



USO DE GEORADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO EM ESTUDOS PEDOGEOMORFOLÓGICOS NO LITORAL NORTE DA BAHIA

Jéssica da Mata Lima¹
Alisson Duarte Diniz²
Junia Kacenenbogen Guimarães³
Joelson da Conceição Batista⁴
João Paulo Santos Correia da Silva⁵
Deorgia Tayane Mendes de Souza⁶

RESUMO

Os Tabuleiros Costeiros do Litoral Norte do Estado da Bahia apresentam predominantemente formações superficiais arenosas, entre elas, coberturas pedológicas desenvolvidas em materiais alóctones e autóctones. Essas superfícies abrigam solos frágeis e altamente suscetíveis à degradação, intensificada pela especulação imobiliária atrelada à atividade turística. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo associar o uso do Georradar de Penetração no Solo (GPR) aos estudos pedogeomorfológicos realizados em Tabuleiros Costeiros Dissecados no Litoral Norte da Bahia (Figura 1). Complementarmente, houve a associação dos dados geofísicos à análise geoquímica de Ti e Zr por fluorescência de raios X (FRX), utilizando-se a razão Zr/Ti, conforme Maynard (1992). O GPR opera por emissão de pulsos eletromagnéticos de alta frequência em direção ao solo, captando sinais refletidos em diferentes camadas, em função das distintas propriedades dielétricas dos materiais subsuperficiais. Foram realizados levantamentos com GPR ao longo de uma topossequência compreendida por Neossolo Quartzarênico, Espodossolo e Cambissolo. Os resultados apresentados no Radargrama 1, indicam a presença de um conjunto de refletores contínuos e mais intensos entre 8 e 15 m de profundidade no Perfil 1 (Compartimento de montante - Neossolo Quartzarênico Órtico típico), que se estende até o Perfil 2 (Compartimento intermediário - Espodossolo Humilúvico Órtico arênico), onde se torna mais superficial, alcançando cerca de 2 m de profundidade. Esse padrão sugere a presença de um material de alta condutividade, possivelmente associado aos horizontes espódicos e uma camada endurecida presente em sua base. Ressalta-se, também, a presença de uma zona de menor intensidade relacionada aos horizontes arenosos C e E dos Neossolos Quartzarênicos e dos Espodossolos, respectivamente. No radargrama 2, entre o Compartimento Intermediário e o Perfil 3 (Compartimento de jusante - Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico), os refletores que indicam a presença de material endurecido, identificados no radargrama 1, diminuem em intensidade, aproximadamente 6 m após o Perfil 2, enquanto outro conjunto de refletores surge abaixo do referido material endurecido estendendo-se até o Perfil 3, onde é observado a uma profundidade de aproximadamente 4 m. No Perfil 3, indícios obtidos por tradagens e dados geofísicos, apontam que o lençol freático ocorra a partir de cerca de 6 m de profundidade, variando conforme a topografia e a formação geológica do local. A análise integrada dos

¹ Doutora pelo Curso de Pós-Graduação em Geografia - Universidade Federal da Bahia - UFBA, jessicalima.geo@gmail.com;

² Professor orientador: Doutor, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia - UFBA, alisson.diniz@ufba.br;

³ Professora Doutora, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia - UFBA, juniakg@gmail.com;

⁴ Professor Doutor, Instituto de Geociências Universidade Federal da Bahia - UFBA, jdbatista@ufba.br;

⁵ Graduando do Curso de Geologia, Instituto de Geociências Universidade Federal da Bahia - UFBA, jpscs1998@gmail.com;

⁶ Professora Doutora, Departamento de Educação, Universidade Estadual da Bahia - UNEB, deorgiasouza.geo@gmail.com.



dados de GPR e da relação Zr/Ti evidenciou duas importantes descontinuidades: (1) entre os horizontes arenosos e o material endurecido encontrado na base dos setores de montante e intermediário da topossequência; (2) entre esse material endurecido e os horizontes do Cambissolo na baixa vertente. A camada endurecida foi interpretada como uma duricrosta caulínica, formada pela cimentação de materiais inconsolidados ou saprolíticos (FORTUNATO, 2004; BÁRDOSSY; ALEYA, 1990), e possivelmente contribuiu para o processo de gênese dos Espodossolos identificados na região. A experiência demonstrou o potencial do GPR como ferramenta complementar para estudos pedogeomorfológicos. Trata-se de uma aplicação ainda em fase experimental, que requer aprofundamento metodológico, mas que já aponta caminhos para o uso integrado de métodos geofísicos e geoquímicos na investigação de solos em ambientes tropicais úmidos.

Palavras-chave: Tabuleiros Costeiros; Podzolização; Duricrosta.

INTRODUÇÃO

A relevância das formações superficiais dos Tabuleiros Costeiros do Litoral Norte do estado da Bahia deve-se à sua localização em áreas com condições climáticas, relevo plano ou suavemente ondulado e solos profundos que favorecem o desenvolvimento e a mecanização das atividades agrícolas, mas também facilitam processos intensos de uso e degradação.

A área também se destaca por integrar a Área de Proteção Ambiental Litoral Norte do Estado da Bahia e estar nos limites da Reserva Ecológica da Sapiranga, uma área de 600 hectares de Mata Atlântica que abriga relevante biodiversidade. A despeito de ser uma Área de Proteção Ambiental, há diferentes níveis de degradação ambiental, provocada pela ocupação desordenada, fragilidade pedológica e ausência de planejamento e gestão ambiental eficientes (Santos, 2016; Lima, 2017; Villalba, 2020).

Para que o planejamento ambiental seja efetivo, é necessário o conhecimento prévio das condições naturais, bem como o reconhecimento da paisagem como síntese de aspectos físicos, bióticos e sociais, o que favorece a pesquisa aplicada e o manejo sustentável dos recursos. Nos Tabuleiros Costeiros, os materiais do Grupo Barreiras apresentam distintas fácies e características físico-químicas, mineralógicas e deposicionais, influenciando diretamente nos processos pedogenéticos e morfogenéticos que originaram as paisagens litorâneas. Segundo Ribeiro (2001), essa cobertura sedimentar resulta de um material intensamente evoluído pedogeneticamente, submetido a sucessivas fases de sedimentação, pedogênese, eventos neotectônicos e formação de couraças ferruginosas ao longo Neógeno e Quaternário.

A cobertura pedológica da região apresenta limitações ao uso agrícola, como baixa reserva de nutrientes e presença de horizontes cimentados que restringem a profundidade efetiva, dificultam o desenvolvimento radicular e limitam a circulação de água e ar, diminuindo



a aeração do solo, formando lençóis suspensos temporários e ambientes redutores (Costa-Júnior, 2008).

A presença de camadas ou horizontes endurecidos, conforme mencionada na literatura sobre os solos da região, sugere duas possíveis interpretações. Primeiramente, especula-se que sejam duricrostas, material de origem sedimentar que pode ter desempenhado um papel favorável na formação dos Espodossolos (Andrade, Lima; Diniz, 2020; Fortunato, 2004) ou que ela foi formada a partir do processo pedogenético, principalmente, de podzolização, o que incide na mudança de nomenclatura para um horizonte ortstein, duripã ou fragipã (Ucha; Villas Boas; Hadlich, 2012).

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo associar o uso do Georradar de Penetração no Solo (GPR) aos estudos pedogeomorfológicos em Tabuleiros Costeiros Dissecados no Litoral Norte da Bahia (Figura 1), articulando também os dados geofísicos à razão geoquímica Zr/Ti obtida por fluorescência de raios X (FRX), conforme Maynard (1992).

