# GEOFÍSICA

Volume I

Fabricia Benda de Oliveira Calvin da Silva Candotti Jenesca Vicente Florencio de Lima (Organizadores)

Fabricia Benda de Oliveira Calvin da Silva Candotti Jenesca Vicente Florencio de Lima (Organizadores)

> GEOFÍSICA VOLUME I

> > CAUFES 2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP) (Biblioteca Setorial Sul, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

G345 Geofísica [recurso eletrônico] / Fabricia Benda de Oliveira, Calvin da Silva Candotti, Jenesca Vicente Florencio de Lima, Organizadores. - Dados eletrônicos. - Alegre, ES : CAUFES, 2022.
90 p. : il. – (Geofísica; v. 1)

ISBN: 978-65-86981-27-8 Modo de acesso: https://geologia.ufes.br/e-book

1. Geofísica. 2. Ground Penetrating Radar. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Eletromagnetismo. 5. Solos. I. Oliveira, Fabricia Benda de, 1978-. II. Candotti, Calvin da Silva, 1985-. III. Lima, Jenesca Vicente Florencio de, 1981-.

CDU: 550.3

# APRESENTAÇÃO

A produção deste trabalho é independente e surgiu da ideia e colaboração de professores, alunos e ex-alunos do curso de Geologia do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, da Universidade Federal do Espírito Santo. Estão contidos neste livro 4 trabalhos apresentados na forma de capítulos e que abrangem temas relacionados a Geologia. O material contido nesta obra servirá de auxílio para estudantes, professores e profissionais da área das geociências em seus trabalhos e pesquisas. REITOR – UFES PAULO SÉRGIO DE PAULA VARGAS

DIRETOR DO CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E DA SAÚDE – UFES TAIS CRISTINA BASTOS SOARES

ORGANIZADORES DESTA OBRA FABRICIA BENDA DE OLIVEIRA CALVIN DA SILVA CANDOTTI JENESCA VICENTE FLORENCIO DE LIMA

Os textos apresentados nesse livro são de inteira responsabilidade dos autores. Os organizadores não se responsabilizam pela revisão ortográfica e gramatical dos trabalhos apresentados.

#### LISTA DOS ORGANIZADORES

**Fabricia Benda de Oliveira.** Professora Associada do Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo / Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Alegre, ES, e-mail: fabricia.oliveira@ufes.br

**Calvin da Silva Candotti.** Estudante de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas (PPGGEO – UFAM), Manaus, AM, e-mail: calvindasilvacandotti@gmail.com

Jenesca Vicente Florencio de Lima. Professora Adjunto do Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo / Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Alegre, ES, e-mail: jenesca.lima@ufes.br

#### LISTA DE AUTORES

ADLER SILVEIRA BATISTA ANA LAURA SILVA OLIVEIRA **BERNARDO LUIZ CAMPOS MARTINS BRENO LAFRATTA CALANDRELLI BRUNO MIAN SILVA CRISTIANO JOSÉ DE LIMA GABRIELLA ANDRADE DOS SANTOS GUILHERME CARNEIRO DE ASSIS** INAÊ DE SENA CONCEIÇÃO ISABELLA COUTINHO SILVA HUBNER JARBAS FERREIRA DE SOUZA NETO JENESCA FLORENCIO VICENTE DE LIMA JOSÉ OTÁVIO TAVARES LEONARDO COELHO FABRINO FILHO LUCAS PINHEIRO TONIÊTO LUIZ CARLOS MOREIRA DUARTE FILHO MARIANA DE MENDONCA CARVALHO MYLLENA MOURA GONÇALVES PABLO RODRIGUES DE SOUZA **RENAN DE MIRANDA BARBOSA RUAN MOREIRA ALVES** SARAH DUARTE BORGES

## Sumário

Capítulo 19
Estudo preliminar da constante dielétrica dos solos no sítio controlado em São José do
Calçado, ES
Adler Silveira Batista; Jenesca Florencio Vicente de Lima; Ana Laura Silva Oliveira; Guilherme Carneiro de Assis; Isabella Coutinho Silva Hubner; José Otávio Tavares; Cristiano José de Lima
Automatização do processo do reconhecimento o classificação do interforências do
subsolo com GPR
Bruno Mian Silva; Jenesca Florencio Vicente de Lima; Bernardo Luiz Campos Martins; Jarbas Ferreira de Souza Neto; Luiz Carlos Moreira Duarte Filho; Pablo Rodrigues de Souza; Renan de Miranda Barbosa; Cristiano José de Lima
Capítulo 3
Caracterização de alvos utilizando o método GPR: estudo sobre o sítio controlado da
UFES – São José do Calçado, ES
Gabriella Andrade Dos Santos; Jenesca Florencio Vicente de Lima; Inaê De Sena Conceição; Mariana De Mendonça Carvalho; Ruan Moreira Alves; Sarah Duarte Borges: Cristiano José de Lima
Capítulo 4
Análise de dados geofísicos e espectrais de sensores remotos no estudo da fertilidade do
solo na região do Complexo Intrusivo Santa Angélica (CISA), ES
Lucas Pinheiro Toniêto; Jenesca Florencio Vicente de Lima; Breno Lafratta Calendarlli, Lorenzado Coelho Esterino Filhos Mellong Morra Concelhos Cristiano

Lucas Pinheiro Toniêto; Jenesca Florencio Vicente de Lima; Breno Lafratta Calandrelli; Leonardo Coelho Fabrino Filho; Myllena Moura Gonçalves; Cristiano José de Lima

#### Capítulo 1

# Estudo preliminar da constante dielétrica dos solos no sítio controlado em São José do Calçado, ES

Adler Silveira Batista<sup>1</sup>; Jenesca Florencio Vicente de Lima<sup>1</sup>; Ana Laura Silva Oliveira<sup>1</sup>; Guilherme Carneiro de Assis<sup>1</sup>; Isabella Coutinho Silva Hubner<sup>1</sup>; José Otávio Tavares<sup>1</sup>; Cristiano José de Lima<sup>2</sup>

**RESUMO.** A geofísica tem desempenhado um excepcional trabalho como instrumento para a investigação e caracterização de estruturas em subsuperfície. Desse modo, a compreensão das propriedades fundamentais dessa disciplina oferece uma boa coleta de dados e, portanto, uma boa interpretação. Esse trabalho tem o objetivo de fazer um estudo da constante dielétrica da área experimental em São José do Calçado, através da umidade do solo. Para realizar essa análise, foram realizadas coletas de solo seco e úmido em diferentes alvos e com profundidades variadas. Em seguida, foram feitas análises laboratoriais para obtenção da umidade relativa do solo e posteriormente tratamentos matemáticos para conseguir encontrar a constante dielétrica das amostras em estudo. Também foram produzidos perfis com as antenas de 400 e 200 MHz nos mesmos alvos onde se coletou as amostras. Utilizando o programa Reflex os dados dos perfis foram tratados, onde se utilizou a constante dielétrica para achar a profundidade do perfil. Através dos dados tratados pelo programa, observou que a constante dielétrica tem uma relação com a umidade do solo e conforme essa propriedade se comporta, poderia induzir em maior ou menor profundidade ou nos perfis GPR, reagindo de forma diferente para cada tipo de frequência de antena.

PALAVRAS-CHAVE: Análises Laboratoriais; Constante Dielétrica; GPR; Umidade do Solo.

<sup>1</sup>Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo (CCENS - UFES) – Alegre, Espírito Santo, Brasil.

<sup>2</sup>Secretaria de Educação do Estado do Rio de Janeiro (SEEDUC) - Bom Jesus do Itabapoana, Rio de Janeiro, Brasil.

# INTRODUÇÃO

Através das propriedades físicas dos materiais (condutividade elétrica, constante dielétrica, resistência física etc.), é possível utilizar a geofísica para detectar as estruturas e formas em subsuperfície.

A constante dielétrica é fundamental para o método eletromagnético *Ground Penetrating Radar* (GPR), pois tem uma íntima ligação com a umidade do solo podendo afetar na qualidade dos dados.

Dessa forma, o entendimento da constante dielétrica em relação à umidade é de fundamental importância para aquisição dos dados nos perfis de GPR, para diferentes frequências de onda. Entretanto, no mundo acadêmico há poucos estudos sobre como essas propriedades podem afetar a coleta dos materiais, e consequentemente a interpretação.

## LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudo está localizada no município de São José do Calçado - ES, na fazenda experimental da Universidade Federal do Espírito Santo (Figura 1). A distância entre a capital e a área do trabalho é de 241 km.



Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA/GEOLOGIA REGIONAL**

#### Geologia Local

De acordo com mapa de VIEIRA, 2013, a área em estudo se encontra inserida na unidade Bom Jesus do Itabapoana e na Suíte São João do Paraíso.

A rocha mais abundante na unidade Bom Jesus de Itabapoana é o (ortopiroxênio)granada-biotita gnaisse, descrita como sendo um litotipo cinzento e esverdeado, apresentando grande heterogeneidade estrutural e composicional, podendo estar migmatizada e ocorrem associadas às bandas e lentes de composição diversa (DUARTE et al., 2012).

### Solo da Área

De acordo com a classificação de IEMA (2010) o solo da área de São José do Calçado pode ser definido como um latossolo, no qual a textura dominantemente é fina a médio com teores de matéria orgânica.

O Latossolo brasileiro, segundo a classificação do solo da EMBRAPA (2014) tem cores que variam nos matizes do vermelho muito escuro ao amarelo. Exibem teor de silte de 20% e argila entre 15% e 80%, sendo altamente permeáveis à água. Por conta disso, esse tipo de solo é de fácil intemperização.

### Clima e Pluviometria

A região em estudo de acordo com IEMA (2010), pode ser compreendida no contexto de clima úmido. Nesse caso, a umidade varia de 30 a 40% e a precipitação média anual entre 1300 e 1600 mm de chuva e temperatura em torno de 18 a 23°C.

#### Sítio Controlado

A área experimental em estudo foi elaborada a fim de estudar melhor as relações das propriedades do GPR e para ser usada como forma de ensino aos alunos de graduação. Assim, foram enterrados 06 alvos, em que consiste em vasilhames cilíndricos com diferentes soluções e suas profundidades (VIETCHESKY, 2013), como apresentado na Tabela 1.

Ponto	Composição	Solução H20 (l) + NaCl (g)	Profundidade (m)	Material de cobertura
01	Polipropileno	40l + 1000g	1,00	Solo local
02	Polipropileno	40l + 1000g	1,60	Areia lavada
03	Polipropileno	401 + 0g	1,60	Solo local
04	Polipropileno	20l + 1000g	1,60	Solo local
05	Polipropileno	201 + 500g	1,60	Solo local
06	Metal		1,40	Solo local

Tabela 1. Tabela de Alvos na área de estudo. Modificado de VIETCHESKY. 2013.

#### **Constante Dielétrica**

A constante dielétrica é a permissividade relativa que um material tem a ser induzido por um campo elétrico. (HALLIDAY, FESNICK e KRANE, 2008).

Para o método de GPR a constante dielétrica é importante, pois essa propriedade é determinante para a velocidade de propagação das ondas em altas frequências, além de ser muito usada em estudos de umidades de solo devido ao fato desta constante ter uma íntima relação com a umidade (PAIXÃO, PRADO e DIOGO, 2006).

Existem muitos meios para a definição da constante dielétrica através do perfil do GPR (RIOS, 2011). Como forma de definir a umidade do solo é possível usar fórmulas matemáticas desenvolvidas que correlaciona a duas propriedades (CEZAR, NANNI, et al., 2012), como a relação abaixo:

$$V_{OD} \approx \frac{C}{\sqrt{K}}$$

Equação 1: Equação da Velocidade da onda direta no solo

Onde C = a Velocidade da onda eletromagnética (0,3 m/ns), K = Constante dielétrica e VOD = Velocidade de propagação da onda direta. Esta relação é possível de usar no caso de solos homogêneos onde a energia se propaga diretamente da antena transmissora para antena

### **GEOFÍSICA APLICADA – VOLUME I**

receptora (PAIXÃO, PRADO e DIOGO, 2006). Para uma melhor acurácia nos dados obteve a seguinte relação a partir da equação acima, quando as ondas aérea e direta chegam simultaneamente e o afastamento das antenas é quase zero;

$$K = \left(\frac{C(t_{OD} - t_{OA}) + x}{x}\right)^2$$

Equação 2: Equação da onda aérea e direta para afastamento de zero.

Onde  $t_{OD}$ = tempo de onde direta no solo;  $t_{OA}$ = tempo da onda área; x= afastamento e K=constante dielétrica (PAIXÃO, PRADO e DIOGO, 2006). Para determinar a umidade com relação à constante dielétrica a equação mais usada é Topp. Onde estabelece uma relação baseada em experimentos laboratoriais, com diferentes texturas do solo. Essa equação não depende da densidade, da temperatura e da salinidade solo, porém não é muito aplicável para solos orgânicos (MESQUITA, 2011). Essa relação pode ser expressa matematicamente da seguinte forma:

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K - 5.5 \times 10^{-4} K^2 + 4.3 \times 10^{-6} K^3$$

**Equação 3:** Equação de Topp, Onde  $\theta$ = teor de umidade e K= constante dielétrica (PAIXÃO, PRADO e DIOGO, 2006).

Outra forma matemática de se obter valores da constante dielétrica em relação à umidade é a equação de Roth, no qual essa equação foi formulada com base em onze amostras de solo mineral e sete em solo orgânica com diferentes propriedades química e física e como resultado obteve-se equação (MESQUITA, 2011):

$$\theta_{\nu} = -7.8^{-2} + 4.48 \times 10^{-2} e_r - 1.95 \times 10^{-3} e_r^2 + 3.61 \times 10^{-5} e_r^3$$

**Equação 4:** Equação de Roth θv= umidade do solo e er= é a constante dielétrica (MESQUITA, 2011).

### METODOLOGIA

A primeira etapa do trabalho consistiu na coleta de dados com o uso do GPR SIR-3000, com antenas de 200 Mhz e 400MHz (Figura 2), bem como a coleta de amostras de solo para análise laboratorial.



Figura 2. Em A) GPR com a antena de 400 Mhz e em B) antena de 200 MHz.

Para a coleta de dados, inicialmente foram realizados dois perfis com o GPR sobre alvos no subsolo (Figura 3:C e D), sendo o primeiro (alvo 1), constituído de um fogão enterrado e o segundo (alvo 2), formado por dois tanques contendo água e sal. A coleta de amostras de solo seco foi realizada com trado manual (Figura: 3-A). Cada sondagem gerou duas amostras, uma a 0,5 m de profundidade e outra de 1,0 m e condicionados em sacos plásticos a fim evitar perda de umidade.

Em um segundo momento foram repetidos os mesmos procedimentos, tanto para a realização dos perfis quanto a coleta de amostras, porém, trinta litros de água foram despejados sobre os alvos, a fim de que a umidade viesse a interferir na velocidade de propagação do sinal do GPR (Figura 4).



Figura 3. Em A) sondagem com Trado Manual; em B) coleta das amostras e seu condicionamento, em C) e D) perfil feito com o GPR nos alvos com as antenas de 200 e 400 MHz respectivamente.



