

TECNOLOGIA ANDAS PARA MAPEAMENTO 3D DO SISTEMA RADICULAR DE ÁRVORES UTILIZANDO GEORADAR E ELETRORRESISTIVIDADE

ANDAS TECHNOLOGY FOR 3D TREE ROOTS SYSTEM MAPPING USING GPR AND ELECTRICAL RESISTIVITY

Vinicius Rafael Neris dos Santos¹, Marcelo Farias Caetano², Marcelo Martinatti³,
Juliana Mitie Pereira⁴

RESUMO

Sabe-se que a arborização urbana traz diversos benefícios à população e ao meio ambiente. Porém, especialmente nas grandes cidades, a crescente expansão desordenada, associada com a falta de planejamento na implantação ou preservação de áreas verdes, resulta em conflitos com a infraestrutura existente e transtornos sociais, incluindo acidentes decorrentes da queda de árvores, causando danos patrimoniais e até perda de vidas. Atualmente no Brasil, verifica-se que existem lacunas para diagnósticos mais eficientes quanto a caracterização de raízes. Muitas análises partem de avaliações visuais ou invasivas, resultando em decisões equivocadas quanto ao adequado manejo de árvores. Este trabalho apresenta uma investigação indireta e não destrutiva, através da tecnologia ANDAS, que utiliza os métodos geofísicos *Ground Penetrating Radar* (GPR) e eletrorresistividade, aplicado a um exemplar de pau-ferro, para o mapeamento em alta resolução do sistema radicular não aparente. O ambiente urbano requer análises eficientes, não prejudicando a mobilidade nas vias, fornecendo uma resposta rápida para que as devidas ações sejam postas em prática. O uso da geofísica atende a essa demanda, sendo capaz de analisar o sistema radicular em diferentes profundidades, além de obter o diâmetro dessas estruturas e parâmetros do solo. A partir dos resultados obtidos e comparados com a escavação da área, mostrou-se que as metodologias empregadas possuem um grande potencial para se tornar uma ferramenta diagnóstica que pode, e deve, ser integrada ao ferramental técnico disponível no monitoramento e análise de risco de queda de árvores em ambiente urbano.

Palavras-chave: *Ground Penetrating Radar*; Eletrorresistividade; Sistema radicular; Árvores urbanas.

ABSTRACT

It is known that urban trees bring several benefits to citizens and the environment. However, the disorderly expansion associated with the lack of green policies, results in conflicts with the infrastructures and social impact, for instance falling trees causing property damage and even serious injury to citizens. In Brazil, there is a necessity for a more efficient diagnosis regarding the characterization of roots, since many analyses start from visual or invasive assessments, resulting in wrong decisions regarding the proper management of trees. In this work, we present an indirect and non-destructive technology for such characterization, which uses geophysical methods *Ground Penetrating Radar* (GPR) and electrical resistivity, named *ANDAS*. We applied our technology to a *pau-ferro* tree (*Libidibia Ferrea* (Mart. exTul.) L.P. Queiroz), for high-resolution mapping of the non-apparent root system. The urban environment requires efficient analysis, providing a quick response so that the appropriate actions are put into practice. The use of geophysics meets this demand, being able to analyze the root system at different depths, in addition to obtaining the diameter of those structures besides the soil parameters. We compare the results obtained with the excavation and we show that the methodologies employed have great potential to become an excellent diagnostic tool that should be integrated into the technical tools available for monitoring and analyzing the risk of falling trees in an urban environment.

Keywords: *Ground Penetrating Radar*; Electrical resistivity; Tree roots; Urban trees.

Recebido em 01.02.2022 e aceito em 02.06.2022

¹ Geofísica. PhD. Kern Geo Soluções. São Paulo/SP. Email: vinicius@kerno.com.br

² Matemática Aplicada. PhD. Kern Geo Soluções. São Paulo/SP. Email: mcaetano@kerno.com.br

³ Geologia. Kern Geo Soluções. São Paulo/SP. Email: mmartinatti@kerno.com.br

⁴ Ciências Biológicas. Kern Geo Soluções. São Paulo/SP. Email: juliana@kerno.com.br

INTRODUÇÃO

No Brasil, é comum que a expansão urbana ocorra com pouco ou nenhum planejamento. Neste contexto, a implantação e preservação de áreas verdes deixaram de ser prioridades, implicando cada vez mais na necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias, com objetivo de proporcionar ferramentas adequadas para o manejo, análise e prevenção de acidentes decorrentes das quedas de árvores, cujas consequências resultam em danos sociais, patrimoniais e até perda de vidas (ALLISON; WANG; SENALIK, 2020).

As árvores urbanas são diretamente afetadas pelas condições, normalmente inapropriadas de seu entorno, devido a composição e compactação do solo (geralmente pobre de nutrientes e impermeável), dificultando o enraizamento necessário para a nutrição e sustentação da planta. Além disto, intervenções antrópicas, como injúrias, corte de raízes para construção de calçadas ou instalação de cabos e tubulações, associados a podas inadequadas podem levar a queda desses indivíduos (SANTOS; TEIXEIRA, 2001; QUIGLEY, 2004). A avaliação da estabilidade de árvores, pela presença ou não do sistema radicular, é uma ferramenta indispensável na preservação da integridade de pessoas e propriedades no contexto urbanístico (SANTOS; TEIXEIRA, 2001). A importância da análise do sistema radicular ficou mais evidente através da normativa publicada em 2019 pela NBR16246-3 em que, nas avaliações de árvores nível 3, é recomendado o uso de georadar ou tomógrafo para análise do sistema radicular (ABNT, 2019).

No Brasil, no que diz respeito a investigação indireta de raízes em subsuperfície, existem poucos trabalhos disponíveis em que se realiza uma caracterização eficiente dessas estruturas, onde o método mais utilizado ainda é o tomógrafo sônico de raízes. Um exemplo é o trabalho desenvolvido por Guardia (2020), onde foi utilizado o tomógrafo de ondas mecânicas para a determinação de velocidades de propagação em raízes de ancoragem de árvores urbanas, além de um estudo dos ruídos existentes devido aos pavimentos de concreto. Pelo trabalho, foi constatado que diferentes tipos de coberturas de solo podem interferir na velocidade encontrada pelo equipamento. Entretanto, no âmbito internacional existem desenvolvimentos consistentes para o estudo do sistema radicular não aparente de árvores, como o proposto por (PROTO et al., 2020), onde apresenta uma comparação, também com o detector de raízes por ondas mecânicas e modelos 3D gerados após a escavação dessas raízes entre duas espécies diferentes. O resultado obtido mostrou que existem diferenças na detecção entre as espécies, condições do ambiente e propriedades do solo (conteúdo de água e compactação), além de que existe um limite de detecção com relação a distância da raiz para o tronco.

Já com a utilização do georadar (GPR), historicamente, os estudos florestais datam do final dos anos 90, com Hruska, Cermák e Sustek (1999) e Butnor et al. (2001), que mapearam o sistema radicular de árvores através de uma análise tridimensional. Em Lorenzo et al. (2010) é descrito e demonstrado diferentes estudos com GPR em silvicultura: mapeamento do substrato, estratigrafia do subsolo e profundidade do lençol freático; a análise de madeira e os sistemas radiculares são algumas das aplicações citadas pelos autores. O método foi utilizado também na localização de sistemas radiculares sob pavimentos de concreto em ambiente urbano (NICHOLS et al., 2017) e na estimativa de biomassa (ZHU et al., 2014). O estudo dos troncos de árvores com o método também constitui uma área de pesquisa incipiente. O trabalho de Fu, Li e Liu (2014) propõe uma caracterização estrutural interna de troncos de árvores vivas utilizando GPR, através de modelagem numérica e análise de dados de campo. Os resultados dos autores demonstram que o GPR é uma excelente ferramenta para descrever a estrutura interna de árvores vivas. Recentemente, os estudos envolvendo o uso do GPR voltado a troncos ou raízes de árvores continuam, com a utilização de tomografia de micro-ondas (ALANI et al., 2019), otimização do processamento dos dados (LANTINI et al., 2020) e análise do sinal eletromagnético (CHEN et al., 2021).

