

João Batista Cabral dos Santos Junior

**ESTRATIGRAFIA DE GEORADAR (GPR) E EVOLUÇÃO DE RAMPA
COLUVIAL DURANTE O ÚLTIMO MÁXIMO GLACIAL (UMG) –
CERRO DO TOURO, JARAGUÁ DO SUL -SC**

Florianópolis

2019



João Batista Cabral dos Santos Junior

**ESTRATIGRAFIA DE GEORADAR (GPR) E EVOLUÇÃO DE RAMPA
COLUVIAL DURANTE O ÚLTIMO MÁXIMO GLACIAL (UMG) –
CERRO DO TOURO, JARAGUÁ DO SUL -SC**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Programa de Graduação em Geografia do Centro de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito a obtenção do Título de Bacharel em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Accioly Teixeira de Oliveira.

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geografia, Florianópolis, 2019.

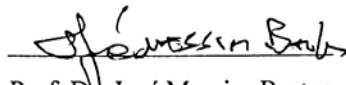
Inclui referências. 1. Geografia. 2. Geomorfologia do Quaternário. 3. Estratigrafia. 4. Mudanças climáticas globais. 5. Evolução da paisagem. I. Accioly Teixeira de Oliveira, Marcelo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Geografia.

João Batista Cabral dos Santos Junior

**ESTRATIGRAFIA DE GEORADAR (GPR) E EVOLUÇÃO DE RAMPA
COLUVIAL DURANTE O ÚLTIMO MÁXIMO GLACIAL (UMG) –
CERRO DO TOURO, JARAGUÁ DO SUL -SC**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Geografia” e aprovado em sua forma final pelo curso de Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 30 de Julho de 2019.

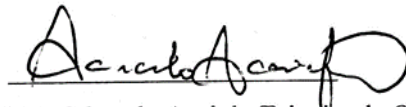


Prof. Dr. José Messias Bastos

Coordenador do Curso

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

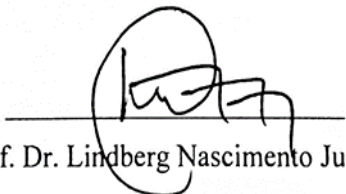
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Marcelo Accioly Teixeira de Oliveira

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC



Prof. Dr. Lindberg Nascimento Junior

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC



Me. Maikon Passos Amilton Alves

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de corpo e alma à minha mãe índia Iracema (In memoriam), que sempre me apoiou em todos os momentos da vida, mesmo após sua fase terrena.

Ao meu orientador, Professor Dr. Marcelo Accioly Teixeira de Oliveira, pelos valiosos conhecimentos transmitidos, discussões e oportunidades oferecidas.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Geodinâmica Superficial (LAGES), por toda ajuda nas etapas de campo e laboratório. Aos irmãos que fiz durante a graduação, pelas trocas de ideias, pelas cervejas de cada semestre e pela parceria que vou levar por toda vida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que por meio do projeto estudos de caso associados a cambissolos e neossolos em ambientes altimontanos e planálticos brasileiros, viabilizaram o auxílio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho no que toca as datações radiométricas utilizadas.

A professora Dra. Ângela Beltrame, coordenadora do laboratório de Pedologia do departamento de Geociências da UFSC, pela autorização concedida para a realização das análises granulométricas.

Ao colega Márcio, pelas providenciais contribuições referentes a elaboração dos Mapas.

Ao irmão e sócio Giordano Palla Kennick pelo auxílio com as traduções da língua inglesa.

A minha companheira Rosana Dalla Brida, e a toda família pelo apoio e confiança depositados.

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pela infraestrutura e apoio institucional.

E aos membros da banca, professor Dr. Lindberg Nascimento Junior e o Me. Maikon Alves Passos, pela paciência e o tempo dedicado para a avaliação deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta as contribuições do método georadar (GPR) quando aplicado ao estudo de estratigrafia rasa, integrando análises geocronológica e estratigráfica que possibilita a compreensão de mecanismos e variáveis ambientais locais, associadas às mudanças climáticas globais ocorridas no período geológico do quaternário. O estudo focou na investigação dos fatores ambientais passíveis de gerar registros estratigráficos, sedimentológicos, geocronológicos, geoquímicos, etc., envolvendo escalas variadas, mas que permitam estabelecer relações com a evolução das formas de relevo. Na área específica de estudo, localidade conhecida como Cerro do Touro, em zona rural do município de Jaraguá do Sul-SC, resultados anteriores de caráter geomorfológico, micromorfológico, sedimentológico, isotópico, palinológico e geocronológicos demonstraram a ocorrência de registros quaternários situados em ambiente de transição entre cabeceiras de vale e vales fluviais. Esse registro é relativamente rico em termos de evidências paleoambientais, e tem fornecido subsídios aos estudos do Quaternário continental no Brasil e América do sul. O recorte geográfico, assim, implicou desenvolvimento de trabalho em área planáltica, na borda interior leste da Serra do Mar. O estudo associa metodologias derivadas da estratigrafia e da sedimentologia tradicionais com metodologia de prospecção geofísica rasa GPR (*Ground Penetrating Radar*). Buscou-se avaliar a aplicabilidade do método GPR para a identificação da arquitetura deposicional de depósitos coluviais e paleossolos quaternários no local estudado. Para tanto, foram analisadas, seção estratigráfica sistemática em corte aparente de estrada, e seções construídas através de sondagens manuais ao longo de toposequências, abarcando a transição entre média e baixa encosta. Amostras variadas foram coletadas permitindo a descrição de propriedades físicas dos sedimentos, bem como a datação (C^{14}) de materiais com proporção significativa de matéria orgânica. O levantamento com Georadar (GPR), foi realizado com antena blindada monoestática de 200 MHz, utilizando-se o método de aquisição de dados por caminhamento contínuo, registrado em espaçamento fixo pré-definido (common offset survey), alcançando profundidades de prospecção de até 7 metros a baixo da superfície. O perfil GPR seguiu linha de prospecção buscando o reconhecimento de sinal eletromagnético passível de associação com as estruturas sedimentares observadas em superfície. A metodologia empregada visa, portanto, associar o registro empírico, de caráter estratigráfico amplo (litoestratigráfico, pedoestratigráfico e aloestratigráfico) com sinal GPR, possibilitando a definição de unidades aloestratigráficas no subsolo. Os procedimentos e análises adotados no trabalho, complementam os estudos de estratigrafia e de geocronologia já desenvolvidos na área investigada, indicando mudanças ambientais locais que coincidem com eventos climáticos relacionados ao último ciclo glacial e à transição climática para o Holoceno.

Palavras-chave: Quaternário; Estratigrafia; GPR.

ABSTRACT

This study brings contributions of the Ground Penetration Radar (GPR) when applied to the shallow stratigraphy, integrating geochronological and stratigraphy reviews which enables the understanding of the mechanism and local environmental variables, associated to the global climate changes that happened in the geological period of quaternary and also to the distribution of the living beings on earth. This study sought focus in the investigation of environmental factors that could generate stratigraphic, sedimentological, geochronological, geochemical records, involving varying scales, but allowing establish relation with the relief forms evolution. In the specific area of study, situated in the volcano-sedimentary basin of Campo Alegre, previous results of geomorphological, micromorphological, sedimentological, isotopic, palynological and geochronological studies demonstrate the occurrence of quaternary records situated in a transitional environment between valley headwaters and river valleys. This record is relatively rich in terms of paleoenvironmental evidences, and has provided subsidies to the study of continental Quaternary in Brazil and South America. The geographic cut, therefore, helped the work development in planal area located on the inside edge, east of Serra do Mar, in the state of Santa Catarina. The locality is known as Cerro do Touro and is located in the countryside of Jaraguá do Sul County. The study associates methodologies derived from traditional stratigraphy and sedimentology with the geophysics methodology GPR. Evaluating the applicability of the method GPR for the identification of colluvial and quaternary paleosol deposit, originating the depositional architecture in the study site. Stratigraphics were analyzed in apparent road sections, also made through manual probes along toposequences, covering the transition between medium and low slope. Different samples were collected, allowing the description of physical properties of the sediments, as well as the dating (C^{14}) materials with significant proportion of organic matter (buried paleosol). The capture of data made with GPR was performed with 200 MHz monostatic shielded antenna using the data acquisition method of continuous walking, registered in common offset survey, reaching depths of up to 9 meters below the surface. The GPR profile followed prospecting line with parallel walking until the stratigraphic section in the valley headwaters, looking for similarity on the sedimentary structures observed on surface. The methodology used aims to associate the empirical record of broad stratigraphic character (lithostratigraphic, pedostratigraphic and alostratigraphic) with the GPR signal, allowing the definition of alostratigraphic units in the subsoil. The procedures adopted at the work complement the stratigraphic and geochronological studies already developed in the area investigated, indicating local environment changes that coincide with climatic events related to the last glacial cycle and the climatic transition to the Holocene.

Keywords: *Quaternary* 1. *Stratigraphy* 2. GPR 3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Localização da área de estudos.....	18
Figura 02 – Recorte geográfico.....	19
Figura 03 – Mapa Litoestratigráfico da Bacia de Campo Alegre.....	22
Figura 04 – Sistema operacional do GPR.....	25
Figura 05 – Exemplo de aquisição de dados pelo método perfil de reflexão.....	31
Figura 06 – Técnicas de aquisição de dados eletromagnéticos.....	32
Figura 07 – Frequências de antenas GPR e suas aplicações	33
Figura 08 – Mapa de Localização da Seções stratigráficas e Linha de prospecção GPR.....	34
Figura 09 – Diagrama de Flemming.....	36
Figura 10 – Diagrama de Folk.....	36
Figura 11 – Estágio Isotópicos Marinhos.....	38
Figura 12 – Arranjo das antenas no método de caminamento contínuo.....	40
Figura 13 – Parâmetros adotados na análise dos refletores identificados.....	43
Figura 14 – Datações com a geocronologia dos paleossolos estudados.....	44
Figura 15 – Seção esquemática de superfície, elaborada em corte de estrada.....	45
Figura 16 – Perspectiva das análises de campo na seção elaborada em corte de estrada.....	46
Figura 17 – Amostras plotadas segundo diagrama de Flemming.....	47
Figura 18 – Amostras plotadas segundo diagrama de Folk.....	48
Figura 19 – Descrição de unidades stratigráficas na seção de corte em estrada (superfície)....	49
Figura 20 – Representação gráfica da Seção S1 elaborada a partir da sondagem Furo 1.....	51
Figura 21 – Representação gráfica da Seção S2 elaborada a partir da sondagem Furo 2.....	52
Figura 22 – Radargrama GPR interpretado sem correção topográfica.....	55
Figura 23 – Detalhe do radargrama GPR corrigido topograficamente e sondagem no P1.....	56
Figura 24 – Detalhe de radargrama GPR corrigido topograficamente e sondagem no P2.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Materiais em relação as constantes dielétricas utilizadas pelo GPR.....	30
Tabela 02 – Sequencia de processamento da imagem de radar.....	42
Tabela 03 – Datações obtidas para as amostras da Seção elaborada em corte de estrada.....	43
Tabela 04 – Datações obtidas para as amostras da Seção S1 elaborada em subperfície.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP – Antes do Presente

CFH – Centro de Filosofia e Ciências Humanas

EIM – Estagio Isotópico Marinho

EM – Eletromagnéticas

GCN – Departamento de Geociências da UFSC

Ka – Mil anos

LAGES – Laboratório de Geodinâmica Superficial

Ma – Milhões de anos

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UMG – Ultimo Máximo Glacial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	Objetivos.....	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS FISIAGRÁFICOS.....	18
3.1	Localização da área.....	18
3.2	Aspectos Fisiográficos.....	19
4	CONTEXTO GEOLÓGICO E REGISTROS QUATERNÁRIOS.....	20
4.1	Geologia regional.....	20
4.2	Bacias de Campo Alegre.....	21
4.3	Registros Quaternários.....	23
5	GPR (<i>GROUND PENETRATING RADAR</i>).....	24
5.1	Histórico	24
5.2	Sistema Georadar (GPR)	24
5.3	Princípios Físicos.....	26
5.3.1	Ondas eletromagnéticas	26
5.4	Equações Constitutivas	27
5.4.1	Condutividade elétrica (σ)	27
5.4.2	Permissividade dielétrica (ϵ).....	28
5.4.3	Permeabilidade magnética (μ)	28
5.5	Atenuação do sinal.....	29
5.6	Aquisição de dados	30
6	MATERIAIS E MÉTODOS	33
6.1	Estratigrafia do quaternário	34
6.2	Granulometria	35
6.3	Geocronologia.....	37
6.4	Aplicação do Georadar (GPR).....	39
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
7.1	Datações.....	43
7.2	Estratigrafia tradicional e Granulometria.....	45
7.3	Estratigrafia de Georadar (GPR).....	54

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS61

REFERÊNCIAS.....63

1 Introdução

O período geológico do Quaternário que abarca os últimos 2,5 milhões de anos da história da terra, faz parte da Era Cenozoica e está dividido nas épocas Pleistoceno (2,5 Ma até 11.000 atrás) e Holoceno (11.000 anos até os dias atuais). Esse período geológico está associado à intercalação de fases glaciais, com duração média de 100.000 anos, a fases interglaciais, com duração aproximada de 11.000 anos, definindo o ritmo das mudanças climáticas globais sobretudo no último milhão de anos. O Quaternário coincide ainda com o aparecimento de registros do gênero humano (*Homo*) na Terra.

Em função dessas características, trata-se de período geológico que está tradicionalmente associado ao conceito de mudanças climáticas globais e à emergência da humanidade (SUGUIO, 2005). Nas Américas, sobretudo, o período é associado também à interação entre seres humanos e animais de grande porte no final da última glaciação, conhecidos como megafauna Pleistocênica (Tigres dente de sabre, Tatus, Preguiças gigantes etc.), e que constituem espécies hoje extintas.

O padrão de mudanças ambientais, em ritmos de alternâncias bem definidos a partir do Pleistoceno Médio (~ 1Ma), resulta da interação de fenômenos astronômicos, geofísicos e geológicos, que têm causa principal na variação de parâmetros orbitais calculados e descritos pela teoria dos ciclos de Milankovitch. Esses ciclos implicam a variação da quantidade de radiação solar (ondas curtas) que atinge a superfície do nosso planeta nas altas latitudes do hemisfério norte, disparando mecanismos de retroalimentação que resultam em mudanças climáticas globais, levando o nosso planeta a oscilar entre fases Glaciais e Interglaciais.

Essas mudanças climáticas são responsáveis por alterações nas taxas de pedogênese e de morfogênese sobre os continentes; por alterações dos regimes fluviais, e pela modificação da distribuição espacial da fauna e da flora (MOURA & SILVA, 1998), afetando todo o globo terrestre, com efeitos notáveis mesmo em áreas que não são diretamente afetadas por geleiras, como nos trópicos e subtropicais úmidos.

Em áreas tropicais, os registros de mudanças climáticas quaternárias podem ser encontrados em cavernas; em depósitos de turfas, e em depósitos sedimentares coluviais, aluviais, lacustres e costeiros. Nos setores de maior continentalidade, o estudo de depósitos coluviais e aluviais vem sendo utilizado com êxito ao longo dos anos como indicadores de flutuações e mudanças climáticas (BIGARELLA et al., 1965a; MOURA, MEIS, 1986; THOMAS, 1994; THOMAS, THORP, 1995; NEMEC, KAZANCI, 1999), oferecendo de fato, possibilidades de compreensão não somente da dinâmica da evolução da paisagem (THOMAS & THORP, 1995), mas também dos mecanismos de interação entre as mudanças climáticas e a distribuição dos seres vivos no planeta.

Nos aproximando um pouco mais da área de estudos, trabalhos importantes com enfoque continental no Sul Brasil (como os de CAMARGO, 2005; OLIVEIRA et al., 2006; PAISANI, et al., 2008; LIMA, 2010), vêm comprovando como a interpretação estratigráfica associada a dados representativos (isotópicos e palinológicos, sobretudo) pode contribuir para um melhor entendimento em relação aos efeitos das mudanças climáticas ocorridas durante o Pleistoceno Superior e o Holoceno em terrenos subtropicais brasileiros.

Apesar da dificuldade imposta ao estudo de depósitos continentais quaternários, em função da sua natureza espacial descontínua e lacunar (SUGUIO, 1999), estes depósitos apresentam com frequência descontinuidades estratigráficas que possibilitam a definição de unidades deposicionais distintas, favorecendo a interpretação estratigráfica (MOURA, 1998).

Contudo, como ressaltado por Suguio (1999), a chamada estratigrafia tradicional baseada em litofácies e biofácies se aplica mal a esses depósitos. Nesse sentido, a estratigrafia tradicional foi complementada pelos avanços derivados da sismoestratigrafia (VAIL & MITCHUM, 1977), criada no contexto mais amplo da Geologia sedimentar, com destaque para a Estratigrafia de Sequências (MITCHUM et al., 1977; VAN WAGNER et al., 1990), a sequência Estratigráfica Genética (GALLOWAY, 1989) e para a Aloestratigrafia. Essa última, introduzida pelo Código Norte-Americano de Nomenclatura Estratigráfica, tem como objetivo identificar corpos estratiformes, mapeáveis, definidos com base em descontinuidades e capazes de individualizar sequências sedimentares em pacotes genéticos, separados entre si por superfícies de discordância (SUGUIO, 2004).

No Brasil, essa abordagem foi aplicada de forma pioneira por Moura e Meis (1986) para sistematizar os depósitos quaternários continentais do médio vale do Rio Paraíba do Sul, e culminaram na proposição da classificação aloestratigráfica para o Quaternário Superior da região em torno do município de Bananal, no estado de São Paulo (MOURA & MELLO, 1991). A metodologia está baseada na identificação de descontinuidades estratigráficas que podem estar associadas a superfícies erosivas e, ou, lacunas deposicionais, definindo a passagem entre unidades deposicionais distintas (LIMA, 2010).

A abordagem aloestratigráfica revela, portanto, alto grau de integração com a metodologia geofísica do GPR (Ground Penetrating Radar) ou Georadar (como é conhecido no Brasil), quando aplicada em meio estratigráfico, pois essa metodologia está fundamentada na detecção de descontinuidades no subsolo, capazes de gerar sinal eletromagnético. Como o sinal eletromagnético é gerado pela passagem dos pulsos por meios com características físicas distintas (tamanho do grão, composição mineralógica, fábrica, densidade aparente, teor de água, etc.), a detecção de sinal relativamente contínuo ao longo do espaço, gera os chamados refletores GPR, que estão associados à passagem entre unidades deposicionais distintas, definindo unidades de radar no contexto da chamada estratigrafia GPR (NEAL, 2000). O presente trabalho, buscou por tanto, integrar resultados associados a análise estratigráfica tradicional com a análise de dados geocronológicos e geofísicos (GPR) que, integrados de forma interdisciplinar pudessem auxiliar na interpretação paleoambiental da área investigada.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a aplicabilidade do Georadar (GPR) à caracterização estratigráfica de depósitos coluviais e de paleossolos do Pleistoceno Superior e Holoceno, na localidade de Cerro do Touro, Jaraguá do Sul-SC.

2.2 Objetivos Específicos

- Definir relações estratigráficas ao longo de rampa coluvial na localidade de Cerro do Touro;
- Caracterizar a granulometria dos depósitos estudados;
- Correlacionar a estratigrafia dos depósitos ao sinal obtido pela prospecção Georadar (GPR);
- Integrar registros estratigráficos, sedimentológicos e geocronológicos quaternários, visando a interpretação paleoambiental.

3 Localização e Aspectos Fisiográficos

3.1 Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada sob terreno planáltico, em zona subtropical sul-americana, na região norte do estado de Santa Catarina, sul do Brasil, entre as coordenadas 26°14' de latitude Sul e 49°13' de longitude Oeste. A localidade (Figura 01) se encontra em zona rural conhecida como Cerro do Touro, em trecho fronteiro entre os municípios de Jaraguá do Sul e Campo Alegre, e dista aproximadamente 250 km da capital catarinense, Florianópolis.

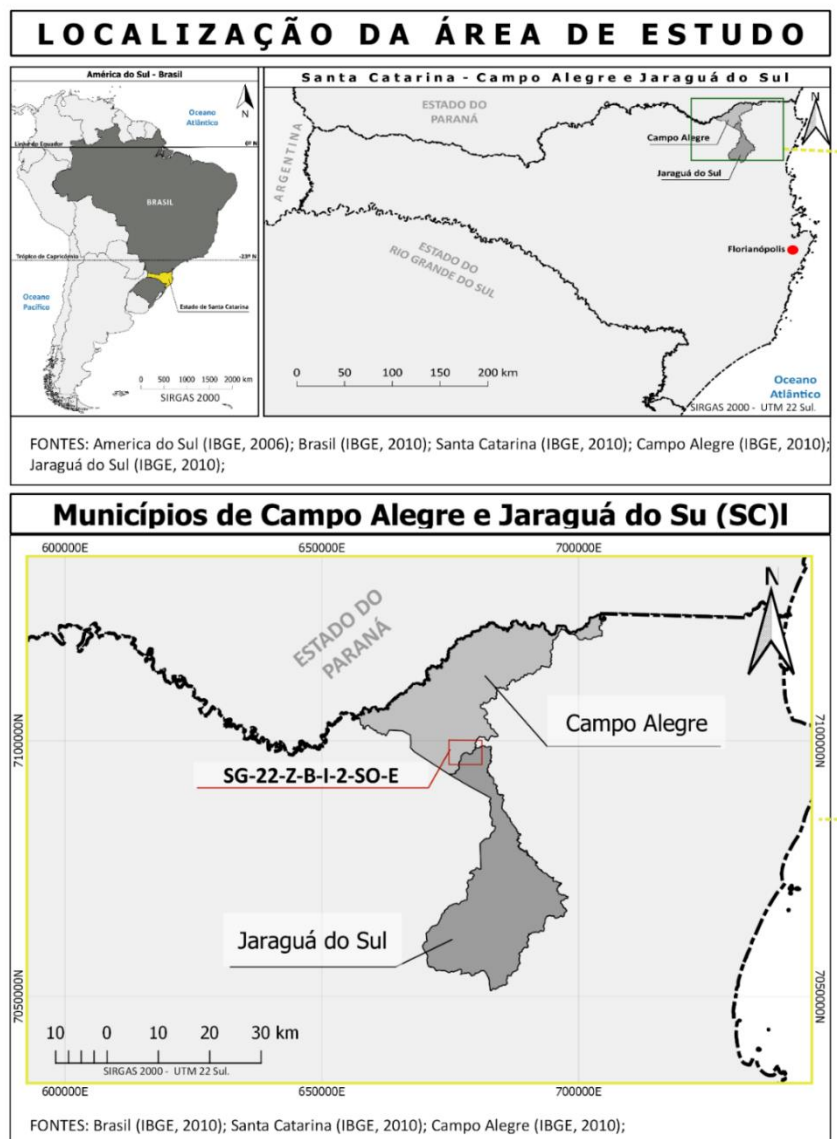


Figura 01: Localização da área de estudo. Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.2 Aspectos Fisiográficos

A área investigada compõe parte da borda interior leste da Serra do Mar (Figura 02), em região condicionada por variáveis ambientais típicas de planalto, porém aqui atreladas ao contexto evolutivo da bacia sedimentar de Campo Alegre. Localizada no extremo norte do Escudo Catarinense, sua geologia é constituída por sequência vulcano-sedimentar com cerca de 800 m de espessura (VALIATI,1974). O relevo é escalonado em compartimentos topográficos de origem estrutural, que são limitados por níveis de base locais, a montante de vales que ocorrem entulhados por aluviões e por rampas colúvias, revelando compartimentos individualizados em colinas, limitadas por vales bastante dissecados.