Figura 4. Em A) umedecendo o solo para se fazer o perfil, em B) galão usado para umedecer o solo e em C) sondagem do solo com trado manual.

A segunda parte do trabalho, constituiu-se na etapa laboratorial, bem como o tratamento dos dados coletados através do GPR.

Sendo assim, as amostras de solo levadas ao Laboratório de Produção Vegetal da Universidade Federal do Espírito Santo, no qual cada amostra foi classificada de acordo com a profundidade do solo no qual foi coletada (0,5 m e 1, m), separada em três porções de mesmo volume e pesadas em balança analítica, sendo posteriormente levadas à estufa onde permaneceram por um período de 24h sob uma temperatura de 105° C. Após este período o

material foi pesado novamente para a obtenção da diferença de massas dos solos para determinar a umidade relativa.

Para medir a constante dielétrica, foi necessário ter-se a densidade do solo em estudo, no qual foi encontrada através da fórmula abaixo:

$$\rho = \frac{M_{sec}}{V}$$

**Equação 5:** Equação da Densidade, no qual  $M_{sec}$  = massa seca da amostra em kg e V = volume da amostra.

Após o cálculo da densidade, foi feito o cálculo do teor de umidade volumétrica de água/ m<sup>3</sup> de solo, utilizando a metodologia descrita por BUSKE, 2013, que usa a seguinte equação para medir a umidade do solo gravimétrico.

$$Umidade \ Gravim \acute{e} trica = \frac{M_{sumi} - M_{ssec}}{M_{sec}}$$

Equação 6: Umidade Gravimétrica

$$Umidade Volumétrica = \frac{Umidade Gravimétrica - \rho_{sec}}{\rho_{ag}}$$

Equação 7: Equação da umidade volumétrica

Com a umidade volumétrica, foi então encontrada a constante dielétrica do solo com as equações 3 e 4 (Topp e Roth) descrita anteriormente, calculadas pelo site on-line *Wofram Alph*.

Após a aquisição dos valores das pesagens de cada porção das amostras, calculou-se a umidade gravimétrica de cada uma delas, bem como a média aritmética simples entre as porções das amostras. A partir destes valores, foram calculadas: a densidade do solo, a umidade volumétrica e a constante dielétrica.

Posteriormente foi calculada a média aritmética simples da constante dielétrica a partir da classificação por profundidade, a fim de se obter uma única constante para cada solo em que o alvo está enterrado.

As constantes dielétricas, possibilitaram medir a velocidade da onda de propagação do GPR no solo e dessa forma indicar, com precisão, a profundidade do alvo. Essa velocidade foi

medida de acordo com a equação 1, descrita anteriormente. A partir destes dados e dos coletados em campo com o GPR, foi possível fazer o processamento no programa Reflex. O tratamento efetuado nos radargramas foram: com a antena de 200 MHz, utilizou-se somente a correção estática e com a antena de 400 MHz utilizou-se a correção estática e filtros - o dewow, remoção do *background* e *gain engercy decay*.

Ao todo, dezesseis radargramas foram tratados, em que para cada alvo era colocada a velocidade da onda para as equações de Topp e Roth, ou seja, em cada linha foram gerados dois radargramas com as diferentes velocidades da onda e, consequentemente, da profundidade. Ainda nos radargramas foram demarcados em laranja o topo e base dos alvos de acordo com que VIETCHESKY (2013) propõem (Tabela 2). Efetuou-se esse procedimento a fim de se observar se essa metodologia poderia ser usada para medir a velocidade da onda direta de propagação do solo.

PONTO	PROFUND. (m)	Altura (cm)	Topo (m)
2	1	0,4	0,6
1	1,4	0,6	0,8

Tabela 2. Dados das profundidades dos alvos, modificado de VIETCHESKY, 2013.

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### Descrição do Solo

Alvo 1 – O solo pode ser descrito da seguinte maneira:

- Da superfície até 0,5 m Coloração marrom avermelhada, e granulometria de argila a areia, onde ocorre o predomínio da fração argilosa e pequenos agregados de solo e pequenas concentrações de matéria orgânica.
- De 0,5 m até 1,0 m o solo também é marrom avermelhado, com argila e areia como granulometria, porém nesta porção aparenta se com mais argila que areia em relação sua parte superior e ocorrem agregados de solo em menores quantidades e tamanhos e menores quantidades de matéria orgânica.

Alvo 2 – O solo é descrito da seguinte maneira:

- Da superfície até 0,5 m possui coloração avermelhada, granulometria de areia à argila, predominando a porção mais argilosa, com agregados com tamanho de até 2. É nessa porção onde se concentra a matéria orgânica.
- De 0,5 m a 1 m o solo possui coloração amarronzada, com predomínio da fração argila e não possui aglomerados de solo (Figura 12).

As características diferentes nos solos analisados são as seguintes: quando o solo é umedecido as porções mais siltosas se sobressaem em relação à arenosa. A água no alvo 1 se infiltra melhor até 0,5 m, já no alvo 2 possui uma melhor infiltração. Mas isso pode estar relacionado ao tempo que levou para fazer as sondagens nos alvos.

## Constantes Dielétricas e Umidade do solo

A partir dos cálculos das equações de Topp e Roth, para as constantes dielétricas do solo, obteve os seguintes resultados (Tabela 3):

**Tabela 3.** Tabela das Constantes dielétricas calculadas pelas fórmulas matemáticas, para solo seco e úmido.

	SOLO S	SECO	SOLO ÚMIDO		
Amostra	Constante dielétrica (Equação de <i>Topp</i> )	Constante dielétrica (Equação de <i>Roth</i> )	Constante dielétrica (Equação de <i>Topp</i> )	Constante dielétrica (Equação de <i>Roth</i> )	
	Ponto 02 - 0,5 m				
P1					
P2	6,84781	5,753	16,5335	17,149	
P3					
Ponto 02 - 1,0 m					
P1					
P2	12,4608	11,4692	17,9636	19,2162	
P3					
Ponto 01 - 0,5 m					
P1					
P2	13,2101	12,4116	16,1934	16,6417	
P3					
Ponto 01 - 1,0 m					
P1					
P2	12,8874	11,9991	13,668	13,0143	
P3					

A partir da descrição, o solo de enquadraria com a tabela 3 com uma constante entre 5 (solo argiloso seco) a 15 (solo argiloso saturado). Como os perfis contêm água em ambas as amostras pode-se constatar que houve coerência entre os dados, ficando entre o intervalo classificado. Em relação com as constantes dielétricas e solos amostrados, foi observado aumento relativo da constante nas seções mais úmidas.

	SOLO SECO		SOLO ÚMIDO	
Alvo	Média do Solo (Equação de Topp)	Média do Solo ( Equação de Roth)	Média do Solo (Equação de Topp)	Média do Solo ( Equação de Roth)
Alvo 1	13,04875	12,20535	14,93075	14,828
Alvo 2	9,654305	8,6109	17,24855	18,18255

**Tabela 4.** Tabela das medidas da constante dielétrica para cada alvo.

#### GPR e velocidade da onda

Pode-se notar que as velocidades para o solo úmido são menores do que as de solo seco. Isso se deve porque que a raiz da constante dielétrica do solo é inversamente proporcional à velocidade de propagação. As velocidades no solo úmido são mais constantes que no solo seco, podendo estar associada a essa homogeneização de água no solo, fazendo com que nos dois alvos o solo fique com a mesma quantidade de umidade e as ondas tenham a mesma resposta para a velocidade da onda, já que os solos são semelhantes.

A partir da marcação do topo e base, foi possível identificar coerência com o que é proposto por VIETCHESKY (2013). No alvo 1 foi possível delimitar só o topo, utilizando antena de 400MHz, devido a uma maior atenuação dessa frequência para profundidades maiores. As partes mais superficiais terão menor atenuação produzindo imagens nítidas. No alvo 2 há também uma forte atenuação para a antena 400MHz em todo o perfil.

Com os dados processados nos radargramas, é plausível fazer algumas interpretações. A frequência de 200MHz consta que quando a constante dielétrica for alta, produz perfis mais profundos, devido à ocorrência de água que proporciona a onda propagar mais profundo. Possui menor atenuação das ondas em profundidade altas, evidenciado pela demarcação topo e base.

A frequência de onda de 400MHz em um mesmo alvo, a constante dielétrica é maior, a profundidade dos perfis é maior também, porém tem uma maior atenuação de onda em grande profundidade, não delimitando a base dos alvos. A atenuação da onda nessa frequência é muito maior, para constante dielétrica maiores, gerando perfis ruidosos. Em relação às frequências, é

possível observar que a onda de 400MHz tem uma maior atenuação, ocorrendo dispersão de onda, gerando perfis mal marcados e difusos. Por isso radargramas com a antena 200Mhz são mais nítidas as feições, onda há menos perda de energia no solo.

• Alvo 1 - Antena de 200 MHz (Figura 5 a 8).







The network of the second seco

**Figura 5.** Radargrama da antena de 200 MHZ para solo seco no alvo 1 (velocidade de onda para constante da equação de Topp) e em linha vermelha marcada 1,0 m de profundidade e em laranja o topo e base do alvo.

**Figura 6.** Radargrama com antena de 200 MHZ para solo seco no alvo 1, com velocidade da constante para equação Roth, em vermelho profundidade de 1,0 m e em laranja indica o topo e base do alvo.

**Figura 7.** Radargrama da antena de 200 MHz para o solo úmido no alvo 1 e velocidade da onda com a constante da equação de Topp, em vermelho a profundidade de 1,0 m e a linha laranja topo e base do alvo enterrado.

**Figura 8.** Radargrama com antena de 200 MHz para solo úmido no alvo 1 (velocidade calculada com a constante de Roth) e a linha vermelha indica 1,0 m de profundidade e em laranja as profundidades de 0,8 m e 1,4 m. • Alvo 1 - Antena de 400 MHz (Figura 9 a 12).



**Figura 9.** Radargrama da Antena de 400 MHz para solo seco no alvo constante dielétrica para equação de Topp, em vermelho a profundidade de 1,0 m e em laranja é o topo e base do alvo.



**Figura 10.** Radargrama com antena de 400MHz para o solo seco no alvo 1, velocidade calculada com base na constante de Roth, em vermelho profundidade de 1,0 m e laranja topo e base do alvo enterrado.





**Figura 11.** Radargrama com antena 400 MHz para solo úmido no alvo 1, com as constantes da equação de topp, a linha vermelha indica a profundidade de 1,0 m e laranja profundidade de 0,8 m e 1,4 m

**Figura 12.** Radargrama com Antena de 400 MHz com o solo úmido no Alvo 1, e constante calculada com base na fórmula de Roth. em vermelho profundidade de 1,0 m e em laranja o topo e base do alvo

• Alvo 2 - Antena de 200 MHz (Figura 13 a 16)



**Figura 13.** Radargrama com antena de 200 MHz para o Alvo 2 para o solo seco, com a constante calculada para equação de Topp em vermelho, profundidade de 1,0 m e em laranja 0,6m.



**Figura 14.** Radargrama da Antena de 200 MHz no Alvo 2 para solo seco, e velocidade calculada com base na constante de Roth, em vermelho profundidade de 1,0 m e em laranja o topo do alvo.



**Figura 15.** Radargrama da Antena de 200 MHz para o solo úmido no alvo 2, e velocidade calculada com base na constante da fórmula de Topp, em vermelho profundidade de 1,0 m e a linha laranja no topo do alvo.



**Figura 16.** Imagem gerada com antena de 200 MHz para o solo úmido no alvo 2, com base na equação de Roth, a linha vermelha indica profundidade de 1,0 m e em laranja profundidade de 0,6 m • Alvo 2 - Antena de 400 MHz (Figura 17 a 20)



**Figura 17.** Imagem com antena de 400 MHz para alvo 2 como o solo seco, e constante da equação de Topp, a linha vermelha indica profundidade de 1,0 m, em laranja indica topo do alvo



**Figura 18.** Imagem com a Antena de 400MHz para o Alvo 2 com solo seco, e constante calculada com base na equação de Roth, em vermelho indicando profundidade de 1,0 m e a linha laranja indica o topo do alvo.



**Figura 19.** Imagem gerada a partir da antena de 400 MHZ com solo úmido no alvo 2, e velocidade da onda calculada com base na equação de Topp, a linha vermelha indica profundidade de 1,0 m e a linha laranja indica profundidade 0,6 m.



**Figura 20** R.adargrama da Antena de 400 MHz para solo úmido no alvo 2, com a constante da equação de Roth, em vermelho a profundidade de 1.0 m em laranja indica profundidade de 0,6m.

# CONCLUSÃO

A partir dos resultados, conclui-se que a metodologia que foi aplicada tem efetividade para medir a constante dielétrica no solo sem a necessidade de um TDR (equipamento que mede a constante dielétrica). A metodologia usada para o cálculo da velocidade da onda direta mostrou ter efetividade para antenas blindadas, onde a antena emissora fica no mesmo equipamento que a receptora.

Existe uma relação entre a umidade do solo e a propriedade estudada, tal relação tem de ser levada em consideração para o momento de aplicação do GPR, foi evidenciado que essa propriedade irá afetar na profundidade em que as ondas se propagam, consequentemente os perfis terão profundidades diferentes, além disso cada tipo de antena será afetada de forma diferente pela umidade, podendo servir como catalisadora da onda e levando em profundidades maiores ou como uma resistência causando ruído no perfil. Fica claro que as constantes elétricas diferentes do solo têm uma relação com a atenuação da onda para uma mesma frequência, sendo assim tem de ser medida e levada em consideração para um melhor tratamento dos dados.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BATISTA, A. S. Estudo preliminar da constante dielétrica dos solos, no sítio controlado em São José dos Calçados. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.

CEZAR, et al. Emprego de GPR no estudo de solos e sua correlação. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 33, n. III, p. 979-988, 2012.

DUARTE, B. P. et al. Geologia e recursos minerais da folha Itaperuna SF.24-V-C-I, estado do Rio de Janeiro escala 1:100.000. CPRM. Belo Horizonte, p. 138. 2012.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, v. I, 2006. 306 p.

HALLIDAY, D.; FESNICK, R.; KRANE, K. S. **Física 3.** Tradução de Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco; Leydervan Souza Xavier Xavier e Paulo Pedro Kenedi. 5°. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. II, 390 p. 2008. HEILBRON, et al. Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Marques de Almeida. [S.l.]: [s.n.], 2004.

INCAPER. Sistema de Informações Meterológicas. Instituto Capixaba de pesquisa, assistência técnica e extensão rural. Disponível em:

<a href="http://hidrometeorologia.incaper.es.gov.br/?pagina=itarana\_sh>">http://hidrometeorologia.incaper.es.gov.br/?pagina=itarana\_sh></a>. Acesso em: 16 set. 2014.

MESQUITA, M. J. L. Estimativas de Umidade no solo usando GPR. Universidade Federal do Pará. Belém, p. 61. 2011.

PAIXÃO, M. S. G.; PRADO, R. L.; DIOGO, L. A. **Análise do emprego do GPR para estimar o teor de umidade do solo a partir de um estudo na cidade de São Paulo.** Revista Brasileira de Geofísica, São Paulo, v. II, n. 24, p. 189-198, 2006.