A eletrorresistividade, embora seja um nome pouco familiar no contexto da dendrologia e silvicultura, tem relação direta com a resistência elétrica, cuja aplicação na área é conhecida desde o início do século passado (STAMM, 1927). Esta propriedade é, até hoje, muito utilizada, principalmente na indústria de madeira, pois é a propriedade utilizada para estimar o seu conteúdo de água. Devido há algumas limitações do uso da resistência elétrica, o uso da eletrorresistividade passa a ser mais adequado, pois ela é uma quantidade mais geral, independente da geometria do objeto de análise e menos passível a erros de medição. Um dos primeiros trabalhos envolvendo a aplicação da tomografia elétrica em estudos de integridade de árvores data do final dos anos 90, na Alemanha (HAGREY, 2007). A partir daí, seu uso se tornou fundamental neste tipo de avaliação com estudos de raízes e troncos (HAGREY, 2007), detecção de biomassa em plantações de café (PAGLIS, 2013), caracterização das propriedades elétricas de árvores em florestas temperadas (GORA; YANOVIK, 2015) e em palmeiras (ELLIOTT et al., 2016). Atualmente, a eletrorresistividade vem sendo mais aplicada em estudos do sistema radicular, como por exemplo na determinação do conteúdo de água em raízes (MARTIN et al., 2021), determinação da biomassa e rizosfera (BALWANT et al., 2021) e análise da relação raiz-solo em árvores urbanas (GIAMBASTIANI et al., 2022).

No presente trabalho é apresentada a tecnologia ANDAS (**Análise Não Destrutiva de Árvores e Solos**), que utiliza os métodos geofísicos *Ground Penetrating Radar* (GPR) ou georadar e eletrorresistividade (resistividade elétrica aparente e polarização induzida) aplicados em árvores. É possível determinar cavidades e regiões de apodrecimento em troncos de

árvores, o mapeamento e caracterização do sistema radicular, determinando a sua distribuição espacial, profundidade e diâmetro das raízes encontradas, além de estimar a porosidade e conteúdo de água do solo no entorno da árvore. Foram desenvolvidas metodologias de aquisição próprias para melhorar a detecção dos alvos de interesse, assim como um software de processamento de dados para realçar essas estruturas internas ao tronco e em subsuperfície. Esse conjunto de ferramentas diagnósticas pode fornecer importantes informações que auxiliem na tomada de decisões do manejo arbóreo nos grandes centros urbanos.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi de analisar as potencialidades de detecção e caracterização do sistema radicular de um exemplar de pau-ferro – *Libidibia ferrea* (Mart. exTul.) L.P. Queiroz, localizado em frente ao prédio principal do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), Edifício Adriano Marchini, na cidade de São Paulo (SP), a partir da aplicação do ANDAS. Além disso, comparar com a escavação direta na área de estudo, utilizando o *air spade*, a fim de comprovar as medidas indiretas realizadas.

MATERIAL E MÉTODOS

Árvore pau-ferro

A *Libidibia ferrea* (Mart. exTul.) L.P. Queiroz, conhecida popularmente como pau-ferro, é uma espécie nativa do Brasil e pertence à família Fabaceae (LORENZI, 1992). Essas árvores podem ser perenifólias ou semidecíduas com raízes classificadas como pivotantes. Atingem altura e diâmetro a altura do peito (DAP) médios de 10 a 15 m e 40 a 60 cm, respectivamente, com floração entre os meses de dezembro e janeiro e a frutificação de julho a agosto (LORENZI, 1992). A madeira se destaca pela sua alta densidade de 1,17 g/cm³ a 15% de umidade (ICRAF, 2021), sendo muito dura, pesada e de longa durabilidade natural (CAMPOS FILHO, 2015). Sua madeira tem grande valor econômico e apresenta o cerne e alburno diferenciáveis pelas suas cores contrastantes. O cerne apresenta coloração castanho-escuro a enegrecido e o alburno bege-amarelado (CURY, 2001).

O exemplar de pau-ferro analisado vem sendo motivo de estudo ao longo dos anos (Figura 1). A árvore apresentava uma inclinação acentuada, direcionada para uma avenida de grande movimentação (Av. Professor Almeida Prado) no campus da USP – Universidade de São Paulo, na cidade de São Paulo. Assim, para o correto manejo arbóreo, foram solicitadas diversas análises, dentre elas: visuais, internas do tronco com o auxílio da tomografia sônica, do sistema radicular e de características do solo. A árvore possuía um DAP de 71,7 cm, com altura e inclinação aproximadas de 18 m e 20°, respectivamente. Parte do sistema radicular já estava aparente, descolada do solo e dobrada, além de uma depressão do solo junto a árvore.

O resultado da tomografia mostrou uma cavidade interna com avançada deterioração do lenho. A partir dos resultados dessas análises optou-se pela remoção do indivíduo, por apresentar risco de queda.



Figura 1. Exemplar de *Libidibia ferrea* (Mart. exTul.) L.P.Queiroz (pau-ferro) estudado.
Figure 1. Studied *Libidibia ferrea* (Mart. exTul.) L.P.Queiroz (pau-ferro) tree.

Para a realização das aquisições de dados, foi delimitada uma área de 5,0 x 5,0 m no entorno da árvore pau-ferro (Figura 2), visando melhor caracterizar o sistema radicular deste exemplar de acordo com a disponibilidade operacional de aquisição. Próximo à área foi realizada uma sondagem a trado manual, para se obter uma caracterização tátil visual dos horizontes de solo na região onde se localizava a árvore. A perfuração atingiu o nível d'água (NA) em 4,10 m de profundidade. A análise da sondagem mostrou uma primeira camada, com espessura de aproximadamente 0,50 m, na qual se localiza a maior parte do sistema radicular do pau-ferro, composta por aterro e areia fina, com pouco teor de argila, de cor amarronzada a avermelhada. O próximo horizonte de solo (0,50 m até 1,10 m) é composto por uma areia muito fina com maior teor de argila, de cor avermelhada. Com o avanço da profundidade observa-se aumento do teor de argila, até alcançar o contato do aterro com uma camada de solo argiloso, cinza escuro em 1,70 m. Após essa profundidade até o NA encontrou-se apenas materiais argilosos de cor acinzentada, com presença de mica.

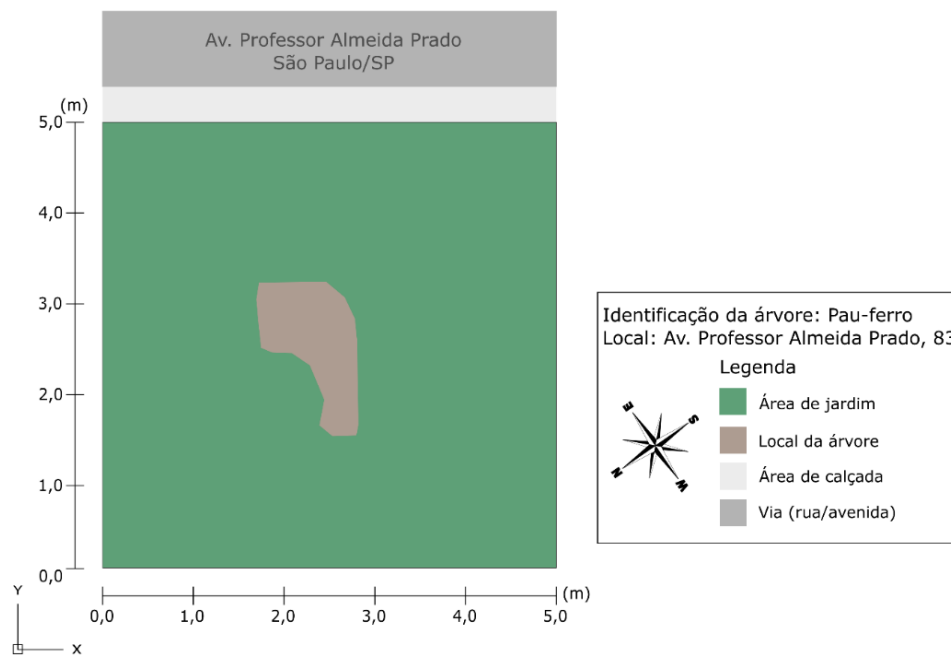


Figura 2. Croqui esquemático da área de aquisição dos dados geofísicos.
Figure 2. Schematic sketch of the geophysical data acquisition area.

