: Relação da massa radicular com a condutividade elétrica aparente do solo

Os recipientes R_4 , R_6 , R_8 e R_{11} foram escolhidos aleatoriamente durante o experimento para avaliação da distribuição das raízes e quantificação de massa radicular das plantas de milho. Para isto, a cada 15 dias um recipiente deveria ser aberto. O primeiro recipiente a ser aberto foi o R_{11} , mas este foi aberto com 30 dias de experimento, devido a pequena quantidade de raízes apresentadas nos primeiros 15 dias. Porém, mesmo sendo aberto com 30 dias, as raízes ainda tinham tamanho reduzido, cerca de 0,12m, por isso não foi feita a quantificação da massa radicular, mas os demais recipientes foram abertos a cada 15 dias e a massa radicular quantificada. A Tabela 11 apresenta os resultados de massa radicular em cada profundidade dos recipientes escolhidos aleatoriamente durante o experimento. Na Tabela 11 observa-se que quanto maior a profundidade menor a massa radicular das plantas de milho. A massa total de raízes nos recipientes a longo de 30 dias variou de 0,097 para 0,159kg.

Tabela 11 – Massa radicular em cada profundidade dos recipientes cultivados escolhidos aleatoriamente durante o experimento.

Dias após a semeadura	Recipiente	P ₁ = 0,14 m	P ₂ = 0,26 m	P ₃ = 0,38 m	Total (kg)
		Massa radicular (kg)			
45	R ₄	0,051	0,031	0,015	0,097
60	R ₆	0,049	0,038	0,018	0,105
75	R ₈	0,090	0,046	0,022	0,159

A Tabela 12 mostra os valores de massa radicular em comparação aos valores médios de σ_a dos recipientes cultivados com plantas de milho. Observou-se que na profundidade P₁ que a σ_a aumentou de acordo com o aumento da massa radicular, enquanto nas demais profundidades houve diminuição da σ_a .

Tabela 12 – Comparação dos valores de massa radicular com os valores médios de condutividade elétrica aparente do solo σ_a dos recipientes cultivados com plantas de milho.

Recipiente R ₄ (45 dias)			Recipiente R ₆ (60 dias)			Recipiente R ₈ (75 dias)		
Profundidade	Massa (kg)	σ_a média (mS m ⁻¹)	Profundidade	Massa (kg)	σ_a média (mS m ⁻¹)	Profundidade	Massa (kg)	σ_a média (mS m ⁻¹)
P ₁	0,051	1,181	P ₁	0,049	1,272	P ₁	0,090	1,341
P ₂	0,031	2,652	P ₂	0,038	1,778	P ₂	0,046	1,172
P ₃	0,015	14,382	P ₃	0,018	4,772	P ₃	0,022	3,321

O teor de umidade do solo w pode ter influenciado na σ_a na profundidade P₁, pois como mostrado na Figura 29, o w aumentou próximo ao termino do experimento. É possível observa na Tabela 12 que na maioria das vezes que quanto maior foi profundidade do solo menor foi a massa radicular e menor a σ_a do solo. Portanto é provável que quanto maior a massa radicular menor a σ_a , como mostra a Figura 32, onde são apresentadas as equações da correlação da massa radicular com σ_a nas três profundidades para o tipo de solo utilizado na pesquisa deste trabalho.

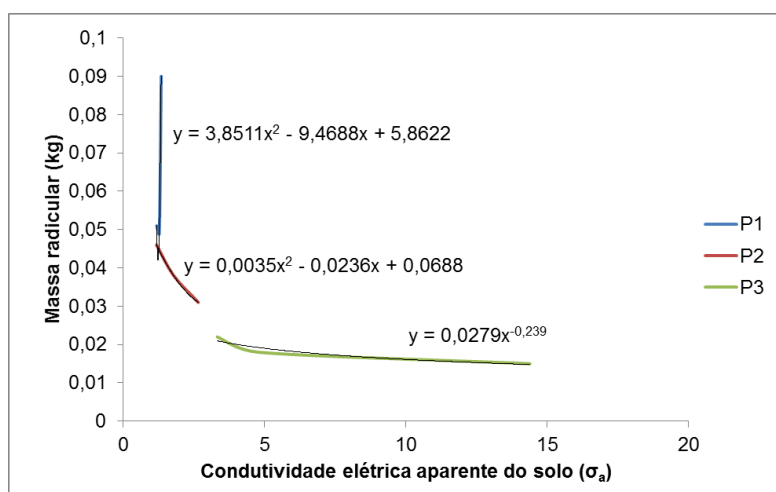


Figura 32 – Correlação da massa radicular com a condutividade elétrica aparente do solo σ_a .

6.6 Estudo de Caso 4: Mapeamento do sistema radicular no solo

Para verificar a capacidade de utilização da σ_a como metodologia de identificação de sistema radicular no solo em condições de campo, uma área de 9x6 m, parcialmente cultivada com plantas de milho (*Zea mays*), foi delimitada na Fazenda Capivara, situada no município de Santo Antônio de Goiás (GO), coordenadas UTM: E 772000 e 775750 e entre N 8649750 e 86444750. A fazenda é um dos campos de pesquisa do Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (CNPAP), ou simplesmente, Embrapa Arroz e Feijão.

O plantel de milho na metade da área delimitada estava com as plantas no estágio de maturação, estágio em que o sistema radicular das plantas encerra o crescimento. O solo da área é classificado como LATOSSOLO VERMELHO ácrico típico, de textura argilosa (EMBRAPA, 2012). A Figura 33 apresenta o esquema de coleta de dados para o mapeamento do sistema radicular no solo através da σ_a e de acordo com o método do Caminhamento Elétrico.