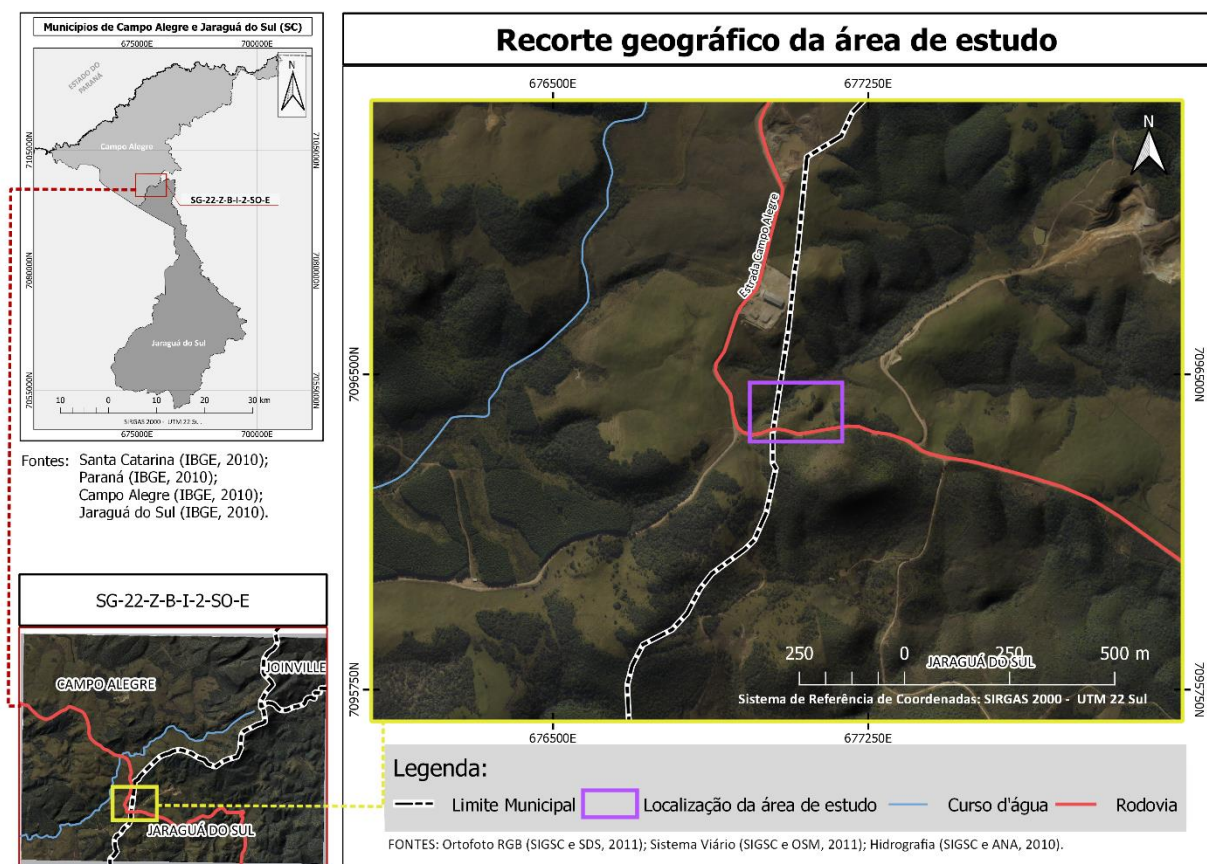


Figura 02: Recorte geográfico da área investigada. Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

As altitudes no planalto estão em torno de 850 a 950 m, atingindo 1046 m na área de estudo (SANTA CATARINA, 1986). O clima, segundo a classificação de Koppen é do tipo mesotérmico, úmido com verões frescos, em função da altitude. A temperatura média anual é de 16,4°C com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, com total anual que varia de 1600 a 1800 mm (SEPLAN, op.cit). Esse regime pluviométrico pode ser atribuído principalmente ao posicionamento geográfico da área, onde o movimento das massas de ar úmidas provenientes do oceano atlântico (a cerca de 66 km), são forçadas a acender pela barreira geográfica imposta pela Serra do Mar, provocando volumes importantes de chuva ao longo do ano.

A área está situada em zona de transição entre a floresta ombrófila mista e os campos de altitude, onde são encontradas matas galerias ao longo dos rios e capões nas depressões do terreno, formando ilhas no meio dos campos (DAITX & CARVALHO, 1980). Observa-se localmente a coexistência das floras tropical e temperada compondo a Floresta de Araucária (Floresta Ombrófila Mista), que recebe este nome devido ao papel importante que o pinheiro-do-Paraná, a araucária, desempenha na fisionomia florestal da área (SEPLAN, op.cit.).

4 Contexto Geológico e Registros Quaternários

4.1 Geologia regional

Existem inúmeras propostas para os modelos geológicos da região entre o setor sudeste paranaense e nordeste catarinense exemplificados por diversas denominações geotectônicas envolvendo total ou parcialmente esta porção do escudo brasileiro. Assim como adotado anteriormente por Basei et al (1992), neste trabalho serão mantidos os contornos propostos por Hasui et.al (1975) denominando a região de Maciço de Joinville. Para Hasui et al (1975), os terrenos granito-gnáissicos da região, tiveram sua evolução tectônica condicionada pela interação entre três entidades tectônicas distintas, através de sucessivas subducções, seguidas de colisões continentais. Estes eventos teriam ocorrido entre o Proterozóico superior e o Cambriano como parte de um processo maior, relacionado à constituição da porção oeste do supercontinente Gondwana.

As unidades geotectônicas separadas entre si por importantes zonas de cisalhamento, estão representadas pelas Microplacas Curitiba e Luís Alves, nos domínios norte e sul respectivamente, e na porção litorânea pelo Cinturão Granitóide Costeiro. Nesse contexto, enquanto a colisão das placas Curitiba e Luís Alves teria se dado a partir do fechamento completo de um oceano existente entre elas a cerca de 610 Ma (AP), a justaposição do domínio costeiro parece ter ocorrido mais tardiamente. Os valores de idades e a assinatura isotópica desse terreno o diferencia claramente dos demais e sugere sua evolução a partir do retrabalhamento de rochas crustais no intervalo entre 600-550 Ma (fim do período Neoproterozóico, início do Cambriano).

Ao final do Neoproterozóico essa porção do escudo catarinense é marcada pelo desenvolvimento de sequências sedimentares associadas a rochas vulcânicas confinadas às bacias de Itajaí, de Campo Alegre e ao graben de Corupá. Nestas áreas foram depositadas sequências vulcano-sedimentares que possuem diferentes proporções entre as rochas sedimentares e vulcânicas com características estruturais e estratigráficas distintas (WAICHEL,1998). Nesse trabalho é dada atenção ao contexto evolutivo da Bacia de Campo Alegre, uma vez que a área investigada está restrita a ela.

4.2 Bacia de Campo Alegre

A bacia de Campo Alegre, foi mapeada por Daitx (1980) e teve sua geologia revista por Silva (1987), durante a elaboração do Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina na escala 1:500.000, por Citroni (1998) e Biondi (2001). De acordo com a literatura consultada, a bacia vulcano-sedimentar de Campo Alegre é composta essencialmente por vulcanitos ácidos e sedimentos vulcanogênicos derivados. Possui pacote de origem vulcânica bem preservado, formado por rochas básicas (em menor proporção), e por rochas traquíticas e riolíticas intercaladas com sedimentos vulcânoclásticos. Suas rochas vulcânicas foram datadas pelo método absoluto Rb-Sr em 536 Ma AP (CITRONI, 1998). A Campo alegre portanto, é classificada quanto a sua gênese, como uma bacia tardi-orogênica associada aos últimos eventos colisionais identificados na região.

As unidades litoestratigráficas (Figura 03) estão presentes no que foi denominado por Ebert (1971) como Grupo Guaratubinha, e dividido nas Formações; Bateias, Campo Alegre e Rio Turvo. A formação Bateias é constituída por litofácies de conglomerados polimíticos, sobrepostos por litofácies de ignimbritos. Quanto as rochas da formação Campo Alegre, estas foram separadas em duas sequencias: basal e superior para melhor compreensão de suas caraterísticas distintas (BIONDI et al, 2001).

A sequência basal contém conglomerados e arcósios intercalados com lavas traquíticas (predominantes), andesíticas e básicas (menos frequentes), enquanto a sequência superior é constituída por rochas associadas à segunda fase vulcânica, predominantemente riolítica alcalina, com menor proporção de traquitos. Essa fase possui caráter explosivo, como demonstrado através da ocorrência de brechas e tufos ácidos com lavas subordinadas.

Unidades Litoestratigráficas da Bacia de Campo Alegre

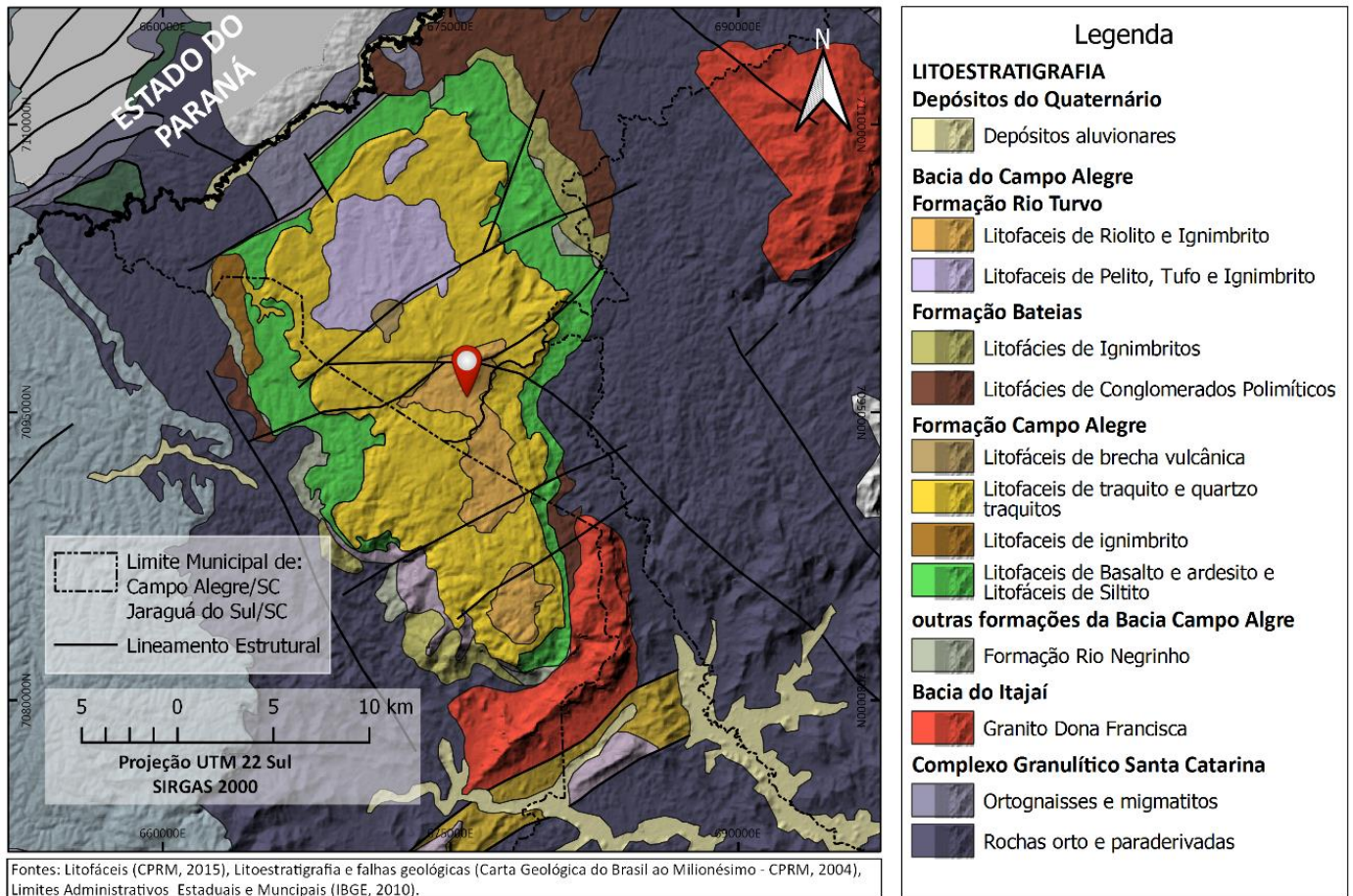


Figura 03: Mapa litoestratigráfico da bacia de Campo Alegre. Fonte: Adaptado de Projeto Baneo – Metalogenia de bacias Neoproterozoico-Eopaleozoicas CPRM (2015).

A maior parte do vulcanismo identificado na bacia parece ter sido linear, com saídas vulcânicas associadas aos principais lineamentos estruturais identificados com orientações nos sentidos; EW, NE e NS. Na área de estudos, ao Sul da bacia de Campo Alegre, as fases de vulcanismo e sedimentação estão associadas as rochas da formação Rio Turvo, composta por litofácies de pelitos, tufos, ignimbritos e siltitos, intercalados com riolitos e ignimbritos (EBERT,1971; DAITX,1980).

Estudos geológicos e geoquímicos (WAICHEL, 1998) já realizados na bacia, indicam que durante as fases vulcânicas as rochas foram alteradas por fluidos quentes de origem profunda (hidrotermais) e por fluidos superficiais meteóricos. Ao final das fases de vulcanismo, a parte norte da bacia Campo Alegre foi coberta por sedimentos clásticos interpretados como depositados em um lago formado por caldeira vulcânica (CITRONI 1998, BIONDI et al.2001). De acordo com a literatura consultada, uma vez preenchida a bacia de Campo Alegre, as suas rochas de cobertura teriam sido expostas por cerca de 260-300 Ma, até o início do período Permiano, quando a região foi recoberta pelo mar, propiciando o início da deposição dos sedimentos arenosos do grupo Itararé, da Bacia do Paraná. Entretanto, assim como ressaltado por Biondi et al (2001), é muito difícil avaliar quanto foi erodido antes da deposição do Itararé e quais as modificações intempéricas e

estruturais causadas nas rochas da Campo Alegre durante o período de cerca de 300 Ma AP. Contudo, fica evidente que houve consequências, visto que, após novamente expostas, as rochas vulcânicas seriam submetidas ainda a diversos processos, dentre eles seguidos ciclos de intemperismo e de erosão, glaciais e interglaciais, até adquirirem a conformação e a composição da superfície atual.

4.3 Registros Quaternários

Os registros quaternários representativos, principalmente continentais, em áreas tropicais e subtropicais (como em Campo Alegre), são difíceis de serem encontrados e, de forma geral, têm baixa resolução para análise cronoestratigráfica. Diante disso, a identificação de áreas capazes de reter e preservar sedimentos ao longo do tempo é fundamental (VELDKAMP & TEBBENS, 2001). Na busca por estes locais, as chamadas áreas de “cabeceira de vale” vêm sendo apontadas como privilegiadas no interior das bacias hidrográficas, pois exibem elevado potencial de geração e preservação de registro sedimentar quaternário (MOURA & MEIS, 1986; DIETRICH & DORN, 1984; DIETRICH & DUNNE, 1993; OLIVEIRA et. al., 2001c).

Estudos de caráter interdisciplinar e multiescalares, realizados, principalmente, a partir de 1996 em áreas planálticas do Paraná e de Santa Catarina pelo do grupo de pesquisas “Superfícies Geomorfológicas, Paleoidrologia e Processos Atuais” (Diretório 5, CNPq), têm comprovado o potencial das cabeceiras de vale, revelando nelas rico registro sedimentar e paleo-pedológico quaternário (CAMARGO & OLIVEIRA, 1998; PAISANI & OLIVEIRA, 1998; OLIVEIRA & PEREIRA, 1998; OLIVEIRA et. al., 2001a; OLIVEIRA et al., 2001b, OLIVEIRA et. al., 2001c, LIMA, 2005 e LIMA,2010).

Na bacia de Campo alegre inclusive, resultados de caráter geomorfológico, micromorfológico, sedimentológico, isotópico, palinológico e geocronológico já demonstraram a ocorrência de importantes registros quaternários situados em ambiente de transição entre cabeceiras de vale e vales fluviais. De forma geral, essas unidades do relevo se distribuem em função da dinâmica pretérita das bacias hidrográficas, e são indicadoras de formações superficiais úteis para a reconstrução da história natural (erosiva e deposicional) do ambiente no qual estão inseridas (MOURA e SILVA, 1998).

Especificamente na área de estudos, localidade Cerro do Touro em Jaraguá do Sul-SC, os registros estão representados por depósitos sedimentares que desenvolveram feições interpretadas como rampas coluviais e por paleossolos (enterrados ou não). Ainda segundo Moura e Silva (1998), essas áreas de colinas desenvolvem tais feições por estarem posicionadas em ambiente de articulação entre encosta e a calha fluvial. Os registros investigados até aqui na área de estudo, indicam portanto, valiosas evidências paleoambientais que fornecem importante subsídio aos estudos do Quaternário continental no sul do Brasil, e América do sul.

5 GPR (*GROUND PENETRATING RADAR*)

5.1 Histórico

A idealização e posterior aplicação dos métodos eletromagnéticos, dentre eles o GPR ou georadar como é conhecido no Brasil, remetem à formulação da base teórica do eletromagnetismo clássico por Maxwell em 1864 (PORSANI, 2004a), a qual será melhor descrita no item 5.3.1 deste capítulo. Contudo, historicamente o primeiro registro da utilização de ondas eletromagnéticas (EM) para a localização de objetos enterrados, teria sido feita através de uma patente alemã em 1910 (DANIELS, 1996). No caso citado, foi aplicada uma técnica bastante alternativa (na época), onde as antenas foram montadas separadamente sobre a superfície, visando identificar a reflexão de uma interface em subsuperfície, gerada, provavelmente, por um lençol d'água ou depósito mineral. No entanto, o método avançou rapidamente e, com algumas modificações, em 1929 já era realizado com êxito (no Ártico) o primeiro levantamento GPR para a determinação da espessura de uma geleira (STERN, 1929, OLHOEFT, 1996).

Inicialmente quase que restrito ao uso militar, com aplicações inclusive no programa espacial estadunidense (a partir da década de 1972), o GPR teve o seu lançamento no mercado através da criação da empresa norte americana GSSI (*Geophysical Survey System Inc.*) (MOREY, 1974). Com isso, houve a diminuição dos custos de aquisição dos equipamentos e os trabalhos utilizando GPR cresceram consideravelmente. Com um modelo mais comercial, e menos complicações logísticas em relação à sísmica convencional, o GPR vem sendo atualmente utilizado nas mais variadas áreas do conhecimento como; geologia (JOL; SMITH, 1995), geotecnia (DAVIS; ANNAN, 1989), planejamento urbano (DANIELS, 1989), geologia ambiental (PORSANI et al., 2004a) e exploração mineral (TRAVASSOS; MENEZES, 2005). Na geofísica atual, os métodos de investigação eletromagnéticos podem ser divididos em dois grandes grupos. O primeiro compreende todos os métodos que trabalham com antenas de baixa frequência, ou seja, < 1000Hz, sendo aplicados a estudos em escalas mais profundas, e um segundo grupo que abrange os métodos baseados em altas frequências (10 MHz a 2,5 GHz), destinados a estudos rasos, onde se enquadra o método GPR. No Brasil, os trabalhos envolvendo a reflexão GPR foram realizados de forma pioneira pelo Centro de Pesquisas da Petrobrás (PORSANI et al., 1994a, 1994b; PORSANI, RODRIGUES, 1995) com excelentes resultados. Atualmente é possível encontrar trabalhos relacionados em diversas instituições de pesquisa e universidades federais pelo país (BORGES, 2002).

5.2 Sistema Georadar (GPR)

O sistema GPR é composto basicamente por um módulo eletrônico transmissor (antena Tx), gerando e enviando pulsos EM de curta duração e alta frequência em direção a subsuperfície e um outro receptor (antena Rx), o qual recebe a resposta (sinal) e envia para a unidade de controle central onde são gerados e armazenados os dados (radargramas) em disco rígido. As antenas transmissoras (Tx) e receptoras (Rx) podem ser blindadas ou não em relação as interferências externas. O sistema (Figura 04) ainda conta com; odômetro,

instrumento usado para medir a distância percorrida ao longo do perfil de aquisição, e cabos de fibra óptica, usados para conectar os módulos eletrônicos à unidade de controle central.

