



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 9, nº 1 (2023)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2023v9n1ID26892>



Utilização da técnica de GPR (Ground Penetrating Radar) para a caracterização do Maciço Vitória (Espírito Santo, Sudeste do Brasil)

The use of Ground Penetrating Radar(GPR) for the characterization of the Vitória Massif (Espírito Santo, Southeastern Brazil)

Diego Silva da Rocha¹; Luiza Leonardi Bricalli²; Patricio José Moreira Pires³

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geologia/Departamento de Geologia, Belo Horizonte/MG, Brasil. Email: diegosr.geo@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1573-6892>

² Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais/Departamento de Geografia, Vitória/ES, Brasil. Email: luizabricalli@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3789-1674>

³ Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico/Departamento de Engenharia Civil, Vitória/ES, Brasil. Email: patriciopires@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5445-1753>

Resumo: Este estudo tem como objetivo caracterizar, através de método eletromagnético, a unidade geológica Maciço Vitória na região metropolitana de Vitória-ES, utilizando a técnica de GPR- *Ground Penetrating Radar*. Objetivos secundários visam investigar litotipos e estruturas geológicas, delimitar contatos entre aterros e embasamento Pré-Cambriano, investigar e descrever arranjos de estruturas geológicas e demonstrar a assinatura geofísica das unidades estudadas. A área de estudo corresponde a área do Parque Pedra da Cebola, que pertence a unidade Maciço Vitória, por sua vez a unidade fica localizada em Vitória, capital do Espírito Santo. Foram realizados 4 (quatro) perfis geofísicos, em diferentes orientações, de forma que as diferentes características de subsuperfície fossem abordadas e representadas no radargrama. A aquisição de GPR foi realizada com antena de 270 MHz (duzentos e setenta megahertz), o caminhamento foi realizado utilizando o método do afastamento constante onde as antenas permanecem a uma distância constante uma da outra. Os perfis de GPR foram processados através do programa RADAN7®, utilizando processamento avançado de dados até que a imagem obtida apresentasse refletores e anomalias bem demarcados. Os dados dos radargramas mostraram dois aspectos geológicos importantes: limite de unidades geológicas bastante delimitados e presença de estruturas geológicas. Foram encontradas falhas e fraturas de direção NE-SW e secundariamente NNW-SSE e E-W, essas estruturas correspondem ao trend regional. Essas estruturas podem estar associadas a controles litoestruturais e tensões neotectônicas. O método demonstrou uma fácil e rápida aplicação, destacando-se aqui uma otimização de tempo e custo para análise de material em subsuperfície.

Palavras-chave: Ground Penetrating Radar; Fraturamento; Geofísica.

Abstract: This study aims to characterize, by electromagnetic method, the geological unit Maciço Vitória in the metropolitan region of Vitória-ES, using the technique of GPR- Ground Penetrating Radar. Secondary objectives are to investigate lithotypes and geological structures, to delineate contacts between landfills and Precambrian basement, to investigate and describe geological structure arrangements and to demonstrate the geophysical signature of the studied units. The study area corresponds to the Pedra da Cebola Park area, which belongs to the Maciço Vitória unit, in turn, one unit is located in Vitória, capital of Espírito Santo. Four (4) geophysical profiles were performed in different orientations, so that the different subsurface characteristics were addressed and represented in the radargram. The acquisition of GPR was performed with a 270 MHz (two hundred and seventy megahertz) antenna, the walking was performed using the constant distance method where the antennas remain at a constant distance from each other. The GPR profiles were processed through the RADAN7® program, using advanced data processing until the image obtained showed well-defined reflectors and anomalies. The data of the radargrams showed two important geological aspects: limit of geological units quite delimited and presence of geological structures. Faults and fractures of NE-SW direction and secondarily NNW-SSE and E-W were found, these structures correspond to the regional trend. These structures may be associated with lithostructural controls and neotectonic tensions. The method demonstrated an easy and fast application, highlighting here an optimization of time and cost for analysis of material in subsurface.

Keywords: Ground Penetrating Radar; Fracture; Geophysics.

Recebido: 11/10/2021; Aceito: 09/11/2021; Publicado: 11/04/2023.

1. Introdução

O Espírito Santo carece de informações geológicas e geofísicas em uma escala que represente suas unidades litológicas e características estruturais em detalhe. Nas últimas décadas foram realizados trabalhos em escalas regionais (SILVA *et al.*, 1987; CPRM, 2015) objetivando o desenvolvimento do conhecimento geológico e científico capixaba.

A cidade de Vitória, capital do estado, possui um contexto geológico pouco estudado, com estudos de subsuperfície realizados geralmente através de sondagens SPT (*Standard Penetration Test*) sendo em sua maioria direcionados para a indústria da construção civil, já que o município possui diversos tipos de empreendimentos imobiliários. Existe uma necessidade do emprego de técnicas que viabilizem a delimitação das unidades geológicas e suas respectivas estruturas com uma maior precisão. Devido a existência de pavimentação, aterros e impermeabilização do solo é importante a utilização de técnicas indiretas de investigação em subsuperfície através da geofísica, a mais utilizada em áreas urbanas é o GPR (*Ground Penetrating Radar*).

O GPR é um equipamento científico utilizado em pesquisas das área de ciências da Terra que emprega o método eletromagnético, o mesmo é baseado na propagação de ondas eletromagnéticas em subsuperfície. O GPR vem sendo aplicado na ciência já a algumas décadas, mas apenas nos últimos anos existiu um desenvolvimento substancial para diversos campos de aplicações, alguns desses campos são: i) Geotecnia; ii) Meio Ambiente; iii) Hidrogeologia; iv) Investigações Forenses; v) Estudos Costeiros; vi) Geomorfologia; e vii) Geologia (NEAL *et al.*, 2000).

O Espírito Santo proporciona o emprego da técnica em diversas campos das Geociências, sendo que se destacam principalmente as áreas de Geotecnia, Mapeamento Geológico, Geologia Sedimentar e Hidrogeologia, a deficiência em utilização da técnica reside principalmente na quase que inexistência de equipamentos e de mão-de-obra especializada na utilização de métodos geofísicos.

No Brasil diversas universidades (UFRJ, UERJ, USP, UFPA, UFC, UnB, ON-RJ entre outras) desenvolvem trabalhos em geofísica rasa, utilizando o GPR, buscando caracterizar estruturas geológicas e litologias nos mais diversos ambientes geológicos (PORSANI, 1999).

Desta forma, essa pesquisa aborda a utilização da técnica de GPR em diferentes ambientes geológico-geomorfológicos do estado do Espírito Santo, tais como embasamento cristalino e zonas de aterro, propondo delimitar unidades geológicas e apontar estruturas geológicas em subsuperfície.

Área de Estudo

O ponto de estudo está localizado no município de Vitória, estado do Espírito Santo, região Sudeste do Brasil O estado do Espírito Santo faz fronteira com os estados da Bahia a norte, Minas Gerais a oeste e noroeste, Rio de Janeiro a sul e ao oceano Atlântico a leste. As principais vias de acesso para a área de estudo são as rodovias federal BR-101, estadual ES-010 e a avenida Fernando Ferrari. A Avenida Fernando Ferrari é uma importante via do município de Vitória, sendo responsável por interligar bairros como Goiabeiras, Jardim da Penha e Jabour, e a rodovia estadual ES-010 conecta o município de Vitória a fração litorânea do município da Serra.

No ponto estudado (Figura 1) foram realizados 4 (quatro) perfis em diferentes direções e tamanhos. Os perfis foram realizados nas direções NE-SW, E-W e NW-SE e possuem entre 29 (vinte e nove) e 34 (trinta e quatro) metros de comprimento e uma profundidade máxima de 6 (seis) metros.