Métodos geofísicos

Ground Penetrating Radar (GPR) é um método geofísico eletromagnético que emprega ondas de rádio em altas frequências (entre 10 e 2600 MHz) para localizar estruturas e feições geológicas ou objetos enterrados por ação humana em subsuperfície rasa (DANIELS, 2007). O GPR gera uma imagem de alta resolução do subsolo, incluindo o sistema radicular e estruturas antrópicas presentes (tubulação, cabos, galerias etc.) de maneira rápida, não invasiva e não destrutiva.

A metodologia consiste na transmissão de ondas eletromagnéticas, repetidamente radiadas para o interior do solo através de uma antena transmissora colocada na superfície. A propagação do sinal depende da frequência transmitida e das propriedades elétricas dos materiais em subsuperfície que, por sua vez, são principalmente dependentes do conteúdo de água presente no solo (JOL, 2009): quanto maior o conteúdo de água maior será a atenuação do sinal da onda. Variações nas propriedades elétricas em subsuperfície fazem com que parte do sinal eletromagnético transmitido seja refletido de volta à superfície e as ondas de radar refletidas e difratadas são recebidas por uma antena receptora.

Outro método aplicado aos estudos de troncos e raízes é o elétrico. Existem tipos diferentes de levantamentos elétrico, alguns fazem uso de campos naturais, enquanto outros requerem a introdução de correntes elétricas artificiais no solo. O método utilizado neste trabalho foi o da eletrorresistividade, que é comumente utilizado para determinar discontinuidades verticais e laterais de resistividade elétrica aparente do solo e na detecção de

corpos tridimensionais (KEAREY, 2009), além da Polarização Induzida ou cargabilidade (IP, sigla em inglês para *Induced Polarization*). No método da eletrorresistividade, correntes elétricas geradas por fontes artificiais são introduzidas no solo por um par de eletrodos de corrente e a diferença de potencial resultante é medida pelos eletrodos de potencial. As variações nesta medida do potencial fornecem informações a respeito de anomalias no subsolo, como a forma, profundidade e as propriedades elétricas (KELLER; FRISCHKNECHT, 1966).

No caso de raízes, a polarização induzida é a resposta que causa maior contraste entre raiz e solo, devido a polarização das membranas plasmáticas da estrutura celular das raízes (WANG et al., 2011). Nos trabalhos de Weigand e Kemna (2017, 2019), os autores mostram que a resolução espacial no imageamento IP, não é satisfatória para se entender a estrutura de uma raiz individualizada, mas é possível reconstruir sua extensão. Além disso, pode fornecer informações acerca de processos funcionais no interior das raízes, onde os autores mostram um decréscimo, tanto temporal quanto espacial, na resposta de cargabilidade durante prolongados períodos de privação de nutrientes em plantas oleaginosas, indicando uma sensibilidade ao movimento de nutrientes para as partes superiores das árvores (WEIGAND; KEMNA, 2017).

Tecnologia ANDAS

Para o estudo das raízes com o GPR ou eletrorresistividade, definiu-se uma área no entorno da árvore, com dimensão estabelecida em função das condições de acessibilidade e características do exemplar a ser analisado. Foram realizados perfis GPR paralelos 2D, com espaçamento variável, dependendo do grau de resolução necessária, proporcionando uma melhor caracterização desse tipo de alvo. Para o caso do georadar, após o pré-processamento dos dados obtidos e com a determinação da velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio, obtiveram-se a profundidade dos alvos mapeados. Para a estimativa do diâmetro das raízes utiliza-se a técnica proposta em (CUI et al., 2010), através dos processos de migração e envelope do sinal eletromagnético. Já para a eletrorresistividade foi necessário realizar a inversão (GROOT-HEDLIN, 1990; LOKE, 2018) dos dados obtidos a fim de se obter a profundidade das estruturas mapeadas.

Após a realização destas etapas, o software proprietário de processamento, que foi desenvolvido com a exclusiva finalidade de identificar raízes de árvores em subsuperfície, organiza espacialmente os dados e realiza a interpolação polinomial de todos os perfis em conjuntos, obtendo cortes em diferentes profundidades (visão em planta baixa), permitindo detectar as anomalias contínuas condizentes com raízes em subsuperfície. Com o GPR é possível diferenciar e individualizar cada raiz e, através da análise automática do histograma e

da curva de distribuição de probabilidade das amplitudes dos sinais eletromagnéticos, remover os efeitos do meio, gerando a imagem de distribuição espacial (2D e 3D) da ocorrência de raízes no subsolo. Com os dados obtidos de resistividade elétrica aparente e cargabilidade (IP) é possível caracterizar o solo existente ao redor da árvore, além da região de abrangência do sistema radicular em subsuperfície.

Para o estudo das propriedades do solo foram estimadas a porosidade e o conteúdo de água do meio avaliado, a partir de relações empíricas da propriedade elétrica de permissividade (ε), obtida com o método GPR. Segundo Santos e Lima (2012) e Romero-Ruiz et al. (2018) é importante conhecer a estrutura e propriedades do solo para o bom crescimento das plantas em geral, funcionalidade ecológica, manutenção do fluxo da água subterrânea e se tratando de solos urbanos para o planejamento das cidades.

O modelo empírico proposto pela *Equação de Topp* (TOPP; DAVIS; ANNAN, 1980) mostrada abaixo relaciona o conteúdo de água (θ) com ε_r do meio, parâmetro este obtido com o georadar e que diz respeito à capacidade deste meio em se polarizar na presença de um campo elétrico (ANNAN, 1992), sendo que esta relação é mais utilizada para solos argilo-arenosos:

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon_r^3 \quad (1)$$

SHEN et al. (1985) utiliza um modelo para estimar ε_r de acordo com a porosidade ϕ , através da saturação de água (S_w), a permissividade da água (ε_w) e da matriz do solo (ε_m):

$$\varepsilon = \{(\phi S_w \sqrt{\varepsilon_w}) + [(1 - \phi) \sqrt{\varepsilon_m}] + [\phi(1 - S_w)]\}^2 \quad (2)$$

$$S_w = \frac{\theta}{\phi} \quad (3)$$

Dessa maneira obteve-se os diferentes valores de permissividade a partir do ajuste hiperbólico das reflexões presentes em cada perfil adquirido. Utilizando a equação da velocidade da onda eletromagnética no meio ($v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}$, com c sendo 3×10^8 m/s – velocidade da luz no vácuo), é possível encontrar os valores de ε_r . Uma vez obtidos os valores de permissividade e com a utilização das equações mencionadas acima, é possível estimar a porosidade e conteúdo de água no solo ao redor de uma árvore e, assim, fornecer informações adicionais para análise da existência de risco de queda ou pivotamento da árvore pela raiz, em função do meio físico em seu entorno.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas figuras a seguir são apresentados os resultados obtidos com utilização da tecnologia ANDAS para mapeamento do sistema radicular do pau-ferro, através dos métodos GPR e eletrorresistividade. Foi possível obter a distribuição geométrica em profundidade (2D e 3D) e em perfil, bem como a densidade de raízes no subsolo (número de raízes por unidade de medida), para um maior entendimento do sistema radicular do exemplar analisado. Os dados de georadar a seguir foram adquiridos com antena de 900 MHz, da fabricante GSSI, atingindo uma profundidade máxima de investigação de 1,50 m. Na Figura 3 tem-se os cortes em diferentes profundidades, variando de 0,03 a 0,51 m, onde é possível observar os alinhamentos (em vermelho e roxo) condizentes com as raízes em subsuperfície.