1 A.

1 C.



1 B.

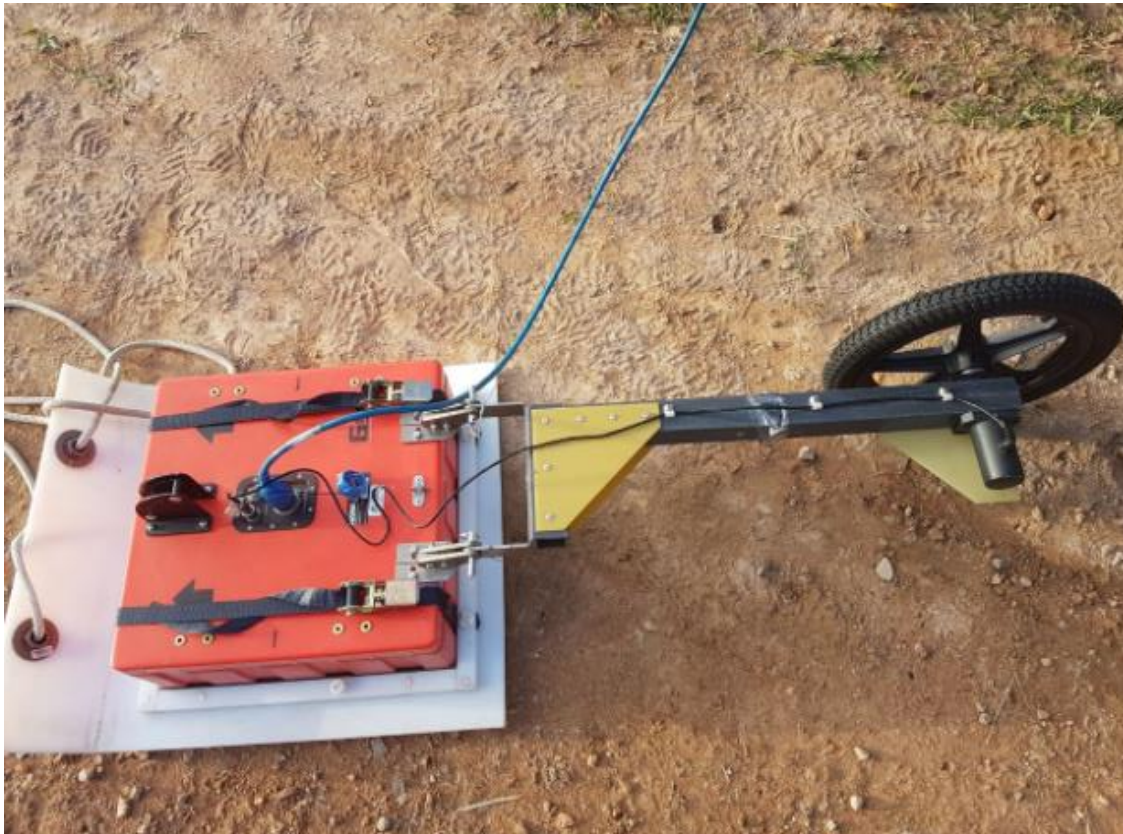


Figura 04: Sistema GPR; **4 A** – Controladora; **4 B** – Conjunto de antenas (Rx e Tx) de 200 Mhz; **4 C** – Sistema montado com odômetro acoplado e conexões a partir de cabeamento em fibra óptica. Fonte: Acervo do autor (2018).

O equipamento GPR trabalha registrando contrastes de impedância eletromagnética entre os materiais imageados, e consiste na geração, transmissão, propagação, reflexão e recepção de pulsos eletromagnéticos de alta frequência (10 MHz a 2,5 GHz). Esses pulsos de curta duração e alta voltagem, ao serem emitidos

pela antena transmissora (Tx) em direção a subsuperfície, interagem com a composição do material encontrado e são refletidos de volta a superfície, sendo registrados pela antena receptora (Rx). O módulo receptor por sua vez, amplia e converte os pulsos em dados digitais que são visualizados em tempo real na controladora (ANNAN, 2004; NEAL, 2004). Nesse contexto, portanto, a composição dos materiais imageados interfere significativamente na propagação das ondas EM e na resposta (sinal) GPR, sobretudo quando temos a presença de água, certa porosidade, e proporção significativa da fração argila.

5.3 Princípios Físicos

Durante a irradiação dos pulsos eletromagnéticos gerados pela antena transmissora do GPR, vários fenômenos ondulatórios ocorrem, entre eles, a propagação, a transmissão e a reflexão do sinal. A ocorrência desses fenômenos é regida por fatores relacionados as propriedades elétricas do solo, a condutividade elétrica, a permeabilidade magnética, a permissividade dielétrica, a impedância elétrica, a frequência do pulso, o conteúdo de água presente no meio, e a geometria das estruturas imageadas em subsuperfície (PORSANI, 2004). Assim como já ressaltado por Dagallier et al. (2000), as três propriedades elétricas do solo (condutividade, permeabilidade e permissividade) juntamente com a frequência do pulso emitido, determinam a profundidade de investigação em subsuperfície. Dessa maneira, o entendimento dos fenômenos durante a propagação das ondas EM no meio e a sua consequente interação com as estruturas em subsuperfície é vital para a correta aplicação do método e interpretação dos dados adquiridos (PORSANI, 2004, NEAL 2004, ANNAN, 2004). Sendo assim, torna-se necessário também, certa compreensão acerca da teoria eletromagnética clássica de Maxwell, bem como das propriedades constitutivas do meio.

5.3.1 Ondas eletromagnéticas

Os princípios eletromagnéticos são embasados pelas equações de Maxwell, as quais descrevem matematicamente a interação entre campos elétricos/magnéticos, e as propriedades constitutivas do meio; a condutividade elétrica, a permissividade dielétrica e a permeabilidade magnética (ANNAN, 2004). A partir da interação dessas propriedades, é possível determinar a velocidade de propagação da onda, o comprimento da onda no meio atravessado e a atenuação da energia (sinal GPR) durante a sua trajetória (RODRIGUES, 2009).

No eletromagnetismo clássico, a geração e a propagação de campos e ondas eletromagnéticas (campos elétricos e magnéticos acoplados), são descritas através de quatro leis físico-matemáticas (PORSANI, 2004) enumeradas a seguir: **I**) Lei de Gauss: descreve carga e o campo elétrico em uma região do espaço (Eq.1); **II**) Lei de Gauss para o magnetismo: descreve o campo em uma superfície fechada, definindo-o como nulo (Eq.2); **III**) Lei da indução de Faraday: descreve o efeito elétrico de um campo magnético variável (Eq.3); **IV**) Lei de Ampère generalizada por Maxwell: descreve o efeito magnético de uma corrente ou um campo elétrico variável (Eq.4).

Lei de Gauss	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = q$
Lei de Gauss para o magnetismo	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Lei da indução de Faraday	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Lei de Ampère - Maxwell	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

Onde:

\vec{D}	Deslocamento do campo elétrico em C/m ² .
q	Densidade da carga elétrica em C/m ³ .
\vec{B}	Indução magnética em Wb/m ² ou Tesla.
\vec{E}	Intensidade do campo elétrico em V/m.
\vec{H}	Intensidade do campo magnético em A/m.
\vec{j}	Densidade de corrente elétrica introduzida por Maxwell em A/m ² .
$\vec{\nabla} \cdot$	É o divergente (operação matemática sobre um vetor) do campo vetorial em 1/m.
$\vec{\nabla} \times$	É o divergente rotacional do campo vetorial em 1/m.

A unificação das leis dos campos elétrico e magnético, através das equações de Maxwell, gerou a previsão teórica da existência de ondas eletromagnéticas. Essas ondas (EM) carregam energia, ou quantidade de movimento, de um ponto do espaço para outro através da interação entre os campos elétrico e magnético. Dessa forma, as ondas eletromagnéticas (EM) constituem o fundamento básico para o funcionamento do equipamento GPR, que gera pulsos de ondas EM e registra o sinal emitido pela interação entre esses pulsos e os objetos no espaço.

5.4 Equações Constitutivas

Para aplicação de métodos geofísicos eletromagnéticos, como o GPR, é necessário associar as equações descritas acima com as equações constitutivas do meio, tendo em vista que as primeiras não fornecem características físicas dos materiais. Assim como observado por Annan (2004), em escala macroscópica, através de tais equações é possível quantificar as propriedades físicas dos materiais, e descrever o comportamento dos mesmos diante de um campo eletromagnético.

5.4.1 Condutividade elétrica (σ)

A primeira equação constitutiva relaciona a densidade da corrente elétrica (J) ao campo elétrico (\vec{E}), por meio da condutividade elétrica (σ) que é a propriedade física que expressa a capacidade de um material em transmitir corrente elétrica ou, de acordo com a lei de Ohm, expressa a facilidade com que a corrente elétrica atravessa um meio material.

$$J = \sigma \vec{E} \quad (\text{Eq. 2})$$

(σ) - Expressa em Siemens/metro (S/m).

Assim como já descrito por Keller (1988), vários fatores contribuem para a variação da condutividade; quantidade de água, porosidade, concentração de sais dissolvidos, argilas e minerais condutivos. O aumento de condutividade portanto, está intrinsecamente ligado à atenuação do sinal eletromagnético (PORSANI, 2004), pois ao ser conduzida a corrente não gera sinal refletido.

5.4.2 Permissividade dielétrica (ϵ)

A segunda propriedade física do meio é a permissividade dielétrica (ϵ), que expressa a capacidade de um material em armazenar cargas elétricas, ou de resistir à condução da carga. Essa propriedade é definida pela segunda equação constitutiva, que relaciona a intensidade do campo elétrico (\vec{E}) à corrente de deslocamento ou à polarização (\vec{D}) dos materiais. Nos estudos envolvendo reflexão GPR, utiliza-se a permissividade dielétrica relativa (ϵ_r), conhecida também como constante dielétrica, que relaciona a permissividade dielétrica do material com a permissividade dielétrica do vácuo (ϵ_0), dada pela terceira equação (Eq. 3). A permissividade pode variar dependendo do tipo de material e da frequência central da antena utilizada. Essa é a propriedade fundamental para a operacionalização da metodologia GPR, pois a maioria dos materiais naturais são dielétricos (parcialmente condutivos e parcialmente resistivos).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

(ϵ): É a permissividade dielétrica (F/m).

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Onde (ϵ_0) é igual a $8,85 \times 10^{-12}$ F/m.

5.4.3 Permeabilidade magnética (μ)

A terceira propriedade física do meio é a constante de permeabilidade magnética (μ), a qual mensura a capacidade de um material em polarizar quando submetido a um campo magnético, ou ainda, a capacidade que um meio tem em armazenar campo magnético. Esta propriedade é definida pela terceira equação constitutiva que relaciona a força do campo magnético (\vec{H}) com a indução magnética (\vec{B}).

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{Eq. 5})$$

(μ) - Medida em Henry/metro (H/m).

Assim como ocorre com a permissividade dielétrica, a permeabilidade magnética também é uma quantidade que expressa o acúmulo de energia. Contudo, a energia acumulada é proveniente da indução magnética, e tem como importante característica o fato de praticamente não variar com a frequência

empregada. Desse modo, a variação entre a permeabilidade magnética do meio e a do espaço livre não é significativa (OLHOEFT, 1981; KELLER, 1987).

5.5 Atenuação do sinal

O pulso eletromagnético induzido pela antena GPR, se propaga pelo meio reagindo de acordo com as variações nas propriedades dielétricas dos materiais imageados. Dessa interação pode resultar forte impedância elétrica em interfaces de separação entre eles, determinando assim qual a magnitude do sinal que será refletido e a quantidade de energia que será absorvida e, ou, dispersa pelo meio.

Em suma, a perda ou atenuação do sinal eletromagnético ocorre por dispersão geométrica da frente de onda, que aumenta a sua área a medida em que o pulso (sinal) se afasta da sua fonte emissora, e varia de acordo com a frequência central da antena utilizada. Dessa forma, em estudos envolvendo a metodologia GPR (assim como exemplificado na Tabela 1), é preciso definir assertivamente também a frequência empregada, tendo em mente principalmente a sua relação com as propriedades físicas dos materiais a serem imageados; a constante dielétrica relativa (ϵ_r), e a condutividade elétrica (σ). Outros fatores físicos consideráveis são; a composição do meio, saturação em água, íons dissolvidos, e porosidade, que tornam o meio mais condutivo e favorecem a dissipação do pulso eletromagnético (ANNAN, 2004).

Quanto aos fatores externos ao levantamento, que não atenuam o sinal, mas que podem interferir no seu comportamento causando ruídos e sobrepondo-se a ele, podemos citar; cabos de transmissão de energia elétrica, transmissor de rádio/celular, superfícies metálicas, automóveis, torres de alta tensão, entre outros, (ANNAN, 2004).

Tabela 1 – Relação entre os materiais mais investigados em estudos com GPR e as frequências utilizadas, com valores que variam de acordo com as suas propriedades físicas; constante dielétrica relativa (ϵ_r), e condutividade elétrica (σ).

Materiais Secos	ϵ_r	σ_0 (mS/m)	Materiais Saturados	ϵ_r	σ_0 (mS/m)
Ar	1	0	Água destilada	81	0,01
Areia seca e cascalho	2 – 6	0,01	Água fresca	81	0,5
Argila seca	5	2	Água do mar	81	3000
Folhelho e siltito seco	5	1	Areia saturada	20 – 30	0,1 – 1
Calcário seco	4	0,5	Silte saturado	10	1 – 10
Solo arenoso seco	2,6	0,14	Argila saturada	40	1000
Solo argiloso seco	2,4	0,27	Solo arenoso saturado	25	6,9
Sal seco	5 – 6	0,01 – 1	Solo argiloso saturado	15	50
Granito seco	5	0,01	Arenito saturado	20 – 30	40
Basalto seco	6	1	Siltito saturado	30	100
Diabásio seco	7	10	Folhelho saturado	7	100
Ferro	1	10^9	Calcário saturado	8	2
Aço	1	∞	Granito saturado	7	1
PVC	8	0	Basalto saturado	8	10
Asfalto	3 – 5	0	Diabásio Saturado	8	100
Concreto Seco	5,5	0	Concreto saturado	12,5	0

Fonte: Extraído de Porsani, (1999) adaptado de Borges, (2002).

5.6 Aquisição de dados

A aquisição dos dados GPR pode ser feita com antenas (blindadas ou não) de diversas frequências, medidas em MHz (mega-hertz – milhões de ciclos por segundo). Vale ressaltar que, quanto menor a frequência central da antena, maior a profundidade atingida. No entanto, como a resolução espacial do produto gerado (radargrama) é inversamente proporcional à frequência do sinal, antenas de baixa frequência penetram mais no subsolo, entretanto, geram sinal com menor resolução espacial. Inversamente, antenas de alta frequência atingem pouca profundidade, apesar de gerarem dados com alta resolução espacial (SOUZA, 2008).

Apesar das suas limitações, o método GPR vem ganhando forte aceitação entre sedimentólogos e os estratígrafos, principalmente por ser bastante eficaz para a determinação da arquitetura estratigráfica e da geometria dos corpos sedimentares, com base na análise dos chamados refletores GPR (SOUZA, 2008). Quanto ao emprego das técnicas de aquisição, estas podem ser divididas em três tipos principais; perfil de reflexão com afastamento constante (*common offset*), sondagens de velocidade (*CMP* e *WARR*) e tomografia (REYNOLDS, 2011). As duas primeiras técnicas citadas, por serem as mais utilizadas serão descritas a seguir.

Na aquisição pela técnica perfil de reflexão (Figura 05), a forma mais comum e simples de ser empregada, o espaço entre as antenas transmissoras (Tx) e receptoras (Rx) é mantido fixo, e ambas são deslocadas ao longo do perfil de caminhamento simultaneamente.

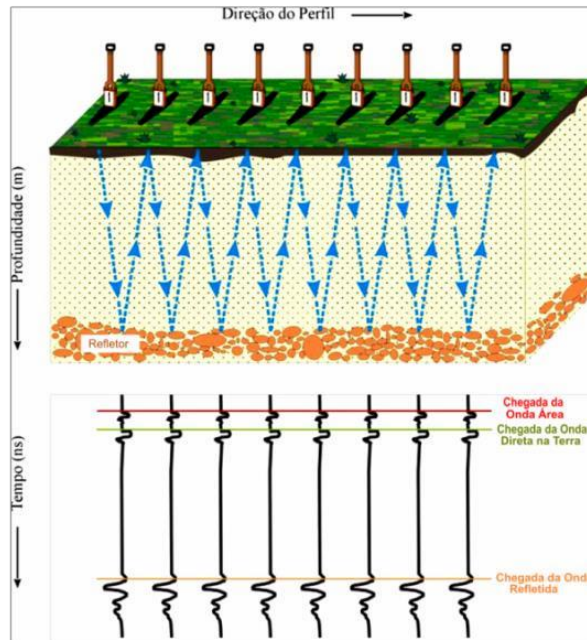


Figura 05: Aquisição de dados pelo método perfil de reflexão. Fonte: Extraído de Borges (2002).

Sobre a técnica de sondagem por velocidade, esta é aplicada para estimar (como nome já diz) a velocidade do sinal em relação à profundidade de investigação. A técnica pode ser empregada pelos arranjos *CMP* ou *WARR*, variando a distância entre as antenas e registrando o tempo duplo (ida e volta) das reflexões (conhecido como *two-way-travel-time- TWTT*), (ANNAN, 2004).

O arranjo *CMP* (*common mid point*) consiste em mover as antenas (transmissora e receptora) a partir de um ponto fixo e em direções opostas para posteriormente obter a velocidade em função de um ponto médio comum (Figura 6 A). Enquanto no arranjo *WARR* (*Wide Angle Reflection and Refraction*), uma das antenas é sucessivamente deslocada em relação à outra que é mantida fixa (Figura 6 B).

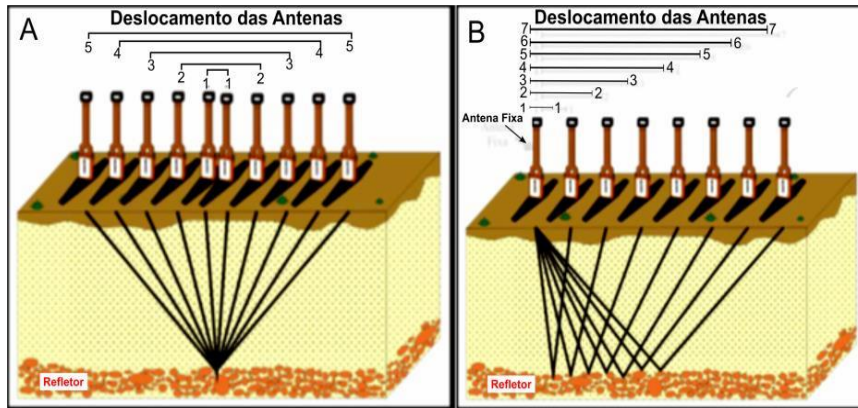


Figura 06: Técnicas de sondagem por velocidade; **A)** Aquisição pelo método *CMP*; **B)** Aquisição pelo método *WARR*. Fonte: Extraído de Borges (2002).

Assim como já ressaltado anteriormente neste trabalho, seja qual for o método utilizado, a profundidade de penetração do sinal eletromagnético, bem como seu comportamento em subsuperfície são diretamente influenciados pelas propriedades elétricas dos materiais; a condutividade e a permissividade elétrica (ou constante dielétrica). Com isso, as antenas escolhidas devem ser configuradas para o imageamento em determinadas profundidades conforme a frequência central de seu emissor e a natureza do solo investigado que, interfere significativamente na velocidade das ondas eletromagnéticas e na variabilidade de penetração do sinal (ORESTES, 2013).

Isso posto, a escolha de antenas adequadas ao tipo de estudo empregado é fundamental para atingir a melhor resposta e resolução espacial possível. Como destacado por Barboza (1999), a profundidade de penetração do sinal emitido é inversamente proporcional à frequência da antena empregada, e a resolução do imageamento é diretamente proporcional a essa frequência. Ou seja, quanto maior a frequência, maior será a resolução e consequentemente, menor será a capacidade de penetração do pulso eletromagnético no meio, assim como verificado na Figura 7, que nos traz a referência das frequências centrais utilizadas (nas antenas da empresa GSSI), relacionadas as profundidades de prospecção obtidas para as principais aplicações.

Frequência Central	Profundidade de Penetração Média	Aplicações
2600 MHz	0 a 0,3 m	Inspeções em Concreto
1600 MHz	0 a 0,5 m	Inspeções em Concreto
900 MHz	0 a 1,0 m	Inspeções em Concreto e Identificação de Vazios
400 MHz	0 a 4,0 m	Engenharia, Meio Ambiente e Identificação de Vazios
270 MHz	0 a 6 m	Geologia, Engenharia, Meio Ambiente, Arqueologia e Pedologia
200 MHz	0 a 9 m	Geologia, Engenharia, Meio Ambiente, Arqueologia e Mineração
100 MHz	0 a 15 m	Geologia, Meio Ambiente, Arqueologia e Mineração
16 a 80 MHz	0 a 50 m	Geologia
2,0 GHz	0 a 0,75 m	Inspeção de Pavimentação de Estradas e Lances de Pontes
1,0 MHz	0 a 0,9 m	Inspeção de Pavimentação de Estradas e Lances de Pontes

Figura 07: Principais frequências centrais utilizadas, em relação as profundidades médias e principais aplicações envolvendo estudos com GPR. Fonte: GSSI / Alpha Geofísica – Brasil. Adaptado de Orestes (2013).