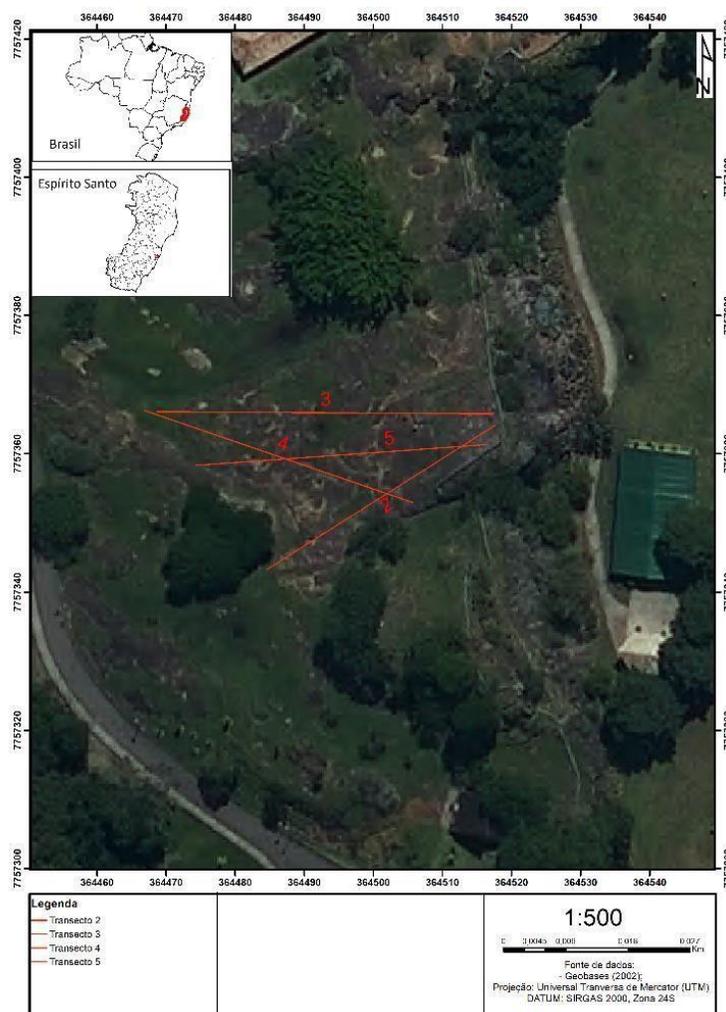


Figura 1 - Mapa de localização dos transectos da área da Pedra da Cebola.
Fonte: Autores (2019).

O Orógeno Araçuai se estende do Cráton São Francisco até o litoral atlântico e está localizado entre os paralelos 15° e 21°, sendo que, no paralelo 21° se observa uma transição do Orógeno Araçuai para o Orógeno Ribeira. Essa mesma transição tem como característica a mudança da estruturação de direção NNE, a norte, para NE, a sul (HEILBRON, *et al.*, 2004).

Geologia Regional

A geologia do estado da área de estudo (Figura 2) pode ser dividida em dois compartimentos principais: i) Embasamento pré-cambriano constituído basicamente de rochas ígneas e metamórficas; e ii) Depósitos sedimentares cenozoicos, constituídos pela Formação Barreiras e por depósitos quaternários da bacia do Espírito Santo (BRICALLI, 2011).

A rochas correspondentes ao embasamento Pré-Cambriano da área de estudo foram geradas durante o Ciclo Brasileiro e estão ligadas a uma complexa associação de rochas ígneas e metamórficas da Província Mantiqueira. No estado do Espírito Santo predominam os orógenos Araçuai e Ribeira (TUPINAMBÁ *et al.*, 2013).

O Orógeno Araçuai se estende do Cráton São Francisco até o litoral atlântico e está localizado entre os paralelos 15° e 21°, sendo que, no paralelo 21° se observa uma transição do Orógeno Araçuai para o Orógeno Ribeira. Essa mesma

transição tem como característica a mudança da estruturação de direção NNE, a norte, para NE, a sul (HEILBRON, *et al.*, 2004).

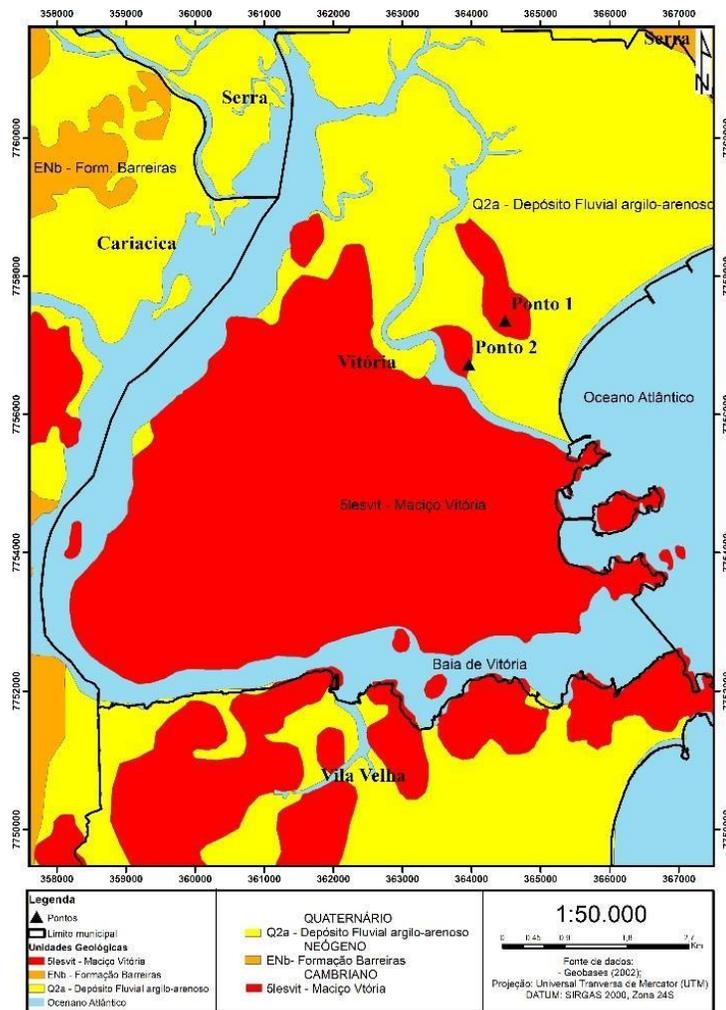


Figura 2 - Mapa geológico da área de estudo.

Fonte: Autores (2019).

Segundo Pedrosa-Soares *et al.*, (2013) o Orógeno Araçuaí é caracterizado como um conjunto orogênico neoproterozoico-cambriano, que é parte pertencente da reentrância originada pelos crátons do Congo e São Francisco, seus componentes geotectônicos evidenciam um sistema orogênico colisional que sucede um sistema orogênico acrescionário de margem ativa. O Orógeno possui uma característica intrínseca que é o seu confinamento a reentrância, implica na ligação parcial dos crátons São Francisco e Congo durante a tatoniana (2 Ga) até a abertura do Atlântico Sul por meio da ponte Gabão.

Machado *et al.*, (1996) caracterizou a gênese da faixa como originada durante a orogenia brasileira e identifica que as suas estruturas de larga escala resultam de uma compressão contra o cráton São Francisco no norte e na parte mais central. A área é composta por séries de pulsos empilhados, sob condições metamórficas de grau anfibolito, em escala crustal.

Tupinamba *et al.*, (2013) aborda que grande parte do Estado do Espírito Santo está contido dentro do Domínio Cambuci, ou seja, no Terreno Oriental. Segundo o autor esse terreno consiste em uma sucessão metavulcano-sedimentar metamorfizada em fácies anfibolito alto e granulito, invadida por diversas gerações de rochas granitoides.