RIOS, R. F. V. Detecção de Dutos Enterrados empregando os Métodos GPR e Eletromagnético Indutivo. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal da Bahia. p. 90. 2011.

VIEIRA, V. S. Mapa Geológico do Espírito Santo. CPRM. [S.l.]. 2013.

VIETCHESKY, P. P. Sítio Controlado de Geofísica Rasa para Utilização e Calibração de GPR (ground penetration radar). Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre. 2013.

INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (IEMA), ESPÍRITO SANTO (ESTADO). SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **ZEE - Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Espírito Santo.** Vitória, ES, 2010.

#### Capítulo 2

# Automatização do processo de reconhecimento e classificação de interferências do subsolo com GPR

Bruno Mian Silva<sup>1</sup>; Jenesca Florencio Vicente de Lima<sup>1</sup>; Bernardo Luiz Campos Martins<sup>1</sup>; Jarbas Ferreira de Souza Neto<sup>1</sup>; Luiz Carlos Moreira Duarte Filho<sup>1</sup>; Pablo Rodrigues de Souza<sup>1</sup>; Renan de Miranda Barbosa<sup>1</sup>; Cristiano José de Lima<sup>2</sup>

**RESUMO.** O radar de penetração no solo (GPR) é um método geofísico não destrutivo capaz de detectar objetos enterrados, tais como: cabos e tubulações de água e esgotos sem causar danos à superfície. O presente trabalho objetiva melhorar a detecção de alvos, objetos enterrados em ambientes urbanos e determinar o tipo de material para reduzir a ambiguidade na interpretação geofísica. Este estudo foi realizado pelo método GPR - Ground Penetrating Radar em duas diferentes áreas localizadas nos municípios de São José do Calçado e Alegre, onde foram coletados perfis contendo os alvos no subsolo. O objetivo principal foi a automatização usando conceitos da visão computacional para detectar características e classificar os alvos no subsolo. Depois da efetivação do algoritmo e desenvolvimento de uma interface gráfica, o software denominado GeoView foi executado no ambiente computacional Matlab. A validação dos resultados foi realizada em condições controladas com tambores plásticos, tanques de água e fogão metálico, bem como na situação real da rede de tubulação urbana. Os resultados obtidos em condições controladas e reais demonstraram a precisão da classificação dos alvos otimizando o tempo, além de melhorar a interpretação dos dados geofísicos que podem ser utilizados nas áreas de planejamento urbano, infraestrutura e pesquisa ambiental em áreas urbanas.

PALAVRAS-CHAVE: Algoritmo; Alvos; Ambientes urbanos; Detecção; Interpretação.

<sup>1</sup>Departamento de Geologia, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde (CCENS)– Alegre, ES, Brasil.

<sup>2</sup>Secretaria de Educação do Estado do Rio de Janeiro (SEEDUC), Bom Jesus do Itabapoana, Rio de Janeiro, Brasil.

# INTRODUÇÃO

O radar de penetração no solo (GPR) é um método geofísico não destrutivo capaz de detectar objetos enterrados, tais como: cabos e tubulações de água e esgotos sem causar danos à superfície. De acordo com LEE & MOKJI (2014), o equipamento *Ground Penetrating Radar* (GPR) é um dos equipamentos de levantamento de subsuperfície mais populares e confiáveis, no entanto, operadores humanos são obrigados a interpretar manualmente os dados GPR, ocasionando problemas como aumento do consumo de tempo e resultados imprecisos devido a erro humano.

À medida que a digitalização da informação ocorre, surge a possibilidade de criar soluções automatizadas para os problemas de organização da informação de forma analógica (AUSTIN, 2011).

Este trabalho tem como objetivo geral pesquisar aplicações computacionais e tecnologias de processamento de imagens em ambiente Matlab aplicadas aos perfis de GPR. Os objetivos específicos são coleta de perfis de GPR de duas áreas de estudo, aplicação de filtros para corrigir os perfis, treinamento de algoritmos para detecção e classificação de alvos enterrados e teste e aprimoramento do software completo denominado GeoView. A finalidade principal deste trabalho é reduzir a ambiguidade e inconsistência dos dados geofísicos, reduzir o consumo de tempo e melhorar o desempenho de detecção e classificação de objetos enterrados através de um processo automatizado.

# LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

As áreas de estudo estão localizadas nos municípios de São José do Calçado e Alegre (Figura 1), no sul do Espírito Santo, Brasil, respectivamente na Fazenda experimental da UFES - Universidade Federal do Espírito Santo e na construção do Ed. Comercial Victoria Center (Figura 2). Da capital Vitória a Alegre são 201 quilômetros e, São José do Calçado, 241 quilômetros. Os primeiros 46 km são feitos pela Rodovia do Sol, depois deste percurso, o caminho percorrido é pela BR-101 e BR-482 até Alegre, seguindo nesta rodovia até a saída para BR-484, chegando a São José do Calçado.



Figura 1. Mapa de localização e vias de acesso. (SILVA, 2018).



Figura 2. Visualização das áreas de estudo por imagens de satélite (SILVA, 2018).

# Automatização do processo de reconhecimento e classificação de interferências do subsolo com GPR

# **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para que o software tenha sido desenvolvido, foram adicionadas novas tecnologias a suas particularidades. A seguir serão apresentados fundamentos teóricos de cada um dos elementos utilizados para realização desta pesquisa.

### Método GPR (Ground Penetration Radar).

*Ground Penetration Radar* (GPR) é um método geofísico cujo princípio físico consiste na emissão de ondas eletromagnéticas (EM) produzidas a partir de um curto pulso de alta frequência repetidamente irradiado para dentro do terreno através de uma antena emissora. A propagação do sinal e a profundidade de alcance das ondas eletromagnéticas dependem da frequência do sinal emitido e das propriedades elétricas dos materiais, tais como: condutividade elétrica, permissividade dielétrica, velocidade de propagação e constante de atenuação.

Sendo assim, as ondas refletidas e difratadas em subsuperfície, são recebidas por outra antena disposta na superfície, que recebe o nome de antena receptora. A energia refletida é registrada em função do tempo de percurso (tempo duplo), sendo em seguida amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido do computador, deixando então os dados já preparados para um próximo processamento quando assim necessário (NUNES, 2002).

#### Características das reflexões nos perfis geofísicos (alvos)

De acordo com GSSI (2001), os alvos podem ser identificados nos perfis utilizando a forma de hipérboles ou reflexões evidenciadas, quando a antena é cruzada com tubos, cabos, vergalhões em um determinado ângulo. Hipérbole é o termo de descrição para essa forma uma vez que o resultado poderá ser um "U" ou um "V" invertidos. Isso se dá pelo fato de que o feixe de radiação da antena possui a forma de um cone grande, com isso o radar não só vê o alvo quando está no topo, mas também em muitos *scans* antes e depois da posição. A forma de hipérbole mostra a antena se aproximando do alvo e logo depois se afastando.

### **Algoritmos Computacionais**

Buscando compreender mais sobre os processos de automatização que são associados ao GPR, é importante citar algumas referências técnicas associadas aos conceitos de visão computacional.

• **Histograma de Gradiente Orientado (HOG):** O HOG foi implementado em 2005, tinha o conceito principal de que a aparência e forma de objetos em uma imagem pudessem ser descritos a partir da distribuição dos gradientes intensidade dos pixels ou pelas direções das bordas. Para que seja gerado um descritor HOG.

• **Transformada de Hough:** O principal objetivo nessa técnica é aplicar na imagem uma transformação, de modo que todos os pontos pertencentes a uma mesma curva sejam mapeados em um único ponto de um novo espaço de parametrização da curva procurada, assim, definindo a forma do objeto. O fato de poder ser aplicada ao tratamento de qualquer tipo de curva é a principal vantagem desta técnica, além de apresentar uma eficiência em imagens fortemente ruidosas.

• **Transformada de Fourier:** Jean Baptiste Fourier desenvolveu o método da transformada a fim de solucionar problemas de processamento de imagens digitais a partir de equações matemáticas. Esse método consiste na visualização da imagem do domínio da frequência, de forma que não há a perda de informações. Por exemplo nas imagens Biomédicas que utilizam as variações sinusoidais no elemento que está medindo a fim de obter a aquisição da temperatura, intensidade da absolvição do raio x, eco do ultrassom medindo a atenuação da ressonância do Pixel da imagem de acordo com NAJARIAN & SPLINTER (2016).

• **Detector de Objetos em Cascata:** Pode-se observar um detector de objetos com uma combinação de um conjunto de características de imagem/rótulos que são associados a um algoritmo descritor (HOG), podendo até ser utilizado para analisar, descrever e unir imagens, de acordo com DALAL (2006).

O funcionamento do detector de objetos em cascata Matlab, é explicado por ALIONTE & LAZAR (2015), Como um conjunto de imagens positivas e negativas que detêm regiões de interesse (ROIs), podendo ser associadas a um algoritmo descritor (HOG ou Haar) e alguns parâmetros como o número de estágios e alarme falso. Ou seja, é basicamente estágios de treinamento para a formação de um modelo de detecção.

### **Trabalhos Relacionados**

SANTOS (2014) desenvolveu técnicas de aprimoramento parar detecção de alvos no subsolo, onde era determinado tipo de material e reduzir as ambiguidades na interpretação geofísica de duas importantes famílias de alvos encontradas no ambiente urbano: sendo elas os alvos resistores, como as manilhas de concreto, e os alvos condutores, tubulações metálicas.

# Automatização do processo de reconhecimento e classificação de interferências do subsolo com GPR

Esse feito foi realizado utilizando o algoritmo de Redes Neurais Artificiais (RNAs).

Já os autores MAAS & SCHMALZL (2013) dão outra abordagem para a localização de hipérboles de reflexão em dados GPR, onde eles conseguiram resolver um problema de reconhecimento de padrões de imagens em escala de cinza, conseguindo detectar alvos em tempo real usando o algoritmo de aprendizado de Viola-Jones.

#### **METODOLOGIA**

O software GeoView foi desenvolvido de acordo como esquema mostrado na Figura 3. Na primeira etapa, uma revisão bibliográfica da implementação de técnicas de levantamento GPR e algoritmos de detecção relacionados à geofísica, mais especificamente ao GPR.

Os perfis geofísicos foram então investigados na fazenda experimental da UFES e no edifício comercial do Victoria Center, sendo 50% dos perfis utilizados para a fase de treinamento e 50% para testes do detector de objetos em cascata. O processamento da seção geofísica visa preservar ao máximo as características originais do sinal, sempre destacando a difração hiperbólica.

Após o processamento, as reflexões são detectadas pela transformada de Fourier e Hough, respectivamente, utilizando-se parâmetros estatísticos de domínio da frequência e simulações das hipérboles para extrair características e classificação de objetos de subsuperfície.

Na fazenda experimental São José do Calçado (UFES), o trabalho realizado por VIETCHESKY (2013) obteve um trecho de 400 MHz, contendo tanques plásticos de água e um fogão de cozinha, enterrados em subsuperfície do solo (Figura 4).



Figura 3. Metodologia de desenvolvimento do software GeoView (SILVA, 2018).

Automatização do processo de reconhecimento e classificação de interferências do subsolo com GPR



Figura 4. Croqui Esquemático adaptado de VIETCHESKY (2013), contendo os objetos enterrados e o caminhamento realizado pelo GPR na Fazenda Experimental de São José do Calçado (SILVA, 2018).

Logo após foi realizada uma visita ao edifício comercial Victoria Center, no dia 22 de dezembro de 2017, onde foram feitos levantamentos dos perfis em situação real no ambiente urbano para identificar a rede de encanamento enterrada sob superfície cimentada (Figura 5).


Figura 5. Vista geral do edifício comercial Victoria Center (SILVA, 2018).

Cinco perfis foram feitos a uma profundidade de três metros transversais aos alvos na frequência de 400 MHz, três referentes ao primeiro andar e dois ao térreo. É possível observar o caminhamento feito para obtenção dos perfis na Figura 6.

O primeiro andar foi definido como a área de treinamento, onde ocorreu o desenvolvimento do detector, contendo uma superfície cimentada com tirantes sobre canos expostos de 10 cm de espessura. Existe uma rede de dutos desconhecida no térreo, que foi definida como área de teste, onde os resultados serão analisados usando o software GeoView.



**Figura 6.** Croqui esquemático, demonstrando o caminhamento realizado com o equipamento GPR de frequência 400 MHz no edifício comercial Victoria Center (SILVA, 2018).

#### Processamento dos Perfil de GPR

Nesta segunda etapa de processamento dos perfis, utilizou-se o software livre, matGPR 3.5 (TZANIS, 2006). Aplicou-se correções e padronizou a resolução dos perfis para testes com o detector (Figura 7). Sabe-se que o GeoView é um software que detecta e classifica apenas objetos enterrados, logo, não é possível realizar correções e padronizações dos perfis, sendo assim foi incluído um atalho no GeoView para acessar de forma rápida o matGPR.

Automatização do processo de reconhecimento e classificação de interferências do subsolo com GPR



Figura 7. Perfis 2D em (a) original e (b) utilizando o software matGPR (SILVA, 2018).

### Arquitetura do Descritor-Detector

A terceira etapa refere-se a fase computacional de desenvolvimento nas técnicas utilizadas no software GeoView, através do algoritmo *Histogram of Oriented Gradients* (HOG) associado ao detector de objetos em cascata, dividiu-se em alguns estágios de desenvolvimento observados na Figura 8.



Figura 8. Rotina do Detector de Objetos em Cascata (SILVA, 2018).

### **GEOFÍSICA APLICADA – VOLUME I**

A ferramenta Image Labeler, ela permite selecionar as regiões de interesse (ROI) na forma de retângulos para a identificação dos objetos nos perfis, pertencentes a Fazenda Experimental da UFES e no 1º piso do Edifício Comercial Victoria Center, somando um total de 4 perfis contendo 9 ROIs.

Após a seleção da região de interesse, é aplicado o algoritmo HOG para o resultado das propriedades dos objetos, cuja função é identificar mudanças direcionais de intensidade ou cor, denominados gradientes, apresentando a forma do objeto.

De maneira simultânea a extração das características HOG, são adicionados um banco de imagens contendo as regiões de interesse, denominadas "positivas" e sem presença dos mesmos, denominadas "negativas". Essas imagens são transferidas ao detector que quando associados as ROIs, desenvolvem uma série de estágios de padronização dos alvos, detectando as reflexões geradas pelos objetos.

#### Classificação dos Alvos

A classificação dos alvos foi usada técnicas de processamento de imagens, recortando os objetos detectados e armazenado em um vetor célula. Sobre esse vetor, foram feitos estudos envolvendo parâmetros estatísticos (média, moda, variância e frequência máxima) e simulação de hipérboles, estabelecendo modelos durante a fase de desenvolvimento do software (Tabela 1 e 2) com base nos dados obtidos durante o treinamento do detector, foram feitas algumas observações:

• A média não influenciou na classificação, servindo apenas para verificação dos valores da variância.