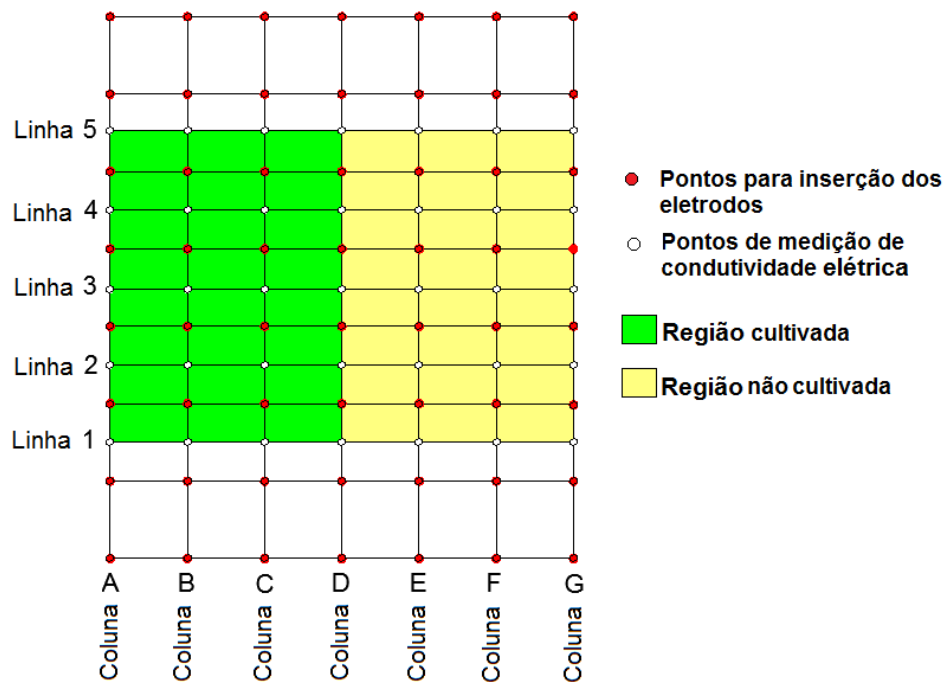


Figura 33 – Esquema de coleta de dados para o mapeamento do sistema radicular no solo através da σ_a e de acordo com o método do Caminhamento Elétrico.

O espaçamento d entre os eletrodos foi de 1,5 m e a profundidade P dos eletrodos de 0,20 m. A coleta de dados foi feita ao longo de toda área delimitada. Foram coletados dados de resistência elétrica aparente R_m e em seguida, utilizando (4.7), calculadas a ρ_a e a σ_a , respectivamente. A Tabela 13 apresenta os dados de σ_a .

Tabela 13 – Dados de condutividade elétrica aparente do solo σ_a da área delimitada.

Condutividade elétrica aparente do solo σ_a (mS m ⁻¹)							
	Coluna A	Coluna B	Coluna C	Coluna D	Coluna E	Coluna F	Coluna G
Linha 1	1,081	1,067	0,507	1,003	1,471	1,932	1,943
Linha 2	0,962	0,908	1,352	1,785	2,568	2,440	2,401
Linha 3	0,773	0,395	0,771	1,169	1,748	2,035	2,150
Linha 4	1,099	0,374	0,383	1,420	2,119	2,476	2,304
Linha 5	0,876	1,035	1,048	1,592	2,182	2,254	2,384

A Figura 34 apresenta a distribuição espacial da σ_a da área delimitada para o mapeamento do sistema radicular no solo. É possível observar na Figura 34 que na área delimitada há um contraste entre a região cultivada com plantas de milho e a não cultivada. A região cultivada apresenta menor σ_a em comparação com a região não cultivada. É possível observar também uma região de transição a partir do limite da região cultivada, ou seja, a σ_a , alguns metros além da região cultivada, apresenta aumento gradual, provavelmente devido a presença de raízes laterais que ultrapassaram o limite da região cultivada ou devido a pequenas raízes de plantas de milho menores que se desenvolveram pouco.

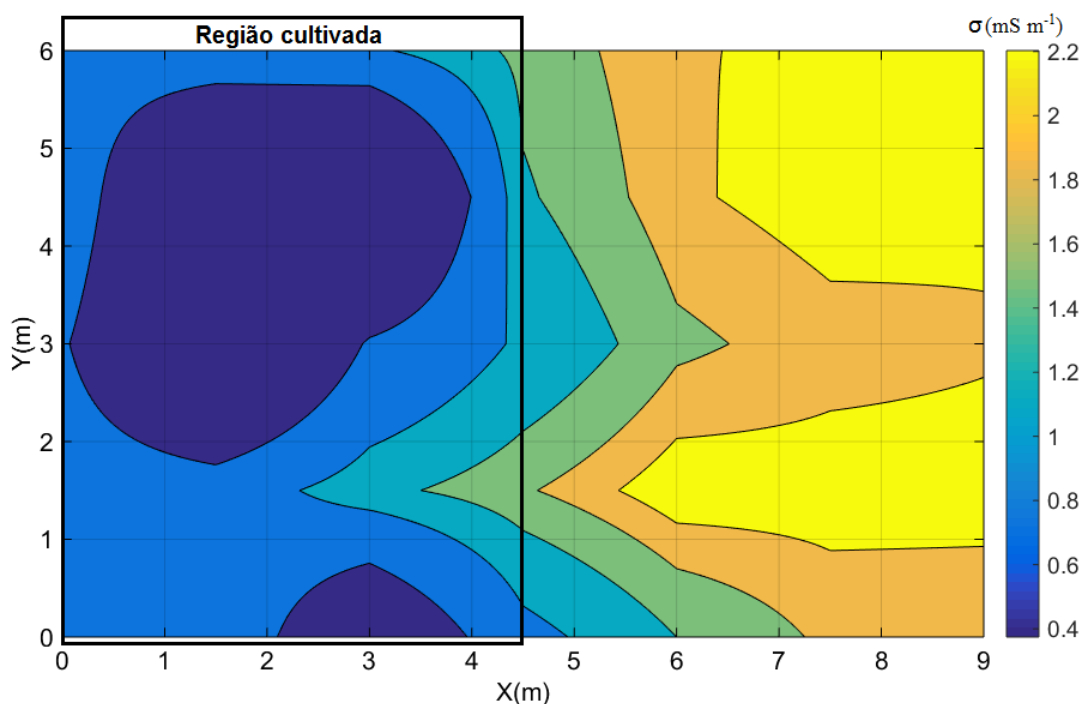


Figura 34 – Distribuição espacial da condutividade elétrica aparente do solo σ_a para o mapeamento do sistema radicular no solo.

6.7 Estudo de caso 5: Monitoramento do sistema radicular no solo com diferentes culturas

Para o experimento de monitoramento do crescimento do sistema radicular em solo cultivado com diferentes culturas, uma área de 9x6m foi delimitada no quadrante 3 do pivô n°2 da Fazenda Capivara, próximo à área do experimento com plantas de milho. Essa área foi escolhida devido o subsolo desta não apresentar raízes que poderiam influenciar no experimento, possibilitando que o método resistivo adotado detectasse somente as raízes das espécies cultivadas, porém a camada superficial foi removida para a retirada de pequenas raízes.

Para o cultivo das espécies escolhidas para o experimento, houve semeadura manual de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*), sorgo (*Sorghum bicolor L. Moench*) e milho (*Pennisetum glaucum L.*), com espaçamento entre as linhas de cultivo de 0,5m. Os motivos da escolha de culturas diferentes foram para verificar a possibilidade do método de eletrorresistividade adotado detectar as diferentes sistemas radiculares ao longo do tempo e devido as culturas serem de crescimento rápido. A adubação do solo foi realizada com 50g m⁻² de Fosfato Monoamônico (MAP), segundo recomendações de técnicos da EMBRAPA Arroz e Feijão. Foram quatro linhas de plantio de 6m para cada espécie cultivada, resultando numa área cultivada de 36m². O restante da área não foi cultivado, servindo apenas como referência.