Machado *et al.*, (1996) aborda que a parte central do Orógeno Ribeira, que constitui uma parte significativa do Espírito Santo, é dividido em domínios litotectônicos: i) Domínio costeiro, domínio responsável pelas feições litotectônicas na parte costeira do Espírito Santo; ii) Domínio Paraíba do Sul; iii) Domínio Juiz de Fora; e iv) Domínio Andrelândia. O domínio costeiro tem como principais litotipos uma variedade de rochas ígneas e metamórficas com uma predominância de ortognaisses com lentes máficas e monzogranitos. O Domínio Costeiro é caracterizado como em grande parte resultado da remobilização crustal que ocorreu durante a orogenia Brasileira.

2. Metodologia

Para elaboração deste trabalho foram consideradas 2 (duas) etapas essenciais: i) análises de gabinete e; ii) análises de campo. A etapa de análise de gabinete consiste na realização do mapa de lineamento e no processamento dos dados de campo.

O mapa de lineamentos foi realizado através da extração manual de lineamentos, para tanto foi elaborada sobre um Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE foi extraído do site <http://srtm.csi.cgiar.org/> (REUTER *et al.*, 2007) correspondente ao levantamento orbital realizado pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM-NASA) dos dias 11 e 22 de fevereiro de 2000. A imagem foi processada e aplicada a iluminação artificial de 315° (azimute) obtida a partir da ferramenta “*Hillshade*” do ArcGis 10.1™ (ESRI, 2012). A elevação solar utilizada foi a de 45° e o estabelecimento do “*Z-factor*” foi calculado a partir da média entre dos valores das latitudes que englobam o Espírito Santo, sendo utilizado 0,00000934 (BRICALLI, 2011). Em seguida foram extraídos os lineamentos com utilização da ferramenta de edição ArcGis 10.1™ (ESRI, 2012), considerando esses elementos de identificação: alinhamentos de cristas, vales, *trench's* de rios e lagos e depressões alongadas (LIU, 1984).

A etapa de análise de campo consistiu nas investigações de radar de subsuperfície (Figura 3) objetivando a realização dos perfis geofísicos e na coleta de dados geológicos.



Figura 3 - GPR GSSI3000 com a antena de 270MHZ, 1) Equipamento completo, vista do operador; 2) Equipamento em perfil; 3) Unidade de controle; 4) Antena de 270 MHz.

Fonte: Autores (2019).

O equipamento GPR utilizado corresponde ao modelo SIR3000 da empresa GSSI (*Geophysical Survey Systems Inc.*) pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

O equipamento é formado por uma unidade de controle digital e unidade de antena que por sua vez consiste em duas antenas, transmissoras e receptoras, blindadas por um invólucro de resina. Nessa pesquisa o equipamento foi utilizado em um carro transportador, uma das rodas do mesmo contém um odômetro que, conectado a unidade de controle, é responsável pela mensuração da distância percorrida nos perfis levantados. A coleta de dados foi realizada de duas formas concomitantes, a realização dos perfis geofísicos e a descrição de litologias e estruturas nos pontos estudados.

Os perfis geofísicos foram realizados no modo Common-offset (Figura 4), é o método mais convencional de levantamento e tem por característica o posicionamento da antena de forma perpendicular à linha de levantamento, detalhadamente ele é descrito como:

Perfil de Reflexão com Afastamento Constante (*Common-offset*)

Essa técnica consiste em uma geometria que mantém a distância fixa entre antena transmissora (Tx) e receptora (Rx) ao longo de um perfil, dessa forma se obtém uma imagem aonde o eixo horizontal representa a posição das antenas e o eixo vertical as variações das propriedades dielétricas em subsuperfície (BORGES, 2004). O tempo entre transmissão, reflexão e recepção da onda é mensurado em nanossegundos (10^{-9} s) e denominado de *two-way-travel* (TWT). O primeiro pulso de onda recebido é denominado de *airwave* e o segundo *ground wave*, esses dois pulsos foram desprezados já que não representam a subsuperfície e mascaram os primeiros refletos (ROCHA, 2013).

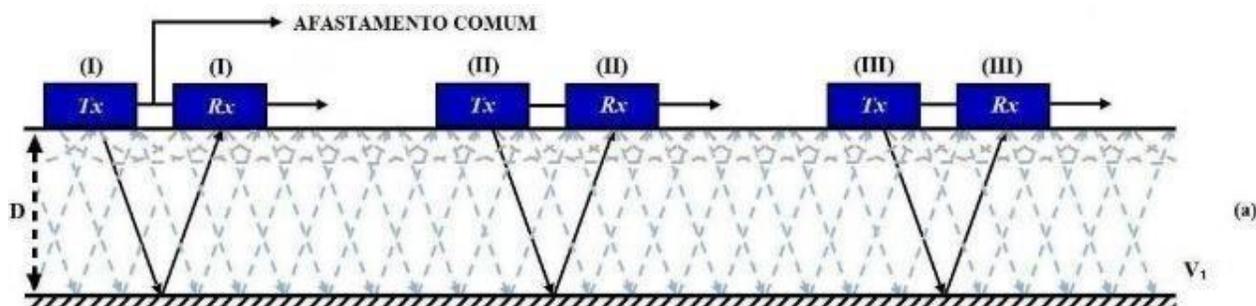


Figura 4 - Técnica de aquisição de perfil de reflexão com afastamento constante.

Fonte: Furtado (2010).

A localização dos perfis respeitou o levantamento de dados prévios da área e o reconhecimento de campo, dessa forma eles foram dispostos em direções que facilitaríamos a obtenção do melhor radargrama possível. Os caminhamentos foram realizados dentro da área onde havia dados de sondagem, em campanhas de campo realizadas de Janeiro a Abril de 2018, dessa forma é possível comparar as diferentes respostas dos radargramas com as variações litológicas em subsuperfície, quando não foi possível a realização do caminhamento sob o ponto exato do furo de sondagem o mesmo foi deslocado para que houvesse a maior possibilidade de correlação possível entre os dados de sondagem e os radargramas.

Os dados de campo foram processados no programa RADAN7, desenvolvido também pela GSSI e licenciado para o Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), o programa oferece uma interface prática e didática para o processamento dos dados considerando as propriedades geofísicas do meio.

A etapa de processamento de dados se inicia na verificação dos parâmetros de aquisição de campo. Para Jol (2008) a transformação dos dados em informação pode seguir dois caminhos: i) o primeiro é correlacionado a métodos geofísicos aonde a resposta do GPR é representada em seções, planilhas ou volumes indicando alvos anômalos e ii) o segundo caminho consiste em extrair quantitativamente variáveis correlacionadas as propriedades das ondas (velocidade, atenuação e impedância) e depois traduzir as mesmas propriedades em dados quantitativos.

O processamento de dados da presente pesquisa consistiu em: i) edição dos dados; ii) processamento básico; iii) processamento avançado; e iv) visualização/interpretação do processamento (JOL, 2008). Para se alcançar o nível de interpretação necessário desta pesquisa foi necessário a utilização de métodos avançados de processamento, para tanto

foram empregadas técnicas de filtros temporais, filtros de profundidade, ganhos de sinal, migração e correção do tempo zero.

Segundo Jol *et al.*, (2003) os radargramas são interpretados a partir da observação dos princípios da sismica de reflexão (Figura 5), ou seja, essa interpretação se faz através do conceito que as reflexões obtidas no radargrama são resultados de superfícies de acamamento e inconformidades em subsuperfície.