• A moda foi utilizada para indicar a precisão na detecção dos alvos, que quando altos indicam a maior precisão.

• A variância é uma medida de dispersão da distribuição dos valores de frequência dos dados, informando sobre a maior ou menor homogeneidade, ou heterogeneidade, resultando em reflexões bem ou mal definidas

• A máxima frequência são padrões de maior reflectância, onde a composição do alvo se torna mais nítida, como por exemplos alvos metálicos que geralmente apresentam altas reflectâncias quando comparadas com outros materiais.

Automatização do processo de reconhecimento e classificação de interferências do subsolo com GPR

Modelo Estatístico de Classificação do Alvos									
	Média	Moda	Variância	Frequência Max.	Objetos				
		> 2	> 0,7	10 > X < 11	Água				
Solo		> 2.5	> 0.7	11 > X < 13	Água Salgada				
		> 2.5	> 0.7	X > 13	Fogão				

 Tabela 1. Modelo Estatístico para Solo (SILVA, 2018).

Tabela 2. Modelo Estatístico para Concreto (SILVA, 2018).

	Modelo Estatístico de Classificação do Alvos									
	Média	Moda	Variância	Frequência Max.	Objetos					
		> 1	> 0,55	8 > X < 9	Cabos					
Concreto		> 1.5	< 0,55	9 > X < 10	Canos					

A simulação dos alvos foi feita através do algoritmo de Houg, identificando padrões de intervalo entre os pontos, representados sob a forma de hipérboles. A seguir é observado um alvo com 3 cm diâmetro em tamanho real e intervalo de 0,3 entre os pontos representados pela cor vermelha (Figura 9). Logo é possível associar as variações no diâmetro das reflexões como agrupamento entre os pixels nas transformada de Hough.



Figura 9. Identificação das Hipérboles, Tracejado em Vermelho e a relação entre o diâmetro dos objetos com o intervalo entre os pixels (SILVA, 2018).

### Criação da Interface Gráfica

Para facilitar a interação entre interface e usuário foi criado um "passo a passo" a fim de englobar de forma prática todos os processos realizados, utilizando a ferramenta GUIMode do Matlab (Figura 10), a interface foi feita em inglês para ter maior compatibilidade como software matGPR.



Figura 10. Funções adicionadas à interface gráfica e as seções contendo suas respectivas descrições. (SILVA,2018)

• Menu Principal: área de acesso principal para as funções fornecidas pelo Software GeoView;

• **MatGPRTools**: Permite acesso rápido ao software matGPR para o processamento dos perfis geofísicos, trabalhando com as imagens no formato original (.DZT) fornecidas pelo equipamento GPR e exportando em formato JPEG para aplicação no software GeoView.

• *Training*: Área de treinamento do detector de objetos em cascata, sendo dividido em Image Labeler para seleção das ROIs e *Train De*tection para inserção de amostras positivas/negativas e a definição do número estágios, falso alarme e nome do arquivo concluindo o detector.

• *Detection*: Onde é inserido o perfil no formato .JPG e delimitada as reflexões encontradas pelo detector.

• **Results:** Função onde são apresentados os resultados estatísticos e a classificação dos alvos enterrados, sendo dividida respectivamente em *Target Statistical* (Figura 11) e *Profile Classification* (Figura 12).

Automatização do processo de reconhecimento e classificação de interferências do subsolo com GPR

Main Window	Print	Screen				
6						
						STATISTICS OF TARGETS
-						
		Stati	stical Tat	ble		Graphics
Alvo	1	Media	Moda	Variância	Intensidade N	
	1	0.6496	0.9299	0.7165	1	0.75
	2	0.5490	1.2170	0.506		
	3	0.5903	0.6915	0.5854	- 4	0.7
	4	0.6536	2.9383	0.7173	1	
	5	0.5339	1.4745	0.4830		
	6	0.5154	1.5821	0.4503		0.05
	7	0.5489	1.8668	0.510		
						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
						0.55
						0.45
•			101			Posicão
						Choose Target
						Variância
	_	_				

Figura 11. Interface contendo os resultados estatísticos referentes aos alvos detectados.

(SILVA, 2018).



Figura 12. Interface de classificação dos objetos enterrados em função do tipo de subsuperfície e simulação das hipérboles. (SILVA, 2018).

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A utilização do software Geoview foi testado em um ambiente controlado na fazenda experimental UFES em dois perfis, chamados de perfil B e perfil C.

O perfil B consiste em galões plásticos de vinte litros, enquanto o perfil C é composto por um fogão de cozinha.

Foram detectados no total 7 alvos no perfil B e no perfil C foram detectados 5 alvos.

Os tanques plásticos com água formaram 8 alvos (perfil B), nos quais os alvos 1 e 3 apresentaram pouca precisão por terem uma área de distribuição muito grande, os alvos 4, 5, 6 e 7 detectaram reflexões por estarem próximos a grandes reflexões ou reflexões causadas por perturbações no próprio solo.

Com análise da tabela estatística classificou-se pelo menos um tanque enterra do no caso o alvo 2. A Tabela 3 possui resultados estatísticos e as classificações dos alvos da fazenda experimental UFES.

**Tabela 3.** Resultados Estatísticos e Classificação dos Alvos na Fazenda Experimental– UFES. (SILVA, 2018).

	Área Experimental UFES											
	Estatísticas - Perfil (B)											
Alvo	Media Moda Variância Frequência Máxima Classificação											
1	0,59	0,69	0,59	11,35	Descartado							
2	0,65	2,94	0,72	10,81	Água							
3	0,65	0,93	0,72	12,15	Descartado							
4	0,53	1,47	0,48	9,40	Descartado							
5	0,55	1,22	0,51	9,92	Descartado							
6	0,52	1,58	0,45	9,18	Descartado							
7	0,55	1,87	0,51	9,33	Descartado							

Na Figura 13 é demonstrada a simulação das hipérboles auxiliou na detecção do alvo 3 mostrando o alvo com aproximadamente 30cm de diâmetro, podendo ter um segundo tanque contendo água salgada.



Figura 13. Detecção do alvo 1 no perfil B, a partir da simulação das hipóteses. (SILVA, 2018).

# Automatização do processo de reconhecimento e classificação de interferências do subsolo com GPR

Os resultados obtidos no perfil B permitiram a classificação dos tanques com água e água salgada, tendo uma taxa de processamento otimizada, com uma margem de erro de 10% e dois alvos com baixa precisão.

Na Figura 14 é possível observar os polígonos com cor vermelha mostrando as anomalias dos alvos pré-selecionados e enterrados e as anomalias em amarelo mostram as anomalias de alvos não conhecidos.



Figura 14. Alvos interpretados por VIETCHESKY, 2013.

Os resultados obtidos no perfil C podem ser observados na Tabela 4, permitindo classificar o fogão. Por fim, foi feita uma comparação entre os arquivos de configuração Interpretado pelo software BATISTA (2014) e GeoView com o objetivo de verificar a precisão do software em relação à interpretação humana.

Tabela 4. Resultados Estatísticos e Classificação dos Alvos na Fazenda Experimental UFES

	Área Experimental UFES											
	Estatísticas - Perfil (C)											
Alvo	Media Moda Variância Frequência Máxima Classificaçã											
1	0,68	2,52	0,77	13,35	Fogão (Metal)							
2	0,67	2,25	0,74	12,77	Descartado							
3	0,52	2,27	0,47	9,33	Descartado							
4	0,67	2,48	0,74	12,91	Descartado							
5	0,64	2,41	0,69	11,47	Descartado							

### **GEOFÍSICA APLICADA – VOLUME I**

Imagem apresentada na Figura 15, foi gerada a partir da antena de 400MHz tendo como alvo com fogão metálico enterrado em solo úmido, as linhas vermelhas e laranja indicam as profundidades de 1,0 m e 0,6 m, respectivamente.



Figura 15. Alvos interpretados por SILVEIRA (2014).

Para ter a verificação das aplicabilidades do software GeoView em um ambiente urbano, foram realizadas classificações dos perfis obtidos no Térreo do Ed. Comercial Victoria Center.

Os perfis D e E foram realizados paralelos entre si, sendo detectados um total de 22 alvos, onde foram detectados 10 alvos no perfil D e 12 alvos no perfil E. As interpretações feitas no perfil E foram consideradas incorretas, devido a presença de objetos (provável vergalhão e canos) muito próximos, dificultando a interpretação. Os resultados das estatísticas e classificações constam na Tabela 5, onde interpretados no perfil D os alvos 1, 2, 4 e 6 como sendo a rede de encanamento. Não foram observados a presença de cabo na área.

# Automatização do processo de reconhecimento e classificação de interferências do subsolo com GPR

**Tabela 5:** Resultados Estatísticos e Classificação dos Alvos no Ed. Comercial Victoria Center(Perfil D). (SILVA, 2018).

	Ed. Comercial Victoria Center											
	Estatísticas – Perfil (D)											
Alvo	vo Media Moda Variância Frequência Máxima Classific											
1	0,45	2,35	0,33	9,05	Canos							
2	0,55	1,58	0,51	10,01	Canos							
3	0,58	0,99	0,57	11,37	Descartado							
4	0,52	2,11	0,48	9,80	Canos							
5	0,53	1,15	0,49	10,41	Descartado							
6	0,53	1,62	0,48	10,04	Canos							
7	0,56	2,13	0,53	10,13	Descartado							
8	0,55	1,94	0,52	10,38	Descartado							
9	0,58	1,43	0,56	10,50	Descartado							
10	0,55	1,12	0,52	9,64	Descartado							

Nos perfis D e E (Figura 16), foi feita a simulação das hipérboles no perfil E para confirmação dos alvos encontrados no perfil D. Somente os alvos 2 e 3 demonstram a presença de hipérboles como agrupamento entre os pixels de 0,04 e 0,05.



Figura 16. Detecção do alvo 2 (A e B) e alvo 3 (C e D) no perfil E, a partir da simulação de hipérboles. (SILVA, 2018).

Os resultados apresentaram uma classificação com uma margem de erro de 20% no perfil (D) e 100% no perfil (E) devido a fatores já descritos. Por fim, foi elaborada um perfil contendo a interpretação dos alvos enterrados a partir das informações adquiridas, como pode ser observado na figura 17.



Figura 17. Interpretação dos Resultados encontrados no Ed. Comercial Victoria Center. (SILVA, 2018)

### CONCLUSÃO

O desenvolvimento do software GeoView auxilia no estudo baseado em métodos geofísicos, otimizando o tempo e melhorando a qualidade da prospecção de objetos soterrados. O programa, que é utilizado no ambiente Matlab, e associado ao algoritmo HOG mostrou sua eficácia na detecção de objetos.

Os objetos alvos foram reconhecidos com taxa satisfatória de aprovação, sendo a taxa de acerto em 75% no conjunto de treino e 50% no teste. A interação dos materiais prospectados no meio foi bem descrita pelo estudo no domínio da frequência.

Em fase inicial, é recomendado que o software seja padronizado perante o tamanho do foco e o material geológico em que se irá trabalhar, incrementando o banco de dados através de novos treinamentos.

Os resultados obtidos nesse trabalho, além de contribuírem na interpretação de dados geofísicos, têm aplicações diretas em áreas de planejamento urbano e infraestrutura.

### REFERÊNCIAS

ALIONTE, E., & LAZAR, C. A practical implementation of face detection by using Matlab cascade object detector. In System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2015 19th International Conference on (pp.785-790). IEEE. 2015.

AUSTIN, R. **Unmanned aircraft systems: UAVS design**, development and deployment (Vol. 54). John Wiley & Sons. 2011.

BATISTA, A. S. Estudo preliminar da constante dielétrica dos solos, no sítio controlado em São José do Calçado. 2014. 39 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre. 2014.

DALAL, N. **Finding people in images and videos. Tese (Doutorado)** — Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2006.

DANIELS, D. J. Surface Penetrating Radar, Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series6. The Institute of Electrical Engineers, London, UK. 1996.

GSSI. Handbook for Radar Inspection of Concrete. [S.l.]:[s.n.], 2001.

LEE, K. L., & MOKJI, M. M. Automatic target detection in GPR images using Histogram of Oriented Gradients (HOG). In Electronic Design (ICED), 2014 2ndInternationalConferenceon (pp. 181-186). IEEE. 2014.

MAAS, C.; SCHMALZL, J. Using pattern recognition to automatically localize reflection hyperbolas in data from ground penetrating radar. Computers & geosciences, v. 58, p. 116-125. 2013.

NAJARIAN, K., & SPLINTER, R. Biomedical signal and image processing. CRC press. 2016.

NUNES, C. M. F. Aplicações do GPR (Ground Penetrating Radar) na caracterização de perfis de alteração de rochas gnáissicas do Rio de janeiro (Doctoral dissertation, dissertação de mestrado, DEC, PUC-Rio, RJ). 2002.

SANTOS, V. R. N. Detecção e Classificação Automática de Interferências no Subsolo com GPR Utilizando Redes Neurais Artificiais: Estudo no SCGR do IAG/USP. 217p. Tese (Doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

SILVA, B. M. Automatização do Processo de Reconhecimento e Classificação de Interferências do Subsolo com GPR. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). 2018.

PORSANI, J. L., Borges, W. R., Rodrigues, S. I., & Hiodo, F. Y. O sítio controlado de geofísica rasa do IAG/USP: Instalação e resultados GPR 2D-3D. Revista Brasileira de Geofísica, 24(1), 49-61. 2006.

TZANIS, A. MATGPR: A freeware MATLAB package for the analysis of common-offset GPR data. In Geophysical Research Abstracts (Vol. 8, No. 09448). 2006.

VIETCHESKY, P. P. Sítio Controlado de Geofísica Rasa para Utilização e Calibração de GPR (Ground Penetration Radar). Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Geologia. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). 2013.

#### Capítulo 3

### Caracterização de alvos utilizando o método GPR: estudo sobre o sítio controlado da UFES – São José do Calçado, ES

Gabriella Andrade Dos Santos<sup>1</sup>; Jenesca Florencio Vicente de Lima<sup>1;</sup> Inaê De Sena Conceição<sup>1</sup>; Mariana De Mendonça Carvalho<sup>1</sup>; Ruan Moreira Alves<sup>1</sup>; Sarah Duarte Borges<sup>1</sup>; Cristiano José de Lima<sup>2</sup>

**RESUMO.** À medida que a sociedade se desenvolve, é notável o aumento da necessidade de expansão dos territórios em superfície ou em subsuperfície, como linhas de metrôs, galerias pluviais e tubulações, entre outros. Para que seja realizado o estudo de subsuperfícies que estão sendo exploradas é de suma importância o uso da geofísica aplicada. O método de Ground Penetrating Radar (GPR), por exemplo, é um método geofísico raso que possui melhor custo/benefício, é pouco invasivo quando comparado a outros métodos e, por utilizar método eletromagnético, a coleta de dados para imagear a subsuperfície é considerada rápida. Contudo, é importante ressaltar que a interpretação de dados de geofísica rasa pode se tornar complexa, assim, para melhor entendimento sobre a resposta que os alvos oferecem ao GPR, cria-se sítios controlados de geofísica rasa. Este trabalho tem como objetivo geral caracterizar, por meio do método GPR, os alvos enterrados na fazenda experimental e testar seu desempenho em condições controladas de campo, além de gerar resultados para que possam ser comparados com trabalhos feitos anteriormente na mesma área para entender as mudanças lá ocorridas. Desse modo, visando delimitar e determinar os alvos e suas respostas, foram criadas linhas de caminhamento que abrangessem os alvos pré-estabelecidos. Comparando os resultados atuais com os resultados do trabalho de VIETCHESKY (2013), a maioria dos alvos tiveram respostas satisfatórias, porem foram influenciadas pelo tipo de solo e o material que compõe os alvos. O presente trabalho foi desenvolvido na época de clima seco, o que causou atenuação dos dados de GPR. Os resultados encontrados neste trabalho servirão como resposta-padrão para alvos

<sup>1</sup>Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo (CCENS - UFES) – Alegre, Espírito Santo, Brasil.