A Figura 35 apresenta o esquema de coleta de dados para o mapeamento do sistema radicular das diferentes culturas no solo através do mapeamento da distribuição espacial da σ_a e de acordo com o método do Caminhamento Elétrico.

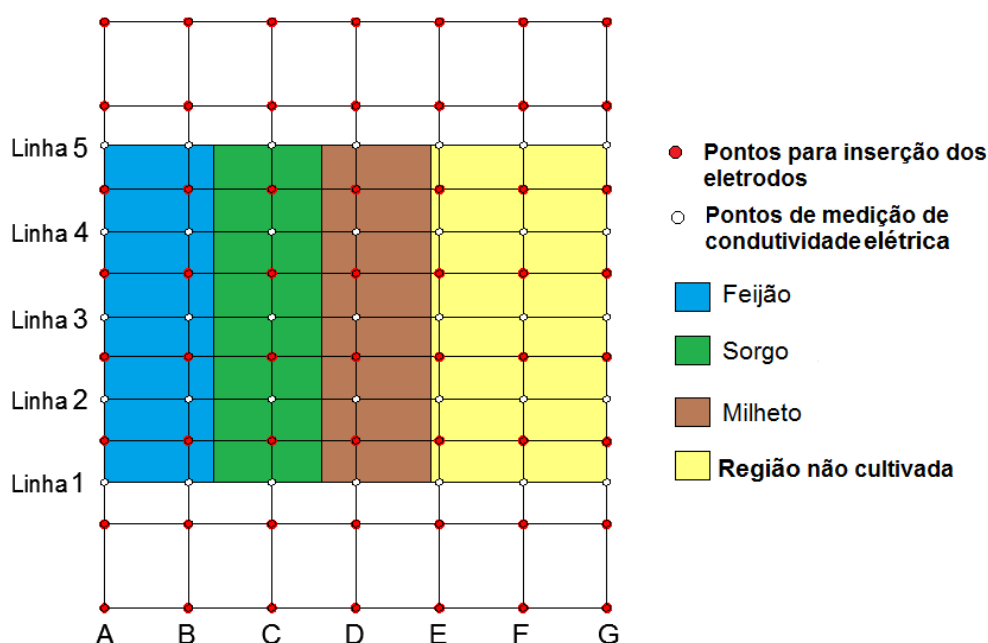


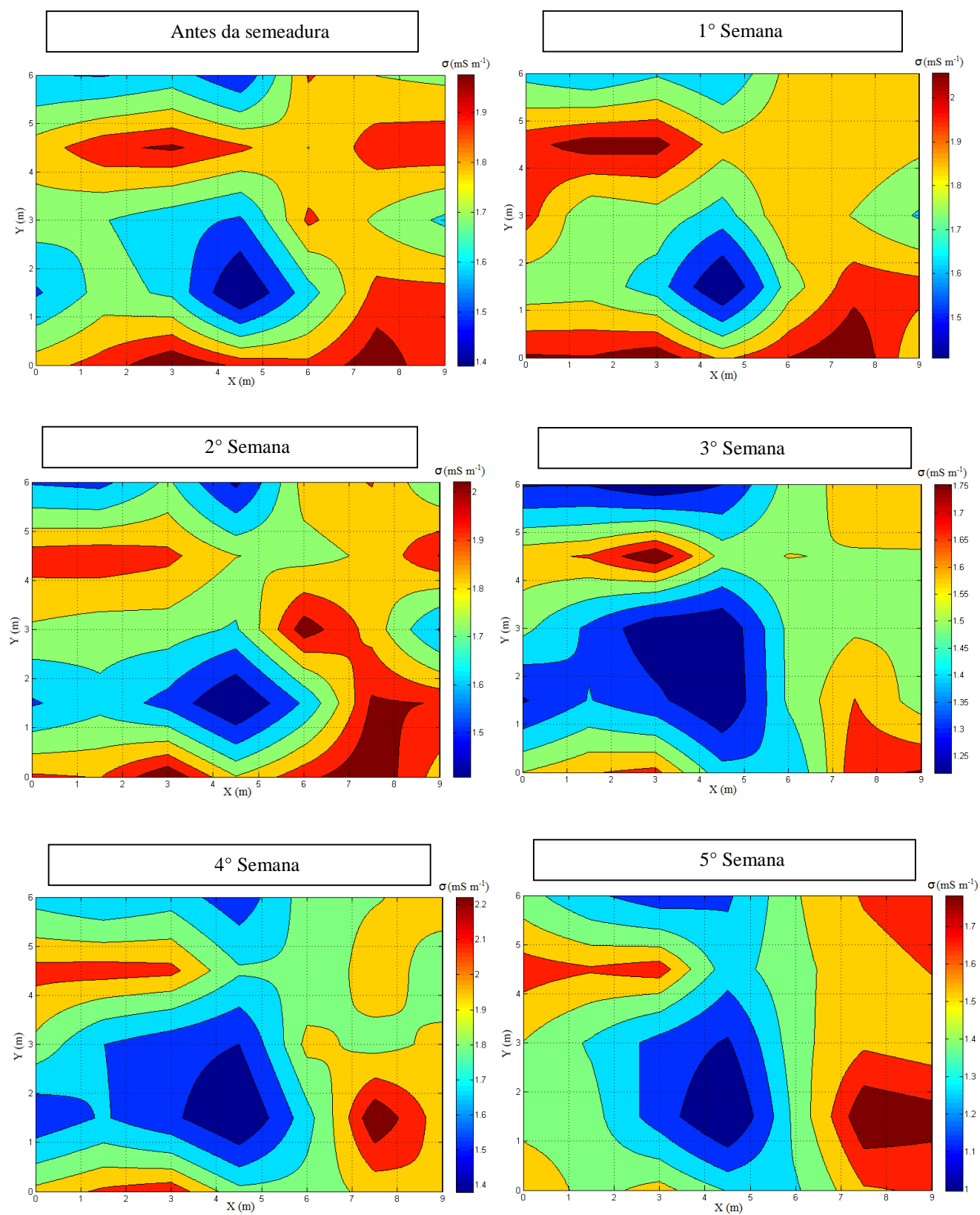
Figura 35 – Esquema de coleta de dados para o mapeamento do sistema radicular de diferentes culturas no solo, através da σ_a e de acordo com o método do Caminhamento Elétrico.