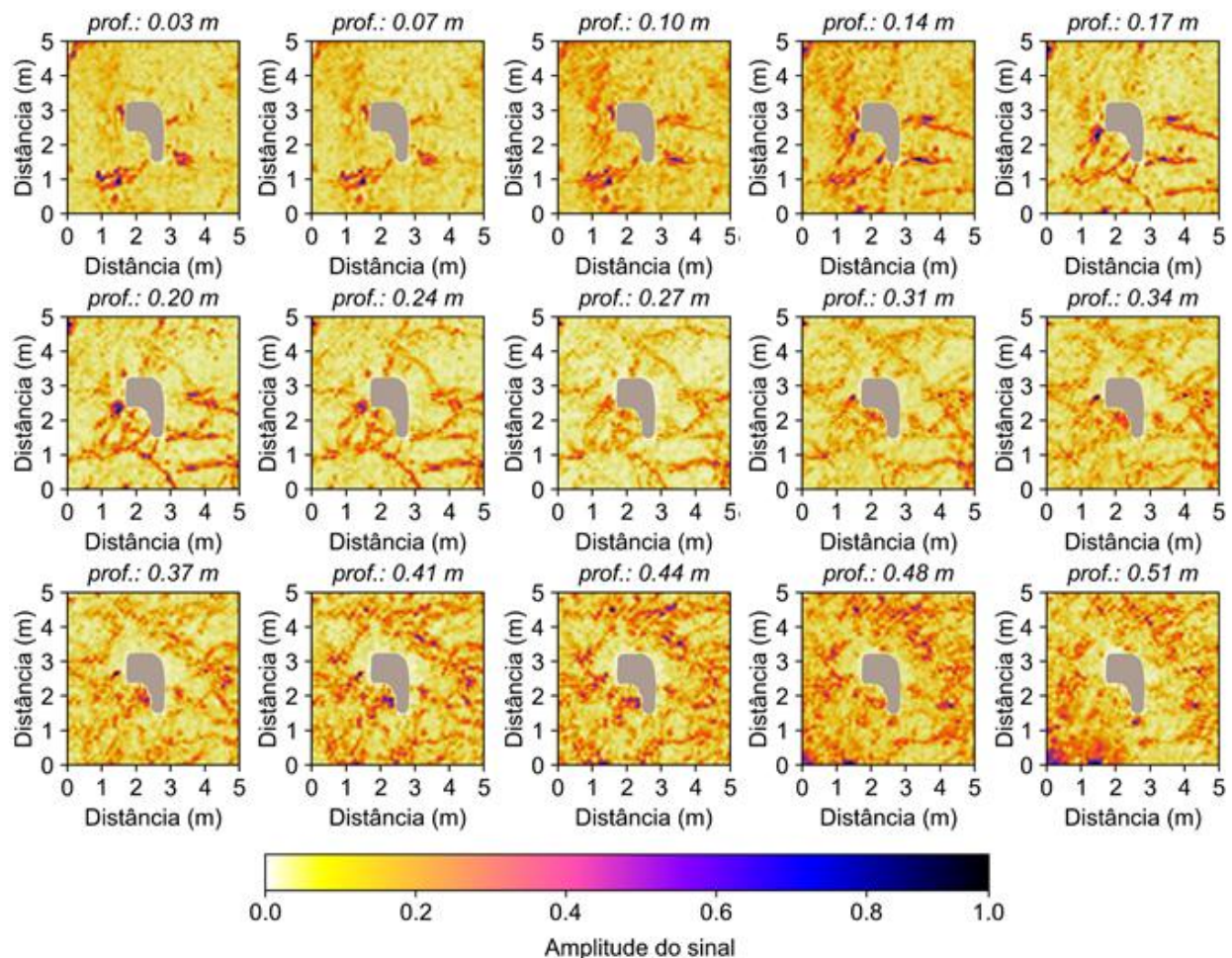


Figura 3. Cortes em diferentes profundidades obtidos na área do pau-ferro com o GPR.
Figure 3. Depth-slices obtained using GPR in *pau-ferro* tree.

O conjunto de dados mostrado na Figura 3 é o passo inicial para a discretização de cada uma das raízes. Após separar automaticamente as amplitudes condizentes com essas

estruturas das demais (referente ao solo ou outros materiais em subsuperfície), é possível mostrá-las em planta (eixos X e Y) e perfil (eixo Z). A Figura 4a mostra a distribuição do sistema radicular no plano XY (planta baixa) em função da profundidade (escala de cores); na Figura 4b tem-se o número de raízes mapeadas no subsolo distribuídas no plano XY, também em função da escala de cores onde, o mais vermelho indica um maior número de raízes no solo e, nas Figuras 4c e 4d é possível observar a distribuição de raízes em perfil, nos planos XZ e YZ, respectivamente. A região em marrom nas figuras indica a posição da árvore e delimita o alcance operacional do equipamento GPR durante a aquisição de dados, sendo que, na porção abaixo (em profundidade) desta posição não é possível se obter dados.

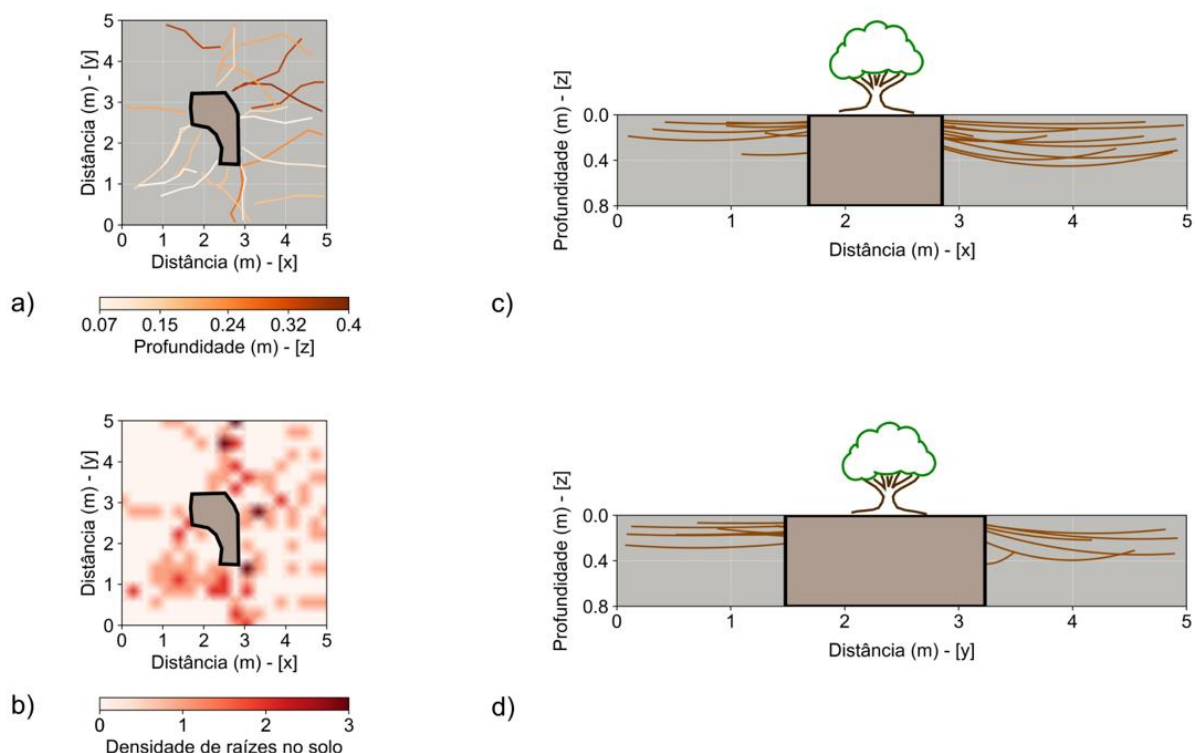


Figura 4. Resultado obtido pelo ANDAS na árvore de pau-ferro. a) Distribuição geométrica das raízes no plano XY. b) Número de raízes no subsolo no plano XY. c) Distribuição geométrica no plano XZ. d) Distribuição geométrica no plano YZ.

Figure 4. Results obtained by ANDAS in *pau-ferro* tree. a) Geometric distribution of roots in XY plane. b) Root number in subsoil in XY plane. c) Geometric distribution in XZ plane. d) Geometric distribution in YZ plane.

Pela análise da Figura 4 é possível observar a existência de um sistema radicular bem desenvolvido, com profundidades variando de 0,07 a 0,40 m e diâmetro estimado entre 3,8 e 19,1 cm. No quadrante superior esquerdo não se vê a presença de raízes, justificado pela inclinação da árvore, antes da supressão. Nos quadrantes inferiores foram encontradas as raízes com maior diâmetro, variando de 9,1 a 19,1 cm, também sugerindo a resposta fisiológica da árvore a essa inclinação, com o desenvolvimento de raízes de maior calibre para sua

ancoragem. A partir destes resultados é possível analisar a distribuição das raízes a partir de uma perspectiva tridimensional (Figura 5).