<sup>2</sup>Secretaria de Educação do Estado do Rio de Janeiro (SEEDUC), Bom Jesus do Itabapoana, Rio de Janeiro, Brasil.

que possuem composições similares tanto em contexto geológico, quanto em locais urbanos como obras de engenharia, contaminação do meio ambiente e geotecnia.

**PALAVRAS-CHAVE.** GPR; Método Eletromagnético; Mapeamento Digital de Solos; Sítio controlado.

#### INTRODUÇÃO

Juntamente ao desenvolvimento da sociedade, tornou-se necessário a criação de galerias pluviais, tubulações de gás e combustível, luz, etc. Contudo, acaba-se gerando problemas socioambientais, como áreas contaminadas, pouco espaço para mobilidade, dentre outros. Considerando esses problemas, foram aplicados métodos geofísicos para realização de estudos a partir de mapeamento, possibilitando localizar alvos como: poços de investigação, furos de sondagens, trincheiras e etc.

As aplicações do GPR podem ser divididas em basicamente duas classificações baseadas na frequência da antena principal, maior resolução de subsuperfície e menor frequência na antena principal, e menor resolução de subsuperfície e maior frequência na antena principal (REYNOLDS, 1997).

Os métodos geofísicos que melhor apresentam resultado em investigações geotécnicas e ambientais são os geoelétricos, que permitem medir condutividade, permeabilidade magnética e permissividade dielétrica que são intrínsecas aos materiais geológicos (BRAGA, 1997). Este trabalho utiliza o método eletromagnético, sendo o mais utilizado para detectar alvos em pequenas profundidades.

### LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

O sítio controlado de geofísica rasa está localizado na fazenda experimental e de produção da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), no município de São José do Calçado/ES. Localiza-se a 1km da Rodovia ES-484, km 36 (Figura 1) (UFES, 2008).

São José do Calçado é um município ao sul do Espírito Santo. A distância da área experimental até a cidade de Alegre é de 44,8 km. As três principais vias de acesso são a ES-181,seguida da ES-484. A distância da área experimental até a capital do Estado, Vitória, é de 235km e o percurso pode ser feito de carro ou de ônibus. As principais vias de acesso são a BR-101, seguida da ES-297 e ES-484.



Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA/GEOLOGIA REGIONAL

### Geologia local

O sítio controlado, é parte do contexto geotectônico do setor central da Faixa Ribeira na porção central da Província da Mantiqueira. Considerando o mapa geológico de VIEIRA et al,(2013), as rochas encontradas na região pertencem,em sua maioria, à Unidade Bom Jesus do Itabapoana, ao Complexo Serra da Bolívia e à Suíte São João do Paraíso.

A Unidade Bom Jesus do Itabapoana representa o estágio pré-colisional da Orogênese Brasiliana e a rocha dominante dessa unidade é o (ortopiroxênio)-granada-biotita gnaisse, que possui cor cinzenta a esverdeada e sua característica principal é uma grande heterogeneidade estrutural e composicional por se apresentar, geralmente, migmatítica associada a bandas e lentes de composições diversas.

rochas que predominam As na Suíte São João do Paraíso são leucocharnockitos/leucogranulitos charnockíticos a enderbíticos verdes e leucogranitos/leucognaisses graníticos a tonalíticos branco a rosados. Sua alteração resulta, majoritariamente, em solo róseo, silte-arenoso, com grande abundância de caulim. (DUARTE et al, 2012)

#### Caracterização da área

O Espírito Santo fica localizado na região tropical, assim, possui clima quente e chuvoso. Considerando a classificação de Köppen, a área do trabalho pode ser classificada, considerando o regime das chuvas e das temperaturas, em Am (ANTONGIOVANNI e COELHO, 2005).

O modelo Köppen é determinado por um conjunto de letras maiúsculas e minúsculas que indicam grupos climáticos, subgrupos e as possíveis características sazonais. O sítio controlado de Calçado, classificado como Am, possui clima tropical de monção, com ausência de estação invernosa e forte precipitação anual (SÁ JUNIOR, 2009).

O solo da área de estudo em São José do Calçado é classificado como argissolo (EMBRAPA, 2006). São solos minerais com nítida diferenciação entre as camadas ou horizontes. Podem ser arenosos, de textura média ou argilosos no horizonte superficial. Possuem cor mais forte, amarelada, brunada ouavermelhada, maior coesão e maior plasticidade e pegajosidade em profundidade, por contado maior teor de argila (IAC, 2013).

#### METODOLOGIA

Este trabalho foi considerado três etapas: a) pré campo; b) campo; c) pós campo.

Na etapa de pré campo foi realizada uma revisão bibliográfica com trabalhos similares executados em outras áreas, teoria do método geofísico GPR e trabalhos que abrangem a geologia regional e local.

Durante a etapa de campo utilizou-se o GPR SIR-3000, que possui antena de 200 MHz, *differential global positioning system* (GPS diferencial – DGPS), trena de 100 metros e cavadeira. Os dados foram coletados por meio do DGPS e configurados em WGS84/UTM, a altura da antena foi disposta em 2,00 metros, altura vertical e intervalo de dados em 15 segundos. A área onde o estudo foi executado possui um tamanho aproximado de 30m x 30m e seus vértices limítrofes. Suas dimensões, composições e o material de cobertura dos alvos foram realizadas por VIETCHESKY (2013). O croqui da área com a localização dos alvos (VIETCHESKY, 2013), serviu como base na realização do planejamento de campo, com o intuito de estabelecer por onde atravessariam as linhas geofísicas.

Para que todos os alvos fossem imageados com as coordenadas do DGPS conectadas aesses dados, foram criadas linhas transversais por meio do GPR. As linhas 11, 12 e 13 foram executadas de maneira em que os alvos 1 e 2 fossem imageados, as linhas 21 e 22 para que imageassem os alvos 3 e 4, as linhas 31 e 32 os alvos 5 e 6, as linhas 41 e 42 o alvo 4, as linhas 51 e 52 os alvos 2 e 6, e as linhas 61 e 62 os alvos 1 e 5. Pode-se observar na Tabela 1 as coordenadas início (i) e fim (f) de cada linha, juntamente aos alvos abrangidos e seus arquivos GPR.

Tabela 1. C	Coordenadas o	lo início (i) e fi	m (f) de cada	linha, junto	com os alvo	s abrangidos e	eseus
respectivos	arquivos GP	R.					

Linha	Coordenada E (m)	Coordenada N (m)	Altitude (m)	Arquivo GPR	Alvos abrangidos
L11i	224699,137	7668250,546	310,138		
L11f	224686,451	7668227,380	312,032	50	
L12i	224686,451	7668227,380	312,032	09	1.2
L12f	224699,137	7668250,546	310,138	1	Tez
L13i	224698,438	7668249,510	312,289	60	
L13f	224687,861	7668225,762	311,437	00	
L21i	224694,780	7668219,210	311,057	61	
L21f	224705,158	7668242,602	311,996	01	2.1
L22i	224706,285	7668242,189	312,497	62	364
L22f	224697,855	7668219,729	312,942	02	
L31i	224706,041	7668214,807	312,288	62	
L31f	224718,425	7668239,581	312,476	63	5.5
L32i	224718,425	7668239,581	312,476	64	560
L32f	224708,283	7668215,121	313,575	04	
L41i	224713,127	7668227,070	310,977	CE	
L41f	224689,318	7668234,745	310,343	00	
L42i	224689,318	7668234,745	310,343	66	4
L42f	224714,070	7668226,006	309,192	00	
L51i	224719,727	7668233,226	309,639	67	
L51f	224696,728	7668247,024	310,431	6/	2 - 6
L52i	224696,728	7668247,024	310,431	<b>C</b> 0	200
L52f	224720,521	7668234,956	311,434	00	
L61i	224411,095	7668214,733	310,101	60	
L61f	224687,999	7668226,535	310,438	03	1.5
L62i	224687,999	7668226,535	310,438	70	165
L62f	224710,710	7668216,639	310,888	70	

Na área de estudo, foram escolhidos três pontos de amostragem para obter dados representativos do solo denominados c1, c2 e c3. Com auxílio da cavadeira realizou-se a amostragem que, posteriormente, foram colocadas em sacolas transparentes contendo suas identificações.

Após a coleta de dados em campo, iniciou-se o processo laboratorial das amostras coletadas, c1, c2 e c3, e o processamento dos dados em questão. Estas amostras foram divididas para que parte delas fossem utilizadas na análise granulométrica e as demais para calcular a constante dielétrica.

A quantidade de c1 destinada ao ensaio granulométrico foi colocada na peneira de 2,000 mm, com as peneiras de malha de menor abertura subsequentes a ela. O material foi lavado até que todo ele passasse por todas as peneiras. O conteúdo de cada peneira foi levado à estufa para secar e posteriormente ser pesado para que a quantidade de cada fração granulométrica na amostra pudesse ser determinada. Esse procedimento foi repetido em todas as outras amostras. Após colherem as informações durante essa etapa, foi possível realizar os cálculos da densidade, umidade gravimétrica e, também, da umidade volumétrica do solo da área estudada.

Por meio dos dados do solo da área de estudo realizou-se o processamento dos dados GPR no software Radan e GPRSoft. Ao todo, foram tratados doze radargramas, procurando cuidadosamente estabelecer se as anomalias encontradas representavam os alvos enterrados na área de estudo, ou se variações de subsuperfície ou interferências. Desse modo, utilizou-se o ajuste do tempo zero, filtro passa baixa (350 MHz), filtro passa alta (50 MHz) e, posteriormente, um ganho linear. Por fim, já com os dados processados, pôde-se realizar suas interpretações nas imagens geradas, de acordo com as respostas delimitadas nos radargramas.

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Não foi possível encontrar afloramentos rochosos em superfície no sítio experimental, sendo este constituído, em sua maior parte, por solo de coloração vermelha alaranjada. Por meio das análises feitas em laboratório com a coleta de amostras do solo local é possível comprovaressas afirmações (Tabela 2).

A amostra c1 demonstrou uma porcentagem maior das frações arenosas, possuindo granulometria predominante nas frações areia média e areia fina. Assim, a amostra c1 não é uma amostra da representatividade da caracterização do solo da área de estudo.

Tabela 2.	Amostras	utilizadas	para análi	se granu	lométrica,	a fim	de dete	rminar o	o tipo d	le solo
da área de	estudo.									

				Peso em cada malha (g)							
Amostra	Coord E (m)	Coord N (m)	Peso quarteado (g)	2	1,18	0,5	0,25	0,125	0,063	Fundo	
c1	224697,533	7668246,552	149,87	7,70	11,98	30,65	58,41	16,22	14,57	10,34	
c2	224701,634	7668235,441	113,55	1,67	5,33	6,51	8,14	12,98	68,23	10,69	
c3	224706,533	7668217,226	169,81	3,27	4,71	7,16	5,60	30,29	103,74	15,04	

Se tratando da caracterização do solo, as amostras c2 e c3, se enquadram na descrição bibliográfica e nas observações feitas em campo. As frações que predominam nessas amostras apontam, utilizando GRADISTAT, solo silte-arenoso, com significativa quantidade de material orgânico e, por vezes, saturado em água.

Com os dados a respeito das densidades, umidade gravimétrica e umidade volumétrica calculou-se a constante dielétrica por meio das equações de Topp e Roth. Para a amostra c1, os valores da constante dielétrica para a equação de Topp e Roth foram, respectivamente 7,9723 e 6,3478. Porém, por ser um material proveniente de fora da área colocado apenas com o intuito de comparar as respostas do GPR, essa amostra não necessariamente representa o solo local.

Na amostra c2, os valores da constante dielétrica para a equação de Topp e Roth foram, 12,9076 e 11,8843, respectivamente, e para a amostra c3, 13,5509 e 12,2431. Os valores encontrados para a constante dielétrica das amostras c2 e c3 se enquadram na Tabela 1 proposta por Porsani (1999) na categoria "Solo argiloso saturado" (constante dielétrica 15), demonstrando maior confiabilidade nos dados adquiridos.

Através do cálculo médio da constante dielétrica, pôde-se processar os dados coletados por levantamento geofísico nas linhas esquematizadas na Figura 15, convertendo o tempo da onda EM em profundidade em metros. Desse modo, foi possível interpretar os radargramas 2D visando identificar os alvos e possíveis anomalias causadas por outros objetos que não sejam os alvos.

A linha 13 usada visando de abranger dois alvos pré-selecionados, a1 um vasilhame de polipropileno com solução salina composta por 40 litros de água (H<sub>2</sub>O) e 1000 g de cloretode sódio (NaCl), onde sua cobertura é o solo da área estudada; e a2 um vasilhame de polipropileno com solução salina constituída por 40 litros de H<sub>2</sub>O e 1000 g de NaCl, que possui cobertura feita por areia lavada, majoritariamente quartzosa. As parábolas geradas pela anomalia referente aos alvos podem ser vistas tanto no radargrama de dado bruto que apresenta zona do

tempo zero, corrigida ao ser processado (Figura 2), quanto no radargrama de dado processado (Figura 3).



Figura 2. Linha 13 abrangendo alvos a1 e a2 - dado GPR bruto.



**Figura 3.** Linha 13 abrangendo alvos a1 e a2 - dado GPR processado. Parábolas referentes à resposta dos alvos em amarelo, parábolas referentes a outras anomalias em vermelho.

A linha 21 foi executada de forma que abrangesse dois alvos pré-selecionados, a3 vasilhame de polipropileno com 40 litros de H<sub>2</sub>O, cuja cobertura é o próprio solo da área estudada; e a4 vasilhame de polipropileno com solução salina composta por 20 litros de H<sub>2</sub>O e 1000g de NaCl, cuja cobertura é o próprio solo da área estudada. As parábolas causadas pela anomalia referente ao alvo a3 podem ser vistas tanto no radargrama bruto (Figura 7), quanto no processado (Figura 8), já as parábolas do alvo a4 são melhor vistas no radargrama processado. A linha 21 passou ligeiramente longe do alvo a4, o que explica a fraca resposta.



Figura 4. Linha 21 abrangendo alvos a3 e a4 - dado GPR bruto.



Figura 5. Linha 21 abrangendo alvos a3 e a4 - dado GPR processado. Parábolas referentes à resposta dos alvos em amarelo.