A integração dos dados de GPR com a razão Zr/Ti revelou duas discontinuidades: (1) entre horizontes arenosos e o material endurecido encontrado na base dos setores de montante e intermediário da topossequência; (2) entre esse material endurecido e os horizontes do Cambissolo na baixa vertente. O material endurecido foi interpretado como uma duricrosta caulínica, formada por cimentação de materiais inconsolidados ou saprolíticos (Fortunato, 2004; Bárdossy; Aleya, 1990), e possivelmente associado à gênese de Espodossolos. A experiência demonstrou o potencial do GPR como ferramenta complementar em estudos pedogeomorfológicos. Trata-se de uma aplicação ainda em fase experimental, que requer aprofundamento metodológico, mas que já aponta caminhos para o uso integrado de métodos geofísicos e geoquímicos na investigação de solos em ambientes tropicais úmidos.

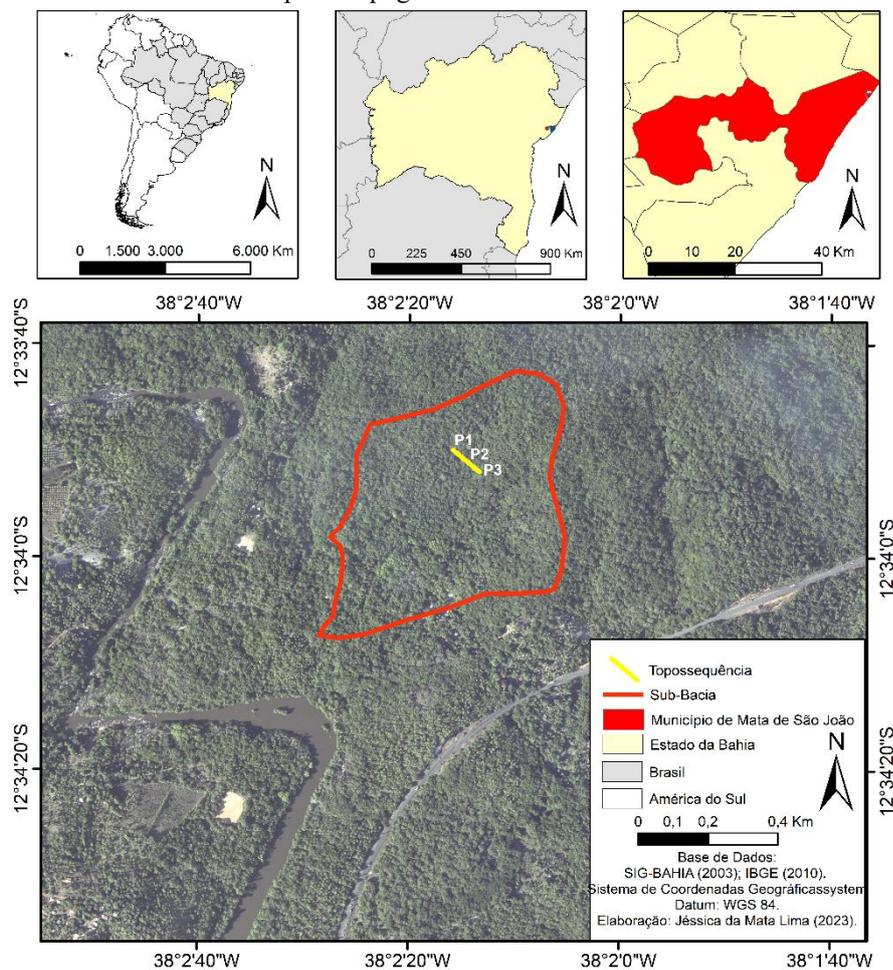
METODOLOGIA

A área designada para a realização desta pesquisa está localizada no Nordeste da Bahia, mais especificamente na Área de Proteção Ambiental (APA) Litoral Norte do Estado da Bahia, na Reserva da Sapiranga, situada no município de Mata de São João. Está inserida em uma sub-bacia do Rio Pojuca, abrangida pelo quadrante com coordenadas geográficas de 38°2'30''W a 38°2'00''W e 12°33'40''S a 12°34'10''S (Figura 01). O acesso principal pode ser realizado pela Linha Verde (BA-099), distante 75km de Salvador.



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE
GEOMORFOLOGIA

Figura 01 – Mapa de localização da área de estudo, situada no município de Mata de São João, incluindo perfil topográfico da vertente sob análise.



A partir do Balanço Hídrico elaborado por Lima (2017) e de acordo com dados do município de Mata de São João obtidos pela SEI (1999), a área objeto deste estudo possui clima B₁ r A' a': úmido, com deficiência de água pequena ou nula, megatérmico e com evapotranspiração acumulada no verão muito baixa conforme classificação climática de Thornthwaite e Matther (1948).

A vertente objeto de estudo desse trabalho está inserida na unidade geológica do Grupo Barreiras, cuja unidade geomorfológica são os Tabuleiros Costeiros Dissecados (Lima *et al.*, 2019). De acordo com Fortunato (2004) e Filizola *et al.* (2001), os solos que predominam nos Tabuleiros Costeiros são Latossolos e Argissolos Amarelos. Em menor quantidade, há a presença de Neossolos Quartzarênicos e Espodossolos, Argissolos Acinzentados e os Plintossolos (Fortunato, 2004).

Nos Tabuleiros Costeiros Dissecados, Lima (2017) pontuou que existe uma dinâmica pedogeomorfológica diferenciada. Duas unidades geológicas estão inseridas nesse compartimento geomorfológico, sendo elas: Grupo Barreiras e Leques Aluviais. No domínio



do Grupo Barreiras, os topos dos Tabuleiros Costeiros Dissecados abrigam solos como Argissolos Amarelos Distrocócos abruptos, nas encostas convexas foram identificados Cambissolos Hápticos Tb distróficos petroplínticos e nos sopés das encostas foram mapeados Gleissolos Hápticos.

Para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, foram estabelecidas as seguintes linhas de ações, seguidas das etapas de execução: 1- diagnóstico, inventários preliminares e delimitação da área de pesquisa; 2- levantamento de dados em campo; 3- análises laboratoriais; e 4- organização, interpretação e análise dos resultados. Essas etapas são descritas abaixo.

Diagnóstico, inventários preliminares e delimitação da área de pesquisa

O levantamento bibliográfico e cartográfico, etapa fundamental do estudo científico, foi realizado gradualmente com a finalidade de buscar suporte teórico e metodológico para o desenvolvimento da pesquisa. Foram utilizados dados regionais, sobretudo os elaborados por Dominguez (2006) e RADAMBRASIL (2010) para a compreensão regional do funcionamento dos elementos paisagísticos, como geologia, geomorfologia, climatologia e hidrografia. Dados em escala local, com maior detalhamento, tais como, mapa de solos (LIMA, 2017), estudos em topossequências (Souza, 2020), catena (Santana *et al.*, 2022) e sedimentológicos (Santos, 2016) realizados na área da pesquisa, mapa de prováveis lineamentos estruturais (Lima, 2017) e mapas de compartimentos geomorfológicos (Lima, 2017).

Posterior à análise e interpretação dos dados supracitados, foi realizada a seleção das áreas de interesse para a realização dos estudos em topossequência. Para a escolha da área, foi necessário realizar, primeiro, leituras sobre os problemas e fragilidade ambiental na região do Litoral Norte da Bahia e levantar as principais questões de pesquisa que envolvem a evolução da paisagem, em especial, a relação morfogênese - pedogênese nos Tabuleiros Costeiros. Ressalta-se que a área selecionada se caracteriza por possuir uma considerável extensão de vegetação secundária (Mata Atlântica), consistindo, dessa forma, em uma área com menor influência antrópica.

Assim, para compreender a origem das formações superficiais, analisou-se uma vertente localizada em um vale assimétrico, nos Tabuleiros Costeiros Dissecados. Tal vertente foi previamente estudada por Souza (2020), Andrade, Lima e Diniz (2020) e Santana *et al.* (2022) e apresenta uma sequência de Neossolo Quartzarênico - Espodossolo - Cambissolo.