TIPOS DE CONFIGURAÇÕES DE REFLEXÃO			INTERPRETAÇÃO	
Configuração de Reflexão Livre	Reflexão Livre		1) Atenuação de Energia 2) Sedimentos Lacustrinos Siltosos 3) Areia, acamamento espesso ou maciço 4) Til, maciço, alguns matacões	
	Reflexão Livre com Difrações		1) Sedimentos, maciço e matacões	
Configuração de Reflexão de Acamamentos	Acamamento Simples	Paralelo		1) Silte e laminações finas 2) Areia e laminações espessas
		Onda		1) Silte e Areia, acamamento 2) Areia e acamamento
		Hummocky		1) Areia e acamamento 2) Areia e cascalho e acamamento
	Acamamento Complexo	Obliquio		1) Areia e acamamento delgado a espesso
		Sigmóide		1) Silte e acamamento delgado 2) Areia e acamamento delgado
Configuração de Reflexão Caótica	Caótico		1) Areia e Cascalho e estratigrafia cruzada	
	Caótico com Difrações		1) Areia, estratigrafia cruzada e matacões 2) Til, maciço e numerosos matacões	

Figura 5 - Tipos de reflexões encontradas em litologias diversas.

Fonte: Haeni (1988, apud Furtado, 2010).

A partir a configuração dos refletores obtidos no radargrama é possível associar os mesmos com diferentes tipos de substratos, sejam eles litológicos, artificiais ou até mesmos litoestruturais se considerarmos substratos rochosos afetados por estruturas como fraturas, falhas, juntas, estruturas de dissoluções, diques e veios.

O bom entendimento da resposta da técnica GPR aos diferentes meios é um instrumento facilitador, é importante saber diferenciar os tipos de respostas possíveis quando se trabalha em meios muito fraturados ou maciços. Maciços fraturados terão um padrão de reflexão mais caótico enquanto reflexões ligadas a camadas sedimentares apresentam padrões laminados, sub-horizontais, concordantes e coerentes (XAVIER NETO, 2006). Segundo a classificação de Haeni (1988) os padrões de reflexão encontrados com mais frequência são os de reflexão livre, livre com difrações, onda, oblíquo e caótico.

3. Resultados e Discussões

Análise de Lineamentos

O mapa de lineamentos (Figura 6) foi elaborado de forma manual, na escala 1:75000, abrangendo a área da RMGV e com um total de 122 (Cento e vinte e dois) lineamentos. O diagrama de roseta demonstra uma maior concentração de lineamentos na direção NE-SW, N-S e NW-SE. Os lineamentos que possuem maior comprimento têm direção NE-SW.

Outra observação interessante é a densidade de lineamentos, observa-se que a densidade dos maiores lineamentos (14 – 42) possuem orientação NE-SW. Correlacionam-se as direções correspondentes a Faixa Colatina, com *trend* estrutural NW-SE e NE-SW na porção mais cenozoica da área (Depósitos Fluviais argilo arenosos e Formação Barreiras), e com um *trend* NW-SE mais a sul da área.

Os padrões observados demonstram uma distinção clara mesmo em uma escala local, dessa forma podemos concluir que o mesmo reflete os padrões regionais observados em trabalhos anteriores (BRICALLI, 2011; RIBEIRO, 2010).

Os lineamentos encontrados mostram que há uma predominância de estruturas NE-SW, seguido de lineamentos NNW-SSE. O predomínio de lineamentos NE-SW, pode ser explicado pela predominância de falhas, fraturas e foliações de direção NE-SW, relacionadas à estruturação da Faixa Ribeira, cortadas quase que perpendicularmente por estruturas de orientação NW-SE (MACHADO FILHO *et al.*, 1983; PEDROSA SOARES e WIEDEMAN-LEONARDOS, 2000; BRICALLI, 2011);

Os lineamentos NNW-SSE podem estar associados a Faixa Colatina, que é a mais importante feição estrutural no estado do Espírito Santo.

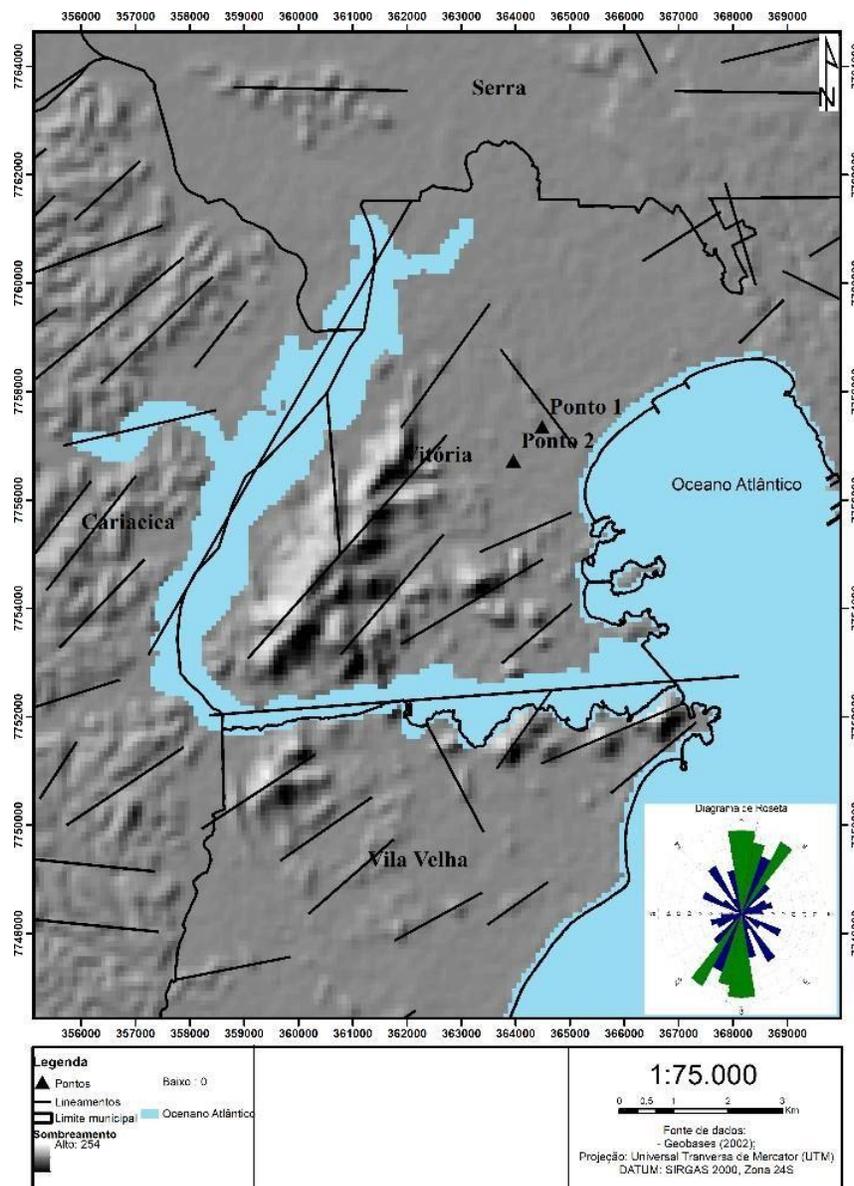


Figura 6 - Mapa de lineamentos da área que abrange os pontos estudados sobre MDE na iluminação de 315°. Diagrama de rosetas demonstrando a maior densidade de orientações dos lineamentos (verde) assim como a mediana das orientações (vermelho) e as demais.

Fonte: Autores (2019).

Análise Geofísica

A litologia da rocha nessa área consiste em rochas máficas de coloração preta com índice de cristais melanocráticos orientados na direção do fluxo magmático. As rochas apresentam estrutura anisotrópicas com textura holocristalina, inequigranular, fanerítica, de granulação média a grossa com pórfiros de feldspato. Mineralogicamente a rocha é constituída por quartzo, biotita e plagioclásico.

Foram encontradas, em diversas porções da rocha, famílias de juntas (Figura 7) perpendiculares umas às outras, esse padrão foi interpretado como planos de fraqueza na rocha.



Figura 7 - Granito com fraturas preenchidas por solo no ponto de estudo.

Fonte: Autores (2019).