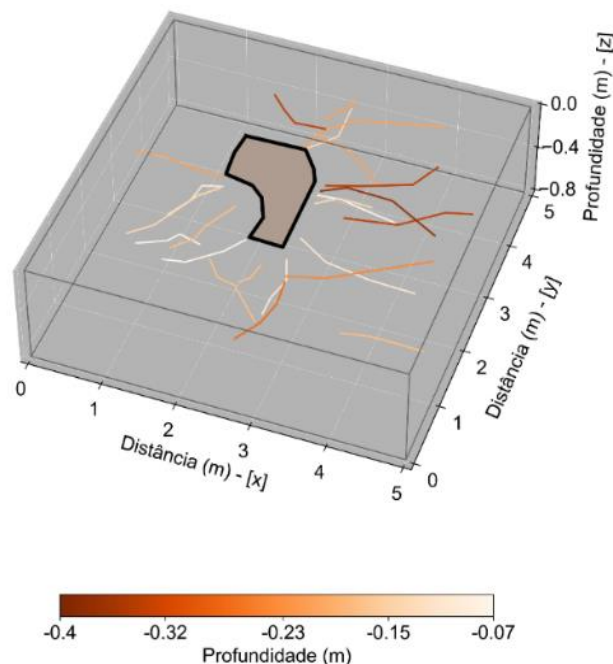


Figura 5. Distribuição geométrica tridimensional das raízes do pau-ferro obtido pela tecnologia ANDAS.
Figure 5. Three-dimensional geometric distribution of *pau-ferro* roots obtained by ANDAS technology.

Para o método da eletrorresistividade optou-se pelo arranjo de eletrodos do tipo dipolo-dipolo (KEAREY, 2009), pois é o arranjo que tem a melhor definição lateral da subsuperfície, com espaçamento de 0,5 m entre eles. Após a interpolação polinomial das linhas paralelas de aquisição, da mesma forma que o GPR, é possível obter os cortes em profundidade para a resistividade elétrica aparente (Figura 6) e cargabilidade - IP (Figura 7). Um diferencial frente aos dados GPR se refere a possibilidade de obtenção de dados abaixo da árvore estudada (linha preta nas figuras), pois é possível gerar um fluxo de corrente sob ela, possibilitando a identificação de uma raiz pivotante, por exemplo.

A profundidade dos cortes variou entre 0,04 e 0,72 m e, a partir dos resultados da resistividade observou-se que as imagens não apresentam uma correlação direta com a presença de raízes, quando comparado com os dados obtidos pelo georadar. Até a profundidade de 0,55 m tem-se valores altos de resistividade elétrica, entre 1500 e 2500 Ohm.m, sendo a porção mais à direita da área mais resistiva (em vermelho). A partir desta profundidade os valores diminuem gradativamente mostrando materiais mais condutivos, com maiores teores de argila e/ou água. Isso é confirmado pelo resultado do trado manual, onde a primeira camada é mais resistiva (mais arenosa e seca), seguido de horizontes menos resistivos (maior teor de argila e água).

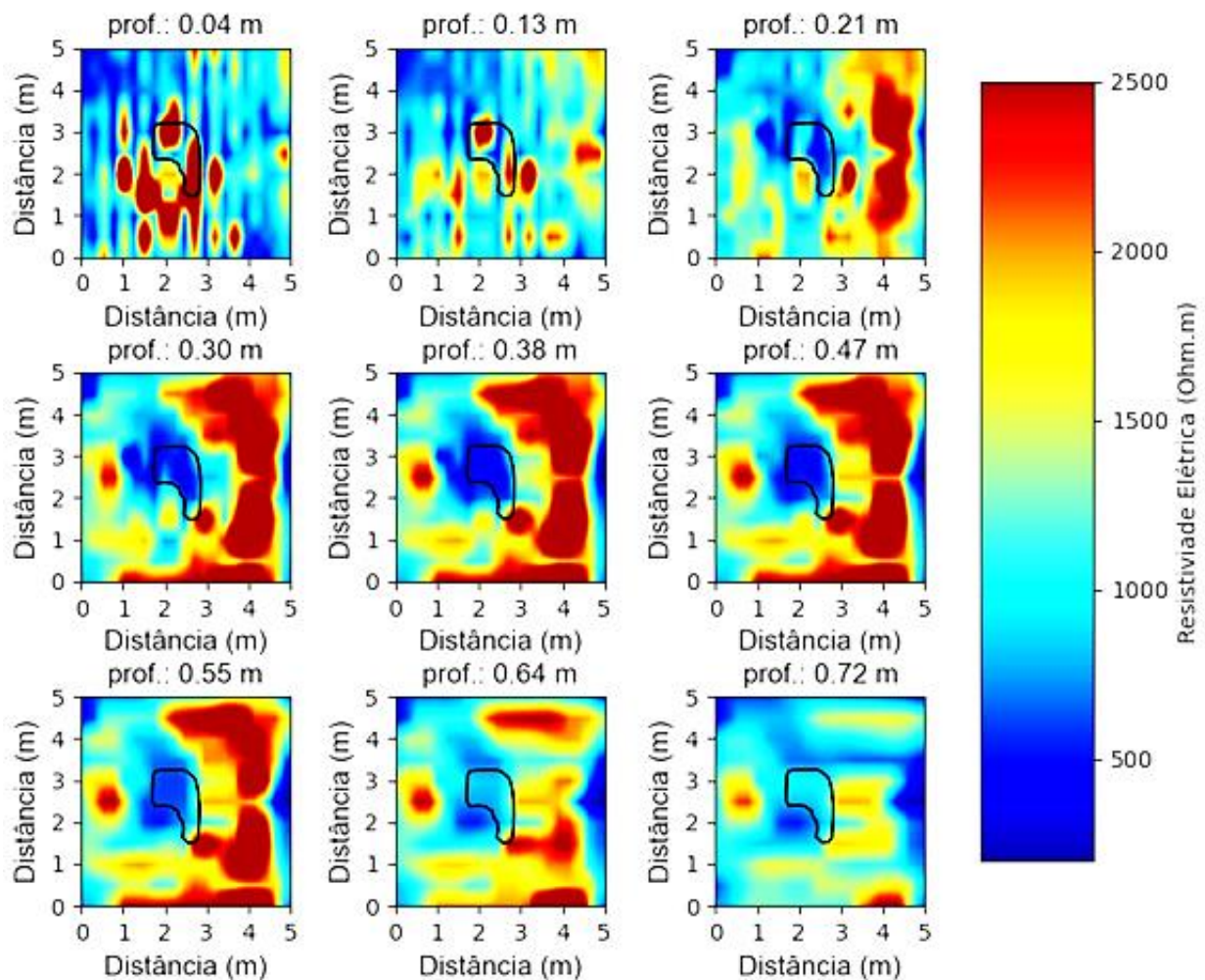


Figura 6. Cortes em diferentes profundidades obtidos na área do pau-ferro para a eletrorresistividade (resistividade elétrica aparente).

Figure 6. Depth-slices obtained using electroresistivity (apparent electrical resistivity) in *pau-ferro* tree.

Já as imagens de cargabilidade (Figura 7) apresentaram uma maior correlação com a presença de raízes mostradas no georadar. Altos valores de IP (em vermelho) indicam a possível localização do sistema radicular, acima de 10 mV/V e, até a profundidade de 0,38 m tem-se uma distribuição condizente na porção direita da área analisada. Diferentemente do GPR, onde é possível discretizar as raízes, no método da eletrorresistividade e, mais especificamente a cargabilidade, apenas é mapeado a região de influência dessas estruturas, mostrando se a árvore apresenta um sistema mais distribuído ou mesmo a ausência dele.