O espaçamento d entre os eletrodos também foi o mesmo do experimento com plantas de milho, ou seja, 1,5 m, bem como a profundidade P dos eletrodos de 0,20 m. A coleta de dados foi feita ao longo de toda área delimitada. Foram coletados dados de resistência elétrica aparente R_m e em seguida, utilizando (4.7), calculadas a ρ_a e a σ_a , respectivamente. Os dados foram coletados em campo semanalmente no período de maio a julho. A Tabela 14 apresenta os dados de σ_a .

Tabela 14 – Dados de condutividade elétrica aparente do solo σ_a coletados em campo cultivado com diferentes culturas no período de maio a julho.

Linha	Coluna	Condutividade elétrica aparente do solo σ_a (mS m ⁻¹)								
		Antes da semeadura	1°Sem.	2°Sem.	3°Sem.	4°Sem.	5°Sem.	6°Sem.	7°Sem.	8°Sem.
1	A	1,836	2,072	1,936	1,577	1,984	1,643	1,597	1,711	1,473
2	A	1,572	1,773	1,594	1,299	1,563	1,463	1,420	1,373	1,486
3	A	1,737	2,000	1,800	1,512	1,907	1,517	1,630	1,630	1,521
4	A	1,826	2,019	1,973	1,637	2,132	1,722	1,743	1,594	1,577
5	A	1,589	1,697	1,602	1,300	1,748	1,442	1,397	1,424	1,497
1	B	1,921	2,064	1,914	1,656	2,110	1,469	1,478	1,510	1,369
2	B	1,725	1,791	1,680	1,401	1,675	1,442	1,325	1,268	1,161
3	B	1,688	1,751	1,766	1,381	1,661	1,371	1,411	1,178	1,251
4	B	1,954	2,115	1,992	1,675	2,155	1,669	1,637	1,746	1,478
5	B	1,580	1,640	1,582	1,302	1,675	1,283	1,346	1,155	1,124
1	C	2,072	2,141	2,119	1,694	2,187	1,577	1,570	1,503	1,289
2	C	1,664	1,680	1,577	1,332	1,551	1,195	1,069	1,031	1,007
3	C	1,627	1,797	1,770	1,245	1,580	1,216	1,222	1,085	1,010
4	C	1,992	2,102	1,947	1,842	2,128	1,734	1,388	1,346	1,264
5	C	1,630	1,716	1,734	1,241	1,740	1,189	1,314	1,273	1,251
1	D	1,950	1,925	1,823	1,436	1,849	1,381	1,130	1,106	1,009
2	D	1,392	1,407	1,407	1,219	1,379	0,995	0,838	0,799	0,520
3	D	1,572	1,683	1,699	1,235	1,519	1,112	0,903	0,729	0,762
4	D	1,900	1,886	1,820	1,546	1,823	1,327	1,241	1,166	1,036
5	D	1,506	1,624	1,488	1,307	1,572	1,239	0,990	0,888	0,932
1	E	1,904	2,056	1,988	1,399	1,856	1,373	1,568	1,666	1,337
2	E	1,645	1,785	1,627	1,503	1,748	1,438	1,242	1,056	1,268
3	E	1,900	1,939	2,085	1,508	1,988	1,484	1,359	1,203	1,020
4	E	1,779	1,925	1,779	1,577	1,816	1,490	1,422	1,334	1,346
5	E	1,890	1,879	1,859	1,526	1,883	1,510	1,359	1,284	1,222
1	F	2,043	2,164	2,123	1,731	1,992	1,637	1,731	1,493	1,807
2	F	1,914	2,015	2,039	1,666	2,362	1,914	2,106	2,068	1,947
3	F	1,763	1,832	1,883	1,563	1,893	1,627	1,694	1,369	1,632
4	F	1,932	1,943	1,836	1,570	2,027	1,592	1,702	1,653	1,677
5	F	1,779	1,862	1,925	1,614	1,929	1,666	1,699	1,599	1,708
1	G	1,893	1,859	1,872	1,760	2,076	1,669	1,688	1,553	1,748
2	G	1,914	1,992	1,977	1,535	2,004	1,849	1,883	1,677	1,907
3	G	1,664	1,719	1,604	1,560	1,977	1,577	1,779	1,826	1,794
4	G	1,958	1,869	2,027	1,570	1,862	1,658	1,746	1,506	1,800
5	G	1,754	1,862	1,728	1,624	2,011	1,746	1,869	1,893	1,832

A Figura 36 apresenta os mapas de distribuição da condutividade elétrica aparente do solo, elaborados a partir dos dados apresentados na Tabela 14.