Duas famílias de fraturas na porção mais a SW do afloramento apresentam comportamentos distintos. O primeiro padrão se refere a parte mais superior do afloramento e apresenta planos 180/65, orientação NNE-SW. O segundo padrão se apresenta praticamente em posição ortogonal a primeira família, dessa forma possui planos com medidas de 270/43 e 275/50, orientação E-W.

Radargrama 02 (NE-SW)

O primeiro transecto (02) tem direção NE-SW, possui 6 (seis) metros de profundidade e 29 (vinte e nove) metros de comprimento.

O radargrama 02 (Figura 8) apresenta uma zona de refletos até 40 ns. Nessa área podemos observar refletos horizontais na porção central do mesmo; já nos extremos do perfil radargrama 02 é possível observar refletos sub-

horizontais e algumas hipérboles, essas duas áreas foram interpretadas como locais onde existem presença de famílias de juntas dessimétricas preenchidas por solo.

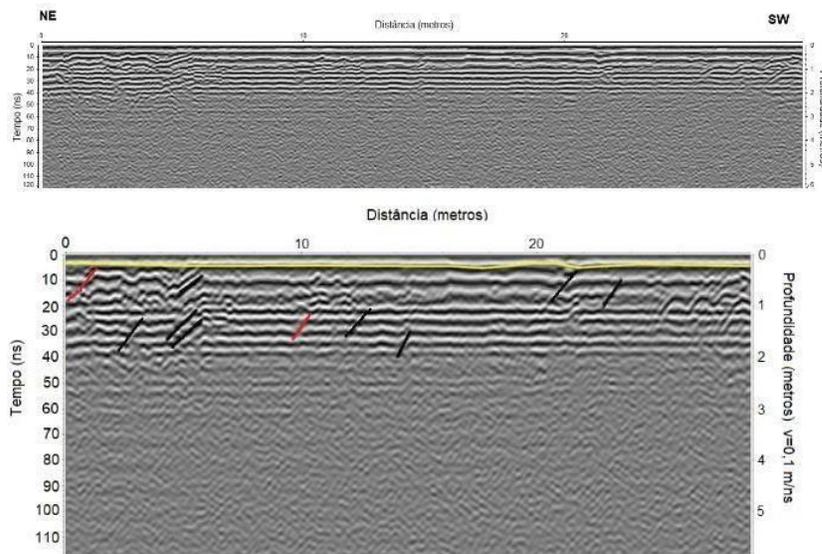


Figura 8 - Radargrama 02, área localizada no Parque Pedra da Cebola.
Fonte: Autores (2019).

Litotipos e estruturas geológicas em subsuperfície

O radargrama demonstra uma área homogênea do ponto de vista geológico, onde quase toda a área demonstra refletores característicos do granito pertencente ao embasamento Pré-Cambriano, ou seja, demonstra refletores horizontais a subhorizontais. Algumas estruturas são identificadas na área, apresentando quebras na continuidade dos refletores e são identificadas como produto do fraturamento da rocha, tendo representações nas camadas mais superiores e nas camadas mais profundas, também preenchidas por solo (Figura 9).

Contato entre rochas do embasamento pré-cambriano e os depósitos tecnogênicos

O contato entre o solo e o embasamento é caracterizado por refletores superficiais e abaulados nas posições de 4 (quatro) metros e 22 (vinte e dois) metros. Devido a inexpressividade da porção de solo presente nesses pontos e em todo o restante do perfil, não existe um refletor típico e bem demarcado que seja representativo do contato entre as duas unidades citadas. A interpretação da presença de solo no local só foi possível através da comparação entre as fotos de campo e o radargrama (Figura 9).

Assinatura geofísica dos principais dos litotipos

O ponto estudado demonstrou 2 (duas) assinaturas geofísicas (Figura 10) que se destacam dentro do radargrama: i) a primeira é formada por refletores horizontais com pequenas quebras na sua continuidade, sendo assim interpretados como zonas fraturadas, podendo ser demonstrado pelos padrões estruturais observados em superfície; ii) a segunda assinatura é formada por refletores subhorizontais a horizontais que demonstram a presença de fraturas e a acomodação do solo nas mesmas.

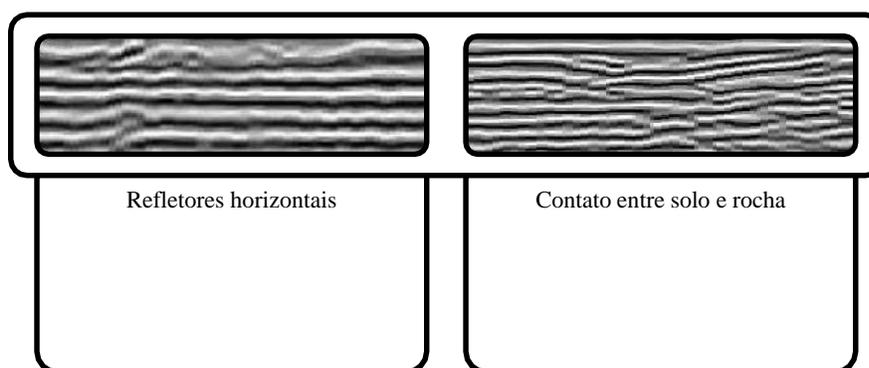


Figura 9 - Principais assinaturas geofísicas do ponto estudado.
Fonte: Autores (2019).

Radargrama 03 (E-W)

O segundo transecto (03) foi realizado na direção E-W (Leste-Oeste), com possui 6 (seis) metros de profundidade e um comprimento de 34 (trinta e quatro) metros.

O radargrama 03 (Figura 11) apresenta uma zona de refletores que vai até 40 ns com refletores horizontais que vão desde 30 ns a 40 ns. Acima dessa área se encontram refletores horizontais e sub-horizontais. O perfil do radargrama 03 apresenta nas posições 4 (quatro), 14 (quatorze) e 26 (vinte e seis) metros reflexões associadas a famílias de juntas preenchidas por solo. Na última posição (26 metros) existe a presença de uma área com solo já formado, observando-se, dessa maneira, o contato entre o embasamento e o solo, delimitado por juntas.

Litotipos e estruturas geológicas em subsuperfície

O radargrama demonstra uma outra área também homogênea do ponto de vista geológico. Seus refletores são característicos do granito pertencente ao embasamento Pré-Cambriano, ou seja, demonstra refletores horizontais a subhorizontais com pouco contraste com refletores de outro formato.

Nesse ponto pode se observar algumas porções com refletores côncavos, onde foram observados porções de solo bem formados. A área se aproxima aos demais pontos quanto as estruturas presentes, demonstradas no radargrama por quebras na continuidade dos refletores e são identificadas como produto do fraturamento da rocha, com representações tanto nas camadas mais superiores quanto nas camadas mais profundas, e preenchidos por solo (Figura 11).

Contato entre rochas do embasamento pré-cambriano e os depósitos tecnogênicos

Observa-se no radargrama, logo abaixo da onda aérea caracterizada pelos refletores horizontais, uma área de aproximadamente 1 (um) metro de espessura que se estende por todo o comprimento do radargrama. Essa mesma área é formada por refletores subhorizontais em meio a padrões mais caóticos. Em determinadas porções podem ser observados ainda refletores bem demarcados juntamente com pequenas quebras de reflexão, logo pode se interpretar que essa área corresponde a interação entre um solo juvenil e um fraturamento mais superficial do granito porfirítico pertencente ao embasamento. Porções onde o solo é melhor formado possuem refletores fortes estabelecendo o contato entre essa unidade e a unidade sotoposta (Figura 10).