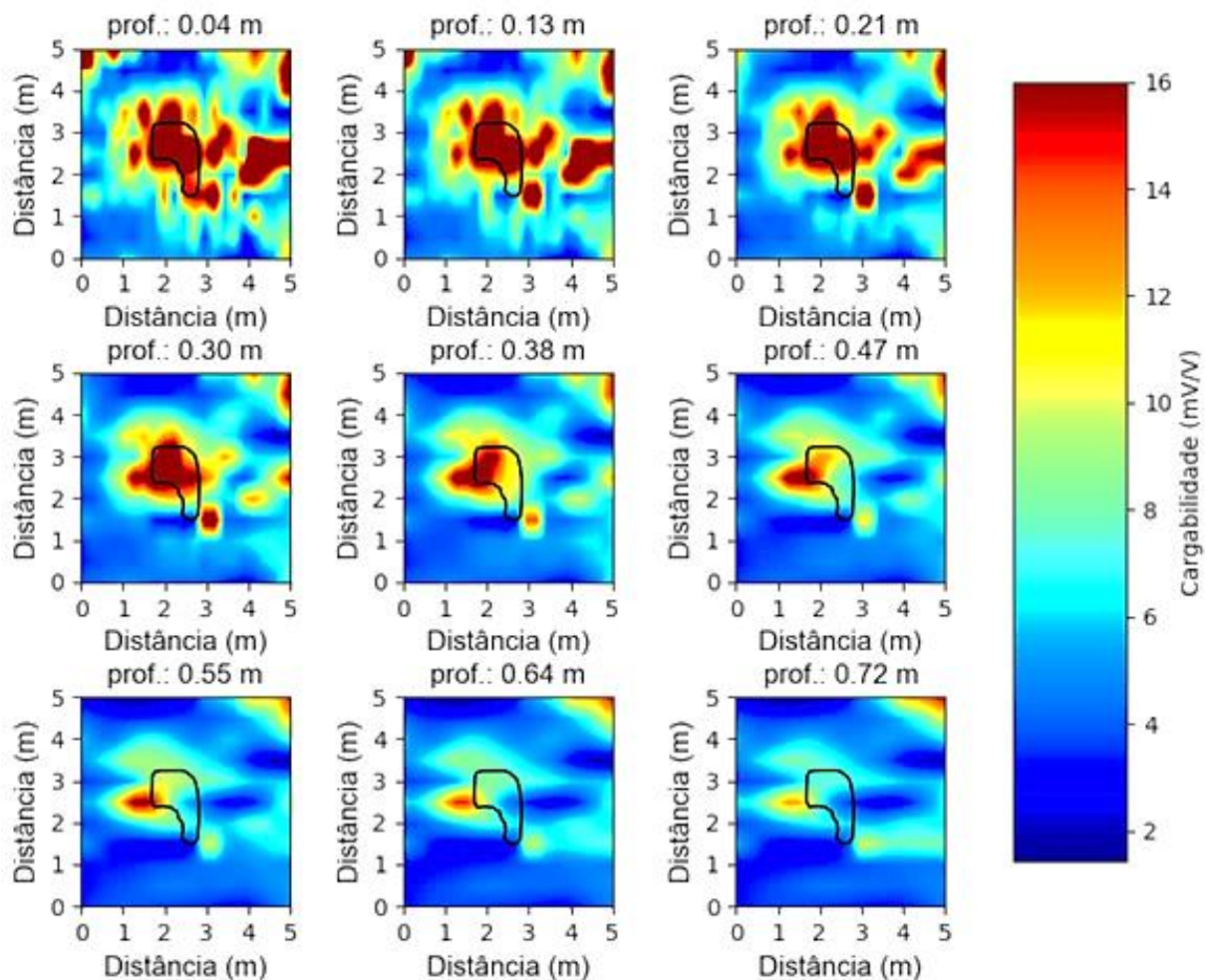


Figura 7. Cortes em diferentes profundidades obtidos na área do pau-ferro para a eletroresistividade (cargabilidade).

Figure 7. Depth-slices obtained using electroresistivity (induced polarization) in *pau-ferro* tree.

A Figura 8 mostra os resultados para o teor de umidade (8a) e porosidade (8b) do solo no entorno do pau-ferro, obtidos a partir dos dados de georadar. Os valores estimados se referem à primeira camada de espessura de 0,5 m, onde a maior parte do sistema radicular se encontra. O teor de umidade variou de 13% a 19,5%, mostrando um solo predominantemente seco; já a porosidade apresentou pouca variação, entre 42,8% e 43,3%, condizente com um solo mais arenoso e pouco compactado, o que favorece a um bom desenvolvimento do sistema radicular. Destaca-se a região anômala compreendida entre 2,0 e 3,0 m no eixo X e 3,0 e 4,0 m no eixo Y, onde exatamente localiza-se uma depressão mais acentuada do terreno, com teor de umidade e porosidade mais elevados. Devido à presença de argilas mais plásticas nas camadas subjacentes, estas estão sujeitas a deformações ao longo do tempo, contribuindo para a inclinação do pau-ferro.

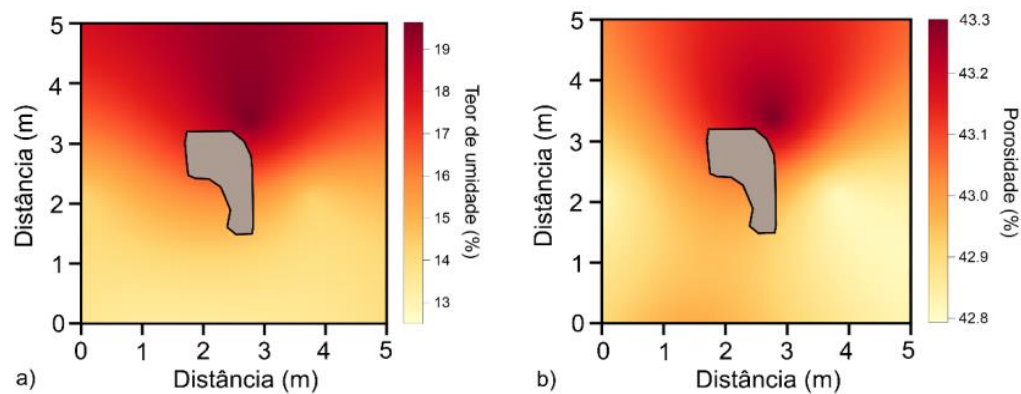


Figura 8. Resultados obtidos para o teor de umidade (a) e porosidade (b) na área do pau-ferro.
Figure 8. Results obtained to water content (a) and porosity (b) in *pau-ferro* tree area.

Escavação

Como comprovação das estruturas encontradas pela tecnologia ANDAS, foi realizada a escavação do local estudado com o auxílio do *air spade* (jato de ar em alta pressão que facilita a escavação e não danifica o sistema radicular). A escavação compreendeu toda a área mapeada pelo georadar e eletrorresistividade (5,0 x 5,0 m) e atingiu até 0,60 m de profundidade. A Figura 9 mostra o trabalho realizado (9a), bem como toda a malha de raízes que foi exposta (9b).

Foi realizada a raspagem longitudinal da superfície das raízes encontradas para a verificação das condições fitossanitárias, bem como para a confirmação de serem do pau-ferro. Verificou-se a presença de três tipos distintos de raízes na área delimitada. A partir da proximidade das árvores no entorno e da direção das raízes concluiu-se que estas pertenciam às espécies do pau-ferro, ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos) e jacarandá-mimoso (*Jacaranda mimosifolia* D. Don). A raspagem evidenciou que as raízes atribuídas ao pau-ferro possuem uma camada superficial avermelhada logo abaixo da casca externa, de coloração bege-escuro, como descrito na literatura para este tipo de madeira. Os tecidos apresentaram grande resistência à raspagem demonstrando alta dureza, além de estarem em bom estado. Já as raízes do ipê-roxo se mostraram muito úmidas, com coloração clara e pálida, cedendo com bastante facilidade ao processo de raspagem. O jacarandá-mimoso exibiu coloração amarelada nos tecidos abaixo da casca externa e resistência mediana ao processo de raspagem, comparativamente às outras duas espécies.

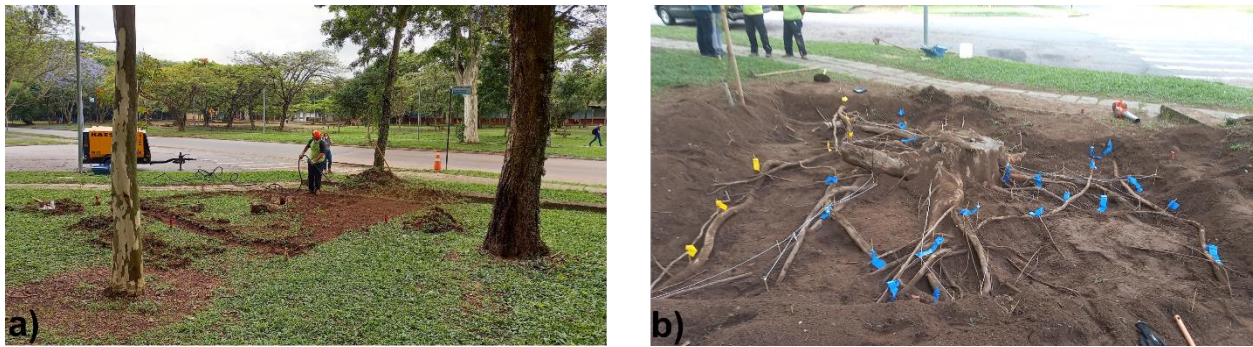


Figura 9. a) Trabalho de escavação utilizando o *air spade*. b) Sistema radicular exposto após a escavação.