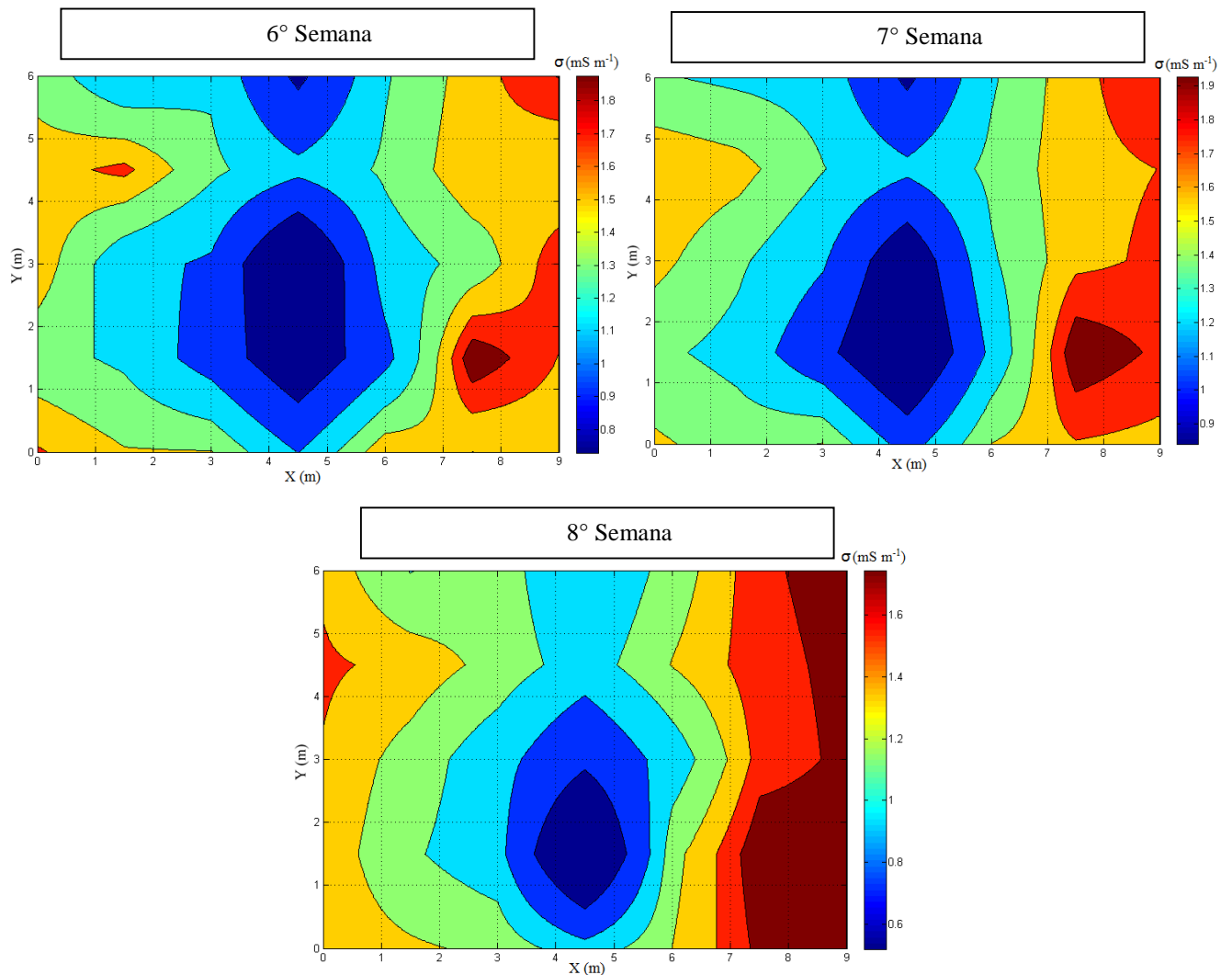


Figura 36 – Mapas de distribuição da condutividade elétrica aparente do solo σ_a .

Observa-se na Figura 36 que os valores de condutividade elétrica aparente do solo σ_a da maior parte da região cultivada da área começaram a reduzir significativamente a partir da terceira semana. Geralmente, as culturas selecionadas para experimento começam a encerrar a fase vegetativa após 3 semanas. Com isso, é possível observar nos mapas que na região cultivada da área, a condutividade elétrica aparente do solo σ_a , da terceira semana em diante, foi menor do que na região não cultivada, revelando um contraste entre essas regiões.

O crescimento das raízes das plantas de sorgo, em geral, termina antes da fase de florescimento, 60 dias após a semeadura (DURÃES; MAGALHÃES; SCHARFFERT, 2000). Já o crescimento das raízes das plantas de milho termina entre as fases de floração e enchimento dos grãos, entre 40 e 50 dias após a semeadura (DURÃES; MAGALHÃES; SANTOS, 2003), e as raízes das plantas feijão também encerram seu crescimento entre as fases de floração e enchimento das vagens, 70 dias após a semeadura (INFORZATO, 1963).

Diante dessas informações, juntamente com a análise dos mapas, percebe-se que os valores de condutividade elétrica aparente do solo da região cultivada começaram a apresentar redução próximo ao encerramento da fase vegetativa das culturas, quando as raízes crescem o suficiente para influenciar na condutividade elétrica aparente. Já próximo a fase de florescimento, quando as culturas têm o máximo de desenvolvimento radicular, os valores de condutividade elétrica aparente do solo começam a ter redução maior.

Analisando as regiões cultivadas no mapa de distribuição da σ_a da 8ª Semana, quando foi encerrado o crescimento dos sistemas radiculares, observa-se que o sistema radicular que mais influenciou na σ_a foi o das plantas de milho seguido das plantas de sorgo e feijão (Figura 37).

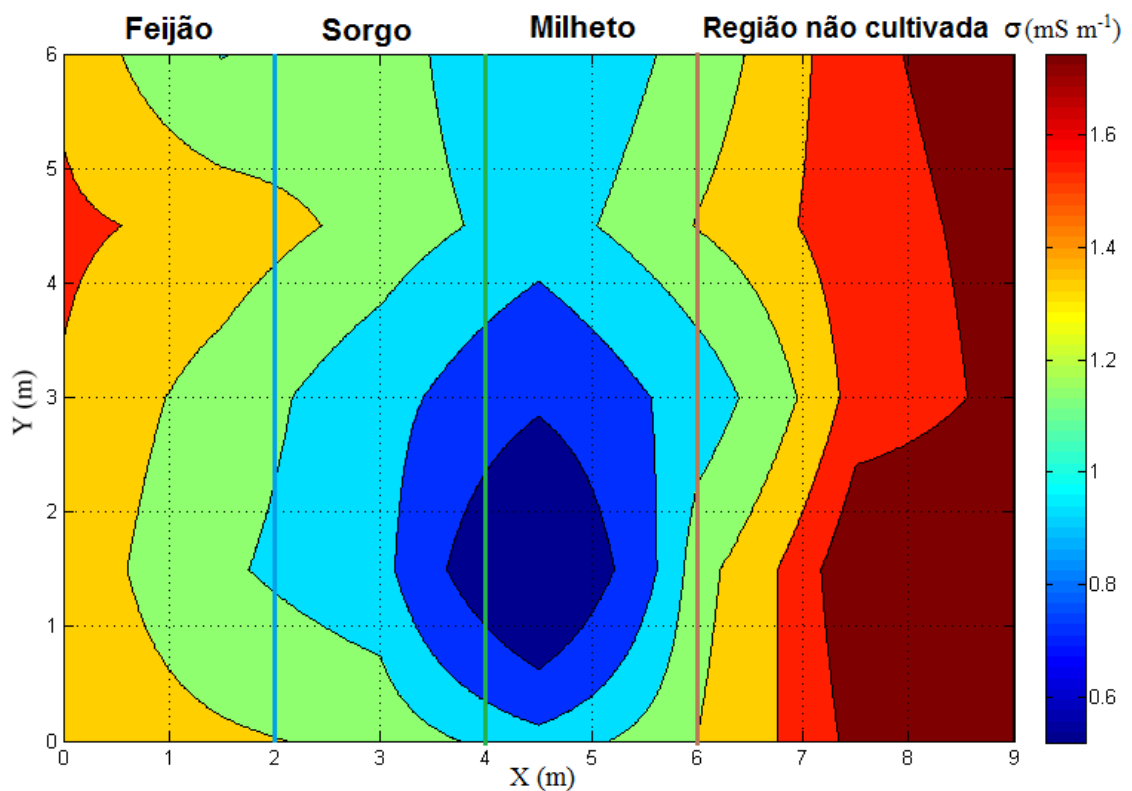


Figura 37 – Mapa de distribuição da condutividade elétrica aparente do solo σ_a com 8 semanas após a semeadura das culturas.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

A condutividade elétrica aparente do solo σ_a nos recipientes cultivados com plantas de milho sofreu redução ao longo do tempo após os efeitos da fertilização e da maior retenção de água nos primeiros centímetros do solo.