6 Materiais e Métodos

Os materiais e as metodologias utilizadas nesse trabalho visaram levantamento de dados que permitissem definir a evolução espaço-temporal da rampa coluvial estudada, tanto em superfície, quanto em subsuperfície. Após pesquisa que contou com revisão bibliográfica sobre o estudo de depósitos quaternários continentais na América do Sul (sobretudo no sul do Brasil) e sobre seus métodos de investigação, optou-se portanto, pela obtenção de dados geofísicos, geocronológicos, topográficos e granulométricos, cuja integração com as descrições e observações de campo levam à interpretação paleoambiental.

Para tanto, buscou-se alternativa metodológica que associa o registro estratigráfico (litoestratigráfico, pedoestratigráfico e aloestratigráfico) local com o registro GPR, possibilitando a identificação de unidades aloestratigráficas no subsolo. Os procedimentos metodológicos foram agrupados em três eixos de investigação: estratigrafia do Quaternário; caracterização granulométrica, e aplicação da metodologia de geofísica rasa (GPR). Esses eixos são conceitualmente integrados em uma perspectiva evolutiva pelo referencial geocronológico do trabalho.

6.1 Estratigrafia do quaternário

No desenvolvimento desse trabalho foram abordadas três seções estratigráficas do quaternário, dispostas em cabeceira de vale. Uma delas em superfície, caracterizada em corte aparente de estrada, e outras duas seções elaboradas através sondagens manuais, cujas posições no espaço (Figura 8) foram norteadas por imagens do subsolo obtidas através da Linha de caminhamento GPR. As seções estratigráficas estudadas abarcam a transição entre a alta e a média encosta na localidade Cerro do Touro, em Jaraguá do Sul, SC.



Figura 08: Posicionamento das seções estratigráficas e dos pontos (P1 e P2) onde foram realizadas as sondagens manuais. Em destaque ainda, a linha de caminhamento para aquisição do perfil de radar GPR.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

6.2 Granulometria

Para as análises pertinentes à granulometria, foram coletadas amostras seriadas apenas da seção estratigráfica de superfície. Os materiais coletados do subsolo (pontos de sondagem P1 e P2) foram utilizados apenas para correlação e confirmação da sequência deposicional em subsuperfície, através de descrição qualitativa (cor e textura ao tato). Durante a coleta das amostras sedimentológicas e paleopedológicas, foi realizado controle de campo e a descrição de características físicas gerais dos materiais, gerando dados importantes de afloramento. As características dos materiais foram obtidas em três etapas distintas de avaliação. Inicialmente houve a descrição da cor da matriz e de grãos de cascalho segundo a tabela *Munsell* (*MUNSEL SOIL COLOR CHART*, 1994).

Na segunda etapa, foi determinada a distribuição granulométrica das partículas conforme Suguio (1973). O grupo de amostras coletadas na seção de cabeceira foram processadas da maneira tradicional, por peneiramento para a fração grossa (>0.062 mm) e por pipetagem para a fração fina (<0.062 mm). Já o segundo grupo de amostras, referentes às tradagens (P1 e P2) foram classificadas apenas com base nos dados de afloramento, buscando relações estratigráficas com os registros da seção em corte de estrada e com o perfil GPR. A terceira etapa foi dedicada a representação gráfica dos materiais, apresentados segundo diagramas triangulares de classificação textural. Neste trabalho, foram utilizados os diagramas de Flemming (2000) para sedimentos lamosos, e o de Folk (1954) para sedimentos cascalhosos.

O diagrama de Flemming (2000) (Figura 09), foi concebido para o estudo de fluxos lamosos, definindo seis tipos de sedimentos: Areia: <5 % de lama; Areia levemente lamosa: 5 - 25% de lama; Areia lamosa: 25 - 50% de lama; Lama arenosa: 50 - 75% de lama; Lama levemente arenosa: 75 - 90% de lama; Lama: >95 % de lama. Os tipos de sedimento são divididos ainda em 25 classes granulométricas, o que permite uma maior diferenciação textural eventualmente atribuível a distintos regimes hidrodinâmicos. São elas; S areia A-I areia ligeiramente siltosa; A-II areia ligeiramente argilosa; B-I areia muito siltosa; B-II areia siltosa; B-III Areia argilosa; B-IV areia muito argilosa; C-I lama arenosa extremamente siltosa; C-II lama arenosa muito siltosa; C-III lama arenosa siltosa; C-IV lama arenosa argilosa; C-V lama arenosa muito argilosa; C-VI lama arenosa extremamente argilosa; D-I lama extremamente siltosa e ligeiramente arenosa; D-II lama muito siltosa e ligeiramente arenosa; D-III lama siltosa ligeiramente arenosa; D-IV lama argilosa ligeiramente arenosa; D-V lama muito argilosa ligeiramente arenosa; D-VI lama extremamente argilosa e ligeiramente arenosa; E-I silte; E-II silte ligeiramente argiloso; E-III silte argiloso; E-IV argila siltosa; E-V argila ligeiramente siltosa; E-VI argila.

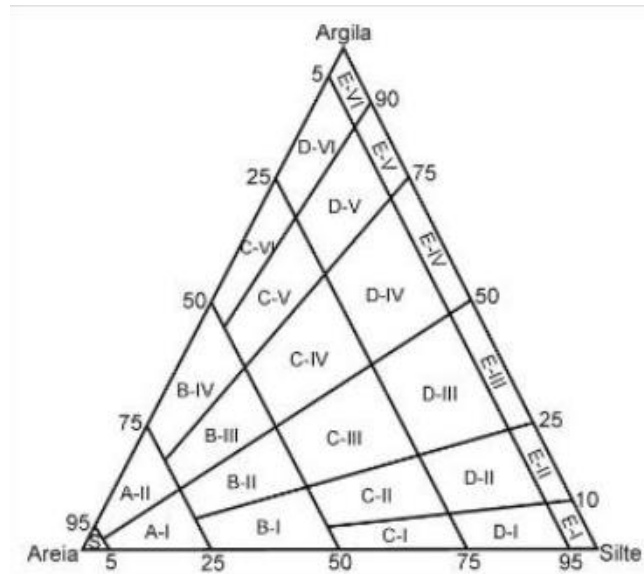


Figura 09: Classes granulométricas propostas por Flemming (2000).

O diagrama de Folk (1954) (Figura 10) por sua vez, é utilizado para amostras com teor importante de cascalho, onde os mesmos são representados proporcionalmente a partir do seu percentual nas frações; Cascalho (>2mm), areia (2mm a 63 μ) e lama (<63 μ).

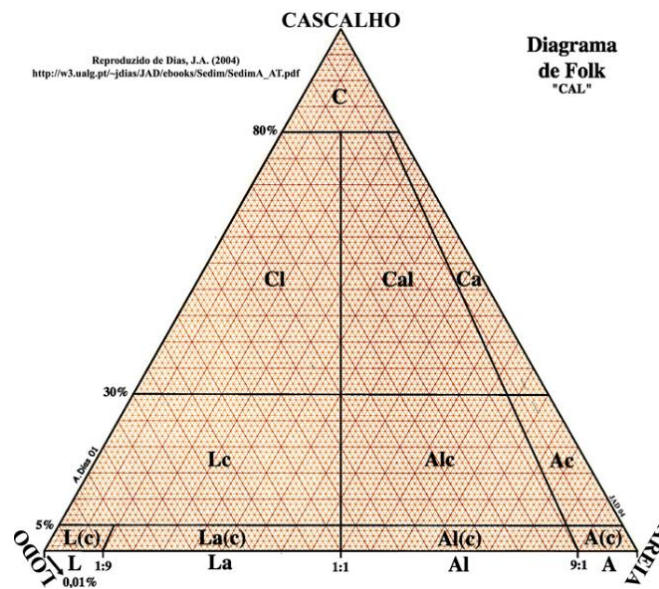


Figura 10: Diagrama textural elaborado por Folk (1954). Fonte: Extraído de Dias, J.A (2004).

A partir da constituição dos sedimentos são considerados 15 termos de classificação granulométrica; C – cascalho; Ca - cascalho arenoso; Cal - cascalho areno-lodoso; Cl - cascalho lodoso; L – lodo; Lc - lodo cascalhento; L(c) - lodo ligeiramente cascalhento; La(c) - lodo arenoso ligeiramente cascalhento; La - lodo

arenoso; A – areia; Al - areia lodosa; Alc - areia lodo-cascalhenta; Al (c) - areia lodosa ligeiramente cascalhenta; Ac - Areia cascalhenta; A (c) - areia ligeiramente cascalhenta.

6.3 Geocronologia

Estudos arqueológicos e paleoambientais como os do Quaternário, requerem um referencial geocronológico para auxiliar a construção de suas narrativas. Para tanto, utilizam-se métodos de datação dos materiais disponíveis buscando definir intervalos temporais baseados em técnicas que podem produzir resultados absolutos ou mesmo relativos. Tomados os devidos cuidados, sobretudo quanto a escolha dos materiais a serem datados em relação ao método utilizado, os resultados são bastante satisfatórios. Nas investigações do Quaternário, o registro temporal (formas de relevo e depósitos associados) pode resultar de interações locais e/ou globais.

Como o clima global resulta também de importante interação entre oceanos e atmosfera, sedimentos marinhos profundos têm sido correlacionados estratigraficamente e classificados em função da variação de isótopos de oxigênio (^{16}O / ^{18}O) observada em testemunhos coletados em diferentes pontos dos oceanos na Terra. O registro isotópico é expresso através do índice $\delta^{18}\text{O}$, que é definido pela relação entre os isótopos de oxigênio retidos em restos de carapaças de carbonato de cálcio secretadas por foraminíferas (bentônicas e planctônicas), que se acumulam ao longo do tempo nos fundos oceânicos. O registro é armazenado nessas carapaças pois o teor isotópico da água do mar varia entre os períodos glaciais e interglaciais em função da diferença de calor que chega até a terra. Dessa forma, foi possível construir referencial geocronológico sólido para as mudanças climáticas cíclicas que ocorrem em nosso planeta, uma vez que, os sedimentos acumulados nas planícies abissais, ao contrário do que ocorre em terras emersas, possuem alta resolução temporal, pois se depositam de forma contínua e sem interrupção ou perturbação significativa. Esse referencial fornece portanto, escala absoluta de tempo com alta resolução, baseada na variação das paleotemperaturas das águas marinhas de superfície e no volume variável de geleiras.

O método é fundamentado na fragmentação isotópica realizada através do ciclo hidrológico. Em fases de aquecimento global o índice $\delta^{18}\text{O}$ se aproxima dos valores atuais da composição isotópica da água do mar. Nas fases de resfriamento global, a água do mar se enriquece de ^{18}O em função da evaporação preferencial da água isotopicamente mais leve, formada por ^{16}O . O inverso ocorre com o registro isotópico de geleiras, que ficam relativamente mais ricas em ^{16}O durante fases de resfriamento global (glaciações) e menor em fases de aquecimento (interglaciais).

Esses registros são considerados como dados representativos (*proxy data*) dos processos globais associados às mudanças do clima no nosso planeta, representando tanto as variações das temperaturas da superfície dos oceanos, quanto as taxas de expansão e de retração de geleiras ao longo dos tempos, sintetizando, portanto, as principais causas associadas às mudanças globais do clima ao longo do Quaternário; além de tornarem possíveis correlações entre diferentes tipos de registro estratigráfico. As variações (Figura 11 a seguir) registradas pelo índice $\delta^{18}\text{O}$ são interpretadas através dos chamados estágios isotópicos marinhos (EIM), que são considerados de abrangência global, e são frequentemente utilizados para definir intervalos glaciais (altos valores de $\delta^{18}\text{O}$) e interglaciais (baixos valores de $\delta^{18}\text{O}$), com suas consequências sobre os climas locais.

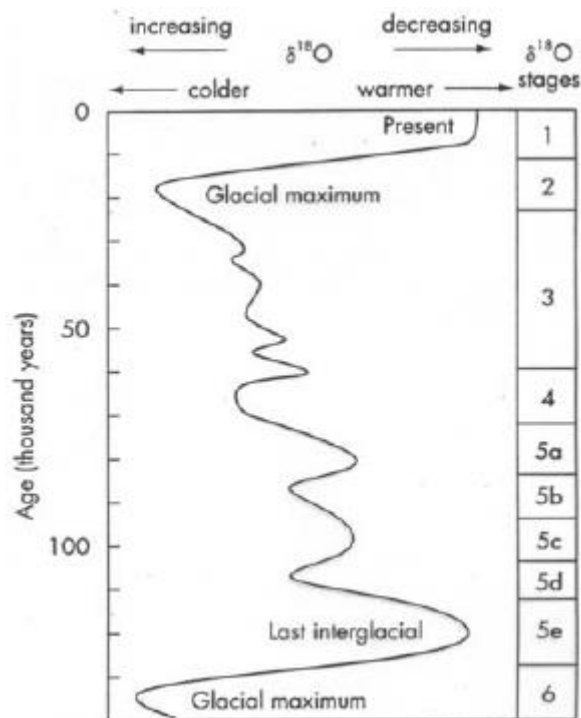


Figura 11: Variação das paleotemperaturas oceânicas com base nos Estágios Isotópicos Marinhos.

Fonte: Wilson *et al.* (2000).

Conforme Suguio (1999), os estudos do Quaternário, por abordarem justamente um período geologicamente mais breve da terra, trabalham com evidências sedimentares que, quando encontradas, ainda podem estar suficientemente bem preservadas e (em casos ideais) podem permitir estabelecer comparações com dados de origens distintas.

Os estudos focados no quaternário continental por exemplo, utilizam com frequência o referencial isotópico marinho, correlacionando-o com diferentes métodos de datação (radiocarbono, luminescência, isótopos cosmogênicos, etc.). Contudo, apesar da precisão significativa dos métodos disponíveis, as datações obtidas por radiocarbono são, como todas as medidas de radioatividade, enunciadas de probabilidade. Cada data é definida como o ponto médio de uma curva com o seu respectivo desvio padrão e representa um nível conhecido de probabilidade (Bradley 1985), mas que é bastante preciso. Dessa forma, a datação (conhecida

como absoluta), através da análise de isótopos do carbono, foi desenvolvida inicialmente para mensuração de radioatividade. O isótopo usado foi o carbono 14 já que é instável e, é continuamente formado na atmosfera superior pelo efeito do bombardeamento de nêutrons nos átomos de nitrogênio pelos raios cósmicos. O carbono 14 é rapidamente oxidado no ar, formando dióxido de carbono e entra no ciclo de carbono global, sendo absorvido pelos organismos vivos. Os outros isótopos do carbono (12 e 13) são estáveis.

As plantas e os animais assimilam o carbono instável (C^{14}) a partir do dióxido de carbono ao longo de suas vidas, mas ao morrerem, deixam de intercambiar esse carbono com a biosfera e o conteúdo de carbono (C^{14}) começa a diminuir em função do decaimento isotópico. Atualmente a taxa em que isso ocorre é determinada pela lei de decadência radioativa que quantifica a taxa de decaimento isotópico (ou meia vida dos isótopos) que é de 5.568 anos \pm 30 anos para o radiocarbono. Ou seja, a cada 5.568 anos, com um erro de aproximadamente 30 anos, todo o radiocarbono contido em um organismo morto perde 50% do seu teor.

A geocronologia dos materiais orgânicos obtida através do radiocarbono é essencialmente um método desenvolvido para medir a radioatividade residual nos resíduos orgânicos. Ou seja, ao determinarmos a quantidade de radiocarbono (C^{14}) que permanece em uma amostra, é possível definir a idade do organismo morto. Essa metodologia, apesar de não aplicável aos materiais inorgânicos, é bastante eficaz para a datação de materiais de origem orgânica (até 50 mil anos A.P.), e vem sendo aplicada com êxito nas mais variadas áreas do conhecimento, como: Arqueologia, Geologia, Hidrologia, Geofísica, Oceanografia, Paleoclimatologia, dentre outras.

Neste trabalho foram coletadas amostras seriadas em paleohorizontes (horizontes A), possibilitando a sua datação absoluta pelo método do radiocarbono (C^{14}), em função dos teores importantes de matéria orgânica presentes nos materiais pedogenizados. As datações foram realizadas pelo laboratório *Beta Analytic Inc.* (EUA) e auxiliaram na definição do contexto estratigráfico no qual esses paleossolos se formaram, favorecendo a interpretação paleoambiental dos depósitos estudados.

6.4 Aplicação do Georadar (GPR)

A aplicação do Georadar (GPR) está fundamentada em método geofísico eletromagnético (EM) de alta resolução espacial que é capaz de identificar estruturas e feições subterrâneas rasas. Os dados são gerados a partir do registro do tempo duplo de propagação (ida e volta) de pulsos eletromagnéticos de alta frequência, assim como ocorre nas ondas de rádio (ANNAN,1992).

Essa metodologia baseia-se no tempo transcorrido entre a emissão e a recepção do sinal refletido por discontinuidades composicionais encontradas no subsolo. Esse tempo é proporcional à velocidade de propagação do pulso eletromagnético, possibilitando assim a determinação da profundidade de feições capazes de gerar a reflexão do sinal. Quando essas feições possuem expressão espacial de ordem decimétrica, o sinal gerado tende a refletir a geometria da feição. Sendo assim, o sinal que assume a expressão espacial da feição no subsolo passa então a ser denominado refletor. A aplicação do GPR em contexto estratigráfico, portanto, está fundamentada na análise e na descrição de refletores que reproduzem feições do subsolo.

Neste estudo, após conhecimento prévio da área investigada, observações de campo e revisão bibliográfica acerca da Geologia e Geomorfologia locais, optou-se por levantamento geofísico GPR utilizando conjunto de antenas blindadas monoestáticas (de 200 MHz) do modelo SIR-3000, produzidas pela GSSI (*Geophysical Survey Systems Inc*). Os dados foram adquiridos pelo método de caminhamento contínuo (perfil de reflexão), registrado em espaçamento fixo pré-definido (Figura 12), alcançando profundidades de prospecção de até 7 metros abaixo da superfície.

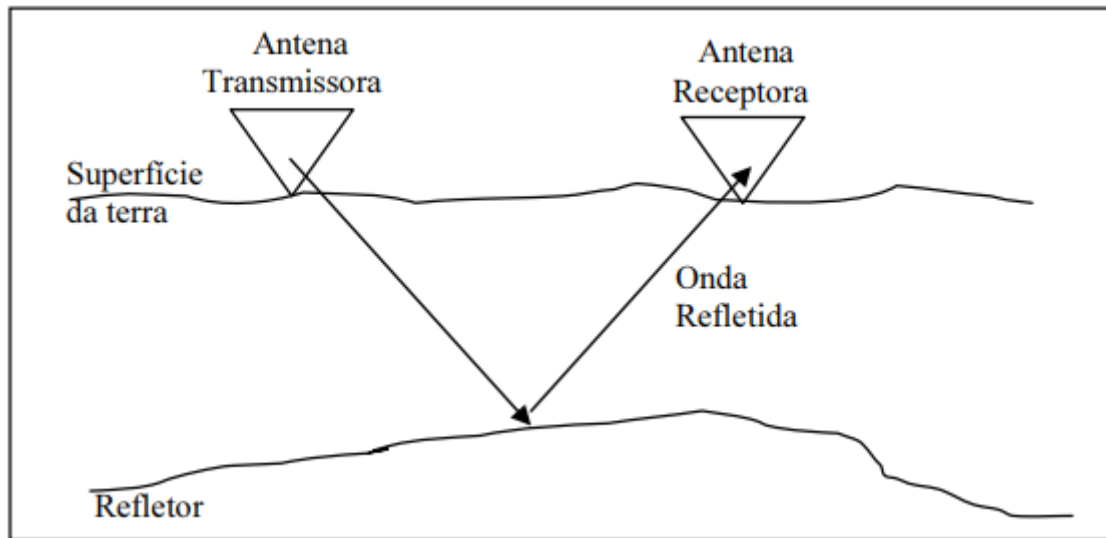


Figura 12: Arranjo das antenas no método escolhido, com espaçamento fixo das antenas. Fonte: Adaptado de Souza (2006).

A investigação buscou associar os registros da reflexão eletromagnética GPR, a eventuais descontinuidades de caráter estratigráfico (passagens entre camadas e horizontes, entre camadas, ou entre coberturas superficiais e embasamento) na área do estudo. Em casos ideais, as descontinuidades entre os materiais no subsolo geram fortes refletores, e o método possibilita a definição de unidades aloestratigráficas (quando essas podem ser identificadas).

Para melhor aplicabilidade do método é preciso configurar corretamente o equipamento, assim como ressaltado por Orestes (2013). A unidade de controle do GPR produz um gráfico em tempo real, a partir da leitura da subsuperfície local, o que permite definir a profundidade e resolução de imageamento conforme a determinação dos parâmetros; a) Números de amostras por traço de radar (samp/scan), onde, quanto maior o valor (máximo 1024), maior será a resolução obtida no imageamento. Aqui optou-se por utilizar o número máximo de amostras, pois também é o número indicado pelo fabricante (GSSI) do GPR utilizado para a maioria das aplicações; b) Range (alcance) que refere-se a janela temporal (em nanossegundos) na qual o equipamento irá se basear para registrar o tempo duplo de propagação das ondas (EM). Nesse levantamento ficou definido com uma janela de 120 ns, buscando qualidade de sinal em profundidade de até 9 metros, e finalmente; c) a constante dielétrica, possivelmente a propriedade mais importante em mapeamentos eletromagnéticos de solos, já que influencia na definição do alcance de prospecção (tendo em mente a

interferência sofridas pelas ondas EM ao interagirem com materiais de características físicas distintas). Para este levantamento, o valor que melhor se encaixou na relação resolução vs profundidade em associação com os demais parâmetros de configuração, foi igual a 27. Segundo Porsani (1999), esse valor igual ao indicado para areias saturadas.

Após configuração do equipamento foi realizada calibração do odômetro em função da distância percorrida (385 m) entre origem e fim do caminhamento, e realizado levantamento através de linha de prospecção ao longo de estrada vicinal, com sentido de caminhamento paralelo às seções estratigráficas previamente caracterizadas na área. Considerando a disponibilidade dos chamados dados de afloramento (adquiridos por sondagens e caracterização estratigráfica prévia), buscou-se o reconhecimento de sinal GPR passível de associação com as estruturas sedimentares descritas em superfície (seção em corte de estrada).