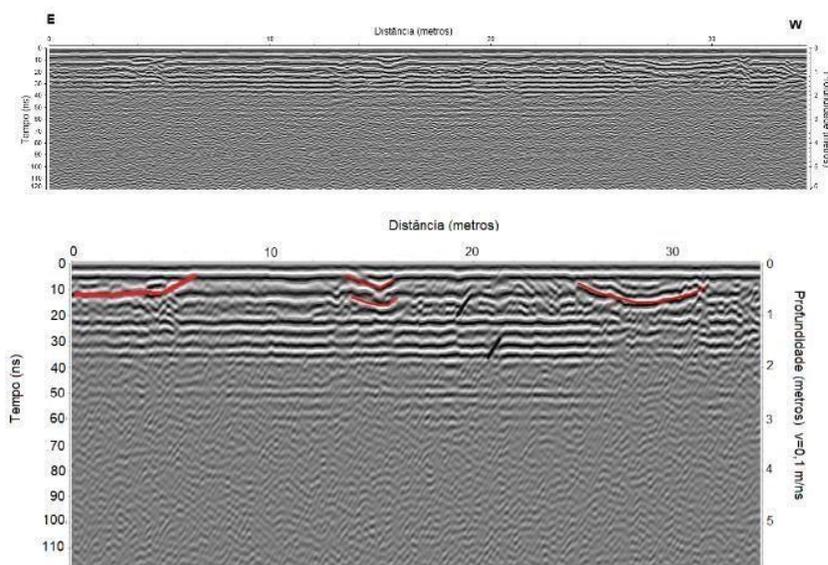


Figura 10 - Radargrama 03, área localizada no Parque Pedra da Cebola. Fonte: Autores (2019).

Assinatura geofísica dos principais dos litotipos

O ponto estudado demonstrou 2 (duas) assinaturas geofísicas (Figura 11) que se destacam dentro do radargrama: i) a primeira é formada por refletores horizontais a subhorizontais referente aos granitos porfíricos representados na área; ii) a segunda assinatura geofísica da área é referente a refletores subhorizontais e côncavos que demonstram o fraturamento da área com parcelas de solo acomodadas preenchendo as mesmas.

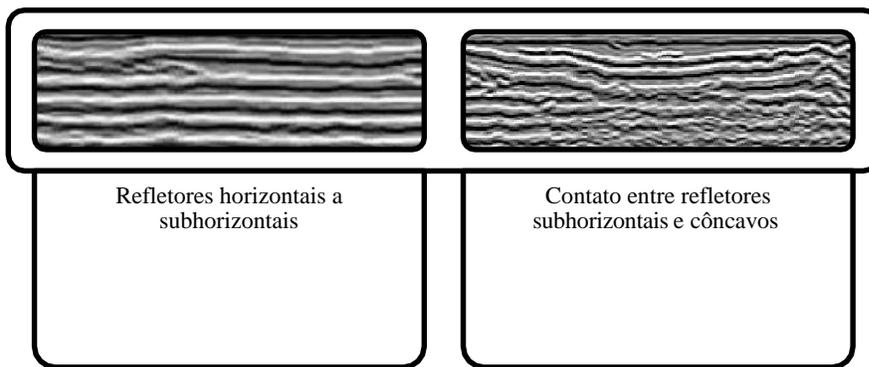


Figura 11 - Principais assinaturas geofísicas do ponto estudado. Fonte: Autores (2019).

Radargrama 04 (NW-SE)

O terceiro transecto (04) realizado na direção NW-SE, possui 6 (seis) metros de profundidade e um comprimento de 22 (vinte e dois).

O radargrama 04 (Figura 12) apresenta reflexões até 40 ns, sendo que em algumas áreas observa-se a perda de sinal em 30 ns. Em quase todo o radargrama observam-se refletores com padrão horizontal. Na porção central do perfil (aproximadamente 10 a 12 metros) são observadas hipérbolas, podendo ser associadas a juntas não preenchidas, já que

acima dos mesmos se observam famílias de juntas sobrepostas por material argiloso. As demais áreas do radargrama, com o padrão de refletores horizontais, são associados a litologia (granito porfírico) que predomina na área.

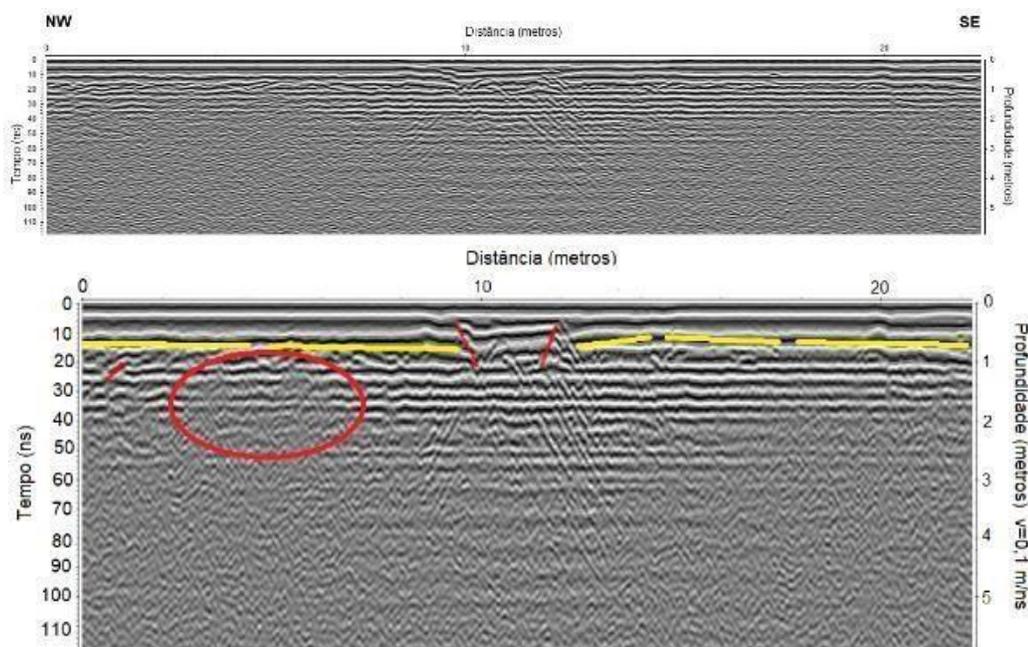


Figura 12 - Radargrama 04, área localizada no Parque Pedra da Cebola.
Fonte: Autores (2019).

Litotipos e estruturas geológicas em subsuperfície

Observa-se no radargrama, logo abaixo da área com onda aérea, refletores horizontais a subhorizontais em quase todo o radargrama na área que pode ser interpretada como o embasamento Pré-cambriano.

A aproximadamente 10 (dez) metros de comprimento pode ser observado uma área fraturada em suas bordas com o centro constituído por refletores que destoam do restante do perfil. Essa área foi interpretada como granito fraturado com o preenchimento das fraturas por solo sotoposta por uma região constituída por solo. A estrutura é classificada como uma estrutura em flor invertida característica de ambientes sedimentares com forte controle estrutural.

A aproximadamente 6 (seis) metros de comprimento do perfil existe uma área com sombreamento causado possivelmente pela presença de água em fraturas no embasamento ou por uma porção de solo húmida no solo. A área foi interpretada dessa maneira devido a ausência de refletores no local, causada pela mudança brusca de velocidade da onda ao passar por um material húmido e de composição muito diferente do meio estudo.

Contato entre rochas do embasamento pré-cambriano e os depósitos tecnogênicos

A área possui refletores bem demarcados nas duas unidades que a constituem. Existe uma boa separação com refletores bem demarcados no contato entre as mesmas. Isso pode ser constatado na área que abrange a estrutura em flor onde apesar de se separado nas laterais pelas fraturas na parte mais profunda, pode ser visto o contato entre o refletor do embasamento e o refletor referente ao solo (Figura 13).

Assinatura geofísica dos principais dos litotipos

O ponto estudado demonstrou 2 (duas) assinaturas geofísicas (Figura 13) que se destacam dentro do radargrama: i) a primeira é formada por refletores horizontais, por vezes descontínuos, associados a granito fraturado; ii) a segunda assinatura é demonstrada por refletores intensamente descontínuos o que demonstra áreas intensamente fraturadas.