Levantamento de dados em campo: levantamento topográfico, amostragem de solos e mapeamento geofísico com GPR

Esta etapa englobou inspeções em campo para a coleta de dados e amostras, sendo dividida em seis fases: i) familiarização e reconhecimento da área de estudo; ii) identificação da vertente de interesse, efetuação de levantamento topográfico, seleção dos pontos de amostragem e realização de tradagens; iii) abertura de trincheiras, descrição de perfis pedológicos e coleta de amostras de solos; iv) mapeamento do subsolo com a utilização do radar de penetração no solo (GPR); v) aferição e validação dos dados obtidos. Detalhes sobre as etapas de amostragem, levantamento topográfico e levantamento do subsolo com GPR estão apresentados a seguir.

A seleção dos pontos de amostragem fundamentou-se na interpretação da base cartográfica previamente elaborada e na prospecção em campo. O levantamento topográfico, realizado por meio de clinômetro e balizas, forneceu dados para a identificação de rupturas de declividade e alterações na forma da vertente, constituindo um parâmetro importante para a realização de tradagens e análise das transformações pedogeomorfológicas que ocorrem desde o topo até o vale.

Os critérios utilizados para identificação e seleção da amostragem de solos e sedimentos representativos para este estudo se basearam no método de Boulet *et al.* (1982), no mapeamento preliminar de formas do relevo (Lima, 2017), no mapeamento de solos (Lima, 2017) e no mapeamento de unidades geoambientais, além das contribuições de Souza (2020) Andrade, Lima e Diniz (2020) e Santana *et al.* (2022).

A vertente objeto de estudo do presente trabalho, denominada Vertente A, possui três compartimentos: compartimento de montante, onde localiza-se o Neossolo Quartzarênico Órtico típico (P1); o compartimento intermediário, ocupado pelo Espodossolo Humilúvico Órtico arênico (P2); e o compartimento de jusante, onde se situa o Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico (P3).

Levantamento de dados do Subsolo com Radar de Penetração no Solo (GPR)

Os estudos geofísicos empregando o Ground Penetrating Radar (GPR) foram conduzidos por meio do equipamento SIR-3000 - Geophysical Survey Systems, Inc (GSSI), com uma antena de frequência igual a 200 MHz, disponibilizado pelo Laboratório de Estudos Costeiros da Universidade Federal da Bahia – LEC/UFBA. Esses estudos auxiliaram na



compreensão da distribuição lateral dos horizontes ou camadas adensadas, identificação de estruturas pedogenéticas e sedimentares, análise de materiais de origem e de evidências da possível influência da neotectônica na gênese e evolução dos solos e do relevo da área estudada.

O radar penetrante no solo (GPR) opera por meio da emissão de pulsos de alta frequência eletromagnética em direção ao solo, registrando respostas em intervalos de tempo extremamente curtos, da ordem de nanossegundos. As propriedades elétricas dos materiais, principalmente a umidade, influenciam a propagação desse sinal. Os sinais refletidos resultam das distintas propriedades elétricas dos materiais presentes no subsolo. Esses sinais são detectados, amplificados, digitalizados e armazenados em meio magnético. A penetração do sinal é maior em solos com baixa condutividade elétrica e constante dielétrica, o que possibilita o uso de fontes com frequências mais elevadas, resultando em maior resolução (Davis; Annan, 1989). De acordo com Davis e Annan (1989), solos arenosos são os melhores para a pesquisa com o radar.

Os radargramas gerados constituem um continuum, em que o final de cada imagem corresponde ao início da imagem subsequente. Esse formato proporciona uma visão abrangente das características dos solos nas topossequências. Os processamentos adotados para o estudo e interpretação dos dados obtidos pelo GPR foram realizados no Reflex-Win Version 7.2.3 e são elencados a seguir:

1. Correção do tempo zero: Eliminação de registros nulos referentes ao período em que a antena receptora capturou leituras, mas os primeiros sinais enviados pela antena transmissora ainda não haviam retornado;
2. Dessaturação (DEWOW): Remoção das componentes de baixa frequência (WOW) que podem acoplar-se à amplitude da onda, causando saturações no sinal e impedindo a percepção de alguns receptores no radargrama.
3. Correção estática: Correção dos efeitos causados por trepidações durante o deslocamento da antena para a aquisição dos dados.
4. Filtragem Espacial (2-D): Utilização de filtros espaciais para realçar ou remover variações espaciais indesejadas, minimizando ruídos relacionados ao deslocamento horizontal das antenas (Porsani, 1999). Neste caso, foi aplicado o filtro 2-D de Background Removal, um passa-alta, para remover reverberações de baixa frequência e destacar refletores pontuais e inclinados.
5. Correção topográfica: Ajuste para compensar os efeitos topográficos, garantindo uma interpretação mais precisa dos dados em áreas com variações de elevação.



6. Filtro de frequência (passa banda): Eliminação de ruídos indesejados, permitindo a passagem apenas da frequência de interesse para preservar as informações relevantes.
7. Deconvolução: Aprimoramento da resolução visual dos dados, melhorando a capacidade de distinguir detalhes na imagem.
8. Migração: Reconstrução da imagem para representar mais fielmente a subsuperfície. As reflexões aparentes são reposicionadas em sua verdadeira profundidade, e as difrações são colapsadas em um ponto. A técnica de migração de Kirchoff 2-D foi empregada.
9. Conversão tempo/profundidade: Após análise do campo de velocidades, as informações foram convertidas de m/ns para profundidade em metros, proporcionando uma representação mais precisa das características subsuperficiais.

Esses procedimentos combinados resultaram em uma análise mais robusta e detalhada das variações pedológicas e litológicas na área de estudo, contribuindo significativamente para a compreensão do ambiente investigado.

Análises laboratoriais

Em laboratório as amostras foram submetidas a procedimentos específicos para viabilizar as análises químicas. Inicialmente, o volume total de cada amostra passou por um processo de secagem ao ar. Em seguida, as amostras foram destorroadas e submetidas a peneiramento em malha de 2,00mm para remoção dos cascalhos e calhaus e obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Além disso, foi realizada a etapa de quarteamento para garantir a representatividade nas análises subsequentes.

A análise da composição química total das amostras foi conduzida por meio da técnica de fluorescência de raios X (FRX). Foram incluídas na análise amostras de solos provenientes de trincheiras e de tradagens, totalizando 22 amostras de solos na TFSA. Adicionalmente, uma amostra complementar de couraça ferruginosa do Grupo Barreiras (S12C) foi incorporada para possibilitar uma análise comparativa mais abrangente.

O equipamento utilizado para a execução da análise foi o FRX com detector XL3t *Thermo Scientific of Niton* e tecnologia *GOLD+* (Figura 02), disponível no laboratório de Espectrorradiometria (LABESPECTRO) da Universidade Estadual de Feira de Santana. No processo analítico, aproximadamente 20g de cada amostra na TFSA foram pulverizados em almofariz de ágata, assegurando uma fração abaixo de 1mm. Esse procedimento foi adotado para estabelecer um padrão comum em relação ao tamanho máximo de partículas, distribuição granulométrica e homogeneidade entre as amostras. Em seguida, as amostras foram

aconditionadas em cápsulas específicas para o equipamento, e o modo *Soil* foi empregado, realizando três disparos de 90 segundos sobre cada cápsula, conforme o método 6200 a *United States Environmental Protection Agency* (EPA, 1998).