A linha 31 foi executada de forma que abrangesse dois alvos pré-selecionados, a5 vasilhame de polipropileno com solução salina composta por 20 litros de H2O e 500g de NaCl, cuja cobertura é o próprio solo da área estudada; e a6 fogão de metal, cuja cobertura é o próprio solo da área estudada (Figuras 5 e 6). Ao ser finalizada a linha, o alvo a5 não havia sido imaginado.



Figura 6. Linha 31 abrangendo alvo a6 - dado GPR bruto.



Figura 7. Linha 31 abrangendo alvo a6 - dado GPR processado. Parábolas referentes à resposta do alvo em amarelo.

A linha 41 foi executada com a finalidade de abranger um alvo pré-selecionado, a4 vasilhame de polipropileno com solução salina composta por 20 litros de H2O e 1000 g de NaCl, cuja cobertura é o próprio solo da área do sítio controlado. As anomalias neste radargrama não tem relação direta com o alvo pretendido a ser imaginado e podem ser vistas tanto no radargrama bruto (Figura 8), quanto no radargrama processado (Figura 9).



Figura 8. Linha 41, anomalias não relacionadas ao alvo - dado GPR bruto.



Figura 9. Linha 41, anomalias não relacionadas ao alvo - dado GPR processado

A linha 52 foi executada de forma que abrangesse dois alvos pré-selecionados, a2 vasilhame de polipropileno com solução salina composta por 40 litros de H2O e 1000 g de

### GEOFÍSICA APLICADA – VOLUME I

NaCl, cuja cobertura foi feita por areia lavada, predominantemente quartzosa; e a6 fogão de metal, cuja cobertura é o próprio solo da área estudada. As parábolas causadas pela anomalia referente aos alvos podem ser vistas tanto no radargrama de dado bruto (Figura 10), quanto no radargrama de dado processado (Figura 11). Porém, ao maximizar feições do radargrama com o processamento, se torna possível observar os alvos e também os refletores e suas descontinuidades.



Figura 10. Linha 52 abrangendo alvos a2 e a6 - dado GPR bruto.



Figura 11. Linha 52 abrangendo alvos a2 e a6 - dado GPR processado. Parábolas referentes à resposta dos alvos em amarelo.

A linha 62 foi executada para abranger dois alvos pré-selecionados, a1 vasilhame de polipropileno com solução salina composta por 40 litros de H2O e 1000 g de NaCl, coberto pelo solo da área estudada; e a5 vasilhame de polipropileno com solução salina composta por 20 litros de H2O e 500g de NaCl, coberto pelo solo da área estudada. Apesar de o alvo a1 ter parábolas visíveis no radargrama bruto (Figura 12), sua resposta fica melhor, uma vez que processado (Figura 13). A mesma anomalia perto do alvo a5 foi vista nesta linha e na linha 31.



Figura 12. Linha 62, alvo a1 em azul e anomalias em laranja - dado GPR bruto.



Figura 13. Linha 62, abrangendo alvo a1 e anomalias não relacionadas ao alvo - dado GPR processado.

A antena de 400 MHz não foi utilizada, pois nos trabalhos de BATISTA (2014) eVIETCHESKY (2013), na mesma área de estudo, não forneceu uma resposta satisfatória.

A seguir foram feitas algumas análises, observações e comparações com relação as respostas do GPR referente ao trabalho anterior realizado de VIETCHESKY (2013) e o presente trabalho.

Nos alvos a1 (Figura 14), a2 (Figura 15) e a3 (Figura 16), as respostas não apresentam discrepâncias em relação às aquisições de ambos trabalhos.



Figura 14. Comparação das respostas do alvo a1 do trabalho de VIETCHESKY (2013) (A), e opresente trabalho.



Figura 15. Comparação das respostas do alvo a2 do trabalho de VIETCHESKY (2013)

(A), e opresente trabalho (B).



Figura 16. Comparação das respostas do alvo a3 do trabalho de VIETCHESKY (2013) (A), e opresente trabalho (B).

Nos alvos a4 (Figura 17) e a5 (Figura 18), em comparação às hipérboles pontuais, as respostas obtidas aparentam menos pontuais, mais espalhadas e bem definidas. Isso pode ser entendido como um possível vazamento da solução existente no vasilhame de polipropileno.



Figura 17. Comparação das respostas do alvo a4 do trabalho de VIETCHESKY (2013) (A), e opresente trabalho (B).



Figura 18. Comparação das respostas do alvo a5 do trabalho de VIETCHESKY (2013) (A), e opresente trabalho (B).

As respostas para o alvo a6 (Figura 19) em ambos os trabalhos, se mostram bem definidas e similares.



Figura 19. Comparação das respostas do alvo a6 do trabalho de VIETCHESKY (2013) (A), e opresente trabalho (B).

Apesar de ter sido enterrado com o solo argiloso local, o que teve as melhoresrespostas obtidas na aquisição de dados com a antena de 200 MHz foi o alvo a6, devido a sua composição de metal favorecer a uma resposta mais significativa com o uso do GPR.

O alvo a2, adquiriu boas respostas por ter sido enterrado com areia lavada de composição majoritariamente quartzosa. Contudo, isso não ocorreu com o alvo a1, que possui composição igual a do alvo a2, este apresentou respostas inferiores por ter sido enterrado com o solo argiloso do local, favorecendo a atenuação do sinal.

As linhas geofísicas 31 e 62 apresentaram uma resposta similar na proximidade do alvo a5. A resposta não apresentou parábola bem definida como característica de vasilhames

enterrados. Portanto, é possível que tenha havido vazamento do conteúdo do vasilhame do alvo a5, ou que haja alguma outra interferência que mereça ser estudada.

Os alvos a1, a3 e a4, apesar de possuírem composições salinas ligeiramente diferentes, demonstraram respostas similares. Ambos foram enterrados em solo local, o que ajuda na atenuação do sinal. Desse modo, não só o material que compõe os alvos é importante, o solo argiloso também exerce um papel essencial na obtenção de dados.

As linhas estudadas que não possuíram resultados significantes foram descartadas neste trabalho. Contudo, o presente estudo se mostrou eficiente, com respostas satisfatórias ao que foi proposto a ser feito, demonstrando importância a dar continuidade ao estudo para utilizar outros métodos geofísicos e obter maior quantidade de informações.

### CONCLUSÃO

Comparando os resultados atuais com os resultados do trabalho de VIETCHESKY (2013), observa-se que não foram identificadas mudanças no alvo a6, com resposta continua satisfatória. O alvo a5 apresentou atenuação no resultado deste trabalho em e os alvos a1, a2 e a3 tiveram padrões de resposta semelhates em comparação aos dois trabalhos.

As respostas dos alvos foram influenciadas pelo tipo de solo e o material que compõe os alvos. Adicionalmente, a coleta de dados feita por VIETCHESKY (2013) foi realizada em período chuvoso, após remexer o solo para enterrar os alvos, enquanto este trabalho foi realizado em um solo mais compactado e em época de estiagem. Essa diferença pode ser observada numa atenuação maior do sinal observado nos dados mais recentes.

A utilização de estudos em sítios controlados possui grande relevância e utilidade para analisar respostas de alvos diversos e os conhecimentos adquiridos podem ser aplicados em sítios não controlados e/ou em áreas desconhecidas. É importante ressaltar que ter um sítio controlado de geofísica rasa à disposição da UFES é muito importante visto que possibilita aos alunos estudarem na prática o que é aprendido em sala de aula.

Os dados adquiridos neste trabalho fazem parte de um histórico da área, podendo ser utilizados em trabalhos posteriores.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANTONGIOVANNI, L. L., COELHO, A. L. N. Panorama sobre a desertificação no estado do Espírito Santo. Ministério do Meio Ambiente [S.I.]. 2005

BATISTA, A. S. Estudo preliminar da constante dielétrica dos solos, no sítio controlado em São José dos Calçados. Alegre: CCA/UFES, 2014.

BORGES, W. L. Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade. São Paulo: IAG/USP, 2002.

BORGES, W. L. Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. São Paulo: IAG/USP, 2007, 256 p.

BRAGA, A. C. de O. Métodos Geolétricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro. São Paulo: UNESP, 1997,169 p.

DANIELS, David. J. Ground Penetrating Radar. 2. ed. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004.

DUARTE, B. P. et al. Geologia e recursos minerais da folha Itaperuna SF.24-V-C-I,estado do Rio de Janeiro escala 1:100.000. Belo Horizonte: CPRM, 2012.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Ed. 2. Brasília: EMBRAPA, 2006.

HEILBRON, M. et al. A Província Mantiqueira, In: V. MANTESSO-NETO et al. (eds.). O Desvendar de um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, cap. 8, p. 203-234. 2004.

PORSANI, J. L. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descavado – SP. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, 1999. PORSANI, J. L. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano, meio ambiente e arqueologia: estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. São Paulo: FAPESP, 2002.

PORSANI J. L. et al. O sítio controlado de Geofísica rasa do IAG/USP: Instalação e resultados GPR 2D-3D. **Revista Brasileira de Geofísica**, n. 24, v. 1, p. 49-61, 2006.

PORSANI, J. L., SAUCK, W. A. Ground-penetrating radar profiles over multiple steel tanks: Artifact removal through effective data processing. Geophysics, v. 72, n. 6, p. 177-183, 2007.

RADAN GPR data processing software. Version 6. [S.I]: Geophysical Survey Systems, Inc.

REYNOLDS, John. M. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. England: John Wiley & Sons Ltd., 1997.

RODRIGUES, S. I. Caracterização GPR de Tambores Metálicos e Plásticos: Estudosobre o Sítio Controlado do IAG/USP, São Paulo: IAG/USP, 2004.

SA JUNIOR, A. Aplicação da classificação de Koppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais. Lavras: UFLA, 2009.

UFES. Ciências Florestais. **Pós-Graduação: Infraestrutura**. 2008. Disponível em: < http://www.cienciasflorestais.ufes.br/pos-graduacao/PPGCFL/outras>. Acesso em: 29 out 2015.

VIEIRA, V. S. et al. Mapa Geológico do Espírito Santo. CPRM. [S.I.]. 2013

VIETCHESKY, P. P. Sítio controlado de geofísica rasa para a utilização e calibração de GPR (ground penetration radar). Alegre: CCA/UFES, 2013.

#### Capítulo 4

# Análise de dados geofísicos e espectrais de sensores remotos no estudo da fertilidade do solo na região do Complexo Intrusivo Santa Angélica (CISA), ES

Lucas Pinheiro Toniêto<sup>1</sup>; Jenesca Florencio Vicente de Lima<sup>1</sup>; Breno Lafratta Calandrelli<sup>1</sup>; Leonardo Coelho Fabrino Filho<sup>1</sup>; Myllena Moura Gonçalves<sup>1</sup>; Cristiano José de Lima<sup>2</sup>

**RESUMO.** Na atualidade, a tecnologia é introduzida em diversos setores com o intuito de agilizar processos e melhorar sua precisão. A agricultura é um ramo da produção brasileira que tem grande influência na economia do país e constantemente busca por novas formas para aumentar sua produtividade. O mapa de solos existente no Espírito Santo torna inviável certos planejamentos de uso do solo devido ao detalhamento em relação a escala. O presente trabalho visa o processamento e interpretação dos dados de gamaespectrometria, magnetometria e imagens de sensores remotos, de forma que se encontrem padrões que irão auxiliar na predição de atributos físicos e químicos do solo, para a região do Complexo Intrusivo Santa Angélica (CISA). Para o desenvolvimento deste, inicialmente foram relacionadas variáveis ambientais, para fins de calcular e delimitar intervalos equivalentes em probabilidade (estratos), que serão os pontos de amostragem gerados pelo método hipercubo latino condicionado. Foram feitas então as coletas das amostras de solo no intervalo de 0-20cm para realizar as análises químicas e físicas do solo. Os dados foram ajustados a semivariogramas para verificar sua dependência espacial e posteriormente foram confeccionados mapas pelos métodos de krigagem ordinária ou inverso do quadrado da distância (IDW). Foram realizadas as análises descritivas e comparativas com a intenção de se encontrar padrões entre os dados geofísicos e de sensores remotos, com os produtos gerados a partir das amostragens. Os sensores de gamaespectrometria e magnetometria obtiveram maiores correlações significativas que outros sensores, indicando sua maior eficiência em relação aos atributos dos solos.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Departamento de Geologia, Universidade Federal do Espírito Santo (CCENS - UFES) – Alegre, Espírito Santo, Brasil.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Secretaria de Educação do Estado do Rio de Janeiro (SEEDUC) - Bom Jesus do Itabapoana, Rio de Janeiro, Brasil.

Análise de dados geofísicos e espectrais de sensores remotos no estudo da fertilidade do solo na região do Complexo Intrusivo Santa Angélica (CISA), ES

PALAVRAS-CHAVE. Magnetometria; Gamaespectrometria; Mapeamento Digital de Solos.

### INTRODUÇÃO

Em todo o Brasil, o uso e ocupação do solo vem ocorrendo de forma desordenada, visto o aumento populacional, gerando uma maior demanda por alimentos e pressão econômica do agronegócio. Segundo o IBGE, o setor agropecuário corresponde a 5,4% do Produto Interno Bruto (PIB) no Brasil. Informações detalhadas tornam-se base para a conservação e manejo do solo e maior sustentabilidade na agricultura. Contudo, as informações atualmente disponíveis em mapa de solos que abrangem a totalidade do território capixaba, como o Levantamento de Reconhecimento de Solos (EMBRAPA, 1971) e o Levantamento Exploratório de Solos (BRASIL, 1983; 1987), respectivamente, nas escalas de 1:400.000 e 1:1.000.000, são inadequadas para planejamento em nível de microbacias hidrográficas, unidades fundamentais para planejamento do uso e conservação do solo.

O levantamento original de solos do Projeto Radam Brasil, em escala 1:250.000, para o estado do Espírito Santo apresenta pouco detalhamento. Posteriormente, atualizado e disponibilizado pelo Geobases, mas somente no intuito de corrigir nomenclaturas e classes de solos, sendo publicada na escala de 1:400.000. O estudo da distribuição espacial e mapeamento digital de solo são poucos expressivos na região (CUNHA et al. 2015).

Em face do exposto, torna-se muito importante avaliar e validar melhores técnicas de mapeamentos de atributos do solo utilizando ferramentas do Sistema de Informações Geográficas (SIG's), onde estas fazem com que o mapeamento de solos se torne mais rápido e menos custoso. Estas ferramentas buscam predizer atributos de solos, por meio da determinação de padrões observados e modelagens, envolvendo variáveis utilizadas na predição de fatores que influenciam na formação do solo.

Com o avanço da tecnologia, o uso do sensoriamento remoto vem crescendo em diversas áreas. Estas técnicas facilitam e geram processos mais eficientes, utilizando métodos matemáticos e estatísticos, os quais, vem sendo aplicados à Ciência do Solo desde a década de 1960 (McBRATNEY et al., 2000).