Nos primeiros dias do experimento nos recipientes com solo cultivado, a σ_a se elevou devido provavelmente aos sais presentes nos fertilizantes e da água que o solo reteve, mas à medida em que o sistema radicular das plantas se desenvolveu, é possível ter havido o aumento da demanda por água e nutrientes do solo pelas plantas e os valores de condutividade elétrica aparente assim se reduziram.

Assim observou-se que o teor de umidade do solo w sofreu redução devido certamente a demanda de água pelas plantas ao longo do experimento, ou seja, quanto mais as plantas se desenvolveram, mais aumentou a absorção de água para os seus processos fisiológicos, portanto, se a umidade reduz, os valores de condutividade elétrica aparente do solo σ_a também reduzem, pois quanto menor o teor de umidade do solo w , maior a resistividade elétrica aparente do solo ρ_a .

Mas é provável que as raízes em si, sem o efeito da umidade do solo w , reduzem os valores de condutividade elétrica aparente do solo σ_a , pois observou-se que quanto maior foi a massa radicular menores foram os valores de condutividade elétrica do solo, porém se há maior volume de raízes, maior absorção de água. Entretanto, os experimentos de campo, com as culturas já no estágio de maturação, indicaram que apesar da área delimitada ser irrigada periodicamente com o mesmo volume de água, a condutividade elétrica aparente do solo σ_a da região cultivada na mesma área foi menor em comparação com a região não cultivada na mesma área delimitada também. Nas áreas cultivadas é esperado que haja consumo de água pelas plantas através da absorção pelo sistema radicular, mas quando as plantas estavam no estágio de maturação, quando há menor absorção de água, houve redução da σ_a , portanto é provável que a massa radicular em si limita a passagem de corrente elétrica independente do teor de umidade do solo w .

Com base nessa análise, o método de prospecção geoeletrico adotado neste trabalho se mostrou adequado para a detecção e monitoramento indireto do sistema radicular no solo.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. NBR 7117**, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, p. 1-64, 2012.
- ALLRED, B. J.; GROOM, D.; EHSANI, R. M.; DANIELS, J. J. **Resistivity methods**. In: BALLRED, B.; JEFREY, D.; EHSANI, R. M. (Ed.). Handbook of agricultural geophysics. Boca Raton: Taylor & Francis Group, chap. 4, p. 85-108. 2008.
- AMATO, M.; BASSO B.; CELANO, G.; BITELLA, G.; MORELLI, G.; ROSSI, R. **In situ detection of tree root distribution and biomass by multi-electrode resistivity imaging**. Tree Physiology, vol. 28, n°10, p. 1441–1448, 2008.
- AMATO, M.; BITELLA, G.; ROSSI, R.; GOMEZ, J. A.; LOVELLI, S.; GOMES J. J. F. **Multi-electrode 3D resistivity imaging of alfalfa root zone**. European Journal of Agronomy, vol. 31, n°4, pp. 213–222, 2009.
- ANGHINONI, I.; MEURER, E. J. **Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes**. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS, L., Aracaju, 1999. Anais... Aracaju: EMBRAPA. p.57-87, 1999.
- BARBER, S. A.; CHEN, J. **Using a mechanistic model to evaluate the effect soil t of pH on phosphate uptake**. Plant and Soil, Dordrecht, n. 81, p. 143-146, 1990.
- BENGOUGH, A.G.; CASTRIGN, A.; PAGÉS, L.; VAN NOORDWIJK, M. **Sampling strategies, scaling and statistics**. In: SMIT, A. L.; BENGOUGH, A. G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Eds) Root methods: a handbook. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p.147-174, 2000.
- BOHM, W. **Methods of studying root systems**. New York: Springer-Verlag, 188p. 1979.
- BUTNOR, J. R.; DOOLITTLE, J. A.; JOHNSEN, K. H.; SAMUELSON, L.; STOKES, T.; KRESS, L. **Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems**. Soil Science Society of America Journal, vol. 67, n°5, p. 1607–1615, 2003.
- BRASIL, F. C.; ROSSIELLO, R. O. P.; PACIORNIK, S.; ABREU, J. B. R. Distribuição vertical de características morfológicas do sistema radicular de *Brachiaria humidicola* Pasturas Tropicales, *colômbia*, v. 24, n°3, p.14-20, 2002.
- BRASIL, F. C.; ZONTA, E.; OLIVEIRA, M. R. **Métodos de amostragem e quantificação para estudos do sistema radicular em condições de campo – Uma revisão crítica**. Rev. Universidade Rural, Série Ciências da Vida. Seropédica, RJ, EDUR, v. 27, n°2. p. 14-33. jul-dez, 2007.
- BECK, F. L.; BOHNEN, H.; CABEDA, M.S.V.; CAMARGO. F. A. O.; KÄMPF, N.; MEURER, E. J. **Projeto pedagógico – ensino de graduação**. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 2000. 26p. (Boletim Técnico, n°6).
- CALIXTO W.P.; COIMBRA, A. A. B. M. J. C. A. N. L. **3-D Soil Stratification Methodology for Geoelectrical Prospection**. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012.

CARVALHO, J. E. B.; SOUZA, L. S.; JORGE, L.A. C.; RAMOS, W. F.; NETO, A. O. C.; ARAÚJO, A. M. A.; LOPES, L.C.; JESUS, M. S. **Manejo de cobertura do solo e sua interferência no desenvolvimento do sistema radicular da laranja 'Pêra'**. Revista Brasileira Fruticultura, v.21, n°2, p.140-145, 1999.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações, volume 1: Fundamentos**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L.; JORGE, L.A. de C. Distribuição do sistema radicular de porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Jaboticabal. V.21, n°3, p. 313-317, 1999.

CONYERS, L.B.; GOODMAN, D. **Ground-penetrating radar: an introduction for archaeologists**. AltaMira Press, Walnut Creek, CA, 232 p. 1997.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. **Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture**. Computers and Electronics in Agriculture, vol. 46, n°. 1–3, p. 11–43, 2005.

CORWIN, D.; LESCH, S. M.; FARAHANI, H. J. **Theoretical Insight on the measurement of soil electrical conductivity**. In: BALLRED, B.; JEFFREY, D.; EHSANI, R. M. (Ed.). Handbook of agricultural geophysics. Boca Raton: Taylor & Francis Group, chap. 3, p. 59-83. 2008.

CRAIG, R. F. **Mecânica dos Solos**. LTC, Rio de Janeiro, 2011.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Cengage Learning, São Paulo, 2011.

DURÃES, F. O. M.; MAGALHÃES, P. C.; SANTOS, F. G. **Filosofia da planta de milho**. Circular Técnica 28. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, MG, dezembro, 2003.