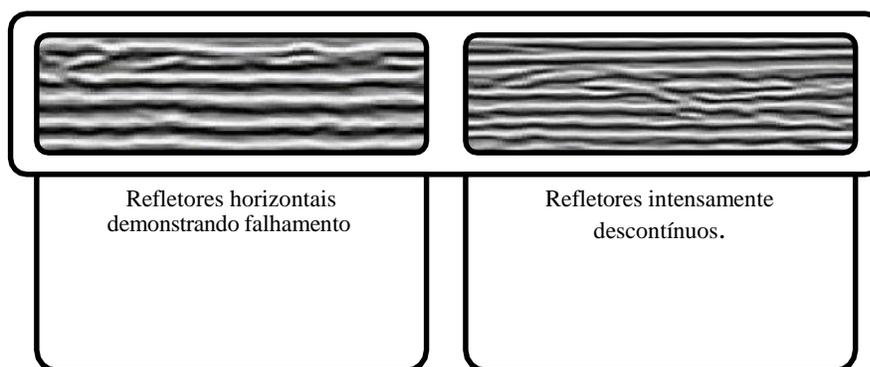


Figura 13 - Principais assinaturas geofísicas do ponto estudado.

Fonte: Autores (2019).

Radargrama 05 (E-W)

O quarto e último transecto (05) foi realizado na direção E-W, possui 6 (seis) metros de profundidade e 29 (vinte e nove) metros de comprimento.

O radargrama 05 (Figura 15) apresenta reflexões até 40 ns e seus principais refletores também se encontram nos padrões horizontais e sub-horizontais. Nos primeiros metros do transecto se observam algumas hipérboles que são associadas a tirantes geotécnicos e a presença dos mesmos acontece por um alto faturamento do granito nessa posição. Em algumas porções do perfil, principalmente em 3 (três) metros e em 8 (oito) metros, se encontram fraturas que variam de milimétricas a dessimétricas, ou seja, fora do alcance de resolução que a antena de 270 MHz possui e, portanto, pouco representadas no radargrama, mas evidenciadas pela presença dos tirantes naquela posição.

Litotipos e estruturas geológicas em subsuperfície

Observa-se no radargrama duas faixas de refletores, na mais superior se observa refletores subhorizontais a caóticos em algumas porções. Nessa área se observa a presença de solo, rocha fraturada com fraturas preenchidas por solo e a presença de tirantes geotécnicos em subsuperfície. Na porção, mais inferior se observa a presença de refletores paralelos a subparalelos em quase toda a sua extensão, no entanto essa área se apresenta mais fraturada do que as demais e isso implica na presença de fraturas bem demarcadas em quase toda a extensão do radargrama.

A parte inicial do radargrama (Figura 14) apresenta hipérboles levemente marcadas que são características de alvos de composição completamente diferente dos materiais naturais, os quais são identificados como tirantes geotécnicos usados para a estabilização do maciço rochoso. Observa-se a grande presença de fraturas na área aonde as hipérboles são encontradas em detrimento a outra extremidade do perfil.

Contato entre rochas do embasamento pré-cambriano e os depósitos tecnogênicos

Observa-se no radargrama refletores fortes que separam a área do embasamento com a unidade de solo sotoposta. Além disso, as hipérboles no início do perfil estão bem marcadas e são características da presença de matérias com características eletromagnéticas muito distintas do material no restante da área.

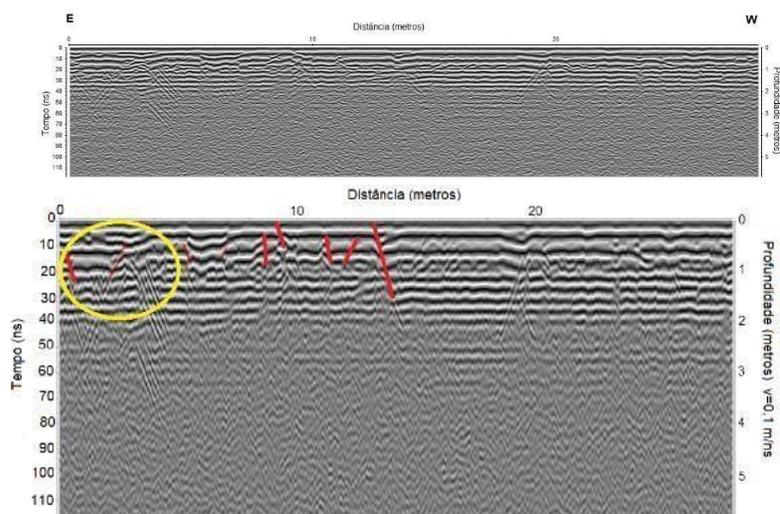


Figura 14 - Radargrama 05, área localizada no Parque Pedra da Cebola.
Fonte: Autores, 2019.

Assinatura geofísica dos principais dos litotipos

O ponto estudado demonstrou 2 (duas) assinaturas geofísicas (Figura 15) que se destacam dentro do radargrama: i) a primeira é formada por refletores horizontais característicos de rochas graníticas como no restante dos pontos estudados; ii) a segunda assinatura geofísica é formada por hipérbolas que são interpretadas como representativas de material constituído por material destoante do *background*, e, nesse caso é interpretado como a representação da presença de tirantes geotécnicos presentes nessa porção da área estudada.

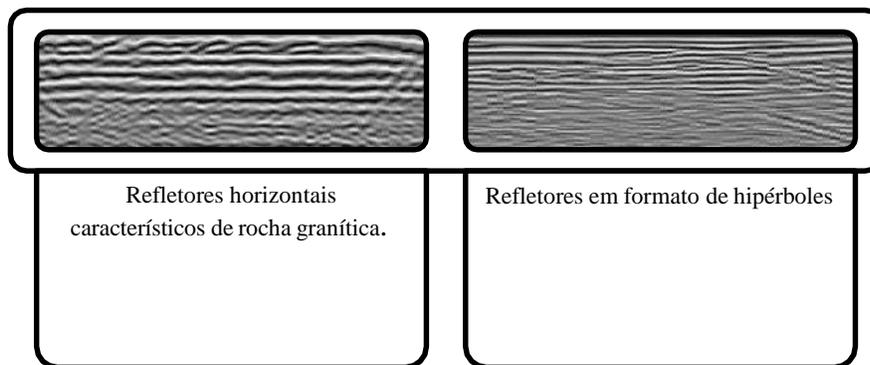


Figura 15 - Principais assinaturas geofísicas do ponto estudado.
Fonte: Autores (2019).

4. Considerações Finais

A utilização da técnica de GPR para a obtenção de imageamento de alta resolução de subsuperfície mostrou-se eficaz. A qualidade dos produtos está diretamente ligada as características composicionais dos materiais em subsuperfície e a disposição dos mesmos no meio e o processamento de dados. Devido a predominância de pesquisas com GPR na área sedimentar, já que a mesma proporciona uma maior qualidade nos padrões de reflexão, essa pesquisa apresenta diferentes formas de identificação e interpretação de refletores em terrenos ígneos apresentando intensa estruturação. Os dados dos radargramas mostraram dois aspectos geológicos importantes: o limite de unidades geológicas bem marcantes e a presença de estruturas geológicas.

Foram observados radargramas com refletores interrompidos em determinadas regiões o que evidencia o forte controle estrutural presente na área, através das medidas retiradas em campo e dos dados supracitados foi possível observar uma predominância de fraturas NE-SW e NNW-SE.

Tanto os lineamentos sobre a imagem como as medidas em campo mostraram que as estruturas NE-SW são muito bem-marcadas.