Figura 02 – Equipamento de Fluorescência de Raio X XL3t *Thermo Scientific of Niton*

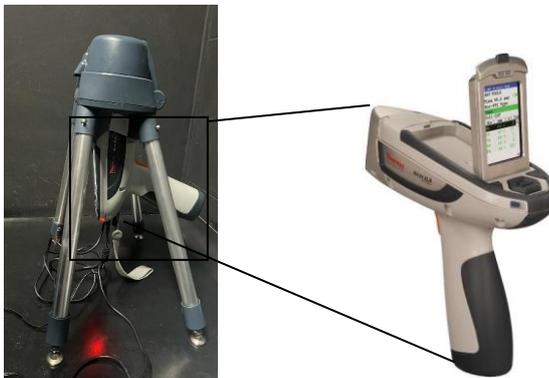


Foto: Jéssica da Mata Lima (2024)

Fonte: <https://www.thermofisher.com/>

A técnica de FRX foi empregada para determinar os teores de macronutrientes e micronutrientes nas amostras de solo e em uma amostra de couraça ferruginosa localizada em um corte de estrada próximo à vertente analisada. Essa técnica é baseada na medição das intensidades dos raios X secundários ou característicos emitidos pelos elementos constituintes da amostra (Scapin, 2002). Para identificar a proximidade do material de origem e possíveis discontinuidades litológicas, utilizou-se os teores totais de Ti e Zr obtidos por meio da FRX, aplicando a relação Zr/Ti proposta por Maynard (1992): **Relação Zr/Ti = [% Zr/Ti] * 10²**.

O zircão (ZrSiO₄), o rutilo (TiO₂), a ilmenita (FeTiO₃) e a titanita (CaTiO(SiO₄)) são minerais pesados de elevada estabilidade. Em função disso, os elementos Zircônio (Zr) e Titânio (Ti) têm sido utilizados como indicadores para quantificar a intemperização do material de origem na produção de determinado volume de solo e como indicativo da presença de discontinuidades de materiais (Cooper; Vidal-Torrado; Lepsch, 2002; Maynard, 1992; Moreira; Oliveira, 2008; Novaes Filho *et al.*, 2012; Tonui; Eggleton; Taylor, 2003).

Foi utilizado o método de Maynard (1992), Novaes Filho (2012) e Tonui, Eggleton e Taylor (2003) para analisar a relação Zr/Ti. Tonui, Eggleton e Taylor (2003) propuseram que é possível identificar a presença de material alóctone associada a material de outras origens a partir de mudança abrupta e aumento dos valores da razão Zr/Ti em direção ao topo do solo. Conforme observado por Moreira e Oliveira (2008), a relação Zr/Ti, na TFSA, apresenta leve



aumento da rocha para a superfície. Logo, quanto maior o grau de intemperismo, maior será o valor da relação Zr/Ti comparado ao valor do seu material de origem.

De acordo com Maynard (1992), um desvio da relação Ti/Zr superior a 100% em relação ao material de origem pode indicar presença de material alóctone em materiais altamente intemperizados. Novaes Filho (2012) adaptou essa abordagem para a relação Zr/Ti. Assim, para este estudo, a fórmula utilizada para calcular o desvio foi: $\text{Desvio} = \left[\% \frac{(Zr/Ti_s - Zr/Ti_p)}{Zr/Ti_p} \right] * 10^2$, onde s= solo e p= material de origem.

Seguindo o critério de Wilding e Dress (1983) e Novaes Filho *et al.* (2012), foi calculado o coeficiente de variação (CV) da relação Zr/Ti utilizando a seguinte fórmula: $\text{CV} = (\text{Desvio Padrão-Média}) * 10^2$. A variabilidade esperada de atributos de solo na paisagem é assim expressa: baixa (CV < 15%), moderada (CV de 15 a 35%) e alta (CV > 35%).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos valores de Zr/Ti obtidos para cada amostra (Gráfico 01 e Tabela 01), observa-se que as amostras com valores mais altos de Zr/Ti, acima de 0,2, correspondem aos horizontes A, AC, C2 e 562cm do Perfil 1 (Neossolo Quartzarênico Órtico típico). Valores intermediários, acima de 0,1 são observados em C1 e 725cm do Perfil 1 e nos horizontes A1, A2, A3, E, Bh e Bhs1 do Perfil 2 (Espodossolo Humilúvico Órtico arênico). Por outro lado, os horizontes 790cm do Perfil 1, Bhs2 e Cr do Perfil 2, além de todos os horizontes do Perfil 3 (Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico), apresentam valores baixos de Zr/Ti, inferior a 0,1.

Mudanças abruptas na relação Zr/Ti foram identificadas no Perfil 1, principalmente, entre 725cm e 790cm; no perfil 2 nos horizontes Bhs1 e Bhs2, e Bhs2 e Cr (Tabela 01 e Gráfico 01). No entanto, no Perfil 3 não foram observadas mudanças abruptas entre os horizontes. A presença de mudanças abruptas pode indicar que há contribuição de material externo nos Perfis 1 e 2. Por outro lado, os horizontes mais profundos possuem menor valor de Zr/Ti. Variações abruptas na relação Zr/Ti refletem discordância entre material coluvial e aluvial, encontrado na base (Tabela 01 e Gráfico 01).

No Perfil 3, os valores de Zr/Ti (Tabela 01 e Gráfico 01) são menos elevados que os horizontes superficiais dos Perfis 1 e 2, mas um pouco mais elevado do que o horizonte Cr do Perfil 2. Isso pode indicar que nesse perfil a duricrosta encontra-se exposta e já sofreu um relativo grau de intemperismo.



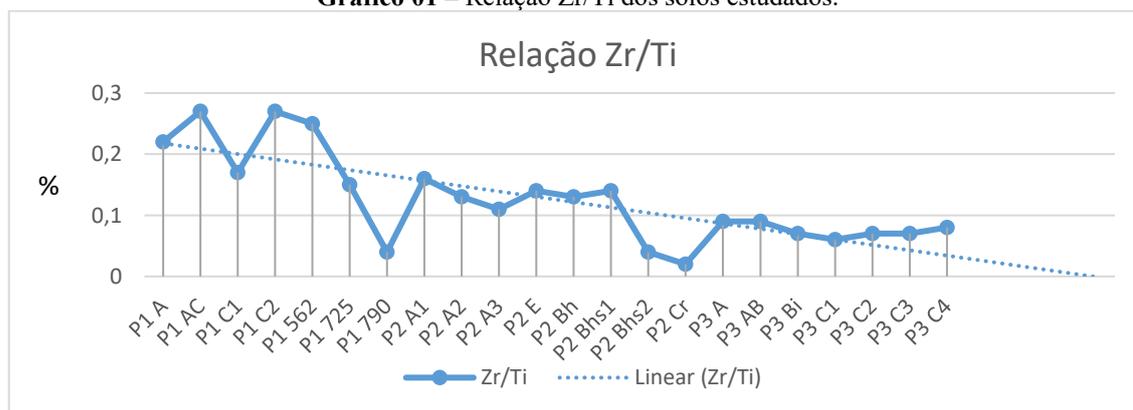
15º SIMPÓSIO NACIONAL DE
GEOMORFOLOGIA

Tabela 01 – Teores de Zr e Ti e Relação Zr/Ti das amostras de solos.

Amostra	Zr	Ti	Zr/Ti * 10 ²
Perfil 1 – Neossolo Quartzarênico Órtico típico			
A	0,0138	0,0614	22,47557
AC	0,0151	0,0548	27,55474
C1	0,0064	0,0366	17,48634
C2	0,01	0,0373	26,80965
562	0,0239	0,0952	25,10504
725	0,0203	0,138	14,71014
790	0,0203	0,4732	4,289941
Perfil 2 – Espodossolo Humilúvico Órtico arênico			
A1	0,0174	0,1117	15,57744
A2	0,0146	0,108	13,51852
A3	0,0088	0,0796	11,05528
E	0,0134	0,0934	14,3469
Bh	0,0107	0,0837	12,78375
Bhs1	0,0197	0,1458	13,51166
Bhs2	0,0179	0,4098	4,367984
Cr	0,0094	0,4443	2,115688
Perfil 3 – Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico			
A	0,0287	0,318	9,025157
AB	0,0314	0,362	8,674033
Bi	0,0277	0,4107	6,744582
C1	0,028	0,4421	6,333409
C2	0,0274	0,3976	6,891348
C3	0,0354	0,5059	6,99743
C4	0,0376	0,4613	8,150878

Zr: Zircônio; **Ti:** Titânio; **Zr/Ti:** Relação Zircônio/Titânio.