Paralelamente à aquisição dos dados GPR, foi executado levantamento topográfico utilizando-se a técnica RTK (*Real Time Kinematic*), contando com equipamento GPS (*Global Positioning System*) da marca Trimble R6. Esse levantamento teve como finalidade a correção topográfica do radargrama gerado pelo GPR, adequando os tempos duplos de propagação dos pulsos eletromagnéticos à variação altimétrica do terreno, e corrigindo assim a geometria dos refletores presentes no subsolo.

Na técnica RTK, um receptor (Base) permanece fixo em um determinado ponto de coordenadas conhecidas, ou materializadas previamente, enquanto outro receptor permanece em movimento sobre o terreno (Rover), coletando os dados, e fornecendo o seu posicionamento relativo em tempo real. Após os levantamentos de campo, os dados topográficos e GPR foram processados no Laboratório de Geodinâmica Superficial da Universidade Federal de Santa Catarina (GCN-UFSC).

No que toca aos dados GPR, o objetivo do processamento foi a eliminação de ruídos de alta e de baixa frequência que impedem a visualização de refletores; a avaliação da qualidade de resposta do sinal, e a realização de correção topográfica dos sinais registrados. Para tanto, foram utilizados os softwares *Reflex View*® e *Radar Data Analyzer* versão para *Windows 7.4.15.0814* (RADAN® 7).

As etapas de processamento dos dados (Tabela 2) consistiram na realização de pré-processamento básico, incluindo remoção e/ou aplicação de ganhos temporais, e pós-processamento incluindo correção do tempo zero; empilhamento (*stacking*); aplicação de filtros de frequência (passa banda alta e passa banda baixa); aplicação de ganhos temporais; remoção de ruído de fundo (*back ground removal*), migração e correção topográfica.

Tabela 2 – Sequência das etapas adotadas no processamento digital das imagens de radar (radargrama).

Etapas	Descrição
Correção Tempo Zero (Start Time)	Remoção de registros indesejados e ajuste dos traços de radar em função do tempo exato em que a primeira onda EM se propagou entre as antenas transmissora (tx) e receptora (rx).
Stacking (empilhar)	Utilizado para comprimir um perfil GPR longo de mais para uma análise homogênea.
Restauração de Ganho (Gain Restoration)	Remove o ganho aplicado durante a aquisição dos dados em campo.
Aplicação de Filtros Passa banda Alta e baixa	Remove ruídos de alta e baixa frequência que estejam fora da banda de frequência central da antena utilizada.
Aplicação de Ganhos	Corrige os efeitos de perda de sinal relacionados à propagação das ondas, aumentando a relação sinal x ruído.
Stretching (descomprimir)	Descomprime o perfil, retornando ao seu tamanho original.
Background Removal	Remove os ruídos de fundo causados por ondas aéreas e terrestres diretas, realçando os sinais que variam lateralmente.
Migração	Remove difrações, distorções e hipérboles associadas a alvos pontuais e/ou estruturas geológicas em subsuperfície.
Correção Topográfica	Corrige as posições dos refletores, atribuindo a cada traço de radar o seu respectivo valor em cota altimétrica.

Fonte: Adaptado de Lemos (2017).

A execução das etapas acima listadas, possibilita a apreciação mais realística da geometria dos refletores nos radargramas, permitindo em alguns casos, a identificação de contatos entre unidades deposicionais e a descrição da sua geometria, dentre outras características. Em casos ideais a metodologia permite a definição de unidades de radar (UR) que viabilizam a interpretação estratigráfica. Nessa etapa, vale ressaltar que, não foram abordadas análises de fácies sísmica, nos atendo apenas as análises das unidades de radar reconhecidas, que posteriormente foram renomeadas neste trabalho como unidade alostratigráficas.

Com base na aplicação de alguns dos princípios da sismoestratigrafia, tal como abordado por Mitchum Jr. et al. (1977b), os conjuntos de refletores puderam ser caracterizados ainda de acordo com os parâmetros (Figura 13) geofísicos identificados como; a) o carácter das reflexões; b) a concentração dos refletores e; c) a magnitude das reflexões.

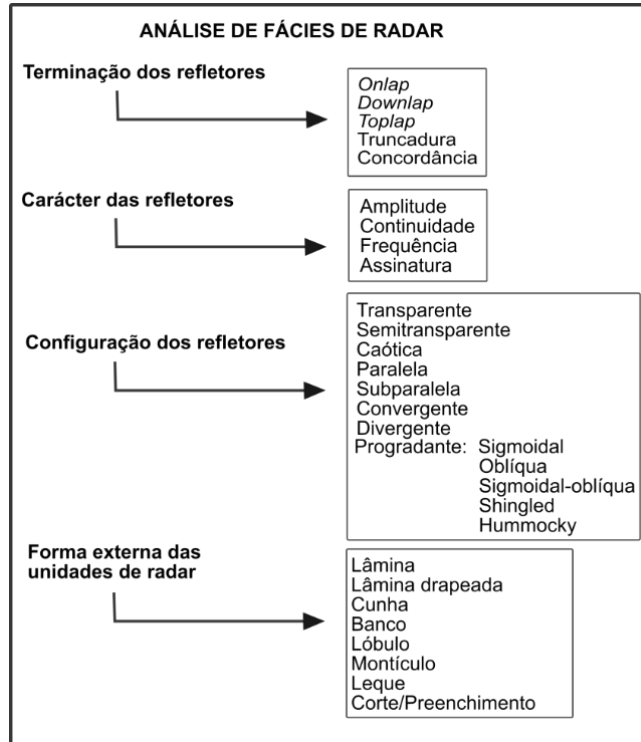


Figura 13: Parâmetros adotados na análise dos refletores identificados. Fonte: Adaptado de Roque (1998).

7 Resultados e Discussões

7.1 Datações

As seis amostras coletadas de horizontes orgânicos (solos e paleossolos), tanto na sessão estratigráfica de superfície (em corte de estrada), quanto da seção (S1) elaborada através de sondagem manual vertical em subsuperfície (a 5 metros da primeira seção) foram datadas através do método do radiocarbono (C^{14}) pelo laboratório *Beta Analytic Inc (EUA)*. Os resultados obtidos são apresentados a seguir (Tabelas 3 e 4) de acordo com a localização dos pontos de coleta dos testemunhos, a profundidade de coleta, o tipo de material datado e, o seu correspondente código laboratorial (Beta).

Tabela 3. Dados geocronológicos para as amostras da Seção em corte de estrada.

Amostra	Latitude	Longitude	Profundidade	Material	Código Beta	Idade C14
C-1	26°14'29.52"S	49°13'36.36"O	20 cm	SOLO ATUAL	499966	1.440 +- 30 AP
C-2	26°14'29.52"S	49°13'36.36"O	110 cm	SOLO ATUAL	513366	14.760 +- 40 AP
C-3	26°14'29.52"S	49°13'36.36"O	142 cm	SOLO ENTERRADO	456938	16.960 +- 60 AP
C-4	26°14'29.52"S	49°13'36.36"O	170 cm	SOLO ENTERRADO	456939	22.690 +- 100 AP

Tabela 4. Dados geocronológicos para as amostras da Seção S1.

Amostra	Latitude	Longitude	Profundidade	Material	Código Beta	Idade C14
C-5	26°14'29.33"S	49°13'36.60"O	171 cm	SOLO ENTERRADO	513363	29.830 +- 160 AP
C-6	26°14'29.33"S	49°13'36.60"O	318 cm	SOLO ENTERRADO	513364	32.210 +- 190 AP

Fonte: Elaboradas pelo autor, (2019).

Cabe destacar nas tabelas acima, a nítida coerência entre o princípio de superposição estratigráfica e as datações obtidas, com as idades mais antigas ocorrendo nos depósitos mais profundos. Os materiais datados na seção de superfície, elaborada em corte de estrada (amostras C-1, C-2, C-3 e C-4) apresentam idades que vão de 22.690 a 1.440 Ka AP, enquanto os materiais coletados na seção de subsuperfície através das tradagens manuais (amostras C-5, C-6) revelaram idades de 32.210 Ka A.P na camada mais antiga, e 29.830 Ka A.P no horizonte mais recente.

Para efeito de síntese, de modo a associar os resultados das datações, de caráter local, com referencial paleoclimático de caráter global, utilizamos o registro geocronológico dos Estágios Isotópicos Marinhos (EIM). Como ilustrado (na Figura 14) a seguir, constatando que as idades obtidas coincidem com os Estágios Isotópicos Marinhos 1, 2 e 3.

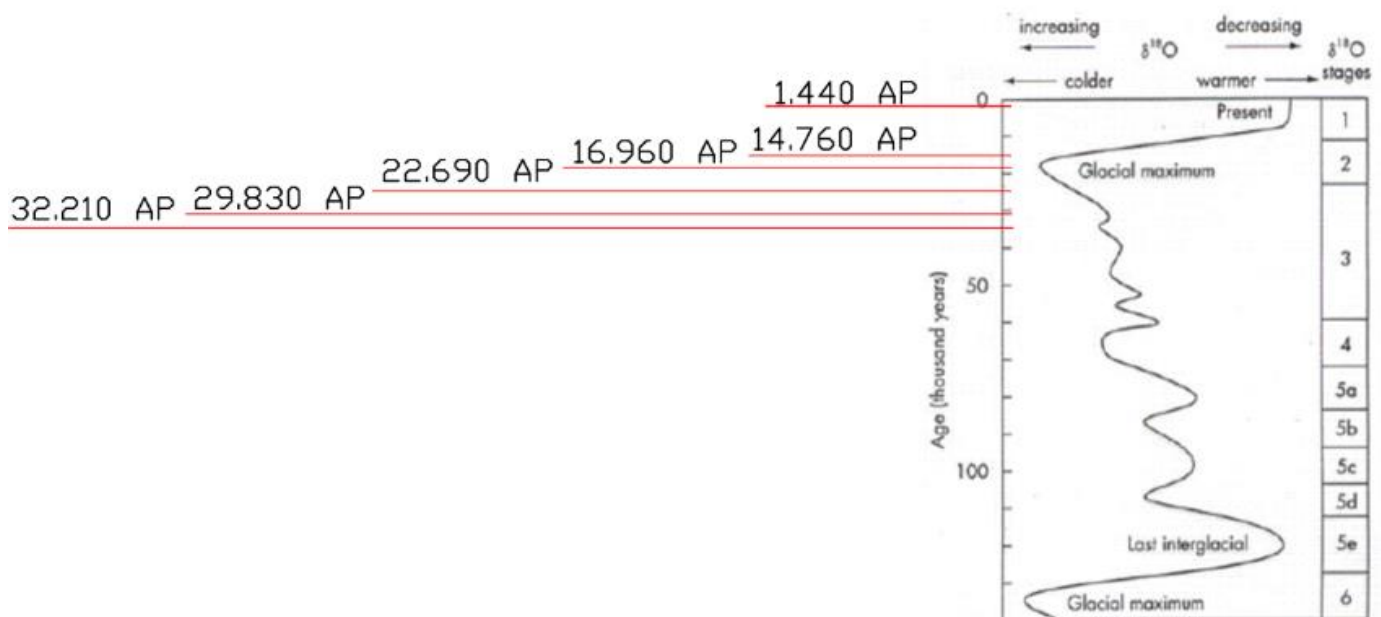


Figura 14: Datações (C^{14}) obtidas para os solos enterrados e atual, em relação ao gráfico de variação do índice $\delta^{18}O$ nos últimos 140.000 anos. Fonte: Adaptado de Wilson *et al.* (2000).

A cronologia da ocorrência dos solos e paleossolos estudados, revela certo padrão de alterações ambientais registradas em períodos de maior estabilidade ambiental que favoreceram a pedogênese na área estudada. Curiosamente, os testemunhos (C-4, C-5, C-6) mais profundos revelam ter havido formação de solo no local de estudos (Cerro do Touro) até mesmo em períodos estadiais (tradicionalmente vistos como de tendência ao resfriamento global), assim como evidenciado no **UMG** (22.6 ka A.P.), que se destaca pelo desenvolvimento de horizonte húmico importante. O desenvolvimento de horizonte superficial de solo no interestadial do **EIM 3** (de 32.2 Ka A.P), chama atenção pelo caráter altamente variável das mudanças climáticas que caracteriza esse estágio isotópico marinho no hemisfério Norte. Já as amostras C-3, C-2 e C-1, são os que abrangem a fase de transição para o período do Holoceno de 16.9 até 1.4 Ka A.P. Período este, tradicionalmente associado ao aumento de umidade na atmosfera e uma tendência (tabelas 3 e 4) de aquecimento global.

A comparação dos registros datados em relação a curva de variação das paleotemperaturas globais exposta (Figura 14), fornece-nos, por tanto, valioso referencial geocronológico e paleoambiental quaternário, permitindo o aferimento de alterações ambientais locais que se enquadram no contexto de grandes mudanças climáticas hemisféricas e globais. Essas relações serão melhor aproveitadas mais adiante, ao sintetizarmos os resultados obtidos.

7.2 Estratigrafia tradicional e Granulometria

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir do estudo da seção estratigráfica (de superfície) elaborada em corte aparente de estrada, onde foi definido o perfil colunar (retângulo em vermelho na Figura 15) de onde foram coletadas as 24 amostras sedimentológicas seriadas entre 142 e 20 cm da superfície. Para uma melhor compreensão dos resultados, estes foram associados às datações e observações de campo, permitindo a individualização dos estratos em 5 unidades estratigráficas distintas. As unidades estão representadas e numeradas da base para o topo da seção (Figura 15 a seguir), de acordo com a cronologia das coletas em campo, e respeitando o princípio da superposição estratigráfica.

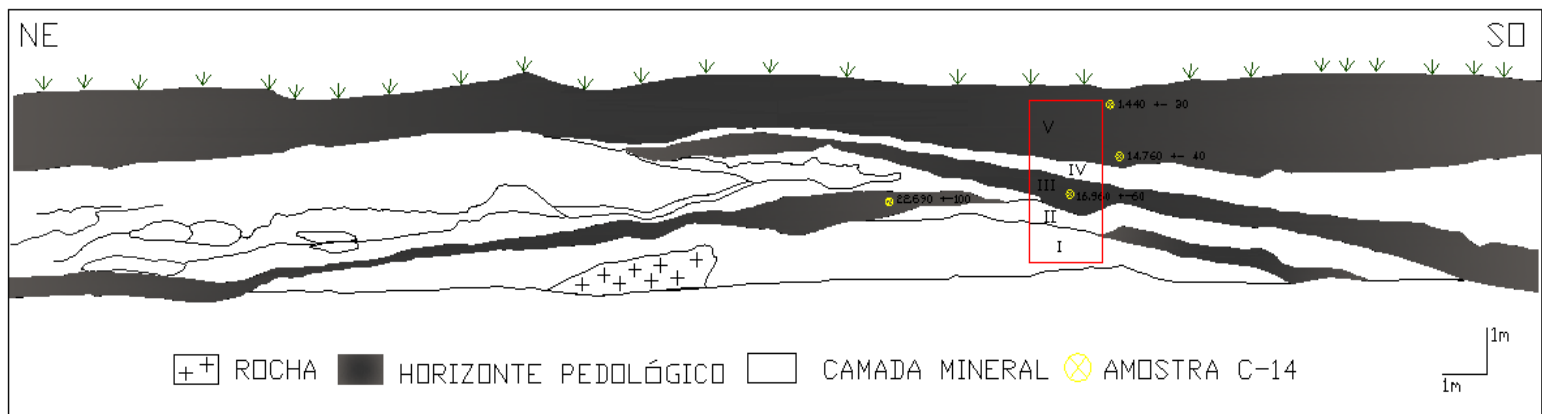


Figura 15: Representação esquemática da seção estratigráfica em corte de estrada, com total de 28 metros de distância horizontal. Cabe destacar também o perfil colunar (retângulo em vermelho) e os pontos (em amarelo) onde houve a coleta das amostras C¹⁴ para datação. Fonte: Elaborada pelo autor, (2018).

Na figura 16, tentamos retratar ainda a perspectiva das análises de campo, trazendo visão mais realista do local onde foi elaborado o perfil colunar (retângulo em vermelho), e coletadas as amostras pertinentes às análises granulométricas e texturais.



Figura 16: Perspectiva das análises de campo. Fonte: Acervo do autor, (2018).

De modo geral, as unidades individualizadas revelaram sequência pedostratigráfica com padrão deposicional variado entre camadas minerais (Unidades I, II e IV) de granulometria mal selecionada e horizontes pedogenizados (Unidades III e V) dispostos em morfologia convexa, e mergulho (NE/SW) aparente em direção ao fundo do vale.

Na sequência é apresentada a distribuição das 24 amostras sedimentológicas coletadas e que foram classificadas segundo os diagramas texturais de Flemming (Figura 17) para os sedimentos lamosos e de Folk (Figura 18) para os sedimentos grosseiros.

As amostras analisadas segundo Flemming (2000), confirmaram a tendência de agrupamento das amostras no setor central do diagrama, em zona característica de materiais pouco diferenciados, do ponto de vista granulométrico, e que são constituídos por todos os tamanhos de grão abarcados pelo diagrama.

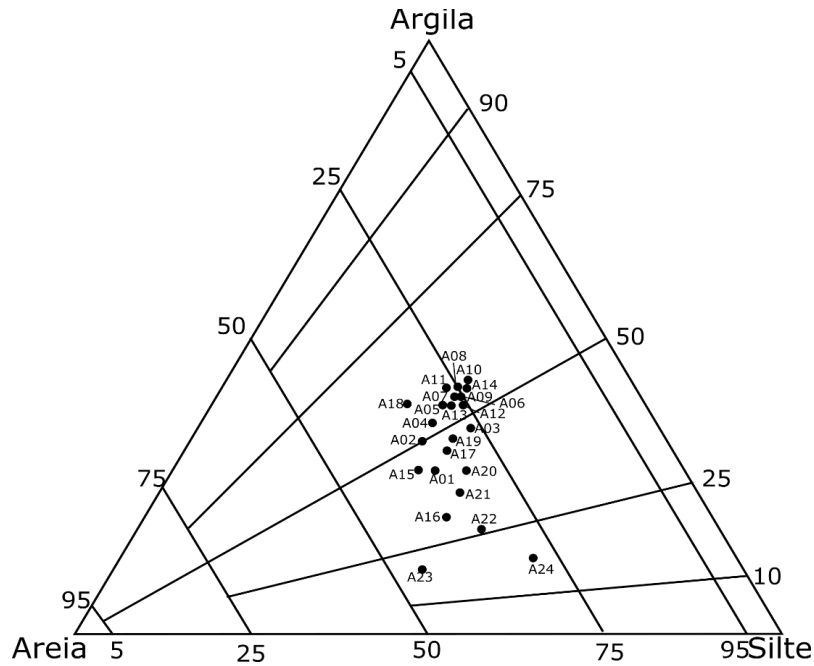


Figura 17: Distribuição das amostras coletadas na seção colunar, segundo diagrama de Flemming (2000).
Fonte: Elaborada pelo autor, (2019).

Em sua maioria (75%), os sedimentos abarcam as classes granulométricas; Lama arenosa siltosa (37,5% do total) e lama argilo-arenosa (37,5% do total). Ocorrem ainda outras amostras (25% do total) com textura mais fina. Duas destas (A23 e A24) foram classificadas como Lama arenosa muito siltosa (C-II) e outras três amostras (A10, A8, A7) classificadas como Lama argilosa ligeiramente arenosa.

Os resultados, de acordo com a classificação textural aplicada (Figura 17), apontam para sedimentos característicos de fluxos relativamente densos, mas difusos, típicos de ambientes de encosta, indicando origem colúvio-aluvial para o depósito estudado, onde há predominância de sedimentos lamosos.

Da totalidade das amostras analisadas, 21 continham alguma proporção de cascalho. Para estas amostras, por tanto, foi aplicado o diagrama de classificação textural de Folk (Figura 18). Os resultados indicam concentração majoritária dos grãos em zona associada à classe textural; Lodo arenoso ligeiramente cascalhento La (c). Apenas uma amostra (A21) coletada na unidade II (Figura 19), se destaca ligeiramente do padrão obtido nas demais, sendo essa classificada como Lodo cascalhento Lc.

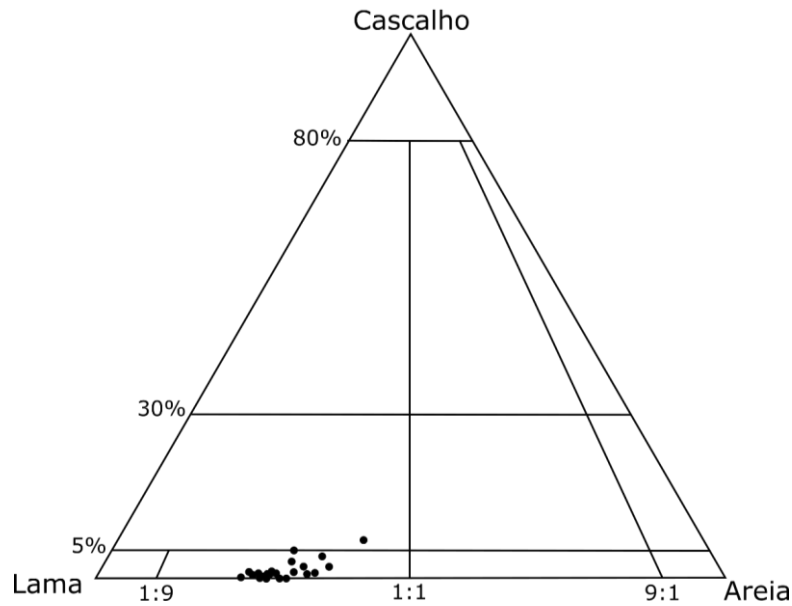


Figura 18: Distribuição das 21 amostras com teor importante de cascalho, classificadas segundo Folk (1954).
Fonte: Elaborado pelo autor, (2019).