Figure 9. a) Excavation work using air spade. b) Exposed root system after excavation.

As estruturas mapeadas pelo GPR foram encontradas durante a escavação, mostrando a eficiência do método para essa finalidade. Foram selecionadas algumas raízes para a comparação entre as estimativas indiretas realizadas e o valor real para a profundidade e diâmetro verificados na escavação. A Figura 10 (a) mostra um exemplo de duas raízes selecionadas para esta finalidade, destacadas em verde e azul, onde a linha preta tracejada indica a posição do perfil GPR realizado (3,0 m na direção X). É possível vê-las no corte em profundidade (0,30 m) mostrado na Figura 10b e as Figuras 10c e 10d mostram os perfis com as comparações entre as estimativas (círculos com linha cheia) e os valores reais (círculos com linha tracejada) para as duas raízes.

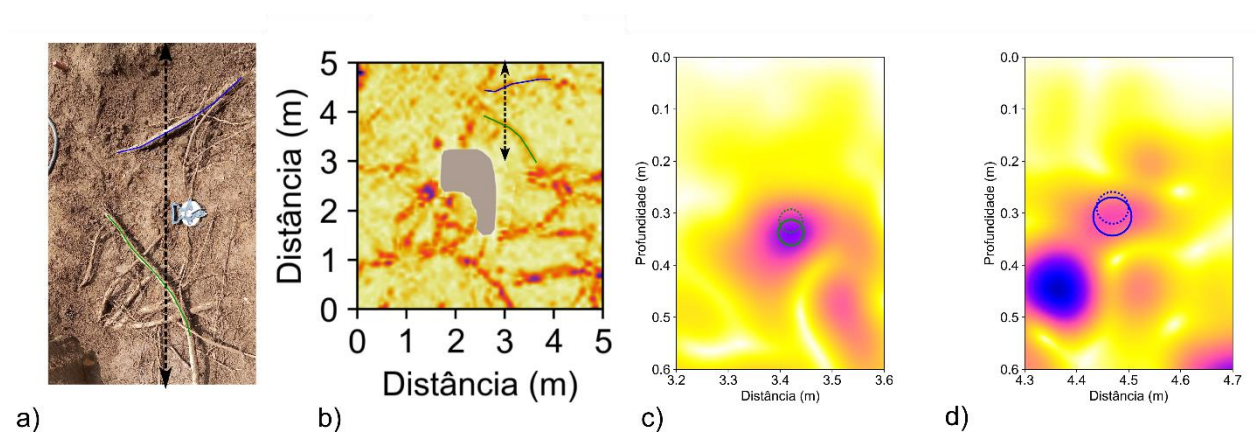


Figura 10. Exemplo de comparação entre os valores reais e estimados para a profundidade e diâmetro das raízes selecionadas. a) Raízes selecionadas (verde e azul). b) Corte em profundidade mostrando as raízes selecionadas. c) Perfil GPR para a raiz verde (círculo em linha cheia: estimativa; círculo em linha pontilhada: real). d) Perfil GPR para a raiz azul (círculo em linha cheia: estimativa; círculo em linha pontilhada: real).

Figure 10. Example of comparison between real and estimated values of depth and diameter of the selected roots. a) Selected roots (green and blue). b) Depth-slice showing the selected roots. c) GPR profile for green root (full line circle: estimative; dotted line circle: real). d) GPR profile for blue root (full line circle: estimative; dotted line circle: real).

Obteve-se 31 cm e 5,2 cm (raiz verde) e 27 cm e 7,8 cm (raiz azul) para profundidade e diâmetro, respectivamente. Todos os valores encontrados, para este respectivo exemplo

mostrado, podem ser vistos na Tabela 1. Comparando com os valores medidos após a escavação, foi possível calcular os erros, com uma média de 4,7% para a profundidade e 15% no diâmetro. No caso da profundidade, o ajuste da velocidade eletromagnética no meio (ajuste hiperbólico) pode diminuir esse percentual de erro, uma vez que, quanto mais próximo da velocidade real, melhor será a estimativa da profundidade. Para os diâmetros, o formato da anomalia (região em rosa, roxo ou azul nas Figuras 10c e 10d) é responsável por recuperar essa informação e está relacionada à uma porcentagem da amplitude máxima do sinal eletromagnético, sendo aqui utilizado 75%. Assim, utilizando-se valores entre 80% e 85% desta amplitude máxima, melhora-se a estimativa de diâmetro, reduzindo o erro para 9,7%.

Tabela 1. Comparativo entre os valores reais e estimados para a profundidade e diâmetro das raízes selecionadas (verde e azul).

Table 1. Comparative between real and estimated values of depth and diameter of selected roots (green and blue).

<i>Raiz 'verde'</i>				<i>Raiz 'azul'</i>			
Profundidade (cm)		Diâmetro (cm)		Profundidade (cm)		Diâmetro (cm)	
Real	Estimado	Real	Estimado	Real	Estimado	Real	Estimado
29,5	31,0	4,7	5,2	26,0	27,0	6,5	7,8
Erro		Erro		Erro		Erro	
1,5 cm	5,7%	0,5 cm	11%	1 cm	3,8%	1,3 cm	20%

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo introduzir a tecnologia ANDAS, não invasiva e não destrutiva, para mapeamento e caracterização de raízes no subsolo, baseado em uma metodologia de aquisição, processamento e apresentação de dados desenvolvidos especificamente para este fim, que visam gerar imagens de alta resolução do sistema radicular, além de obter valores de diâmetros e profundidade das raízes e estimar as características do solo ao redor a árvore. Toda a análise foi realizada em um exemplar de pau-ferro, mostrando as potencialidades para a detecção e caracterização das raízes e solo. As informações obtidas com o mapeamento em subsuperfície, corroboram com a utilização da metodologia na arborização urbana, pois contribuem nas futuras análises técnicas e tomadas de decisão quanto ao manejo dessas árvores.

Com a utilização do georadar foi possível individualizar as principais raízes e apresenta uma versatilidade operacional, pois pode ser aplicado em diversos tipos de ambientes, como pisos de asfalto ou concreto, além de independe da espécie avaliada. Entretanto, para a obtenção de estimativas mais precisas quanto a profundidade e diâmetro, é necessário realizar um bom ajuste da velocidade eletromagnética do meio, além da profundidade de investigação diminuir em solos muito condutivos, pois dificulta a penetração do sinal. Já com a

eletrorresistividade pode-se identificar locais de ocorrência do sistema radicular solo, além de mostrar características físicas do meio estudado, porém sua utilização é mais recomendada em locais sem coberturas de concreto ou asfalto. É importante ressaltar que a metodologia aqui apresentada detecta a presença ou não de raízes no subsolo, mas não garante sua condição de sanidade, outro fator importante na análise de estabilidade.

A escavação e exposição do sistema radicular foi fundamental para a comprovação das raízes mapeadas, sendo possível comparar os valores reais com as estimativas feitas pela tecnologia ANDAS, obtendo os erros médios na estimativa da profundidade e diâmetro e como reduzir esses valores para uma melhor caracterização. Estes dados, adicionados as informações obtidas de teor de umidade e porosidade complementam a análise, mostrando se aquele indivíduo pode ter o risco de pivotamento devido às más condições do solo, como excesso de água ou alta porosidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio institucional e financeiro (processos: 2017/22855-9, 2019/09483-0, 2020/09315-8, 2020/09318-7 e 2020/11873-9). Este trabalho foi realizado a partir do Termo de Cooperação (nº 0070/2019) firmado entre o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) e a empresa Kerno Geo Soluções. Os autores agradecem também aos pesquisadores e técnicos do IPT pelo apoio no desenvolvimento das pesquisas e atividades de campo, em especial a Raquel Amaral e Sergio Brazolin.