Gráfico 01 – Relação Zr/Ti dos solos estudados.



Uma tendência de aumento do valor da relação Zr/Ti da base para o topo do solo é observada nos Perfis 1 e 2, indicando a contribuição de materiais alóctones para a formação do solo (Tabela 01 e Gráfico 01). No entanto, essa tendência não é observada no Perfil 3, o que pode indicar que seu material de origem está *in situ*.



Em relação ao desvio, os horizontes do Perfil 1, com maiores desvios, cujos valores estão acima de 100%, conforme critério estabelecido por Maynard (1992), estão entre as amostras AC e 790cm (542,3%), assim como entre as profundidades 725cm e 790 cm (242,9%). Entre os horizontes C1 e C2, AC e C1, 562cm e 725cm do Perfil 1 também foram observados valores elevados de desvio, embora tenham sido menores que 100%, sendo, respectivamente, 53,3%, 57,6% e 70,7%. No Perfil 2, os maiores desvios foram entre os horizontes A1 e Cr (636%), Bhs1 e Bhs2 (209,3%) e Bhs2 e Cr (106,5%). No Perfil 3, o maior valor de desvio foi entre os horizontes A e C1, sendo de 42,5%. Entre os Perfis também foram observados valores de desvio consideráveis, principalmente entre os horizontes AC do Perfil 1 e Cr do Perfil 2, com desvio de 1202,4%; Cr do Perfil 2 e C4 do Perfil 3 com 285,3%; e Cr do Perfil 2 e C1 do Perfil 3, sendo de 199%.

Investigação geofísica da toposequência por Radar de Penetração no solo – GPR

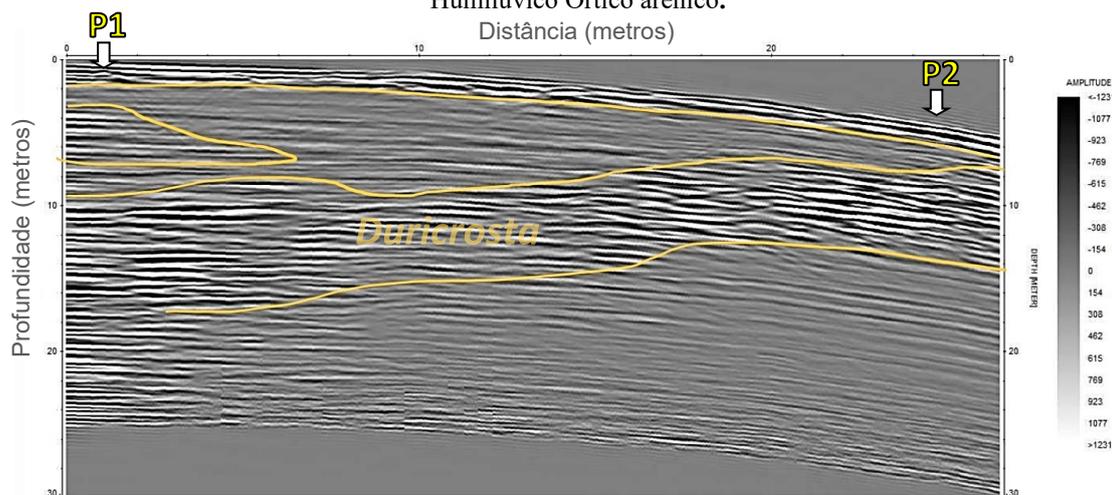
O uso do Radar de Penetração no Solo (GPR) proporcionou a obtenção de imagens dos pulsos eletromagnéticos que refletem o comportamento, as características e as transições entre os diferentes materiais ao longo da toposequência, destacando-se, especialmente, os domínios dos solos com horizontes/camadas endurecidos(as) nos compartimentos de montante e intermediário, presença de água e fraturas.

O radargrama 1 (Figura 03), que abrange os Perfis 1 (Neossolo Quartzarênico Órtico típico) e 2 (Espodossolo Humilúvico Órtico arênico) revela um conjunto de refletores fortes em cerca de 5 metros de profundidade próximo ao Perfil 1, que se dissipa rapidamente em uma curta distância (aproximadamente 2 metros), indicando uma possível variação no material. Identifica-se um refletor contínuo e mais intenso entre 8 e 15 metros de profundidade, que se estende até o Perfil 2, onde se torna mais superficial, alcançando cerca de 2 metros de profundidade. Esse padrão sugere a presença de um material de alta condutividade, possivelmente associado aos horizontes espódicos e ao horizonte ou camada endurecido(a) presente em sua base. Há uma zona de menor intensidade relacionada aos horizontes arenosos C e E, além de uma zona de reflexão presente próximo à superfície contínua que se estende do Perfil 1 ao Perfil 2.

De acordo com o radargrama representado na Figura 03, entre o Perfil 2 (Compartimento intermediário – Espodossolo Humilúvico Órtico arênico) e o Perfil 3 (Compartimento de jusante – Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico), os refletores identificados no radargrama 1 diminuem em intensidade, aproximadamente 6 metros após o

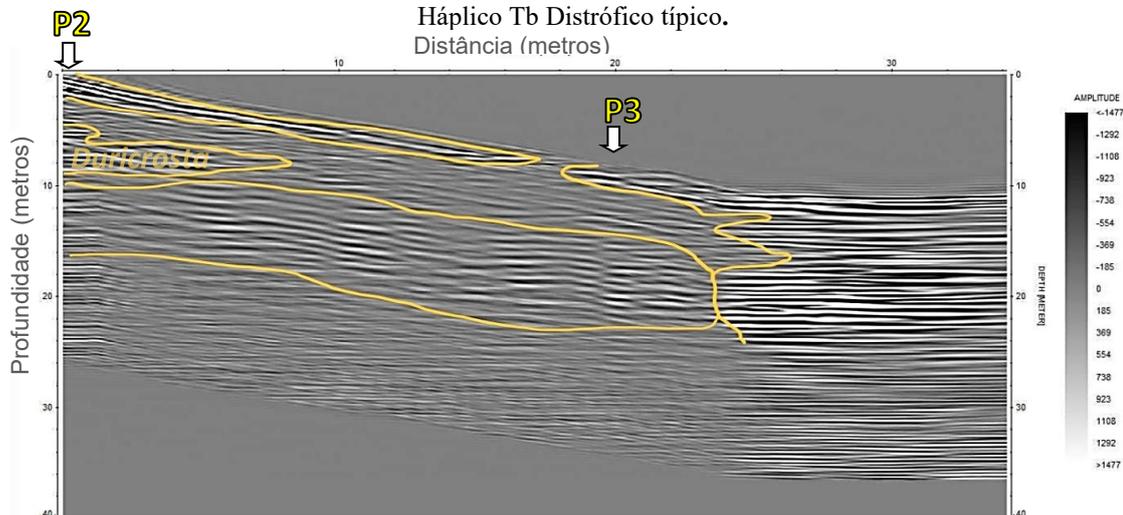
Perfil 2, enquanto outro refletor surge abaixo do referido horizonte/camada endurecido(a) estendendo-se até o Perfil 3, onde é observado a uma profundidade de cerca de 4 metros. Em torno de 1,5 metro de profundidade no Perfil 3, destaca-se a presença de outro refletor, possivelmente indicando a existência de um horizonte mais coeso. Em profundidades maiores, os refletores sugerem a presença do lençol freático.