O predomínio de lineamentos NE-SW, pode ser explicado pela predominância de falhas, fraturas e foliações de direção NE-SW, relacionadas à estruturação da Faixa Ribeira, cortadas quase que perpendicularmente por estruturas de orientação NW-SE (MACHADO FILHO *et al.*, 1983; PEDROSA SOARES e WIEDEMAN-LEONARDOS, 2000; BRICALLI, 2011);

No entanto, além da associação aos controles litoestruturais mencionados, os padrões de lineamentos na área e os padrões estruturais em campo podem refletir tensões neotectônicas documentadas por Bricalli (2011) no estado do Espírito Santo, uma vez que a autora destaca padrões de fraturamento verificados no Compartimento dos Depósitos Cenozoicos apresentando semelhanças aos encontrados no Compartimento do Embasamento Pré-cambriano no estado do Espírito Santo, afirmando assim poder refletir a reativação neotectônica de estruturas preexistentes, atestada pela continuidade de *trends* estruturais.

Sendo assim:

As orientações NNE-SW a NNE-SW, encontradas nos lineamentos e em campo, podem ser associadas a padrões de fraturamento caracterizados por falhas normais NE-SW, relacionados a um regime tectônico distensivo de orientação NW-SE, atribuído a uma idade holocênica (BRICALLI, 2011);

- o conjunto de lineamentos com orientação no quadrante NNW, encontradas nos lineamentos, se associa a padrões de fraturamento caracterizados por falhas normais NW-SE, sendo menos comuns falhas sinistrais NNW-SSE, ambas relacionadas ao regime de transcorrência dextral E-W (BRICALLI, 2011);

- os lineamentos E-W, presentes em campo, podem ser associados a falhas dextrais com aproximadamente esta orientação, também relacionadas ao regime de transcorrência dextral E-W (BRICALLI, 2011).

Os resultados obtidos, especialmente nos radargramas da Pedra da Cebola, confirmam a importância dos mecanismos neotectônicos na estruturação da margem continental brasileira, como vem sendo discutido por diferentes autores (HASUI, 1990; SAADI, 1993; MELLO, 1997; BEZERRA *et al.*, 2001; FERRARI, 2001; RICCOMINI *et al.*, 2004; BRICALLI, 2011).

O método demonstrou uma fácil e rápida aplicação, destacando-se aqui uma otimização de tempo e custo para análise de material em subsuperfície.

O GPR apresentou algumas limitações como a presença de água em subsuperfície e a limitação quanto a profundidade observada nos radargramas que pode ser considerada rasa para materiais geológicos, essas mesmas limitações podem ser solucionadas com a realização de mais um tipo de método de aquisição de dado geofísicos e geológicos, por exemplo podemos citar sondagens e perfis de eletrorresistividade desde que respeitado as limitações do meio físico e do método escolhido.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradecimentos ao grupo LANESI (Laboratório de Neotectônica e Sismologia) e ao Programa de Pós-graduação em Geografia/UFES.

Referências

- BEZERRA, F. H. R. *Deformação tectônica na Formação Barreiras: exemplos das bacias Potiguar e Paraíba, Brasil*. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. 2011.
- BORGES, W. R. *Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletrorresistividade*. Revista Brasileira de Geofísica, v. 22, n. 1, p. 91-91, 2004.
- BRICALLI, L. L.; MELLO, C. L. 2011. *Padrões de lineamentos relacionados a litoestrutura e fraturamento neotectônico (Estado do Espírito Santo, SE do Brasil)*. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 14, n. 3, p. 301-311.

- CPRM, Serviço Geológico do Brasil. *Mapa geológico do estado do Espírito Santo*. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral, 2015.
- ESRI. ArcGIS® 10.1 - *ArcMap™ Tutorial*. 2012. Disponível em: <<http://webhelp.esri.com>>. Acesso em: 31 jul. 2017.
- FERRARI, A. L. *Evolução Tectônica do Graben da Guanabara*. 2001. 412p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade São Paulo, São Paulo, 2001.
- FURTADO, C. P. Q. et al. *Gpr–Processamento e Modelagem*. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica. 2010.
- GEOBASES- Sistema Integrado de Bases Georreferenciadas do estado do Espírito Santo (Geobases). Plano de Informações: limite estadual, localidades, hidrografia, rede viária. Fornecido pela unidade local do Departamento de Geografia (DGEP/UFES) em 2017.
- HAENI,F.P. *Evaluation of the continuous seismic-reflection method for determining the thickness and lithology of stratified drift in the glaciated northeast*, In: RANDALL, A.D.; JOHNSON, A.I. (Eds.) Regional aquifer systems of the United States – the northeast glacial aquifers. [S.l.] American Water Resources Association, 1988. (Monograph, 11)
- HASUI, Y. 1990. *Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil*. In: SBG/MG, WORKSHOP SOBRE NEOTECTÔNICA E SEDIMENTAÇÃO CENOZÓICA CONTINENTAL NO SUDESTE BRASILEIRO, 1, Belo Horizonte, Boletim SBG/MG, 11:11-31.
- HEILBRON, M. et al. *Província Mantiqueira. Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, p. 203-235, 2004.
- JOL, H. M. (Ed.). *Ground penetrating radar theory and applications*. elsevier, 2008.
- JOL, H. M.; BRISTOW, C. S. *GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide*. Geological Society, London, Special Publications, v. 211, n. 1, p. 9-27, 2003.
- LIU,C.C. 1984. *Análise Estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao estado do Rio de Janeiro*. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 157p.
- MACHADO FILHO, L.M; RIBEIRO, M.W; GONZALEZ, S.R; SCHENINI, C.A; NETO, A.S; PALMEIRA, R.C.B; PIRES, J.L; TEIXEIRA, W; CASTRO, H.E.F. *Geologia. Projeto Radam Brasil*. Folhas 23/24 Rio de Janeiro/Vitória .V 32. Rio de Janeiro, 1983.
- MACHADO, N.; SCHRANK, A.; NOCE, C.M.; GAUTHIER, G. 1996. *Ages of detrital zircon from ArcheanPaleoproterozoic sequences: Implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil*. Earth and Planetary Science Letters, 141:259-276.
- MELLO, C. L. *Sedimentação e tectônica cenozóica no Médio Vale do Rio Doce (MG, Sudeste do Brasil) e suas aplicações na evolução de um sistema de lagos*. 1997. 275p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.
- NEAL, A.; ROBERTS, C. L. *Applications of ground-penetrating radar (GPR) to sedimentological, geomorphological and geoarchaeological studies in coastal environments*. Geological Society, London, Special Publications, v. 175, n. 1, p. 139-171, 2000.
- PEDROSA-SOARES A.C. & WIEDEMAN-LEONARDOS C. 2000. *Evolution of the Araçuaí belt and the connection to the Ribeira belt, eastern Brazil*. In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho & D.A. Campos (eds.) Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro, Brazil, pp.: 265-285.
- PEDROSA-SOARES, A. C. et al. *Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977*. Revista Geonomos, v. 15, n. 1, 2013.

-
- PORSANI, J. L. *Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP*. 1999. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 30.03. 99.
- REUTER, H. I, et al. 2007. *An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data*. International Journal of Geographic Information Science, v. 21, n. 9, p. 983-1008, 2007.
- RICCOMINI, C. et al., 2004. *Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil*. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R; BRITO NEVES, B.B. (orgs.). *Geologia do Continente Sul- Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p.383-405.
- ROCHA, T. B. *A planície costeira meridional do complexo deltáico do rio Paraíba do Sul (RJ): arquitetura deposicional e evolução da paisagem durante o Quaternário Tardio*. 2013. Tese de Doutorado. Instituto Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 178p.
- SAADI, A. 1993. *Neotectônica da plataforma brasileira: esboço e interpretação preliminares*. Geonomos, 1(1):1-15.
- XAVIER NETO, P. *Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR: aplicações no imageamento de feições cársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém-CE*. 2006.
- TUPINAMBÁ, M. et al. *Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí*. Revista Geonomos, v. 15, n. 1, 2013.