DURÃES, F. O. M.; MAGALHÃES, P. C.; SCHARFFERT, R. E. **Filosofia da planta de sorgo**. Circular Técnica 3. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, MG, dezembro, 2000.

EISENREICH, E. L. **Electrical Conductivity Mapping for Precision Agriculture. Proceedings**. Montpellier, Ecole National Supérieure Agronomique: European Conference on Precision Agriculture, v.3, 2001.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise do solo**. Brasília, DF, 1997.

EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Condutividade elétrica do solo, tópicos e equipamentos**. Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos, SP, 2009.

EMBRAPA-EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Levantamento detalhado dos solos da fazenda capivara município de Santo Antônio de Goiás – go**. Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento. Relatório técnico. Agosto de 2012.

ERNÂNI, P. R.; ALMEIDA J. A. **Comparação de métodos analíticos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do estado de Santa Catarina**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, n. 10, p. 143-150, 1986.

- FANTE JUNIOR, L.; REICHARDT, K.; JORGE, L. A. C.; BACCHI, O.O.S. **Distribuição do sistema radicular de uma cultura de aveia forrageira**. Scientia Agricola, v. 56, n°4, supl, p.1091-1100, 1999.
- FRANCO, C. M.; INFORZATO, R. **O sistema radicular do cafeeiro nos principais tipos de solo do estado de São Paulo**. Boletim Técnico da Divisão de Experimento e Pesquisas. Vol. 6. Instituto Agrônomico. Campinas, Setembro de 1946.
- FITTER, A. **Characteristics and functions of root systems**. In: Plant Roots: The Hidden Half, WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAI, U. Eds., p. 1002, Marcel Dekker, New York, NY, USA, 2nd edition, 1996.
- FOY, C. D. **Effects of aluminum on plant growth**. In: CARSON, E. W. The plant root and its environment. Charlottesville: University Press of Virginia, p. 601- 642. 1974.
- FRIEDMAN, S. P. **Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 54, p.45-70, sept. 2005.
- FURLANI, R. R. **Efeitos fisiológicos do alumínio em plantas**. In: SIMPÓSIO AVANÇADO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 2., 1989, Piracicaba. Anais... Campinas: Fundação Cargill, p.73-90. 1989.
- GASSEN, D. N.; KOCHHANN, R. A. **Benefícios de insetos de solo sob plantio direto**. In. NUERNBERG, N. J. Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto. Lages: SBCS-Núcleo Regional Sul, p. 151-160. 1998.
- GUIMARÃES, M.F.; BALBINI, L.C.; MEDINA, C.C.; RIBEIRO, A.M.A.; RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J. **A metodologia do perfil cultural e o enraizamento**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1997, Rio de Janeiro-RJ. Anais..., Rio de Janeiro. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997.
- GREGORY, P. J.; HUTCHINSON, D. J.; READ, D .B.; JENNESON, P. M.; GILBOY, W. B.; MORTON, E. J. **Non-invasive imaging of roots with high-resolution x-ray micro-tomography**. Plant and Soil, vol. 187, p. 221–228, 2003.
- HEERMAN, D. A.; HOPMANS, J. W.; CLAUSNITZER. **Three dimensional imaging of plant roots in situ with X ray Computed Tomography**. Hydrology Department of Land, Air and Water Resources (LAWR), University of California, Davis, 1997.
- HRUSKA, J.; CERMÁK, J.; SUSTEK, S. **Mapping tree root systems with ground-penetrating radar**. Tree Physiology, vol. 19, n°2, p. 125–130, 1999.
- IEEE. **Ieee guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and Earth surface potentials of a grounding system**. IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983), p. 1-86, 2012.
- IMHOFF S.; SILVA, A. P. TORMENA, C. A. **Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem**. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.35, n.7, p.1493-1500, 2000.
- INFORZATO, R. **Sistema radicular do feijoeiro em dois tipos de solo do estado de São Paulo**. Revista Bragantia. Boletim Científico do Instituto Agrônomico do Estado de São Paulo. vol. 2 n°38. Campinas, SP. 1963.

- JOHNSON, M. G.; TINGEY, D. T.; PHILLIPS, D. L.; STORM, M. J. **Advancing fine root research with minirhizotrons**. Environmental and Experimental Botany, vol. 45, n°3, p. 263–289, 2001.
- KINDERMANN G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. Porto Alegre: Sagra - D.C. Luzzato, 1995.
- KIRKHAM, M. B. **Soil-oxygen and plant-root interaction: na eletrical analog study**. In: DIEST, van, (ed). Plant and soil: interfaces and interactions. Wageningen, Martinius Nijhoff Publishers, p.11-19. 1987.
- KOCHIAN, L.V. **Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants**. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, v.46, p.237-260, 1995.
- KORNDÖRFER, G. H.; PRIMAVESI, O.; DEUBER, R. **Crescimento e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo LVA**. Piracicaba: Coopersucar. n°47, p.32-36. (Boletim Técnico 47), 1989.
- LEPSCH, I. F. **Formação e Conservação dos Solos**. São Paulo. Oficina de Textos, 2002.
- LOPERTE, A.; SATRIANI, A; LAZZARI, L.; AMATO, M.; CELANO, G. LAPENNA, V.; MORELLI, G. **2D and 3D high resolution geoelectrical tomography for non-destructive determination of the spatial variability of plant root distribution: laboratory experiments and field measurements**. Geophysical Research Abstracts, vol. 8, p. 674, 2006.
- KINDERMANN G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. Porto Alegre: Sagra - D.C. Luzzato, 1995.
- MACHADO, C.C.; COELHO, R.D. **Estudo da distribuição espacial do sistema radicular do limão ‘Cravo’ enxertado com lima ácida ‘Tahiti’**. Laranja, v.21, n°2, p.359-380, 2000.
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de precisão. Boletim Técnico**. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. – Brasília. 36 p. 2013.
- MAIRHOFER, S.; ZAPPALA, S.; TRACY, S.; STURROCK, C; BENNET, M. J.; MOONEY, S. J.; PRIDMORE, T. P. **Recovering complete plant root system architectures from soil via X-ray μ -Computed Tomography**. Plant Methods, 2013.
- MAJDI, H. **Root sampling methods: applications and limitations of the minirhizotron technique**. Plant and Soil, v. 185, p 255-258, 1996.
- MATTA, F. M. **Mecanismos fisiológicos associados ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas**. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR METODOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS, 1. 1999. Aracaju. Anais... Aracaju: EMBRAPA, p.19-45, 1999.
- MATHIEU, C. **Action du travail du sol avant plantation des agrumes sur la morphologie de leur syst'eme racinaire en vergeres irrigués au Maroc**. Fruits, Paris, v. 42, n°5, p. 295-304, 1987.
- MATTA, F. M. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: **Metodologias e estudo de casos**. Aracaju. Anais... Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 300 p. 1999.
- MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 5° Edição. Porto Alegre, RS. 2012.