Figura 03 – Radargrama – R1 mostrando a transição Neossolo Quartzarênico Órtico típico (P1) – Espodosolo Humilúvico Órtico arênico.



No perfil 3, indícios da ocorrência de lençol freático obtidos por tradagens e os dados geofísicos, apontam que o lençol freático ocorra a partir de cerca de 6 metros de profundidade, variando conforme a topografia e a formação geológica do local. Cerca de 2 metros após o Perfil 3, onde o vale se inicia, os refletores indicam a presença de água, manifestada por uma reflexão contínua e ligeiramente intensa (Figura 04).

Figura 04: Radargrama – R2 mostrando a transição Espodosolo Humilúvico Órtico arênico (P2) – Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico.



Possivelmente, essa litofácies endurecida do Barreiras esteve exposta na superfície, pois acima dela foi identificado um horizonte bruno escuro, com presença de raízes (Figura 05), indicativo de um antigo horizonte A, enterrado, posteriormente, por depósitos arenosos. Esta litofácies foi identificada em campo através do mapeamento geofísico, análises físicas, químicas, mineralógicas e sedimentológicas, e da utilização da relação Zr/Ti como indicador de discontinuidades.

Figura 05 – Duricrosta presente em profundidade no Espodossolo Humilúvico Órtico arênico apresentando raízes fósseis.



Foto: Jéssica da Mata Lima

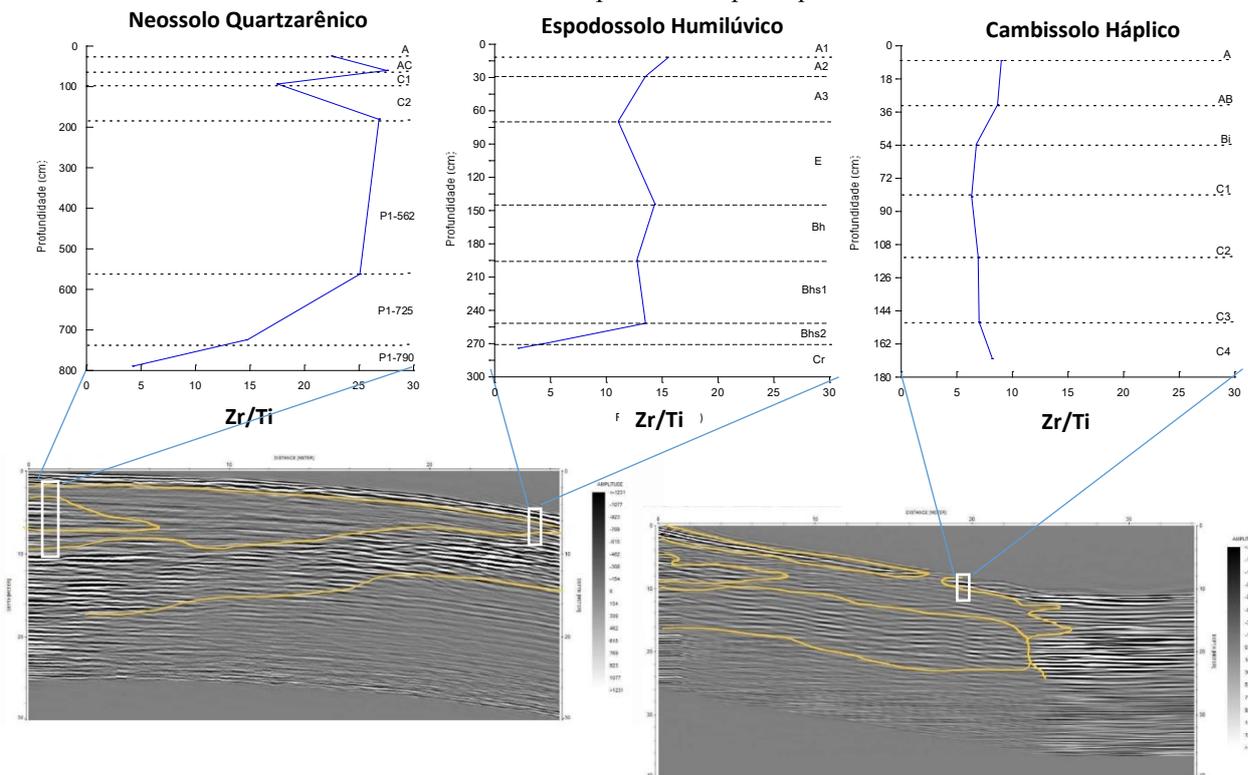
O mapeamento geofísico, por GPR, revelou a presença desse material endurecido nos refletores intensos entre 8 e 15 metros de profundidade, estendendo-se até o Perfil 2, onde se torna mais superficial, alcançando cerca de 2 metros de profundidade (Figura 06). Esses dados coincidem com variações do valor da relação Zr/Ti, que reduz de forma abrupta dos horizontes superficiais para os mais profundos, tanto no Neossolo Quartzarênico quanto no Espodossolo (Figura 06).

A relação Zr/Ti foi utilizada como indicador da intemperismo do material de origem na produção do solo para identificar discontinuidades de materiais (Maynard, 1992; Cooper; Vidal-Torrado; Lepsch, 2002; Tonui; Eggleton; Taylor, 2003; Moreira; Oliveira, 2008; Novaes Filho et al., 2012).



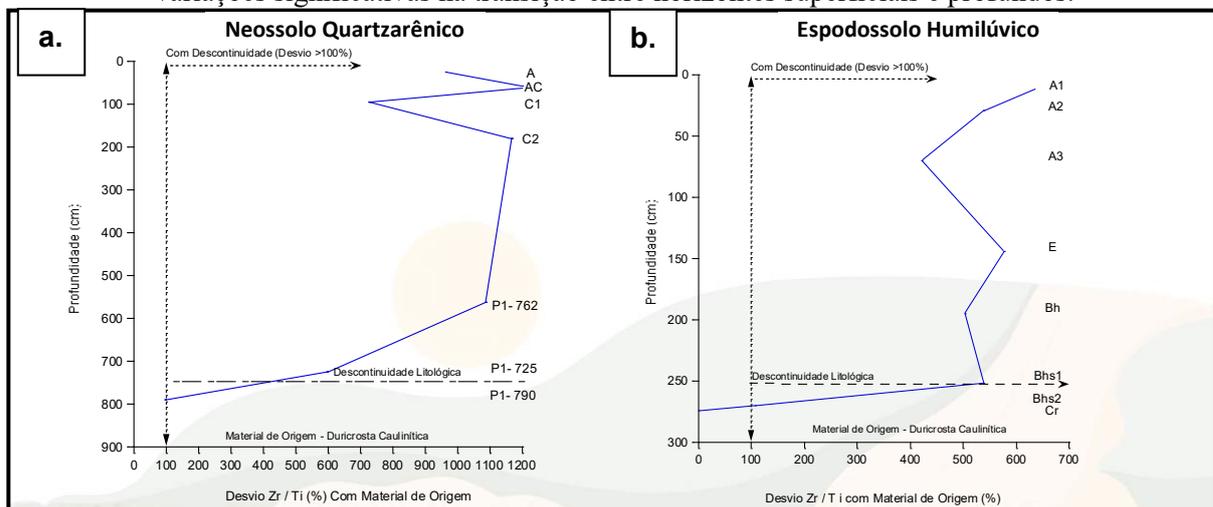
15º SIMPÓSIO NACIONAL DE
GEOMORFOLOGIA

Figura 06 – Mapeamento Geofísico por Georradar de Penetração no Solo associado aos gráficos de Relação Zr/Ti dos solos dispostos em topossequência.