Para a determinação destes padrões, a gamaespectrometria e a magnetometria são instrumentos muito importantes, visto que estes atuam com penetrações superficiais no solo. Estes métodos podem ser então correlacionados com os dados de química do solo, sendo estes interpolados por métodos geoestatísticos trazendo então maior confiabilidade ao produto gerado.

A utilização dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos tem sido difundida nas duas últimas décadas. Embora o uso desses dados geofísicos tenha sido proposto para prospecção mineral, já foram utilizados com sucesso em trabalhos referentes a estudos ambientais e pedológicos (DICKSON & SCOTT, 1997; BECEGATO & FERREIRA, 2005; SILVA et al., 2010 apud COSTA, 2013).

A região a ser estudada compreende um complexo intrusivo dos mais importante relacionados a Supersuíte G5, sendo correlacionada ao estágio pós colisional do Orógeno Araçuaí. O corpo dispõe de dois núcleos gabróicos circundados por rochas graníticas potássicas (ZANON et al., 2012). Em meio ao complexo ocorrem rochas derivadas de misturas de magmas máficos e félsicos. Visto o clima tropical brasileiro, os trabalhos geológicos muitas vezes são inviáveis em certas partes, devido à grande exposição de solos gerados pelo intenso intemperismo. O Complexo Intrusivo Santa Angélica (CISA), é alvo de diversos estudos relacionados a geologia, devido a sua diversidade litológica e estrutural. Entretanto estudos relacionados a parte pedológica são escassos não só na região, mas como no estado do Espírito Santo.

Desta forma, através dos métodos e discussões aplicados a este trabalho, busca-se um estabelecimento de uma análise integrada correlacionando dados geofísicos por meio da verificação das relações de distribuição dos elementos e de atributos físicos do solo. Isto irá contribuir para trabalhos futuros que envolvam não só o mapeamento de solos convencionais, mas também para o mapeamento digital de solos.

### LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

O Complexo Intrusivo Santa Angélica localiza-se na porção sul do estado do Espírito Santo, entre os municípios de Alegre, a nordeste, Cachoeiro de Itapemirim, a noroeste, e Castelo, a sudoeste (Figura 1). Esta região é delimitada pelas coordenadas N 24000 – 25000 e S 770400 – 772000 correspondendo a uma superfície de cerca de 200 km<sup>2</sup>. O CISA está inserido principalmente na cidade de Alegre, mais precisamente nos distritos de Santa Angélica e Anutiba. Distando cerca de 200 km de Vitória, o acesso pode ser feito pela BR-101, e posteriormente pela rodovia estadual ES- 262. Partindo de Alegre, os principais acessos à área de estudo são feitos pela rodovia ES-482, sentido Jerônimo Monteiro. O acesso pelo distrito de Anutiba se dá pelo trevo no sentido Muniz Freire, na ES-181, percorrendo aproximadamente

### Análise de dados geofísicos e espectrais de sensores remotos no estudo da fertilidade do solo na região do Complexo Intrusivo Santa Angélica (CISA), ES

22 km. Já o acesso por Santa Angélica se dá de duas maneiras: pela rodovia ES-181 por aproximadamente 6 km, onde se segue a partir de estradas próximas não pavimentadas, ou pela rodovia ES-482 até o distrito de Rive, onde se segue por estradas vicinais.



Figura 18. Mapa de localização da área em estudo, referente ao Complexo Intrusivo Santa Angélica. Fonte: Autores, 2019.

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA/ GEOLOGIA REGIONAL**

### Contexto Geotectônico

O Complexo intrusivo Santa Angélica (CISA) está situado em um conceito geotectônico no orógeno Araçuaí. Este orógeno é uma subdivisão localizada ao norte de um sistema orogênico Neoproterozóico denominado Província Mantiqueira (ALMEIDA et et. 1977, BRITO NEVES et al. 1991).
### **GEOFÍSICA APLICADA – VOLUME I**

A Província Mantiqueira engloba os orógenos Araçuaí, Ribeira, Brasília meridional, Dom Feliciano e São Gabriel, que se distribuem desde o sul do Estado da Bahia até o aproximadamente o limite do estado do Rio Grande do Sul. A Província teve sua evolução associada a Orogenia Neoproterozóica Brasiliano-Pan Africana, a qual resultou no ajuntamento do Paleocontinente Gondwana Ocidental (HEILBRON et al., 2004).

Almeida (1977) define o Orógeno Araçuaí como um sistema de dobramentos de idade brasiliana. Este está localizado na porção setentrional da Província Mantiqueira e compõe os estados do Espírito Santo, Minas Gerais e sul da Bahia. Os eventos relacionados à formação do Orógeno Araçuaí são divididos em quatro estágios: pré-colisional (630 – 580 Ma), sincolisional (580 – 560 Ma), tardi-colisional (560 – 530 Ma) e pós-colisional (530 – 490 Ma) (PEDROSA-SOARES & WIEDEMAN-NLEONARDOS 2000, PEDROSA-SOARES et al. 2001, 2007, 2008, SILVA et al., 2005).

### Litoestratigrafia

No estágio pré-colisional (acrescionário) foi edificado o arco magmático do Orógeno Araçuaí, representado pela Suíte G1 e rochas vulcânicas do Grupo Rio Doce. A Suíte G1 é constituída majoritariamente por tonalitos e granodioritos, portadores de xenólitos de rochas metassedimentares.

O estágio sin-colisional é caracterizado pela deformação e metamorfismo regionais, além de extensiva granitogênese do tipo S, que ocorreram entre 582 e 560 Ma, já no período tardi e pós-colisional até 520Ma, são representados pela Suíte G3 (e.g., NALINI et al. 2000, PEDROSA-SOARES & WIEDEMANN-LEONARDOS 2000, PEDROSA-SOARES et al. 2001, 2006, CASTAÑEDA et al. 2006, CAMPOS et al. 2004, SILVA et al. 2005, 2007).

Já o período pós-colisional e o mais importante neste trabalho é descrito por Marshak et al. (2006) e Alkmim et al. (2007) como processos deformacionais e plutonismo relacionados ao colapso gravitacional (extensional) do sistema orogênico (PEDROSA-SOARES & WIEDEMANN-LEONARDOS 2000, PEDROSA-SOARES et al. 2001, CAMPOS et al. 2004). Neste estágio formaram-se as suítes G4 e G5 que são constituídas por plútons intrusivos que podem apresentar foliações de fluxo, mas não contém foliação regional, sendo estas localizadas nas unidades que circundam em contato com essas intrusões. (PEDROSA-SOARES et al., 2001)

O complexo intrusivo Santa Angélica compõe um dos importantes plútons que formam a Suíte G5. O pluton apresenta zoneamento concêntrico inverso, ou seja, nas bordas possui

litologias mais ácidas gradando paulatinamente para dois núcleos gabróicos de textura média a grossa. (SCHMIDT-THOMÉ e WEBER-DIEFENBACH 1987, BAYER et al., 1987, WIEDEMANN et al. 1987, 1997, WIEDEMANN-LEONARDOS et al. 2000). De acordo com Zanon et al. (2012), o CISA é dividido em 5 unidades principais, de maneira que as porções marginais são compostas por rochas mais ácidas como o Sienogranito tardio, Sienogranito, Quartzo sienito e Quartzo monzonito. Já adentrando o pluton temos as partes gabróicas. As três unidades principais da área de estudo são: Sienogranito, Quartzo monzonito e Gabro.

#### Geomorfologia e Aspectos Pedológicos

Segundo Projeto Mapeamento Geomorfológico do Espírito Santo, realizado por COELHO et al. (2012) o Espírito Santo se subdivide em três grandes grupos morfoestruturais, caracterizados pelos Depósitos sedimentares, as Faixas e Dobramentos Remobilizados e os Maciços Plutônicos. O local de estudo está inserido na região dos Planaltos da Mantiqueira Setentrional, que é a unidade geomorfológica dos Dobramentos e Faixas de Remobilização, denominada de Maciço do Caparaó I.

O Planalto da Mantiqueira Setentrional possui altitudes variadas dispostas em níveis altimétricos, relacionados com a fase de dissecação comandadas pelos rios, adaptadas às fraquezas litológicas e estruturais. É caracterizada por um aspecto montanhoso fortemente dissecado, orientado por falhas intercruzadas, escarpas adaptadas e falhas e elevações residuais segundo COELHO et al., (2012).

As unidades de solos apresentam relação com o material de origem e outros fatores de formação do solo (McBRATNEY et al., 2000), dentre eles o relevo sobre os quais eles se desenvolveram. A maior parte da área do CISA se encaixa na unidade de mapeamento pedológico RLde1 no qual predomina o Neossolo Lítólico Distrófico associados com afloramentos rochosos.

#### **METODOLOGIA**

A produção deste trabalho começa com o levantamento das características da área de estudos, com uma revisão bibliográfica referente à geologia, distribuição de solos, métodos de classificação digital de solos e o método de amostragem que considera as informações de diversos fatores ambientais para a sistematização da coleta.

A Obtenção dos dados vetoriais e de raster para o mapa de localização e o mapa pedológico, foi a partir da plataforma GEOBASES, sendo arquivos do tipo *shapefile* (.shp), ambos processados por meio do software ArcMap 10.3.1 que também foi usado para elaborar o modelo digital de elevação (MDE), extraídos do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). A sobreposição dos mapas interpolados ao modelo digital de elevação, foram realizados pelo software Leapfrog®Geo 4.5. Para a confecção dos métodos iron oxide e clay minerals foram utilizadas as imagens do satélite Landsat 8 sensor OLI, coletadas na plataforma USGS.

Os dados de magnetometria e gamaespectrometria foram obtidos no site da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), na qual realizou um levantamento aerogeofísico em 2010 pelo *Projeto Aerogeofísico Espírito Santo*.

A seleção dos pontos de amostragem de solo que seriam realizados na etapa de campo, foram elaboradas pelo método Hipercubo Latino Condicionado - cLHS, utilizado para realizar amostragem aleatória estratificada que propõe um ótimo sistema de amostragem de variáveis a partir de suas distribuições multivariadas (MINASNY e McBRATNEY, 2006). Este fora utilizado para que não houvesse problema com relação a representatividade, independência e amplitude das variáveis inseridas. Para o processamento deste, foi utilizado o programa estatístico R 3.1.1.

Na etapa de campo, foram coletadas 132 amostras de solo em diferentes regiões, representando a variação de solos, relevo e geologia. As coletas são de amostras compostas formadas por amostras simples de 10 (dez) pontos amostrais, obtidas na profundidade de 0-20 cm, coletadas com ferramentas de inox e acondicionadas em sacos plásticos identificados e georreferenciados.

Em laboratório, nas amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) foram determinados pH em água, Al3+, Ca2+, Mg2+ e Na+ trocáveis, extraídos com KCl 1 mol L-1, na proporção 1:10, sendo Al3+ determinado por titulação com NaOH 0,025 mol L-1, Ca2+ e Mg2+ por espectrofotômetro de absorção atômica e Na+ por fotometria de chama; K e P disponíveis por extração com Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L-1 + H2SO4 0,0125 mol L-1), na proporção 1:10; H + Al utilizando Ca(OAc)2 0,5 mol L-1, ajustado pH 7,0, na proporção 1:15, titulado com NaOH 0,0606 mol L-1 (Teixeira et al., 2017). A análise granulométrica foi determinada através da dispersão química com NaOH 0,1 mol L -1 e agitação lenta (50 rpm) com agitador rotativo tipo Wagner. As frações silte e argila foram determinadas com incremento da coleta adicional da suspensão (TEIXEIRA et al., 2017).

Após serem gerados os resultados das análises químicas e físicas, estes foram processados pelo software GS+ (*Geostatistics for the environmental sciences*) Copyright ©

(2018). Neste foram adicionados os valores de cada variável individualmente para que fosse gerado o semivariograma, no intuito de estabelecer se existe ou não dependência espacial das amostras. Quando houve dependência espacial, utilizou-se o método de Krigagem ordinária para a interpolação dos resultados. Já quando a dependência não era identificada, empregou-se o método do inverso do quadrado da distância ou IDW (*Inverse Distance Weighting*). Tanto a Krigagem quanto o método IDW foram processados pelo software ArcMap 10.3.1.

Através dos produtos gerados, buscou-se realizar uma análise integrada dos dados em ambiente de SIG, desenvolvendo o processo de análise e interpretação dos dados que relaciona as imagens de magnetometria, gamaespectrometria, iron oxide, clay minerals, e os produtos da interpolação dos teores totais de Na, K, Ca, Mg e dos teores de argila e pH., para a determinação de padrões que irão auxiliar no mapeamento digital de solos.

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### Análise Descritiva

A demonstração de como e quanto a distribuição de frequência se afasta de uma distribuição normal, utiliza-se o coeficiente de assimetria: se o coeficiente de assimetria > 0, então a distribuição é assimétrica à direita; se o coeficiente de assimetria < 0, logo distribuição é assimétrica à esquerda e, se o coeficiente de assimetria = 0, a distribuição será simétrica (GUIMARÃES, 2000).

Enquanto o coeficiente de curtose, que representa a dispersão, achatamento, da distribuição em relação a um padrão, geralmente a curva normal, em que: se o coeficiente de curtose = 0 a distribuição é mesocúrtica, se o coeficiente de curtose < 0 platicúrtica e se o coeficiente de curtose > 0 leptocúrtica (SILVA et al., 2010).

Com os atributos definidos, foram gerados os dados estatísticos vistos (Tabela 1) para realização da análise descritiva.

	Valid N	Média±Desv. Pad	Máx	Mín	Quartil Inferior	Quartil Quartil Inferior Superior		Assimetria	Curtose
Areia Total	131	383.362 ± 118.198	642.121	126.999	307	471	31	0.11	-0.50
Silte	131	176.550 ± 46.364	319.343	67.503	153	204	26	0.23	0.55
Argila	131	440.087 ± 123.851	735.945	189.559	355	525	28	0.23	-0.35
рН	131	5.324 ± 0.458	6.89	4.25	5.08	5.56	8.61	0.27	0.83
P	131	16.290 ± 22.227	151.83	1.21	4.79	18.24	136.45	3.73	16.83
K	131	104.732 ± 126.932	853	3	32.00	127.00	121.20	2.76	10.32
Na	131	6.946 ± 13.464	127	0	2.00	8.00	193.83	6.60	52.87
Ca	131	2.533 ± 1.490	9.55	0.11	1.48	3.48	58.85	0.90	2.67
Mg	131	1.376 ± 1.003	7.07	0.01	0.67	1.75	72.90	1.79	6.95

 Tabela 1. Sumário das estatísticas descritivas dos atributos do solo na profundidade de 0-20cm.

Verificando as estatísticas descritivas de atributos do solo, variáveis como P, K e Na possuem altos valores de assimetria e curtose, indicando uma curva com assimetria a direita e leptocurtica. Para a análise desses elementos observa-se também que o desvio padrão está superior à média, mostrando que na área existe uma alta variação nos teores destes elementos. Isso ocorre devido as disposições do material de origem no terreno. A unidade litológica que se situa no centro do pluton, é caracterizada pelo gabro (ZANON et al., 2012), que é uma rocha composta majoritariamente por feldspato cálcico-sódico (plagioclásio). Ao redor do gabro encontram-se as unidades quartzo monzonito e sienogranito. O quartzo mozonito possui quantidades proporcionais entre plagioclásio e feldspato potássico. Já o sienogranito possui maiores proporções de feldspato potássico.