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, vol. 39, n°5, p. 1138, 2003.

MILLER, D. E. **Root systems in relation to stress tolerance.** HortScience, v. 21, p. 963-970, 1986.

MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; SCHMIDHALTER, U.; HAMMER, J. **Mensuração da Condutividade Elétrica do Solo por Indução e sua Correlação com Fatores de Produção.** Engenharia Agrícola, v. 25 n°2, 2005.

MOLIN J.P.; RABELLO, L. **Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 31, n°1, p. 90-101, 2011.

MORAN, C. J.; PIERRET, A.; STEVENSON, A. W. **X-ray absorption and phase contrast imaging to study the interplay between plant roots and soil structure.** Plant and Soil, vol. 223, n° 1-2, p. 99-115, 2000.

MOREIRA, C.S. **Estudo da distribuição do sistema radicular da laranjeira ‘Pera’ Citrus sinensis (L.) Osbeck, com diferentes manejos de solos.** 1983. 97f. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1983.

MOREIRA, F. M. S.; CARES, J. E.; ZANETTI R.; STÜRMER, S. L. **O ecossistema solo: componentes, relações ecológicas e efeitos na produção vegetal.** Universidade Federal de Lavras. Editora UFLA, 2013.

NETO LADISLAU; VAZ, C. M. P. C. S. M. **Instrumentação avançada em ciência do solo.** São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2007.

NEVES, C.S.V.J.; DECHEN, A.R.; FELLER, C.; ABI SAAB, O.J.G.; PIEDADE, S.M.S. **Efeito do manejo do solo no sistema radicular de tangerineira ‘Poncã’ enxertada sobre limoeiro ‘Cravo’ em Latossolo roxo.** Revista Brasileira de Fruticultura, v.20, n°2, p.246-253, 1998.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia.** São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

OLIVEIRA, M.R.G.; VAN NOORDWIJK, M.; GAZE, S.R.; BROUWER, G.; BONA, S.; MOSCA, G. HAIRIAH, K. **Auger sampling, ingrowth cores and pinboard methods.** In: SMIT, A.L.; BENGOUGH, A.G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S.C. (Eds) Root methods: a handbook. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p.176-206, 2000.

PAGLIS, C. M. **Application of Electrical Resistivity Tomography for Detecting Root Biomass in Coffee Trees.** International Journal of Geophysics Volume 2013.

PALMER, L. S. **Examples of geoelectric surveys.** Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering, v. 106, n°27, p. 231-241, 1959.

PEARSON, R. W. **Soil acidity and liming in the humid tropics.** Cornell: International Agriculture. (Bulletin, n. 300). 1975.

PIERRET, A.; MORAN, C. J.; DOUSSAN, C. **Conventional detection methodology is limiting our ability to understand the roles and functions of fine roots.** New Phytologist. p. 967-980, 2005.

QUADROS, D. G. **Sistema radicular de plantas forrageiras - a parte esquecida das pastagens.** NEPPA - Núcleo de Estudos e Pesquisas em Produção Animal - UNEB -Universidade do Estado da Bahia. Campus IX – Faculdade de Engenharia Agrônômica. 2001.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais.** CAMPINAS: INSTITUTO AGRONÔMICO, 111 p. 2000.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; CURTS, H. **Biologia vegetal.** 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois. 728 p. 1996.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo. Editora Manole Ltda., 1990.

RHOADES, J. D.; MANTEGHI, N. A.; SHOUSE, P. J.; ALVES, W, J. **Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations.** Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 53, p. 433-439, Dec. 1989.

RUSSELL, R. S. **Plant root systems - their function and interaction with the soil.** In: Symposium on the soil/root system in relation to brasilian agriculture, 1980, Londrina. Proceedings... Londrina: IAPAR, p. 3-19. 1981.

SANTI A. L.; FLORA, L. P. D.; BUAES, A. G.; ALBUQUERQUE, M.; MARTINS, F. R. A.; MACHADO, F. C. **Monitoramento da compactação do solo através do mapeamento de resistência à penetração.** Revista Plantio Direto, Ed. 96, Aldeia Norte Editora, Passo Fundo, RS, novembro/dezembro de 2006.

SANTOS JUNIOR, J. D. G.; DE SÁ, M. A. C.; FERREIRA, E. A. B.; RESCK, D. V. S.; LAVRES JUNIOR, J. **O sistema minirhizotron no estudo da dinâmica de raízes.** Planaltina, DF. Embrapa Cerrados, 2007.

SAMOÛELIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A; BRUAND, A; RICHARD, G. **Electrical resistivity survey in soil science: a review.** Soil and Tillage Research, vol. 83, n°2, p. 173–193, 2005.

SILVA FILHO, A. M. **Metodologia para correlacionar a umidade, compactação e a condutividade elétrica aparente do solo.** Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação em engenharia elétrica e de computação. Universidade Federal de Goiás – UFG. Goiânia, Goiás. 2015.

TELFORD W.M.; GELDART, L. S. R. **Applied Geophysics.** Cambridge University Press, 1990.

VAN ZYL, J.L. **The grapevine root and its environment.** Pretoria: Departament of Agriculture and Water Supply. (Technical communication, 215). 1988.

VASCONCELOS A. C. M.; GARCIA, J. C. **Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar.** Encarte Técnico de Informações Agrônômicas n° 110 – Junho/2005.

VISACRO, S. F. **Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento.** 1. ed. São Paulo, Artliber Editora, 2002.

VOGT, K. A.; VOGT, D. J.; JANINE BLOOMFIELD. **Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forest at in ecosystem level.** Plant and Soil. V: 200, p. 71-89, 1998.

WEIHS, U.; DUBBEL V.; KRUMMHEUER, F.; JUST, A. **The electrical resistivity tomography—a promising technique for detection of colored heartwood on standing beech trees.** Forst Und Holz, vol. 54, p.166–170, 1999.

ZANETTI C.; WELLER, A.; VENNETIER, M.; MÉRIAUX, P. **Detection of buried tree root samples by using geoelectrical measurements: a laboratory experiment,** Plant and Soil, p. 273-283, 2011.

WENNER, F. A. **Method of measuring earth resistivity.** 1° ed. Washington D. C.: Bulletin of the National Bureau of Standards, v. 12, 1915.

Resumo do Currículo Lattes

Endereço para acessar: <http://lattes.cnpq.br/2790709844550893>

Possui graduação em Engenharia Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO), MBA em Gestão da Qualidade e Engenharia da Produção pelo Instituto de Pós-Graduação (IPOG - Goiânia), e mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo Instituto Federal de Goiás (IFG-Campus Goiânia).