Identificou-se descontinuidades entre os horizontes superficiais arenosos (A, AC, C1, C2, 562cm e 725cm) do Neossolo Quartzarênico e o material presente em 790cm (Gráfico 02a), e entre os horizontes superficiais arenosos (A1, A2, A3, E, Bh e Bhs1) e os horizontes mais profundos (Bhs2 e Cr) do Espodossolo, tanto pelo desvio maior que 100% (Gráfico 02b), quanto pela mudança abrupta na relação Zr/Ti. No Cambissolo não foram identificadas descontinuidades, pois os valores da relação Zr/Ti são baixos e constantes entre os horizontes.

Gráfico 2 – a. Desvio entre os horizontes do Neossolo Quartzarênico e o material endurecido (Cr); **b.** Desvio entre os horizontes do Espodossolo Humilúvico e o material endurecido (Cr), evidenciando variações significativas na transição entre horizontes superficiais e profundos.

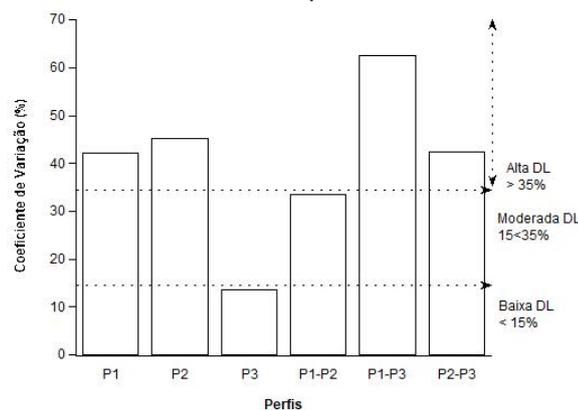


Os dados de GPR e da relação Zr/Ti demonstram duas importantes descontinuidades:

(1) entre o material arenoso da superfície do Neossolo Quartzarênico e do Espodossolo e o material endurecido na base; (2) entre o material endurecido na base do Espodossolo e os horizontes do Cambissolo. O desvio entre os horizontes AC do Perfil 1 e Cr do Perfil 2 é de 1202,4% e indica uma grande diferença entre os materiais de origem. Por outro lado, o desvio entre os valores da relação Zr/Ti do horizonte Cr do Perfil 2 e dos horizontes C1 e C4 do Perfil 3 são de 199% e 285,3%, respectivamente, indicando variações menores comparadas ao material arenoso do Neossolo Quartzarênico e do Espodossolo e ao material endurecido presente em profundidade nestes dois solos. No entanto, ainda apresentam desvio superior a 100%, o que, segundo Maynard (1992), representa descontinuidade litológica.

Para as classificações de coeficiente de variação (Gráfico 03), houve alta variação nos Perfis 1 (42,2%) e 2 (45,28%), enquanto o Perfil 3 possui baixa variação (13,9%). Esses dados também sugerem que no Perfil 1 e 2 houve deposição do material arenoso sobre uma fácies do Barreiras, especificamente, o material endurecido em P2Cr e o material a ele associado – P1790 e P2Bhs2. Em contrapartida, o Perfil 3 possui origem *in situ*. Ao comparar os perfis, a maior variação entre os Perfis 1 e 3 (62,5%) também indica a influência do material alóctone no compartimento de montante. Entre o Perfil 2 e 3 a variação diminui para 42,4%, devido ao Perfil 2 apresentar material diferente, contendo na sua base um material endurecido, fácies do Barreiras, porém diferente da fácies do Barreiras presente no Perfil 3. A variação entre os Perfis 1 e 2 (52,7%) pode ser resultado da ausência de amostra do horizonte Cr no Perfil 1.

Gráfico 03 – Coeficiente de Variação dos Perfis de solo estudados.

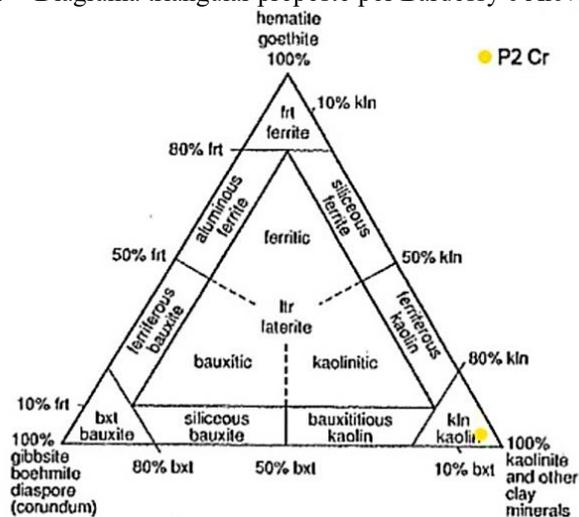


A presença de minerais instáveis, como a biotita, no horizonte Cr do Espodossolo, constitui, conforme constatado por Nunes *et al.* (2023), um dos indicativos da composição de uma fácies endurecida do Barreiras. Acrescido da presença de biotita, identificada por DRX nesses materiais endurecidos da base dos compartimentos de montante e intermediário, também foram identificados baixos valores da relação Zr/Ti; desvio da relação Zr/Ti de 636,28% entre

ele e o horizonte A1 do Espodossolo; mudança abrupta na relação Zr/Ti em relação aos horizontes que o sobrepõem; mudança de classe textural para os horizontes superiores; presença de elementos-traço como chumbo e rubídio identificados por FRX.

Esses dados indicam que esse material endurecido foi formado por cimentação de materiais inconsolidados ou de rocha alterada, saprólito, constituindo-se em uma duricrosta, conforme definido por Fortunato (2004), sendo classificada como uma duricrosta caulínica, conforme triângulo de classificação (Figura 07) de Bárdossy e Aleya (1990). Para classificar a duricrosta (P2 – Cr), levou-se em consideração os valores de 95,06% de SiO₂, 3,69% de Al₂O₃ e 1,25% de Fe₂O₃, identificados a partir da FRX e ponderados para que a soma resultasse em 100%.

Figura 07 – Diagrama triangular proposto por Bárdossy e Aleya (1990)..



Fonte: Bárdossy e Aleya (1990).

A espessura da camada cimentada de cerca de 7m, identificada a partir do GPR, converge com as evidências identificadas por Fortunato (2004) sobre a anterioridade cronológica das duricrostas em relação à paisagem pedológica atual. Fortunato (2004) apresentou quatro evidências:

1. Continuidade: as unidades cimentadas são praticamente contínuas e subjacentes à paisagem pedológica, sem relação direta com áreas abaciadas ou Espodossolos;
2. Espessura: camadas cimentadas maiores que 4 metros foram identificadas;
3. Filiação dos solos: a camada cimentada é o material de origem dos solos, com cimentação ocorrendo antes da formação destes;
4. Caracterização Química: análises indicam teores elevados de Al e Si amorfos na parte superior da unidade cimentada em contato com Espodossolos, enquanto níveis mais profundos apresentam teores mais baixos, semelhantes aos encontrados sob Latossolos.



Fortunato (2004) também sugere que compostos orgânicos solúveis associados ao Al e Fe, liberados por podzolização pretérita, impregnaram litologias subjacentes devido a anisotropias (estruturas e diferenciações granulométricas). Os Espodosolos que geraram esses compostos foram posteriormente quase totalmente erodidos. Dessa forma, o autor propôs um modelo conceitual da evolução das duricrostas, iniciado após a pediplanação que nivelou o Grupo Barreiras. A neotectônica reativou falhas do embasamento cristalino que repercutiram sobre as litofácies desse Grupo. Esse sistema de falhas gerou zonas abaciadas nos topos Tabuleiros Costeiros, com condutos preferenciais de fluxos hídricos para o centro. Com a oscilação entre períodos quentes/úmidos e secos formaram-se os Espodosolos que avançaram progressivamente de forma centrífuga sobre a cobertura pedológica adjacente a partir dos pontos de interseção de falhas, do centro para a periferia das depressões. Assim, os Espodosolos forneceram sílica e alumínio amorfos para o processo de cimentação de litofácies do Grupo Barreiras, formando, portanto, as duricrostas que passaram a ser, posteriormente, o material de origem de vários solos dos Tabuleiros Costeiros.