#### Análise Geoestatística

Na análise geoestatística foram verificadas as dependências espaciais dos atributos químicos e físicos do solo, esta foi expressa por meio dos ajustes dos semivariogramas. O modelo que se ajustou melhor aos semivariogramas das variáveis argila, cálcio e magnésio, foi o exponencial. Já para as variáveis silte e areia, os melhores modelos foram o gaussiano e esférico respectivamente.

As variáveis pH, Na, K e P, apresentaram efeito pepita puro, indicando que a variabilidade aleatória contribui de forma mais importante, não havendo dependência espacial entre as amostras, portanto a estatística clássica é passível de ser utilizada (CARVALHO et al., 2003).

#### Relação atributos do solo com dados de sensores

A areia possui uma correlação moderada positiva com as variáveis de elevação, magnetometria e os três canais da gamaespectrometria. Este fato indica que, onde se tem maiores teores de areia, são em regiões mais elevadas do terreno. A boa resposta com a gamaespectrometria se dá provavelmente pela disposição de minerais resistatos e pela disposição de rochas com maiores teores de potássio que predomina nas partes marginais do CISA. Os valores extraídos da magnetometria são todos negativos e a intensidade é invertida por estarem no hemisfério sul. Então valores numéricos mais altos, apresentam menores intensidades na resposta ao eletromagnetismo. Com isso a correlação foi positiva, entretanto a intensidade na região onde se tem maiores teores de areia é menor.

Ver	Mard (1)		Parâmet	ros <sup>(2)</sup>		Validação Cruzada (3)							
Var	MOG	Co	$C_0 + C_1$	GDE	Α	Var	Média	a <sup>(4)</sup>	b <sup>(4)</sup>	r²			
			Profundida	ade de O	– 0,20 n	1							
Areia	ESF	5940	16420	36	3870	1,033	-0,015	-0,45	1,002	0,60**			
Silte	GAU	1027	2055	50	679	1,007	0,017	16,6	0,910	0,48**			
Argila	EXP	5740	17610	33	3951	0,997	0,011	1,12	0,792	0,33*			
pH <sup>(4)</sup>	EPP		0,89										
Na <sup>(4)</sup>	EPP		1,17										
K <sup>(4)</sup>	EPP		1,35										
Ca <sup>(4)</sup>	EXP	0,085	0,184	46	2685	1,064	-0,001	0,37	0,783	0,38*			
Mg <sup>(4)</sup>	EXP	0,114	0,229	50	9780	1,084	-0,001	0,21	0,808	0,36			
P <sup>(4)</sup>	EPP		0,89										

**Tabela 2.** Modelos teóricos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais ajustados aos teores de areia, silte, argila, Na, K, Ca, Mge P, assim como valores de pH no CISA Alegre – ES.

<sup>(1)</sup> Modelos - EXP = exponencial; GAU = gaussiano; ESF = esférico; EPP = efeito pepita puro (2) Co = efeito pepita; Co+C1= patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial (C<sub>1</sub>/(Co + C<sub>1</sub>)) x 100 (BIONDI; MYERS; AVERY, 1994) <sup>(2)</sup> Validação cruzada feita com a média do erro reduzido e a variância do erro reduzido e coeficiente de correlação entre dados observados e estimado da validação cruzada. sendo \*\* correspondem a p < 0.01. \* a p < 0.05 e n.s corresponde a p > 0.05<sup>(4)</sup> a = coeficiente linear , b = coeficiente angular da regressão. <sup>(4)</sup> Dados transformados para atender pressuposição de normalidade.

	AREIA	SILTE	ARGILA	ELEV	DECLIV	WET	рН	Р	K	Na	Ca	Mg	MAG	IRON OXIDE	CLAY	Kperc	eU	eTh
AREIA	1.00																	
SILTE	-0.07	1.00																
ARGILA	-0.93	-0.31	1.00															
ELEV	0.45	0.04	-0.45	1.00														
DECLIV	0.18	-0.09	-0.14	0.53	1.00													
WETNESS	-0.11	0.16	0.05	-0.47	-0.69	1.00												
рН	-0.18	0.23	0.08	-0.26	-0.17	0.19	1.00											
Р	0.29	0.13	-0.33	-0.08	-0.21	0.09	80.0	1.00										
К	-0.01	0.12	-0.03	0.04	-0.10	-0.03	0.18	0.01	1.00									
Na	0.02	0.22	-0.10	0.01	-0.07	0.08	-0.01	0.05	-0.03	1.00								
Ca	-0.14	0.36	0.00	-0.27	-0.18	0.16	0.51	0.11	0.24	0.14	1.00							
Mg	-0.23	0.22	0.14	-0.24	-0.04	-0.02	0.35	0.03	0.40	-0.04	0.53	1.00						
MAG	0.39	0.05	-0.39	0.49	0.34	-0.28	-0.13	0.10	0.00	0.06	-0.12	-0.09	1.00					
IRON OXIDE	-0.11	-0.13	0.15	0.02	-0.18	-0.05	0.04	-0.13	0.07	-0.20	-0.01	-0.02	-0.23	1.00				
CLAY MINERALS	-0.12	-0.08	0.15	-0.03	0.21	-0.11	-0.02	-0.28	-0.12	-0.28	-0.07	-0.07	-0.14	0.33	1.00			
Kperc	0.42	-0.17	-0.33	0.72	0.40	-0.31	-0.19	-0.17	-0.10	-0.06	-0.23	-0.19	0.20	0.13	0.07	1.00		
eU	0.32	-0.24	-0.21	0.44	0.22	-0.21	-0.18	-0.18	0.02	-0.10	-0.15	-0.19	0.00	0.26	0.12	0.69	1.00	
eTh	0.37	-0.23	-0.27	0.65	0.36	-0.27	-0.27	-0.19	-0.01	-0.11	-0.30	-0.23	0.15	0.19	0.14	0.86	0.74	1.00

Tabela 3. Dados do coeficiente de correlação de Pearson, integrando os atributos do solo, dados geofísicos e dados de sensores remotos.

#### Disposição espacial dos atributos

A partir dos dados ajustados nos semivariogramas, foram realizadas interpolações. Para os atributos físicos, foi possível a realização da krigagem ordinária. Mapas com os teores de areia, silte, argila, cálcio, magnésio, ph, potássio, sódio, fósforo, magnetometria, gamaespectrometria de potássio, urânio e tório, clay minerals, iron oxide e wetness index foram sobrepostos ao modelo digital de elevação do terreno para melhor visualização.

Em relação aos dados geofísicos, foram trabalhados os dados de magnetometria e gamaespectrometria. Para a confecção dos mapas, foram ajustados os semivariogramas com os dados matriciais obtidos pelo levantamento da CPRM. Com os parâmetros gerados realizou-se a interpolação destas variáveis. A magnetometria apresenta interpretações inversas, devido a polaridade incidente no hemisfério sul.

## CONCLUSÃO

A distribuição dos atributos do solo na região do complexo intrusivo Santa Angélica, mostrou-se bem dinâmica e influenciável por fatores intrínsecos ou naturais. Com o presente trabalho pode-se notar algumas relações significativas em relação a distribuição de atributos físicos com os dados dos sensores: A gamaespectrometria obteve uma boa correlação com os teores de areia; A magnetometria foi uma boa indicadora dos teores de argila dentro do complexo intrusivo Santa Angélica; O clay minerals obteve correlações moderadas negativas para os teores de fósforo e sódio, podendo ser um fator interessante para a predição da deficiência destes elementos no solo; O Iron oxide não mostrou ser um bom preditor dos atributos químicos quando se tem disponível as análises dos teores disponíveis; Os sensores de gamaespectrometria e magnetometria obtiveram mais correlações significativas que outros sensores, indicando sua maior eficiência em relação aos atributos dos solos; Os atributos físicos tiveram boa correlação com os dados de gamaespectrometria e magnetometria da região; Os atributos químicos não obtiveram correlação tão significativa com os dados dos sensores geofísicos e orbitais. Alguns fatores dificultaram o detalhamento em relação aos atributos químicos como a ausência de teores químicos pseudo-totais dos solos para determinar melhores relações entre os atributos e a baixa resolução dos dados de magnetometria e gamaespectrometria.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALKMIN F.F., Marshak S., Pedrosa-Soares A.C., Peres G.G., Cruz S.C.P. & Whittington A. Kinematic evolution of the Araçuaí–West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. Precambrian Research, 149:43–63. 2006.

ALMEIDAF.F.M. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira De Geociências, 7(4): 349–364. 1977.

BAYER, P.; SCHMIDT-THOMÉ, R.; WEBER-DIEFENBACH, K. & HORN, H. A. **Complex** concentric granitoid intrusions in the coastal mobile belt, Espírito Santo, Brazil: the Santa Angélica Pluton – an example. Geologische Rundschau, Stuttgart, 1987.

BRITO-NEVES B.B., CORDANI U.G. **Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic**. Precambrian Reseach, 53: 23 – 40. 1991.

BECEGATO, V. A; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. Revista Brasileira de Geofísica. vol.23 n.4 São Paulo. 2005.

CAMPOS C.M., MENDES J.C., LUDKA I.P., MEDEIROS S.R., MOURA J.C. & WALLFASS C. A review of the Brasiliano magmatism in southern Espírito Santo, Brazil, with emphasis on post collisional magmatism. Journal of the Virtual Explorer, 17(1): 35. 2004.

CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.Y.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, p.695-703, 2003.

CASTAÑEDA C., PEDROSA-SOARES A.C., BELÉM J., GRADIM D., DIAS P.H.A., MEDEIROS S.R., OLIVEIRA L. 2006. **Geologia da Folha Ecoporanga**. Rio de Janeiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, UFMG- Programa Geologia do Brasil, escala 1:100.000. COELHO, A. L. N. et al. **Mapeamento geomorfológico do Espírito Santo**. Instituto Jones dos Santos Neves. Vitória, 2012.

COSTA, M. G. A. Gamaespectrometria e magnetometria em mapeamento de solos no domínio de rochas pelíticas do Grupo Bambuí, MG. 2013.

CUNHA, A. de M.; FEITOZA, L. R.; CARDOSO, JKF. Informações aos usuários do GEOBASES sobre a camada de solos. 2015.

DICKSON, B.L. and <u>SCOTT</u>, K.M. Interpretation of Aerial Gamma-Ray Surveys-Adding the Geochemical Factors. Journal of Australian Geology and Geophysics, 17, 187-200. 1997

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Espírito Santo. Rio de Janeiro, 461 p. (EMBRAPA-SNLCS. Boletim técnico, 45). 1971.

GUIMARÃES, E.C. Variabilidade espacial de atributos de um Latossolo Vermelho-Escuro textura argilosa da região de cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 89p. (Tese de Doutorado). 2000.

HEILBRON M., PEDROSA-SOARES A.C., CAMPOS-NETO M.C., SILVA L.C., TROUW R., JANASI V.A. **Província Mantiqueira**. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito-Neves (eds.). Geologia do Continente Sul-Americano. Editora Beca, São Paulo, p.: 203 – 234. 2004.

MARSHAK S., ALKMIN F.F., WHITTINGTON A. & PEDROSA-SOARES A.C. Extensional collapse in the Neoproterozoic Araçuaí orogen, eastern Brazil: A setting for reactivation of asymmetric crenulation cleavage. Journal Structural Geology, 28: 129 – 147. 2006.

McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. Geoderma, 97:293-327, 2000.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. Computers & Geosciences, v. 32, n. 9, p. 1378-1388, Nov. 2006.

NALINI Jr. H.A., BILAL E., PAQUETTE J.L., PIN C. & MACHADO R. Geochronologie U-Pb et géochimie isotopique Sr-Nd des granitoides neoproterozoiques des suites Galileia et Urucum, vallée du Rio Doce, Sud-Est du Brésil. Compte Rendu Academie Science Paris, 331:459 – 466. 2000.

PEDROSA-SOARES A.C., NOCE C.M., WIEDEMANN C.M. & Pinto C.P. **The Araçuaí– West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwan land assembly**. Precambrian Research, 110: 307 – 323. 2001.

PEDROSA-SOARES A.C., NOCE C.M., ALKMIN F.F., SILVA L.C., BABINSKI M., CORDANI U., CASTAÑEDA, C. **Orógeno Araçuaí: Síntese do conhecimento 30 anos após Almeida**. Geonomos, 15(1): 01 – 16. 2007.

PEDROSA-SORES A.C., RONCATO J., CASTAÑEDA C., QUEIROGA G., BELÉM J., GRADIM C., NOVO T., DIAS A.H.A., GRADIM D., MEDEIROS S., JACOBSOHN T., COSTA A.G. Geologia e recursos minerais da região coberta pelas folhas Ecoporanga, Mantena, Montanha e Nova Venécia – ES (Programa Geologia do Brasil, contrato CPRM-UFMG). In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 44, Anais, p.11. 2008.

SCHIMIDT-THOMÉ R. Der Santa Angelica Pluton im Araçuaí-Ribeira Mobile Belt, südliches Espírito Santo, Brasilien: Magmenmischung in einem invers zonierten Pluton. Unpub. Tese de doutorado, Ludwig-Maximilians-Universität, München, 191p. 1987.

SILVA L.C., McNAUGHTON N.J., ARMSTRONG R., HARTMANN L. & FLETCHER I. **The 48 Neoproterozoic Mantiqueira Provinceand its African connections**. PrecambrianResearch, 136: 203 – 240. 2005.

SILVA L.C., PINTO C.P., GOMES A.C.B & PAES V. Geocronologia U-Pb (LA-ICPMS) e a cronoestratigrafia granítica no segmento NE do Orógeno Araçuaí, MG. In: SBG - MG, Simpósio de Geologia do Sudeste, 10, Resumos. 2007.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; XAVIER, A.C.; TEIXEIRA, M.M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.34, p.15-22, 2010.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Editores Técnicos, 573 p. (EMBRAPA SOLOS). 2017.

WIEDEMANN C.M., PENHA H.M., SCHIMIDT-THOMÉ R. Granitóides do Espírito Santo and Rio de Janeiro States. Revista Brasileira de Geociências, 17(4): 674 – 689. 1987.

WIEDEMANN C., MENDES J. C., MOURA J. C., COSTA NASCIMENTO R.C. AND LUDKA I. P. **Granitoidsofthe Espírito Santo Magmatic Arc**. In: ISGAM, International Symposium on Granites and associated mineralizations, 2, Excursions Guide, p.57 – 76. 1997.

WIEDEMANN-LEONARDOS C. M., LUDKA I. P., MEDEIROS S. R., MENDES J. C., COSTA-DE-MOURA J. Arquitetura de plutons zonados da Faixa Araçuaí-Ribeira. Geonomos, 15(1): 25 – 38. 2000.

ZANON, M. L.; CHAVES, A. de O.; RANGEL, C. V. G. T. A Geologia do Maciço Santa Angélica e suas encaixantes (Espírito Santo). 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.