As texturas encontradas indicam o predomínio de sedimentos lamosos (ou lodosos, segundo alguns autores que se utilizam do diagrama de Folk) em geral com pouco cascalho, com pouca variação no regime hidrodinâmico local.

Entretanto, também indicam que essa condição se modificou abruptamente em alguns períodos, assim como pôde ser evidenciado na Unidade II (Figura 19). Esta camada especificamente, apresentou aumento considerável da fração cascalho, indicando a presença de maior energia no ambiente ou fluxo, capaz de promover a remobilização e transporte de material que variou de cascalhos milimétricos na Unidade I (anterior), para centimétricos na Unidade II logo acima. Para a melhor compreensão dos resultados expostos (texturais e granulométricos), foi elaborada breve descrição (Figura 19) das 5 unidades estratigráficas individualizadas nesta seção (em corte aparente de estrada).

A Figura 19 permitiu portanto, o apontamento das principais características evidenciadas nas análises de campo, incluindo informações relevantes como; a numeração e identificação das camadas, das relações de contato entre elas, das classes granulométricas predominantes, da estrutura das camadas e classificação da cor da matriz e dos grãos de cascalho segundo a tabela Munssel (MUNSEL SOIL COLOR CHART, 1994).

Sigla	Relação de contato	Camada	Classe Granulométrica predominante	Estrutura	Cor da matriz	Descrição Pedológica	Foto
UN V	Gradual	Solo Atual	Silte grosso	Estrutura maciça.	Cinza muito escuro (10YR 3/1).	Unidade pedogenizada com presença acentuada de raízes e porosidade considerável. Não pegajosa ao tato, apresenta progradação para cascalhos rosados (5YR 8/4) em direção a sua base.	
UN IV	Abrupto	Coluvial	Cascalho lamoso	Estrutura maciça.	Marrom claro (7.5R 6/3).	Unidade mineral pobremente selecionada, limitada no topo por cascalhos rosa (5YR 8/4). Apresenta matriz rudécea com granulodecrescência de cascalhos, areias e lamaz, do topo em direção a sua base.	
UN III	Abrupto	Solo enterrado	Areia lamosa	Estrutura maciça.	Preto (10YR 2/1).	Unidade pedogenética (poucas raízes), possui baixa porosidade, com cerosidade importante. Pobremente selecionada, é pouco pegajosa ao tato. Em sua base está limitada por lente cascalhosa amarelo avermelhada (5YR 6/8).	
UN II	Abrupto	Coluvial	Cascalho argiloso ligeiramente arenoso	Estrutura maciça.	Marrom claro (7.5R 6/3).	Unidade mineral com lente cascalhosa centimétrica amarelo avermelhada (5YR 6/8) no topo, progradando para clastos centimétricos brancos (5YR 8/1) e rosas (5YR 8/4) em sua base. Possui matriz arenosa siltosa, muito pobremente selecionada.	
UN I	Gradual	Aluvial	Lama arenosa argilosa	Estrutura maciça.	Rosa (7.5YR 7/4).	Unidade mineral compacta com plasticidade importante. Apresenta granulodecrescência de areias, silte médio e argilas do topo para base, com clastos em cores variando de rosa (7.5YR 7/3 e 7/4) para amarelo avermelhado (7.5YR 7/6) no mesmo sentido.	

Figura 19: Descrição das distintas unidades evidenciadas no perfil colunar da seção S1 (em corte de estrada).

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Da base para o topo, a disposição das camadas inicia (na **Unidade I**) em conformidade estratigráfica sobre o manto de intemperismo local, onde houve acumulação colúvio-aluvial com predomínio de finos (lamas e argilas).

Na **Unidade II**, os resultados revelam gradação para material mais grosseiro (cascalho argiloso), característico de fluxos lamosos torrenciais ou difusos, possivelmente acionados na alta encosta através de movimentos de massa em períodos onde houve certo desequilíbrio ambiental, mas com maior aquecimento e umidade disponível na atmosfera local.

A **Unidade III**, apesar de limitada em sua base pelos cascalhos descritos na unidade anterior, apresenta por sua vez predomínio de material pedogenizado, datado como do chamado período tardiglacial (16.9 Ka A.P), que caracteriza mudanças do clima global na transição entre a última glaciação e o Holoceno, evidenciando desenvolvimento de horizonte superficial de solo no período, e indicando fase de equilíbrio ambiental local no período.

Na **Unidade IV**, imediatamente acima, fica evidente o truncamento da camada anterior por material mineral promovendo relação de contato abrupto entre as unidades. A granulometria da unidade apresenta sedimentos mais grosseiros a medida em que nos afastamos da base para o topo da camada (em maior declividade), indicando que a velocidade dos fluxos pode ter sido maior com o passar dos tempos, principalmente ao se aproximar da zona de contato abrupto com camada (Unidade V) sotoposta a ela.

Já a **Unidade V**, apresenta em sua base vestígios minerais (cascalhos rosa) da unidade anterior, porém com predomínio de material altamente pedogenizado (fração silte grosso), com maior presença de raízes em direção ao topo da camada. Essa unidade, com sua base desenvolvida ainda no tardiglacial (14.7 Ka A.P), e o topo no Holoceno Superior (1.4 Ka A.P. no topo), encerra a sequência pedostratigráfica limitada por solo atual (horizonte “A”) e vegetação arbustiva local.

Após a caracterização da seção elaborada em superfície (corte de estrada), foram abordadas outras duas seções (S1 e S2) através das sondagens manuais, que foram posicionadas a partir de imagens de radar extraídas do subsolo através do equipamento GPR. Os resultados são apresentados a seguir (Figura 20 e Figura 21) através das seções estratigráficas (S1 e S2 respectivamente) elaboradas em subsuperfície.

A primeira sondagem (Furo 1 na Figura 20) feita a 5.5m da seção elaborada em corte de estrada, pôde confirmar a configuração dos refletores identificados no radargrama a 202 metros do ponto da origem de caminhamento, auxiliando assim na individualização das unidades deposicionais que foram numeradas, descritas e interpretadas a seguir com base nos dados de afloramento e respeitando o princípio da superposição estratigráfica. Na Unidade 1(mais profunda) foi identificado saprólito cinza escuro avermelhado (5YR 4/2) a partir de 3,48 metros de profundidade (até onde foi possível tradar). Essa unidade inicial, é sobreposta pela Unidade 2, composta por material predominantemente areno-siltoso (mas que foi pedogenizado) de coloração preta (5YR 2.5/1), pouco pegajoso ao tato, que data (C¹⁴) do EIM 3 (amostra C-6) com idade de 32.2 Ka A.P. e com cerca de 70 cm de espessura. Após esse período, que sugere relativa estabilidade ambiental (suficiente para haver formação de solo), ocorre o truncamento do material pela Unidade 3 (imediatamente acima), composta por horizonte cinza escuro (7.5 YR 4/1) de 0,65 cm, com granulometria predominante de cascalhos arenosos, intercalando sequência de areias e cascalhos (a cada 10

cm). Transcorridos cerca de 2.400 anos, aproximadamente, surge a Unidade 4, camada arenosa preta (10YR 3/1), de cerosidade importante (altamente pegajosa ao tato) que foi pedogenizada, e que também data do EIM 3 (amostra C-5) com 29.8 Ka A.P.

Após esse período, na unidade 5 (de origem coluvial), foi encontrado material com predomínio de cascalhos centimétricos amarelo avermelhados (5YR 6/8), envoltos por matriz arenosa bruno escura (10YR 4/4). Por fim, na Unidade 6, que encerra a seção S1, identificou-se camada coluvial (superficial) arenosa também de coloração bruno escura (10YR 4/4), mas com granulometria progredando para cascalhos em direção a sua base.

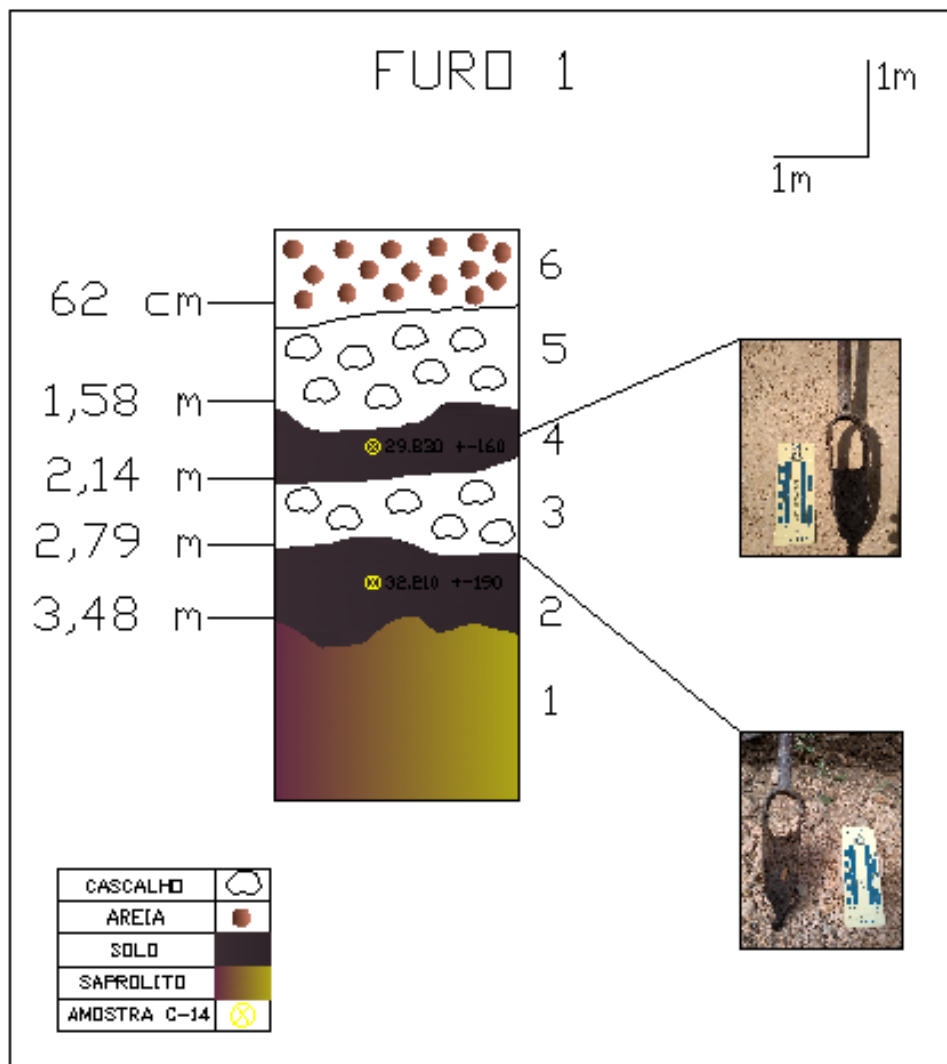


Figura 20: Seção estratigráfica S1, elaborada a partir da primeira sondagem manual (furo 1). Em destaque ainda, as amostras datadas (C^{14}) na seção, as amostras (C-5 e C-6) coletadas nas unidades 4 e 2 respectivamente. Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A partir dos resultados obtidos na primeira sondagem (Seção S1), optou-se por realizar a segunda sondagem (Seção S2) a 153m da origem de caminamento GPR. Essa sondagem (furo 2) permitiu a individualização de outras 07 unidades estratigráficas, que foram descritas do topo para base (na Figura 21), e acabaram por confirmar o padrão deposicional muito episódico que se mostrou (até onde avançamos), recorrente na área de estudo.

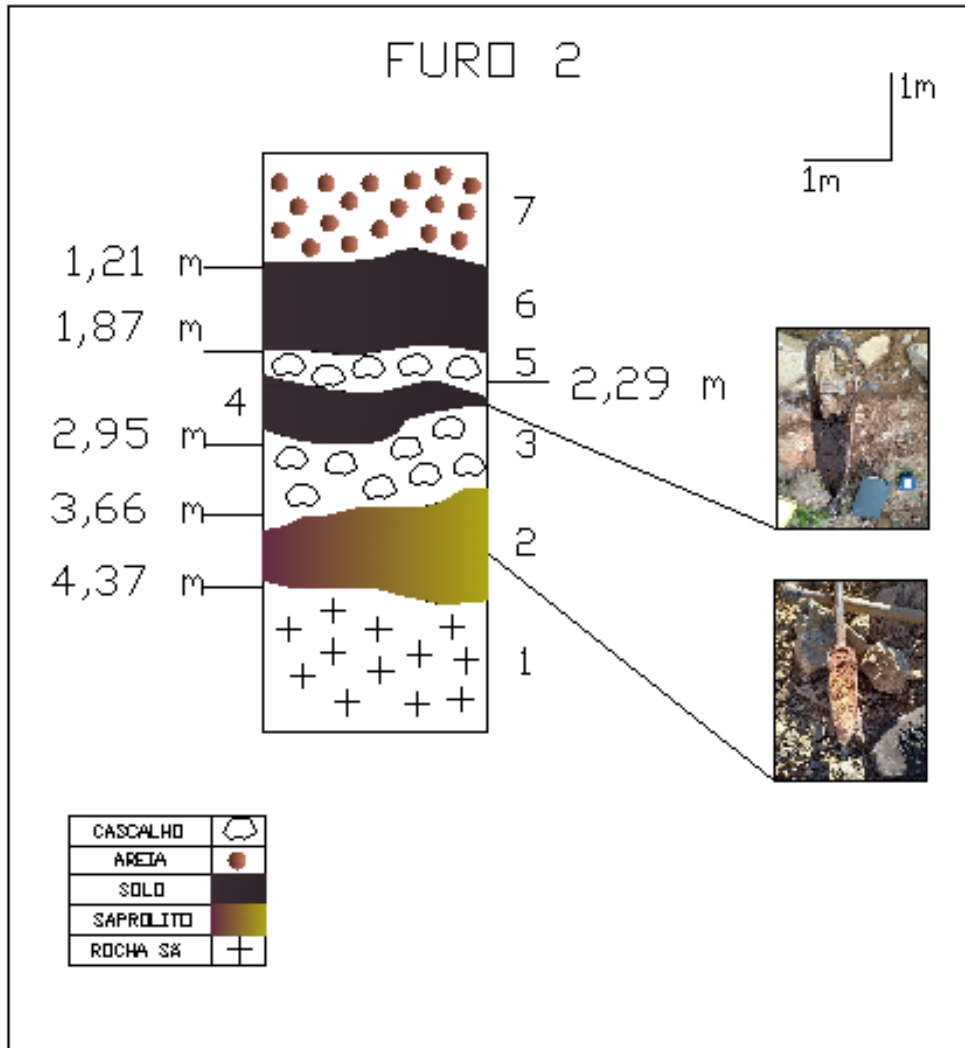


Figura 21: Seção estratigráfica S2, elaborada a partir da segunda sondagem manual (furo 2). As fotos indicam os horizontes correlacionados estratigraficamente a Seção S1; paleossolo homogêneo na Unidade 4 (a 2,29 m) e soprólito identificado a partir de 3,66 m de profundidade na Unidade 2. Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A Seção S2 inicia (Unidade 1) com a presença de rocha sã (o Ignimbrito), identificada a partir de 4,37 metros de profundidade. Na Unidade 2 imediatamente acima, foi identificada camada composta por saprólito cinza escuro avermelhado (5YR 4/2) espesso, de quase 1m de espessura (difícil tradar), sotoposto por lente de cascalhos centimétricos em cores reduzidas (na Unidade 3). Já a Unidade 4, é formada por horizonte arenoso pedogenizado (paleossolo) altamente pegajoso ao tato, com cerca de 66 cm de espessura. Essa camada precede a Unidade 5 (logo acima), identificada como porosa e com predominância de cascalhos

centimétricos, em cores variegadas; cinza claro avermelhado (2.5YR 7/1), marrom avermelhado claro (2.5YR 7/4) e brancos (2.5YR 8/1). Seguindo a arquitetura deposicional, a Unidade 6 revelou horizonte “A” atual de coloração cinza muito escuro (10YR 3/1), pouco poroso, não pegajoso ao tato, mas com presença de algumas poucas raízes. Encerrando a sequência pedoestratigráfica, na Unidade 7, foi identificado material arenoso bruno escuro (10R 4/4), provavelmente sedimentado/compactado pela construção da estrada existente sob as seções investigadas.

Diante dos resultados obtidos (geocronológicos, granulométricos, texturais, etc.), e das observações empíricas em campo, é possível reconhecer um padrão deposicional variado, mas que é bastante similar, e que se repete entre as seções estudadas. Tanto a seção de superfície (em corte de estrada), quanto aquelas (S1 e S2) elaboradas a partir das tradagens manuais, têm sua gênese condicionada à alternância entre períodos com desenvolvimento de solo e períodos com erosão e transporte coluvial sobre as encostas, em idades que coincidem com eventos relacionados aos **EIM 3, 2 e 1** que são caracterizados por importantes mudanças climáticas no hemisfério Norte, relacionas sobretudo a alternância entre períodos glaciais e interglaciais.

As datações obtidas (C^{14}), quando correlacionadas às características gerais das unidades individualizadas em cada uma das sequências pedoestratigráficas, revelaram, do topo para base, depósitos de origem coluvial se formando a partir de espesso manto de alteração do substrato rochoso que, na área de estudo, está associado tanto à alteração hidrotermal quanto supergênica. Horizontes pedológicos se formaram na Seção S1 em torno de 32.2 ka AP (amostra C-6, a 318 cm) e, novamente, a 29.6 Ka A.P (amostra C-5), durante **EIM 3**. Esses horizontes pedológicos relictuais ocorrem separados entre si por camadas ou superfícies de erosão em discordância estratigráfica, geradas por pulsos de coluviação oriundos da alta encosta. Dessa forma, fica evidente o padrão de alternância entre períodos de estabilidade e instabilidade morfogênica durante o registro local associado ao **EIM 3**.

As evidências encontradas, sugerem ainda, formação de horizonte pedológico por volta de 22.6 ka AP, no **EIM 2 (UMG)**, indicando predomínio de condições ambientais estáveis, favoráveis ao desenvolvimento pedogenético, durante o estágio mais frio e com menos umidade do Pleistoceno Superior (Figura 14). Esse paleossolo do **UMG** ocorre sotoposto a camada de material coluvial provavelmente transportado por movimentos de massa vindos da alta encosta, cujos sedimentos foram classificados neste estudo como lamosos, tendo sido depositados entre o **UMG** e o tardiglacial, há 16.9 ka A.P. (transição entre o Pleistoceno Superior e o Holoceno). Entretanto, essa condição ambientalmente mais estável, foi novamente interrompida por pulsos de coluviação que foram seguidos por nova fase de formação de solo, iniciando em torno de 14 Ka A.P (ainda no tardiglacial) e que se estende provavelmente por todo o Holoceno (**EIM 1**), até períodos históricos (1,4 Ka AP). Esse último resultado evidencia, portanto, a persistência de ambiente relativamente mais estável por aproximadamente 13.3 ka A.P, desde a transição multi-milenar entre o Pleistoceno e o Holoceno possibilitando a formação do espesso horizonte pedogenético A “atual” na área dos estudos.

7.3 Estratigrafia de Georadar (GPR)

O levantamento geofísico realizado através do GPR, teve sua origem nas coordenadas 26°14'29.52" de latitude Sul e 49°13'29.76 de longitude Oeste, com linha de caminamento traçada ao longo da estrada geral Campo Alegre, em paralelo a seção estratigráfica de superfície, seguindo no sentido NE/SO até a intersecção com a estrada geral adjacente (após 385 metros da origem). O Perfil de radar (GPR) com total de 385mts, adquirido com antena de 200 MHZ, foi capaz de imagear com qualidade satisfatória o subsolo local, permitindo a identificação e interpretação de distintos conjuntos de refletores. A prospecção empregada, foi capaz de nortear as sondagens manuais realizadas nos pontos P1 e P2 da estrada (Figura 08), contribuindo para elaboração das seções estratigráficas S1 e S2 (Figuras 19 e 20) e gerando dados pedoestratigráficos consistentes do ponto de vista geocronológico relativo e absoluto.

Neste estudo, a metodologia GPR permitiu o imageamento com alcance espacial de até 7 metros abaixo da superfície, revelando agrupamentos de refletores de alta e baixa intensidade, com configuração paralela a subparalela, geralmente ondulada, ocorrendo entre 128m até 228 metros da origem (Figura 22) da linha de caminamento (GPR). Esse intervalo revelou dois trechos (ou blocos) com conjuntos de refletores que possibilitaram a distinção de eventuais camadas no subsolo.

Os trechos do radargrama com os conjuntos de refletores identificados foram destacados entre retângulos vermelhos, onde as setas em amarelo indicam a localização exata dos pontos (P1 e P2) das sondagens manuais a 153m (seção S2) e a 202m (seção S1) da origem do caminamento GPR, e os lineamentos em amarelo os principais refletores interpretados após a execução das etapas de processamento digital básicas (conforme Tabela 2) em laboratório.