Fortunato (2004) afirmou que a formação das duricrostas foi um processo de cimentação por enriquecimento absoluto de sílica e alumínio amorfos sobre um material hospedeiro, representado pelos diamictitos da unidade Dlm (diamictitos com matriz lamosa, maciços), situada no topo do Grupo Barreiras. Em vista disso e devido as condições de baixa temperatura e ausência de processos metamórficos, vulcânicos ou diagenéticos, de média e alta profundidade, essas camadas endurecidas foram então formadas e puderam ser identificadas como duricrostas (Fortunato, 2004), diferentemente de pesquisas realizadas anteriormente que as associavam aos duripãs e fragipãs.

De acordo com Nunes et al. (2023), a presença de minerais pesados instáveis, como a biotita, no material endurecido, indica um ambiente de formação incompatível com o duripã e um elo mineralógico com litofácies do Grupo Barreiras, sugerindo tratar-se de uma estrutura sedimentar.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação integrada do Georradar de Penetração no Solo (GPR) e da razão geoquímica Zr/Ti demonstrou potencial para identificar discontinuidades pedogeomorfológicas nos Tabuleiros Costeiros da Bahia. Foram observadas duas importantes discontinuidades: entre os horizontes arenosos e uma camada endurecida, interpretada como duricrosta caulínica



(Fortunato, 2004; Bárdossy; Aleva, 1990), e entre esta e os horizontes do Cambissolo na baixa vertente.

A razão Zr/Ti mostrou-se eficaz para diferenciar materiais com distintos graus de intemperismo, como já apontado por Maynard (1992) e Novaes Filho et al. (2012), permitindo inferências sobre a origem sedimentar ou pedogenética das camadas. A associação com o GPR, cuja sensibilidade em solos arenosos reforçou o potencial da abordagem para estudos em ambientes protegidos.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, I. C. M.; LIMA, J. M.; DINIZ, A. D. Caracterização pedogeomorfológica de uma transição neossolos quartzarênicos – espodosolos, na reserva da Sapiranga, Mata de São João - BA. **GeoUECE** (online), v. 09, n. 16, p. 154-166, jan./jun., 2020.

BÁRDOSSY, G.; ALEVA, G.J.J. Lateritic Bauxites. **Development in Economic Geology** (27). Amsterdam: Elsevier, 1990. 619p.

BOULET, R.; HUMBEL, F. X.; LUCAS, Y. Analyse Structurale et Cartographie en pédologie. III Pasaje de la phase analytique à une cartographie générale synthétique. **Cah. ORSTOM**, sér Pédol. vol. XIX, nº 4, p.341-351. 1982.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F. Stratigraphical discontinuities, tropical landscape evolution and soil distribution relationships in a case study in SE-Brazil. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:673-683, 2002.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Radar de Penetração no Solo para Mapeamento de Alta Resolução de Estratigrafia de Solo e Rocha. *Geophysical Prospecting*, 37, 531-551p. 1989. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>

DOMINGUEZ, J. M. L. **Sistema de Informações Geográficas para o Suporte à Gestão e ao Monitoramento do Litoral Norte do Estado da Bahia**. GERCO – Ministério do Meio Ambiente. Repor. 30p., 2006.

FORTUNATO, F. F. **Sistemas pedológicos nos tabuleiros costeiros do litoral norte do Estado da Bahia: uma evolução controlada por duricrostas preexistentes, neotectônica e mudanças paleoclimáticas do quaternário**. 2004. 366f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Bahia. Instituto Geociências, 2004.

LIMA, J. M. **Levantamento pedológico e morfopedologia na Área de Proteção Ambiental Litoral Norte do Estado da Bahia – entre os rios Pojuca e Imbassaí**. 2017. 201f. Dissertação (Mestrado em Geografia), UFBA Instituto de Geociências, Salvador, 2017.

LIMA, J. M.; ANDRADE, I. C. M. ; DINIZ, A. D. ; ROSA, M. E. C. . Estudo e Caracterização dos Aspectos Geológico - Geomorfológicos da APA Litoral Norte do Estado da Bahia - Entre os Rios Pojuca e Imbassaí. In: PINHEIRO, L. S.; GORAYEB, A.. **Geografia Física e as Mudanças Globais**. 1. ed. Fortaleza: UFC, 13-24p., 2019.

MAYNARD, J. Chemistry of modern soils as a guide to interpreting Precambrian paleosols. **The Journal of Geology**. 279-289, 1992.



- MOREIRA, H.L. & OLIVEIRA, V.A. Evolução e gênese de um Plintossolo Pétrico concrecionário êutrico argissólico no município de Ouro Verde de Goiás. **Revista Brasileira Ciências Solo**, 32:1683-1690, 2008.
- NOVAES FILHO, J. P.; COUTO, E. G.; RODRIGUES, L. C. M.; CHIG, L. A.; JOHNSON, M. S. Indiativos de descontinuidade litológica de regolitos derivados de granitos em uma microbracia sob floresta amazônica, em Juruena – MT. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:317-324, 2012.
- NUNES, F. C.; VILAS BOAS, G. DA S.; CARVALHO, C. C. N.; FORTUNATO, F. F. Depressões fechadas: dolinas na Formação Barreiras?. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, 24(4).<https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v24i4.204410.20502/rbgeomorfologia.v24i4.2044.2023>.
- PORSANI JL. **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, Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista - São Paulo, 1999. 145 p.
- RIBEIRO, M. R.; Características morfológicas dos horizontes coesos dos solos dos tabuleiros costeiros. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS. **EMBRAPA-TABULEIROS COSTEIROS**, v. 1. p. 161-168. 2001b.
- SANTANA, É. P., DUARTE, A. D.; ROSA, M. E. C.; ANDRADE, I. C. M.; SOUSA, J. H. O.; BONFIM, M. R. B. Caracterização e evolução de solos em vertentes assimétricas da Reserva Ecológica da Sapiranga - Tabuleiros Costeiros do Litoral Norte do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, ISSN 1984-2295. [S.l.], v. 15, n. 6, p. 2903-2920, dez. 2022.
- SANTOS, G. P S. **Relação entre aspectos da morfologia de Espodossolos em unidades da paisagem do Litoral Norte-BA**. TCC (Licenciatura em Geografia). Universidade Federal da Bahia. 75p., 2016.
- SCAPIN, M.; SALVADOR, V.; LIMA, N.; SCAPIN, V. Análise quantitativa de solo por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (WDXRFS). **Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 4, n. 3, p.1007-1014, 2002.
- SEI – SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Balanco hídrico do estado da Bahia**. Salvador: SEI, 250 p., 1999.
- SOUZA, J. H. O. **Caracterização e análise de sequência de solos lateríticos-podzolizados em uma vertente na Reserva da Sapiranga, APA Litoral Norte do Estado da Bahia**. TCC (Bacharelado em Geografia). 80f. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências, Salvador. 2020.
- TONUI, E.; EGGLETON, T.; TAYLOR, G. Micromorphology and chemical weathering of a Krich trachyandesite and an associated sedimentary cover (Parkes, SE Australia). **Catena**, v. 53, n. 2, p. 181–207, 2003.
- UCHA, J. M.; VILLAS BOAS, G. S.; HADLICH, G. M. A degradação dos horizontes duripã e fragipã e o processo de transformação dos solos sobre os tabuleiros costeiros do litoral norte baiano. **Cadernos de Geociências (UFBA)**, v. 9, p. 65-73, 2012.
- VILLALBA, K. S. **Análise da capacidade e conflitos do uso e cobertura atual da terra na APA-Litoral Norte do Estado da Bahia, entre os rios Pojuca e Imbassaí**. 2020. 182 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador, 2020.