REFERÊNCIAS

ALANI, A. M.; SOLDVIERI, F.; CATAPANO, I.; GIANNAKIS, I.; GENNARELLI, G.; LANTINI, L.; LUDENO, G.; TOSTI, F. The Use of Ground Penetrating Radar and Microwave Tomography for the Detection of Decay and Cavities in Tree Trunks. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, s/p, 2019.

ALLISON, R. B.; WANG, X.; SENALIK, C. A. Methods for Nondestructive Testing of Urban Trees. **Forests**, Basel, v. 11, s/p, 2020.

ANNAN, P. **Ground Penetrating Radar workshop notes**. Sensors and Software, Inc. Internal Report. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16246-3: **Florestas Urbanas – Manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas, parte 3: Avaliação de risco de árvore**, 14p.,26/092019.

BALWANT, P., JYOTHI, V., PUJARI, P. R., DHYANI, S., VERMA, P., PADMAKAR, C., QUAMAR, R., RAMESH, J., KHARE, S., MITKARI, M. Tree root imaging by electrical resistivity

tomography: geophysical tools to improve understanding of deep root structure and rizospheric processes. **Tropical Ecology**, Nova York, v.63, p. 319-324, 2021.

BUTNOR, J.R.; DOOLITTLE, J.A.; KRESS, L.; COHEN, S.; JOHNSEN, K.H. Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. **Tree Physiology**, Oxônia, v. 21, p. 1269-1278, 2001.

CAMPOS FILHO, E. M.; SARTORELLI, P. A. R. **Guia de árvores com valor econômico**. São Paulo: Agroicone, 2015.

CHEN, S.-L.; LIU, S.-T.; LIN, C.-H.; LIU, C.-C. Application of Ground-Penetrating Radar for Living Trees Detection. **Earth and Environmental Science**, 6th International Conference on Green Materials and Environmental Engineering, v. 706, 2021.

CUI, X. H.; CHEN, J.; SHEN, J. S.; CAO, X.; CHEN, X. H.; ZHU, X. L. Modeling tree root diameter and biomass by ground-penetrating radar. **Science China Earth Science**, Nova York, v. 54, p. 711-719, 2010.

CURY, G. **Descrição da estrutura anatômica do lenho e sua aplicação na identificação de espécies arbóreas do Cerrado e da Mata Atlântica do Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Universidade de São Paulo, 125p., 2001.

DANIELS, D.J. **Ground Penetrating Radar**. Second Ed. IET Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series, v. 15, 2007.

ELLIOT, M.L., BROCHAT, T.K., GÖCKE, L. Preliminary evaluation of electrical resistance tomography for imaging palm trunks. **Arboriculture & Urban Forestry**, Atlanta, v.42, n.2, p. 111-119, 2016.

FU, L.; LIU, S.; LIU, L. Internal Structure Characterization of Living Tree Trunk Cross-Section Using GPR: Numerical Examples and Field Data Analysis. **15th International Conference on Ground Penetrating Radar – GPR2014**. 30 June – 4 July, Brussels, Belgium, 2014.

GIAMBASTIANI, Y., ERRICO, A., PRETI, F., GUASTINI, E., CENSINI, G. Indirect root distribution characterization using electrical resistivity tomography in different soil conditions. **Urban Forestry & Urban Greening**. Amesterdã, v. 67, s/p, 2022.

GORA, E. M., YANOVIK, S. P. Electrical properties of temperate forest trees: a review and quantitative comparison with vines. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawá, v.45, n.3, p. 236-245, 2015.

GROOT-HEDLIN, C.; CONSTABLE, S. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. **Geophysics**, Houston, v. 55, p. 1613-1624, 1990.

GUARDIA, I. Velocidade de onda mecânica na avaliação de raízes de ancoragem de árvores nas cidades. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 160p., 2020.

HAGREY, S.A. Geophysical imaging of root-zone, trunk and moisture heterogeneity. **Journal of Experimental Botany**, Oxônia, v. 58, n. 4, p. 839-854, 2007.

HRUSKA, J.; CERMÁK, J.; SUSTEK, S. Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. **Tree Physiology**, Oxônia, v. 19, p. 125-130, 1999.

ICRAF. **Tree Functional Attributes Ecological Database**. Disponível em: <<http://db.worldagroforestry.org/>>. Acesso em: 27 jul. de 2021.

JOL, H.M. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. Elsevier, 2009.

KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I. **Geofísica de exploração**. São Paulo: Oficina de Textos. 2009.

KELLER, V.G., FRISCHKNECHT, F.C. **Electrical methods in geophysical prospecting**. Oxford: Pergamon Press. 517 p. 1966.

LANTINI, L.; TOSTI, F.; GIANNAKIS, I.; ZOU, L.; BENEDETTO, A.; ALANI, A. M. An Enhanced Data Processing Framework for Mapping Tree Root Systems Using Ground Penetrating Radar. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n. 20,s/p, 2020.

LOKE, M.H. **Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys**. Geotomo Software SdnBhd, Malaysia. 2018.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**, v. 1. Nova Odessa: **Plantarum**,1992.

LORENZO H.; PÉREZ-GRACIA V.; NOVO A.; ARMESTO J. Forestry application of ground-penetrating radar. **Forest Systems**, Madri, v. 19, n. 1, p. 5-17, 2010.

MARTIN, L., COCHARD, H., MAYR, S., BADEL, E. Using electrical resistivity tomography to detect wet wood and estimate moisture content in silver fir (*Abies alba* Mill.). **Annals of Forest Science**, Paris, v. 78, n. 65, 2021.

PAGLIS, C.M. Application of electrical resistivity tomography for detecting root biomass in coffee trees. **International Journal of Geophysics**. Londres, Article ID383261. 2013.

PROTO, A. R.; DI IORIO, A.; ABENAVOLI, L. M.; SORGONÀ, A. A sonic root detector for revealing tree coarse root distribution. **Nature Scientific Report**, Londres, v. 10, n. 8075, 2020.

QUIGLEY, M.F. Street trees and rural conspecifics: will low-lived trees reach full size in urban conditions? **Urban Ecosystems**, Nova York, v. 7, p. 29-39, 2004.

ROMERO-RUIZ, A.; LINDE, N.; KELLER, T.; OR, D. A review of geophysical methods for soil structure characterization. **Reviews of Geophysics**, Washington, v. 56, n. 4, 2018.

SANTOS, N.R.Z., TEIXEIRA, I.F. **Arborização de Vias Públicas: Ambiente X Vegetação**, 1ª Ed. Gráfica Editora Palloti, Porto Alegre-RS, 2001.

SANTOS, J. B.; LIMA, M. R. Caracterização e classificação de solos urbanos em Campina Grande do Sul, Estado do Paraná. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 55, n.2, p. 98-104, 2012.

SHEN, L.C.; SAVRE, W.C.; PRICE, J.M.; ATHAVALE, K. Dielectric properties of reservoir rocks at ultra-high frequencies. **Geophysics**, Houston, v. 50, p. 692-704, 1985.

STAMM, Alfred J. The electrical resistance of wood as a measure of its moisture content. **Industrial & Engineering Chemistry**, Washington v. 19, n. 9, p. 1021-1025, 1927.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Nova York, v. 16, n.3, p. 574-582, 1980.

WANG,svma P.; KINRAIDE, T. B.; ZHOU, D.; KOPITTKE, P. M.; PEIJNENBURG, W. J. G. M. Plasma membrane surface potential: dual effects upon ion uptake and toxicity. **Plant Physiology**, Oxônia, v. 155, n. 2, p. 808-820, 2011.

WEIGAND, M.; KEMNA, A. Multi-frequency electrical impedance tomography as a non-invasive tool to characterize and monitor crop root systems. **Biogeosciences**, Göttingen, v. 14, n. 4, p. 921-939, 2017.

WEIGAND, M.; KEMNA, A. Imaging and functional characterization of crop root systems using spectroscopic electrical impedance measurements. **Plant and Soil**, Nova York, v. 435, n. 1, p. 201-224, 2019.

ZHU S.; HUANG C.; SU Y.; SATO M.3D Ground Penetrating Radar to Detect Tree Roots and Estimate Root Biomass in the Field. **Remote Sensing**, Basel, v. 6, p. 5754-5773, 2014.