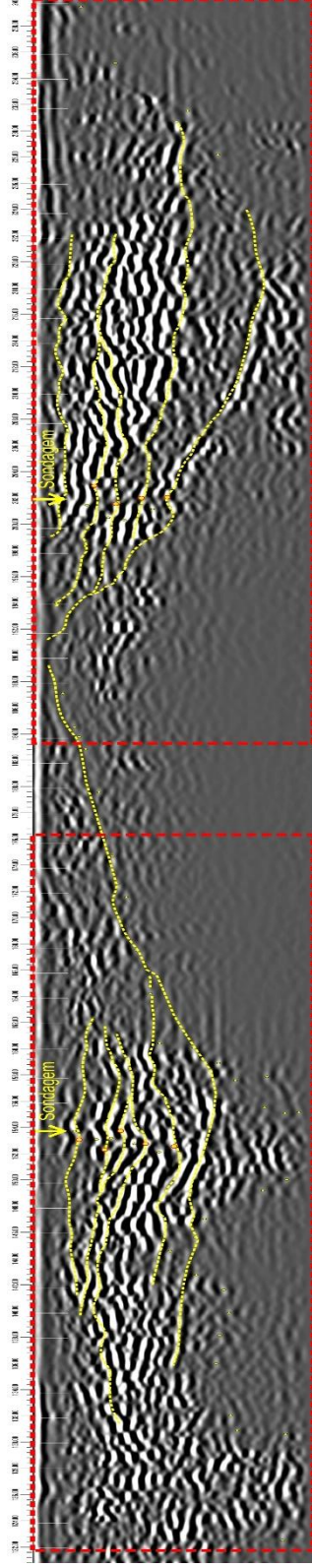


Figura 22: Localização dos pontos de sondagem manual (Furos 1 e 2) da esquerda (NE) para direita (SW) representados aqui por setas amarelas, e a interpretação (tracejado em amarelo) dos refletores verificados em cada um dos depósitos, separados graficamente aqui por retângulos na cor vermelha que definem os dois blocos citados. Vale ressaltar que o radargrama dessa figura não foi corrigido topograficamente, por motivo de visualização.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os conjuntos de refletos que compõem os 2 blocos citados acima, foram destacados a esquerda (SE) e a direita (SW) na figura 22. De forma geral, a zona de baixa reflexão em profundidade, no centro da figura, está associada ao posicionamento relativamente raso do substrato rochoso (vulcânico) local, dividindo as seções (S1 e S2), que constituem sequência de depósitos distintos, embora correlacionáveis. A análise dos seus respectivos depósitos, nos leva por tanto, a descrição e interpretação dos refletos (GPR) fundamentada, essencialmente, na abordagem aloestratigráfica, à qual se somam as descrições e dados obtidos a partir das sondagens manuais (dados granulométricos e as datações obtidas) em subsuperfície (Seção S1), bem como nos resultados pertinentes a seção de superfície (analisada em corte de estrada).

A seguir são apontadas as principais unidades deposicionais (denominadas neste trabalho de Unidade Aloestratigráficas) que foram individualizadas nos dois setores (blocos), seja no setor SW (Figura 23) ou no setor NE (Figura 24) do radargrama após passar por correção topográfica em laboratório.

A partir das interpretações no primeiro trecho do radargrama, foram reconhecidas 6 Unidades Aloestratigráficas (UN-1A, UN-2A, UN-3A, UN-4A, UN-5A, UN-6A) que foram individualizadas, numeradas e descritas a seguir (Figura 23), de acordo com as suas principais características geofísicas encontradas, e com base nos dados obtidos pelas sondagens manuais no ponto P1 da estrada (seção S1). Observar (na figura 23) que os limites (linhas tracejadas em vermelho) definidos entre as unidades aloestratigráficas, correspondem as transições entre conjuntos de refletos cuja geometria geral deixa de coincidir com a geometria do conjunto de refletos de unidades adjacentes.

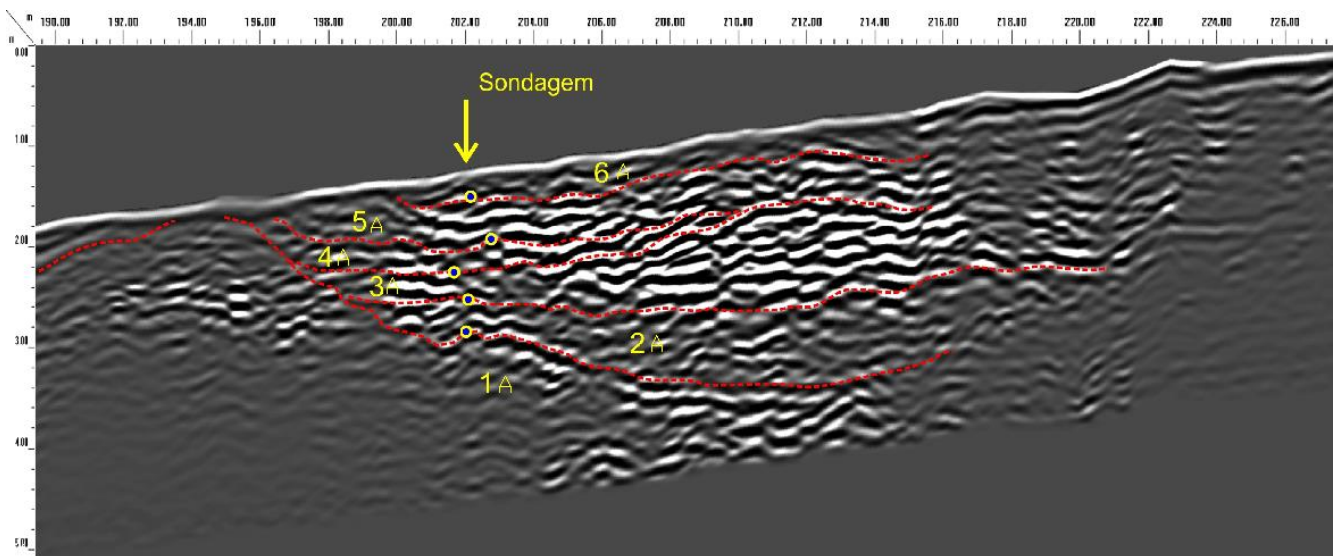


Figura 23: Trecho do radargrama GPR (com correção topográfica), representando de forma mais fiel a geometria dos refletos e as unidades aloestratigráficas identificadas a partir de 190m até 228 metros da origem. Em destaque ainda o ponto de sondagem P1 (seta em amarelo) a 202 metros da origem (seção S1).

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A **Unidade 1A** (UN-1A), a partir de 190m a té 226 metros da origem de caminhamento, em zona bastante rasa, e não apresenta refletores de magnitude relativa elevada até cerca de 1m de profundidade. A partir dessa profundidade, foi identificado conjunto de refletores ondulados de baixa magnitude relativa, mas que adquiriram maior intensidade de reflexão a partir dos 202 m de distância da origem, justamente onde foi realizada a sondagem manual no Ponto P1 da estrada, até a profundidade de 3,48m a baixo da superfície topográfica. Nesse trecho do radargrama, o conjunto de refletores foi confirmado como produto do espesso manto de intemperismo cinza escuro avermelhado (5YR 4/2), existente sob a rocha Ignimbrito (da formação rio turvo) que ocorre no topo dessa unidade. Consequentemente, esse conjunto de refletores está associado à unidade 1, da figura 20 mais acima. Observar como o contato superior da unidade gera clinofoma bem definida para a direita do radargrama, delineando importante contato côncavo para o alto entre a unidade 1A e a unidade 2A.

A **Unidade 2A** (UN-2A) ocorre após 199m da origem do GPR, sobreposta à unidade 1A, exibindo refletores de alta magnitude e considerável continuidade lateral que, assumem formato geral em cunha, ganhando espessura da esquerda para a direita do radargrama, desenvolvendo perfil geral côncavo para o alto. A geometria geral dessa unidade é típica de depósitos acumulados sob o predomínio de acreção lateral, preenchendo espaço de acomodação mais vasto para WSW (direita do radargrama). Essa unidade (UN-2A) é composta por lentes de material areno-siltoso separadas (ainda dentro da unidade) por horizonte pedogenizado a 3.18m de profundidade (amostra C-6), datado (C¹⁴) do Pleistoceno Superior (com 32.2 Ka A.P). Esse solo é o mais profundo e antigo estudado e difere temporalmente em 10.140 Ka anos do primeiro horizonte orgânico identificado na seção de superfície em corte de estrada (amostra C-4) que data de 22.690 anos A.P (próximo ao UMG).

A **Unidade 3A** (UN-3A), que ocorre imediatamente acima da anterior, apresenta conjunto de refletores de alta magnitude relativa, apresentando padrão de reflexão bastante intenso ao longo de toda unidade com geometria lenticular. Os depósitos associados a essa unidade foram interpretados a partir da sondagem no P1 da estrada (seção S1) como sequência de lentes areno-argilosas intercaladas com cascalhos. Apesar de possuírem geometria irregular, o radargrama indica que essas lentes apresentam continuidade lateral considerável (sobretudo a partir de 2.75m de profundidade), se estendendo lateralmente de 204m até cerca de 221m da origem de caminhamento GPR.

A **Unidade 4A** (UN-4A) define lente relativamente delgada, com terminação bem definida (a ENE e a SWS) a partir de 197m até 210m da origem de caminhamento, atingindo profundidades que variaram de 2,14 m a 2,80 metros abaixo da superfície. Seus refletores são relativamente mais espessos (com maior magnitude de sinal) e são os mais estensos lateralmente de toda sequência. De acordo com a sondagem manual (Seção S1) realizada a 202m da origem GPR, a forma dos refletores está associada as lentes de material mal selecionado (sobretudo areias e cascalhos) que teriam invadido a paleocosta no final do Pleistoceno superior, de acordo com a datação da amostra C-5 (com idade de 29.8 Ka A.P).

A **Unidade 5A** (UN-5A) que ocorre logo acima, com refletores (a partir de 200m até 216m da origem) de baixa magnitude relativa no topo, mas que ganham maior intensidade em direção a base da unidade. A sua geometria é ondulada, mas revela camada contínua, com contatos basal e de topo paralelos, se estendendo

ao longo de toda a zona mapeada. A composição da unidade foi confirmada no ponto da sondagem manual (no P1 da estrada), como material cascalho-arenoso de origem coluvial, possuindo fragmentos de rocha centimétricos amarelo-avermelhados (5YR 6/8), envoltos por matriz arenosa bruno escura (10YR 4/4).

Por fim, a **Unidade 6A** (UN-6A) encerra a sequência na zona mais rasa deste trecho do radargrama (de 200 até 215m da origem). Seus refletores são de baixa magnitude e de geometria ondulada, descrevendo traçados descontínuos ao longo da unidade. Com o auxílio da sondagem manual, o material foi interpretado como de origem alúvio-coluvial, composto por areias siltosas de coloração bruno escura (10YR 4/4).

Como indicado pela sua unidade basal, os depósitos revelados pelo radargrama da Figura 24 revelam depósitos que preencheram a borda de uma depressão do terreno. Apesar de a continuidade do radargrama não permitir interpretação clara para WSW, nota-se que a localização (Figura 8) do ponto de sondagem (P1) indica que o perfil GPR atravessa transversalmente o setor adjacente ao talvegue seco (cabeceira do vale) formando linha de drenagem intermitente de primeira ordem, que desemboca na rede hidrográfica mais a jusante (zona de mata-galeria na imagem). Além disso, é notável a associação entre a geometria da Unidade 2A no radargrama e a geometria das unidades de horizontes de solo enterrados na seção estratigráfica descrita em corte de estrada (ver Figuras 15 e 16). As datações indicam, porém, que o GPR detectou unidade mais antiga, que ainda não fora descrita no local por estar invisível, mas que complementa o quadro evolutivo já esboçado anteriormente. Consequentemente, esse trecho do radargrama (Figura 23) revela padrão de preenchimento de cabeceira de vale que foi dissecada pela erosão (incisão vertical do relevo) durante o **EIM 3**, ou ainda antes desse estágio, como indica a datação radiométrica obtida para os solos que se desenvolveram entre os depósitos da unidade 2A (datado de 32,2 ka AP). Dessa forma, os resultados demonstram que o período (relacionado ao **UMG**) cuja tendência seria de resfriamento e déficit hídrico no hemisfério norte, foi na verdade, de considerável estabilidade ambiental na área de estudos, pelo menos o suficiente para promover a pedogênese.

A seguir, como proposta de ampliar a escala de análise na área investigada, apresentamos na Figura 24 os resultados do imageamento no segundo trecho do radargrama (de 128 a 170m da origem), que permitiu a distinção de 07 Unidades Aloestratigráficas (a 58 metros da primeira sondagem na seção S1). As unidades individualizadas (UN-1B, UN-2B, UN-3B, UN-4B, UN-5B, UN-6B, UN-7B), foram descritas de acordo com a concentração e magnitude dos refletores encontrados e com base nos dados obtidos através da segunda sondagem manual, realizada no ponto P2 da estrada (seção S2) a 153m da origem de caminhamento GPR.

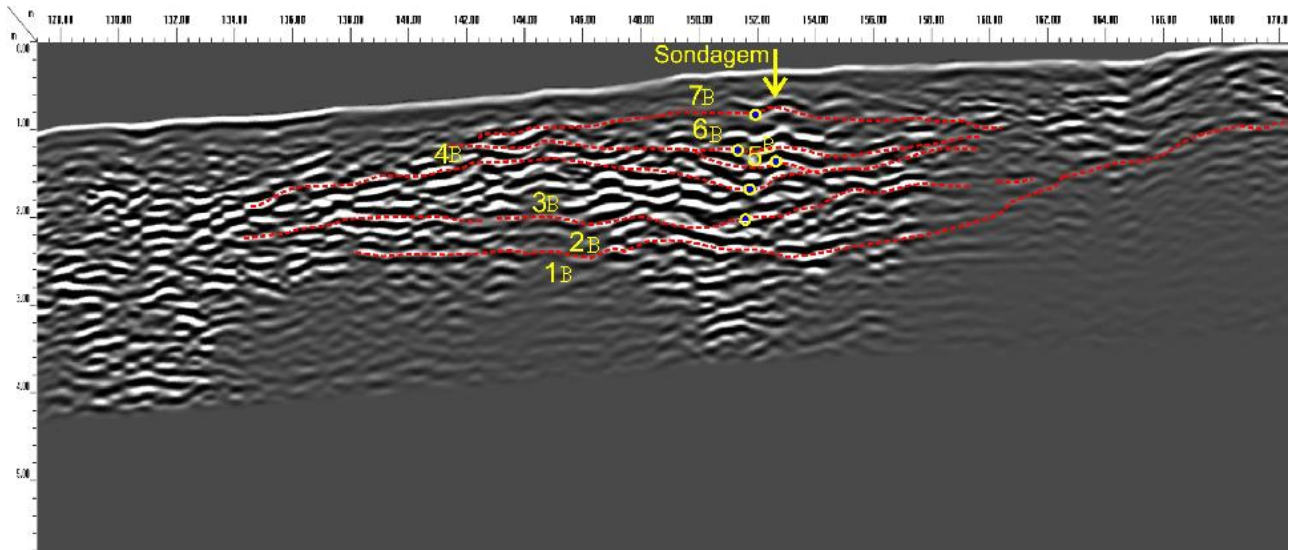


Figura 24: Trecho do radargrama destacando as 7 Unidades Aloestratigráficas individualizadas (por linhas tracejadas em vermelho) e numeradas (em amarelo). No detalhe a localização exata (seta em amarelo) do ponto onde foi realizada a segunda sondagem manual no P2 da estrada (seção S2). Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A **Unidade 1B** (UN-1B) apresenta alguns setores com padrão de reflexão semi-transparente (entre 134 e 140 e entre 157 e 170 metros da origem). Diferentemente, no intervalo entre 147 e 157 m da origem os refletores na unidade desenvolvem maior magnitude. Dados de sondagem no local indicam presença de rocha sã abaixo da profundidade de 4,37 m (Figura 25), que coincide aproximadamente com o final da zona de alta magnitude de reflexão no setor onde foi feita a sondagem. Com base nessa informação, as zonas semi-transparentes em profundidade no radargrama ficam interpretadas como zonas associada à rochas locais intemperizadas. As zonas com refletores de alta magnitude relativa passam a corresponder a depósitos recentes. Além disso, é notável a geometria da zona de alta magnitude dos refletores nas proximidade do ponto de sondagem, delineando seção cônica que estreita para o fundo. A geometria dos refletores sugere: acreção vertical na base, com refletores ondulados a convexos para o topo, com baixa inclinação para ENE (esquerda da figura 25). Na medida em que a seção cônica se alarga para o topo, refletores com maior continuidade indicam mergulho claro dos materiais para ENE, provavelmente preenchendo uma cavidade erosiva em onlap (recobrimento expansivo).

A **Unidade 2B** (UN-2B) foi definida por conjunto de refletores internos de alta magnitude relativa e boa continuidade lateral. O material apresenta cor avermelhada escura (5YR 4/2) e foi confirmado através da sondagem manual (no P2 da estrada) como regolito presente sob o embasamento rochoso local.

A **Unidade 3B** (UN-3B) é caracterizada por conjunto de refletores espesso de alta magnitude relativa, de boa extensão lateral, compondo corpo lenticular importante. O material é composto por cascalho arenoso com cores pálidas, características de solos mal drenados, desenvolvidos em ambiente redutor.

A **Unidade 4B** (UN-4B) é bastante delgada e teve o seu traçado feito de forma aproximativa sob refletores ondulados e descontínuos espacialmente. O material identificado é arenoso, embora com evidências de pedogenização, apresentando-se pegajoso ao tato. Trata-se, provavelmente de horizonte

pedológico, associado a um período de relativa estabilidade, possivelmente associado ao ambiente local saturado em água (visto o caráter pegajoso apresentado).

A **Unidade 5B** (UN-5B) apresenta refletores descontínuos e de baixa magnitude relativa. A unidade está associada a areias cascalhosas, com predominância de cascalhos centimétricos em cores variegadas, como: cinza claro avermelhada (2.5YR 7/1); marrom avermelhada clara (2.5YR 7/4), e branca (2.5YR 8/1).

A **Unidade 6B** (UN-6B) sotoposta a anterior, possui padrão desorganizado de refletores, similar ao da UN-5B, mas que ganham intensidade de reflexão entre 152m e 156m da origem de caminhamento GPR. A unidade define lente cuja extensão está limitada às proximidades do local de sondagem manual (no Furo 2). Nesse ponto (P2) a sondagem revelou ocorrência de horizonte pedológico “A”, de coloração cinza muito escura (10YR 3/1) com pouca porosidade, nada pegajoso ao tato, mas com presença de algumas poucas raízes dispersas. O corpo lenticular define, portanto, remanescentes de um horizonte superficial de solo, parcialmente erodido em suas margens laterais e enterrado pela unidade sobrejacente (UN-7B).

A sequência aloestratigráfica descrita, encerra com a **Unidade 7B** (UN-7B) apresentando refletores em trecho com profundidade inferior a 1,0m. A unidade está mal definida, e se estende por todo o radargrama logo abaixo da superfície, com refletores ondulados e descontínuos de baixa magnitude relativa. No ponto de sondagem foi identificado material arenoso bruno escuro (10R 4/4) heterométrico e relativamente compactado, com características de entulhos associados ao revestimento superficial da estrada vicinal onde ocorrem as seções estudadas.

Apesar da descrição mais genérica aqui realizada, fica claro o potencial da metodologia geofísica GPR para o estudo de formações superficiais quaternárias. Como verificado, o ambiente de sedimentação estudado é relativamente complexo, mesmo para a aplicação de abordagens estratigráficas tradicionais (da litoestratigrafia à aloestratigrafia empírica), pois ambientes de encostas, de fato, não geram estruturas sedimentares bem desenvolvidas dificultando a seu mapeamento. Apesar disso as estruturas lenticulares, em cunha e em camadas paralelas verificadas na seção de corte de estrada e nos perfis GPR demonstram que: a) os registros estudados possuem organização espacial notável, embora complexa; b) a metodologia GPR permite a detecção dessas estruturas. Considerando ainda as datações (C^{14}) obtidas através das sondagens orientadas pelos dados geofísicos, fica evidente que as discontinuidades detectadas pelo GPR representam intervalos entre fases ambientais distintas, variando entre períodos que favorecem seja a pedogênese, seja a morfogênese no local estudado.

Os resultados obtidos com o emprego das distintas metodologias, aliadas com revisão bibliográfica pertinente aos estudos do Quaternário, sobretudo no Brasil, permitiram o reconhecimento de padrão deposicional multi-episódico na área de estudos, por pelo menos 30.800 anos de evolução da paisagem. Esse padrão, intrinsecamente atrelado à evolução da rampa coluvial estudada no Cerro do Touro, é identificado de forma semelhante nos Altos Campos da Serra da Mantiqueira-RJ (MODENESIGAUTTIERI, 2000), onde depósitos coluviais (relacionados a movimentos de massa) encontram-se intercalados a horizontes pedológicos datados de 36 a 14 ka AP (LIMA, 2010). No entanto, a evolução paleoambiental observada não parece estar de acordo com o cenário observado nas demais áreas dos trópicos e subtropicais úmidos, pelo menos não dentro do **EIM 3** (THOMAS & THORP, 1995; THOMAS, 2000; THOMAS et al., 2001),

considerando que, nessas áreas o estágio **EIM 3**, em particular, é frequentemente definido como período quente e úmido, associado à formação de extensas planícies de inundação (THOMAS et al., 2001). Entretanto, as evidências encontradas na área de estudo sugerem condições ambientais locais mais secas e provavelmente, mais frias nesse período. Da mesma forma, como ressaltado por Lima (2010), durante as fases de clima seco do **EIM 3**, identificadas por Thomas (2000) entre 40 e 30 ka A.P nas áreas dos Altos Campos da Serra da Mantiqueira-RJ (MODENESIGAUTTIERI, 2000), os locais estudados na bacia de Campo Alegre apresentaram a formação de horizontes pedológicos, indicando ambiente de maior umidade relativa (OLIVEIRA et al., 2006).

Já no **EIM 2** (22 a 14 ka), os registros sugerem a ocorrência de clima úmido, seguido por período seco, sob temperaturas mais baixas do que as atuais (LIMA, 2010) em Campo Alegre- SC (OLIVEIRA et al., 2006), assim como no rio Tamanduá- MG (TURCQ et al., 1997), no Centro-leste do estado de São Paulo (MELO & CUCHIERATO, 2004), na cidade de Ponta Grossa-PR (MELO et al., 2003) e no município de Lapa-PR (CAMARGO, 2005).

Nessa fase, associada ao **UMG** os trópicos e subtropicais úmidos tenderiam a gerar registro paleoambiental característico de uma atmosfera global mais fria e mais seca. Contudo, por volta de 20 ka A.P, temos em Jaraguá do Sul-SC, o registro da formação de horizontes pedológicos, como verificado neste trabalho e em trabalhos anteriores (OLIVEIRA et al., 2006) na área e também no município de Lapa-PR (CAMARGO, 2005). Consequentemente, é possível inferir que o resfriamento e a diminuição das precipitações que caracterizaram o Último Máximo Glacial em áreas tropicais brasileiras (THOMAS & THORP, 1995; THOMAS et al., 2000), não têm efeitos similares nos planaltos do Sul do Brasil.

Consequentemente, o padrão deposicional já registrado anteriormente no Cerro do Touro em Jaraguá do Sul-SC, e em Campo Alegre-SC (OLIVEIRA et al., 2001, OLIVEIRA et al., 2006 e LIMA, 2005 e LIMA 2010) é consistente com os resultados obtidos neste trabalho, convergindo para o fato de que o modelo bipolar de interpretação paleoclimática (quente/úmido X frio/seco) não se aplica aos terrenos altos do Sul do Brasil.

8 Considerações Finais

Esse trabalho permitiu estabelecer relações estratigráficas entre as seções analisadas em superfície e em subsuperfície na localidade de Cerro do Touro, em Jaraguá do sul-SC. A caracterização estratigráfica dos depósitos (coluviais e dos paleossolos) investigados pôde através de metodologias tradicionais, integradas com a utilização de prospecção geofísica (GPR) rasa e o emprego da geocronologia, auxiliar no estudo dos depósitos locais, levando à identificação de importantes registros Quaternários (do Pleistoceno Superior e do Holoceno).

A integração de metodologias derivadas de áreas distintas do conhecimento em caráter multidisciplinar, favoreceu a interpretação da evolução da rampa coluvial estudada, indicando dinâmica paleoambiental que alternou pulsos de sedimentação coluvial (em períodos de maior energia), com períodos estáveis o suficiente para o desenvolvimento de horizontes pedogenéticos, mesmo em períodos frequentemente associados à fase mais fria e seca do Pleistoceno Superior, como o Último Máximo Glacial. O mesmo foi verificado durante a

passagem entre o Pleistoceno e o Holoceno, embora nesse período tenha havido, de fato, aumento da umidade local (OLIVEIRA et al., 2006).

Dessa maneira, as alterações na paisagem local, puderam ser vislumbradas também a partir das alterações climáticas globais (conhecidas para o período de tempo abarcado pelos registros). Entretanto, sem desconsiderar o posicionamento geográfico e topográfico das seções (imprescindíveis na análise), e o alto índice pluviométrico registrado na área (variando anualmente de 1600 a 1800 mm), onde as chuvas ocorrem de forma bem distribuída ao longo de todo ano.

Nesse contexto, as seções estratigráficas estudadas, por estarem localizadas topograficamente em cabeceira de vale e geograficamente na borda leste da Serra do Mar (a 1046m em relação ao nível do mar atual), sofrem intensa influência das massas de ar mais úmidas provenientes do oceano atlântico (a 66km de distância). Como consequência disso, atua importante efeito orográfico na área, o que explica a saturação do ambiente em água (sobretudo em períodos onde as taxas de evaporação teriam sido menores que as taxas de pluviosidade), criando condição ambiental capaz de proporcionar a formação de horizontes pedológicos, mesmo em fases ambientais consideradas mais secas e mais frias na maior parte das áreas estudadas na América do sul e no Brasil.

Entretanto, o presente estudo permitiu a correlação entre alterações climáticas em escala global com os ciclos locais de pedogênese e de morfogênese na área de estudos, comprovando a sensibilidade atribuída às cabeceiras de vale e aos ambientes de articulação entre encostas e o fundo dos vales, face às mudanças climáticas globais.

Contudo, apesar dos resultados relativamente satisfatórios deste trabalho, é possível apontarmos para novos desdobramentos para pesquisas na localidade do Cerro do Touro, ampliando ainda mais a escala de análise sobre os registros quaternários encontrados. Estudos futuros na área, poderiam certamente avançar no tocante à distribuição local dos seres vivos, incorporando quem sabe uma análise palinológica (as amostras orgânicas coletadas), possibilitando investigação paleoclimática mais detalhada sobre o registro cronoestratigráfico preservado no local. Do ponto de vista estratigráfico e geofísico, também seria possível avançar mais, realizando novas linhas de caminamento GPR ao longo da rampa coluvial, desta vez até o fundo do vale e calha fluvial.

REFERÊNCIAS

- ANNAN, A. P. *Ground Penetrating Radar workshop notes. Canadá: Sensors & Softwares, inc., internal report*, 1992.
- ANNAN, A. P. *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures, and Applications*, 286 pp., *Sensors and Software. Inc., Mississauga, Ontario, Canada*, 2004.
- BARBOZA, E. G. Terraços da margem leste da Laguna dos Patos, litoral médio do Rio Grande do Sul: Estratigrafia e evolução holocênica. 1999. 138 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - UFRGS, Porto Alegre, 1999.
- BASEI, A.S. Evolução tectônica dos terrenos entre os cinturões ribeira e Dom Feliciano (PR-SC). *Rev. Bras. Geoc.* 22(2):216-221, 1992.
- BIGARELLA, J.J.; MOUSINHO, M.R.1965. Considerações a respeito da evolução das vertentes. *Boletim paranaense de Geografia*, n°16-17, P.96.
- BRADLEY, R. S. 1985. *Quaternary Paleoclimatology: Methods of Paleoclimatic Reconstruction*.
- BRADLEY, R. S. 1999. *Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary*, 2nd ed. *International Geophysics Series*, Vol. 64.
- BIONDI, J. C.; BARTOSZECK, M. K & VANZELA, G. A. Controles Geológicos e Geomorfológicos dos depósitos de caulim da bacia de Campo Alegre (Santa Catarina). *Revista Brasileira de Geociências*, n. 31(1), p. 13-20, 2001.
- BIONDI, J. C.; VASCONCELLOS, E. M. G. & VANZELA, G. A. Estudo comparativo entre os minérios da mina Bateias e de outras minas da região de Campo Alegre (Santa Catarina). *Revista Brasileira de Geociências*, n. 32, p. 245-254, 2002.
- BORGES, W, R. Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletorresistividade. 2002. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- CAMARGO, G. & OLIVEIRA, M.A.T. Análise tridimensional de volumes de solo e evolução de encosta em área afetada por erosão em voçorocas e em túneis no Sul do Segundo Planalto Paranaense, *Revista GEOSUL*, 14 (27): 430-436, 1998.
- CAMARGO, G. O Significado Paleoambiental de Depósitos de Encosta e de Preenchimento de Canal no Município de Lapa (PR) no Sul do Segundo Planalto Paranaense. 2005. 1 v. Tese (Doutorado) – Curso de Doutorado em Geografia, Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- CITRONE, S.B. 1998. Bacia de Campo Alegre-SC. Aspectos petrológicos, estratigráficos e caracterização geotectônica. Tese de Doutorado em Geociências. Universidade de São Paulo, 185p.
- CUNHA, S.B. *Geomorfologia do Brasil*, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.
- DAGALLIER, G. et al. *Ground penetrating radar application in a shallow marine Oxfordian limestone sequence located on the eastern flank of the Paris Basin, NE France. Sedimentary Geology*, v. 130, n. 3, p. 149-165, 2000.
- DAIXT, E.C & CARVALHO, M.A. dá s. (1980) Projeto Geoquímica na área de Guaratubinha-Pien, SC. São Paulo, DNPM/CPRM.

- DANIELS, J. J. *Fundamentals of ground penetrating radar. In: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 2, 1989, Golden. *Proceedings...*, Golden: SAGEEP 89, p.62 - 142, 1989.
- DANIELS DJ. 1996. *Surface Penetrating Radar. The Institution of Eletrical Engineers, London, United Kingdom*. 300 p.
- DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. *Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting*, v.37, p.531-551, 1989.
- DIAS, J.A. (2004) - A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos: Uma Introdução à Oceanografia Geológica. II – Análise Textural.
- DIETRICH, W. E.; DORN, R. *Significance of thick deposits of colluvium on hillslopes: a case study involving the use of pollen analysis in the coastal mountains of northern California. The Journal of Geology*, n. 92: p. 147-58, 1984.
- DIETRICH, W. E.; DUNNE, T. *The channel head. In: BEVEN, K & KIRKBY, M. J. (eds.). Channel network hydrology. John Willey e Sons Ltd, 1993.*
- EBERT, H. O grupo Guaratubinha no norte do estado de Santa Catarina. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 25, 1971, São Paulo. Anais... São Paulo: SBG, 1971. v. 1, p.147-165.
- FLEMMING, B. W. *A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis ternary diagrams. Continental Shelf Research*, n 20, pp. 1125-1137, 2000.
- FOLK, R.L. *The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rocks. Journal of Geology*, n. 62, p. 344-359, 1954.
- GALLOWAY, W.E. *Genetic stratigraphic sequence in basin analysis I; architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., Tulsa*, 73:125-42.1989.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; COIMBRA, A.M. 1975. The Ribeira Fold Belt. *Rev. Bras. Geoc.* 5(4):257-266.
- JOL, H. M.; SMITH, D. G. *Ground penetrating radar: antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments. Journal of Applied Geophysics*, v.33, nº 1-3, p. 93-100, 1995.
- KELLER, G. V. *Rock and mineral properties. Electromagnetic methods in applied geophysics*, v. 1, p. 13-51, 1988.
- KÖPPEN, William.1931. *Climatologia. México, Fundo de Cultura Econômica.*
- LIMA, G.L. *Caracterização Pedostratigráfica de Depósitos de Encosta e de Vale, localidade de Cerro do Touro, Campo Alegre, Estado de Santa Catarina. 2005. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geociências – UFSC, Florianópolis, 2005.*
- LIMA, G. L. *Estratigrafia e palinologia de depósitos colúvio-aluviais no Planalto de São Bento do Sul e no Parque Estadual da Serra do Tabuleiro, Santa Catarina 2010. Tese de Doutorado, Departamento de Geociências – UFSC, Florianópolis, 2010.*
- MELLO, C. L. *Fácies Sedimentares, Arquitetura Depositional e Relações Morfoestratigráficas em um Sistema de Leques Aluviais Holocênicos: Aloformação Manso – Médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ). 1992. 38p. Dissertação de Mestrado, Depto. De Geologia – IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro,1992.*

- MELLO, C.L. (1994). Aloestratigrafia e Análise de Fácies: “Revoluções” na Geologia Sedimentar e o Estudo do Quaternário. Anais Anuário UFRJ 1994.
- MELO, M. S.; MEDEIROS, C. V.; GIANNINI, P. C. F.; GARCIA, M. J.; PESSEDA, L. C. R. Sedimentação Quaternária no Espaço Urbano de Ponta Grossa, PR. Geociências, n. 22, p. 33-42, 2003.
- MELO, M. S.; CUCHIERATO, G. *Quaternary colluvial-eluviais covers of the Eastern Paraná Brazil, Southeastern Brazil. Quaternary International*, n. 114, p. 45-53, 2004.
- MITCHUM, R. M.; VAIL, P. R.; SANGREE, J. B.; 1977b. *Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 6. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences In: Payton, C.E. (Ed.), Seismic Stratigraphy-Applications to Hydro- carbon Exploration. AAPG Mem. 16, p. 117– 133.*
- MODENESI-GAUTTIERI, M. C.; TOLEDO, M. C. M. *Weathering and the formation of hillslope deposits in the tropical highlands of Itatiaia – southeastern Brazil. Catena*, n. 27, p. 81-103, 1996.
- MOREY, R.M., 1974. *Detecting of subsurface cavities by ground penetrating radar. Highway Geological symposium, Proceedings 27, p. 28-30.1974.*
- MOURA, J. R. S.; MEIS, M. R. M. Contribuição à estratigrafia do quaternário no Planalto SE do Brasil. Anais da Academia Brasileira de Ciência, n. 58, p. 89-102, 1986.
- MOURA, J. R. S.; MELLO, C. L. Classificação aloestratigráfica do Quaternário Superior na região de Bananal (SP/RJ). Revista Brasileira de Geociências, n. 21, 1991.
- MOURA, J.R.S. & SILVA, T.M. 1998.Complexo de rampas de colúvio. In: GUERRA, A.J.T.
- MUNSSSEL SOIL COLOR CHART. *Munssel Color Company. Baltimore, 1994.*
- NEAL, 2000. *Applications of ground-penetrating radar (GPR) to sedimentological, geomorphological and geoarchaeological studies in coastal environments. Geological Society, London, Special Publications, 175, 139-171.*
- NEAL, A; 2004. *Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth-Science Reviews 66, 261– 330.* Erosão e sedimentação atual em cabeceiras de drenagem: Interpretação Paleohidrológica de conexões entre encostas e canais.
- NEMEC, W. & KAZANCI, N. *Quaternary colluvium in west-central Anatolia: sedimentary facies and palaeoclimatic significance. Sedimentology*, n. 46, p. 139-170, 1999.
- OLHOEFT, G. R. *Electrical properties of rocks, in Physical Properties of Rocks and Minerals, in Touloukian, Y. S., Judd, W. R., and Roy, R. F., eds.: New York, McGraw-Hill, p. 257-330, 1981.*
- OLIVEIRA, M.A.T. & PEREIRA, K. N. Identificação de Solos Colúviais em Áreas de Cabeceira de Drenagem: Cerro do Touro, Campo Alegre (SC), Revista GEOSUL, 14 (27): 476-481. Florianópolis, 1998.
- OLIVEIRA, M.A.T.; CAMARGO, G.; PAISANI, J.C. & CAMARGO FILHO, M. Erosão e sedimentação atual em cabeceiras de drenagem: interpretação paleohidrológica de conexões entre encostas e canais. Congresso da Associação brasileira de estudos do Quaternário – ABEQUA, 8, 2001, Imbé (RS). Boletim de Resumos...Imbé, ABEQUA, p. 271-273, 2001a.
- OLIVEIRA, M. A. T.; CAMARGO, G.; PAISANI, J. C. & CAMARGO FILHO, M. Caracterização Paleohidrológica de estruturas sedimentares quaternárias através de análises macroscópicas e microscópicas: do registro sedimentar local aos indícios de mudanças globais. Pesquisa em Geociências, vol. 28, n. 2, p. 183-195, 2001c.

OLIVEIRA, M.A.T.; PAISANI, J.C.; CAMARGO, G. & CAMARGO FILHO, M. Análise macro e microscópica de estruturas sedimentares atuais e pretéritas: base para interpretação paleohidrológica de depósitos de baixa encosta. Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário - ABEQUA, 8. 2001, Imbé (RS), Boletim de Resumos...Imbé, p. 273-275, 2001b.

OLIVEIRA, M. A. T. & LIMA, G. L. Classificação de sedimentos quaternários em cabeceiras de vale através da aplicação do diagrama de Flemming: município de Campo Alegre, Norte de Santa Catarina, no prelo.

OLIVEIRA et al, 2006. Registro de mudanças ambientais pleistocênicas e holocênicas em depósitos de cabeceira de vale: Campo Alegre, planalto norte catarinense (SC)
Revista Brasileira de geociências, v.36, n°3, 2006.

ORESTES, J.J. Aplicação do Georradar (GPR) na prospecção eletromagnética de solos: Potencialidades e limitações. 2013. Dissertação de Mestrado. Programa de pós graduação em Geografia, Departamento de Geografia, setor de ciências da Terra, Universidade federal do Paraná, Curitiba, PR.

PAISANI, J.C. & OLIVEIRA, M.A.T. Identificação de paleossolos em áreas de cabeceira de drenagem: O Caso da Colônia Quero-Quero, Palmeira (PR), Revista GEOSUL, 14 (27): 470-475, 1998.

PAISANI, J.C.; PONTELLI, M.E.; ANDRES, J. Superfícies aplainadas em zona morfoclimática subtropical úmida no Planalto Basáltico da Bacia do Paraná (SW Paraná/ NW Santa Catarina): primeira aproximação, Geociências 27, p.541-553, 2008.

PORSANI, J. L., RODRIGUES, A. R., CALLARI, R., ANTUNES, P. T. O método GPR. Comunicação técnica interna, Petrobrás/Cenpes/Segef, Rio de Janeiro, RJ, 1994a.

PORSANI, J. L., RODRIGUES, A. R., CALLARI, R., ANTUNES, P. T., ROSA, F. J. Demonstração do GPR. Comunicação técnica interna, Petrobrás/Cenpes/Segef, Rio de Janeiro, RJ, 1994b.

PORSANI, J. L. & RODRIGUES, A. R. O método GPR aplicado à caracterização de reservatórios: um exemplo na Bacia Potiguar - RN. In: Quarto congresso internacional da sociedade brasileira de geofísica, 1995, Rio de Janeiro. Resumos Expandidos, Rio de Janeiro: SBGf, v.2, p. 843 - 845, 1995.

PORSANI, J. L. *Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP.* Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 30.03. 1999.

PORSANI J.L, BORGES WR, ELIS VR, DIOGO LA, HODOO FY, MARRANO A & BIRELLI CA. 2004. Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP. Revista Brasileira de Geofísica, 22(3): 245-258.

REYNOLDS, J. M. *An introduction to applied and environmental geophysics.* John Wiley & Sons, 2011.

RODRIGUES, S. I. Contribuições dos métodos gpr e eletromagnético indutivo em estudos de sítios arqueológicos de sambaquis costeiros no Estado de Santa Catarina. 2009. 235 f. Tese (Doutorado). Curso de Geofísica, Departamento de Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ROQUE, C. Análise Morfosedimentar da Sequência Depositional do Quaternário Superior da plataforma continental Algarvia entre Faro e a foz do rio Guadiana. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Departamento de Geologia, Universidade de Lisboa, 221pp. Lisboa, 1998.

SANTA CATARINA, GABINETE DE PALNEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL, SUBCHEFIA DE ESTATÍSTICA, GEOGRAFIA E INFORMÁTICA. Atlas de Santa Catarina. Aerofoto Cruzeiro. Rio de Janeiro, 1986.

SILVA, L.C. 1987. Geologia do Pré-cambriano/Eopaleozóico de Santa Catarina. In: Silva, L.C.; Bortoluzzi, C.A (eds.).

- SOUZA, A.M. 2006. Mapeamento digital e modelagem determinística de depósitos eólicos costeiros da região de Porto do Mangue-RN. UFRN/Depart. Geologia, Relatório de Graduação.
- SOUZA, A M. Uso do GPR na geração de modelos estáticos 3D para planejamento de lavra de minerais pesados depositados em dunas eólicas. 2008. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geodinâmica e Geofísica, UFRN, São Paulo, 2008.
- SOUZA, C. R. G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A. M.; OLIVEIRA, P. E. Quaternário do Brasil. 1ª Edição, Editora Holos, Ribeirão Preto, SP, 2005. p.p. 265-268.
- SUGUIO, K. Geologia do Quaternário e mudanças ambientais. Paulo's Comunicação e Artes Gráficas. São Paulo, SP, 1999.
- SUGUIO, K. Estratigrafia do Cenozóico Brasileiro. Anais da In: Reunião Aberta da Comissão Brasileira da Estratigrafia, 2004, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 2004.
- SUGUIO, K; ANGULO, R.J. CARVALHO, A. M.; CORRÊA, I.C.S.; TOMAZELLI, L.J.; Paleoníveis do mar e paleolinhas de costa. In Souza et al (Ed.) Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto, Holos Editora, 2005.
- THOMAS, M. F. *Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes. England: John Wiley and Sons Ed. Winchester, 1994.*
- THOMAS, M. F.; THORP, M. B. *Geomorphic response to rapid climatic and hydrologic change during the Late Pleistocene and Early Holocene in the humid and sub-humid tropics. Quaternary Science Reviews*, n. 14, p. 193-207, 1995.
- THOMAS, M. F. *Late Quaternary environmental changes and the alluvial record in humid tropical environments. Quaternary International*, n. 72, p. 23-36, 2000.
- THOMAS, M. F.; NOTT, J.; PRICE, D. M. *Late Quaternary stream sedimentation in the humid tropics: a review with new data from NE Queensland, Australia. Geomorphology*, n. 39, p. 53-6, 2001.
- TOMAZZOLI, E. R.; FURTADO, S. M. A. & PELÉRIN, J. M. Aspectos geológicos da sequência vulcanossedimentar de Campo Alegre. 1º Simpósio sobre vulcanismo e ambientes associados, 1999, Gramado, RS.
- TONIOLO, J.A.; SOUZA, M.B.G. Metalogenia das Bacias Neoproterozoico-Eopaleozoicas do Sul do Brasil: estado de Santa Catarina. Projeto BANEIO – Bacias do Itajaí, de Campo Alegre e Corupá. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Porto Alegre, 2015.
- TRAVASSOS, J. M.; MENEZES, P. T. L. *GPR exploration for groundwater in a crystalline rock terrain. Journal of Applied Geophysics*, v. 55, nº 3-4, p. 239-248, 2004.
- TURCQ, B.; PRESSINOTTI, M. N.; MARTIN, L. *Paleohidrology and Paleoclimate of the past 33.000 years at the Tamanduá River, Central Brazil. Quaternary Research*, n, 47, p. 284-294, 1997.
- VALIATI, D. Projeto Sondagem Campo Alegre/74: relatório final. Porto Alegre: CPRM, 1974. 2 v.
- VAN WAGONER, J.C; MITCHUM, R.M; CAMPION, K.M.; RAHMANIAN, V.D. *Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies. Tulsa, Am. Assoc. Petrol. Geol. Methods in Exploration Series 7. 1990. 55p.*
- VELDKAMP, A., AND L. A. TEBBENS, 2001. *Registration of abrupt climate changes within fluvial systems: Insights from numerical modeling experiments, Global Planet. Change*, 28, 129 – 144.

WAICHEL, B. L. Caracterização geoquímica das rochas vulcânicas da bacia de Campo Alegre, SC. 1998. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

WILSON, R. C. L.; DRURY, S. A.; CHAPMANN, J. L. *The Great Ice Age*. Londres: Routledge, 2000.