

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

JEASY PARREIRA DE ASSIS

**PRODUTOS GEOLÓGICOS RESULTANTES DA INTERAÇÃO SEDIMENTAÇÃO-
VEGETAÇÃO: ESTUDO DE CASO NA FLORESTA FÓSSIL DE ORTIGUEIRA –
PR**

CURITIBA

2024

JEASY PARREIRA DE ASSIS

**PRODUTOS GEOLÓGICOS RESULTANTES DA INTERAÇÃO SEDIMENTAÇÃO-
VEGETAÇÃO: ESTUDO DE CASO NA FLORESTA FÓSSIL DE ORTIGUEIRA –
PR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Geologia da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Farias Vesely.
Coorientadora: Dra. Thammy Ellin Mottin.

CURITIBA

2024

Dedico este trabalho a meus pais e irmãs, que sempre me mostraram o valor da educação e da busca por conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade Federal do Paraná que, entre momentos de dificuldades e felicidades, sempre figurou como um ambiente agradável em que eu pude desenvolver conhecimento científico e conhecer muitas pessoas especiais. O ensino acessível e de qualidade oferecido dentro de suas portas foi o que permitiu que eu me desenvolvesse até o que sou hoje e tenho certeza que seguirá comigo por toda minha vida acadêmica, profissional e pessoal.

Sou grato, especialmente, ao meu orientador, o Prof. Fernando Farias Vesely que, mesmo antes de assumir esse papel, já tinha impactado muito positivamente minha vida acadêmica. Desde as aulas mais básicas de geologia geral até as atividades de mapeamento sedimentar, nunca deixou de demonstrar a preocupação e dedicação na formação dos discentes para quem lecionou. Agradeço por inspirar em mim o interesse especial pela área de sedimentar e estratigrafia, e também pela disposição e paciência para me orientar ao longo dos últimos anos.

À minha coorientadora, Dra. Thammy Ellin Mottin por todo o auxílio e interesse desprendidos desde que a conheci. Pela honra de ter aceitado me coorientar e compartilhar seu conhecimento a respeito dos afloramentos que se tornaram tão importantes para mim. Pelas conversas que me ajudaram a compreender melhor o trabalho incrível que desenvolveu e tem desenvolvido e pelo apoio em continuar explorando e construindo conhecimento geológico.

Agradeço a todos que participaram nas atividades necessárias para o desenvolvimento deste trabalho. Em especial à Prof^a Alessandra Bongioiolo e ao Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA), pela disponibilização de materiais essenciais para o desenvolvimento da pesquisa com o GPR e auxílio na interpretação dos radargramas. Ao Dr. Rafael Espíndola Canata, que despendeu tempo e esforço para fornecer dados, participar de reuniões e direcionar o tratamento dos dados de GPR, cuja aquisição, ainda em 2019, também contou com sua participação e apoio. À Lorena, colega de turma e amiga, que faz parte da minha história desde 2020, com quem compartilhei muitos momentos de discussões geológicas e pessoais, e que prestou muito auxílio para a construção deste documento.

Sou grato também à Profª Cristina Valle Pinto-Coelho, por sempre me inspirar a buscar a excelência nos trabalhos a que me proponho, desde as descrições de mineralogia descritiva até à caracterização de estilólitos em mármore que, durante o período da pandemia de COVID 19, fizeram parte de muitas das minhas tardes em frente ao computador. Agradeço por me introduzir ao mundo da pesquisa científica e por me incentivar a me empenhar ainda mais nas atividades acadêmicas.

Ao Laboratório de Análise de Bacias (LABAP), onde me senti acolhido desde que comecei as atividades de iniciação científica, também sob orientação do Prof. Frenando Farias Vesely. Pelo espaço físico, onde pude conhecer pessoas incríveis e aprimorar ainda mais meus conhecimentos e pela oportunidade de desenvolver pesquisas em uma área que me é tão querida.

Sou grato, também, às profissionais das Salas de Recursos da Prefeitura de Curitiba que, ainda criança, foram capazes de despertar em mim o interesse e a vontade de aprender cada vez mais. Pelas lições que, mesmo depois de tantos anos, ainda me marcam e me fazem buscar ser uma pessoa melhor, para que possa trazer orgulho à Eliane, Leila e tantas outras educadoras e amigas. Por me conectarem, pela primeira vez em minha vida, com a geologia, e nutrirem meu interesse pela ciência.

Ao Programa Bom Aluno, que, desde 2013, se fez tão importante no meu desenvolvimento como estudante e indivíduo. Por toda a preocupação e apoio prestado por toda a equipe, em especial Mabel, Lígia e Edna, e pelo lindo compromisso em levar educação e oportunidades a jovens por toda a parte.

Aos meus amigos, tanto da geologia quanto de fora dela, por todo o apoio, mesmo que indireto, na forma de convites para passeios que eu precisava mesmo sem saber. Pelas conversas e risadas, abraços e ouvidos dispostos a escutar reclamações e contos sobre as dificuldades do semestre. A toda a turma dos formandos 2024, pelo apoio e cumplicidade ao longo de toda a graduação, em especial Agda, Giuliane, Mirian, Liza, Lorena, Bento, Eduardo, Atlética (João), Fred (Bruno), Talita e Fabrizio. Também a amigos de outras turmas que também fizeram parte da minha história no curso, Thaisa Stoco, Heloísa Pilger, Carolina Dallagassa, Paulo Henrique, Bianca Margoti, Daniel Carminatti e Luísa Schemes.

A todos e todas que participaram de grupos de pesquisa e extensão universitária ao meu lado, seja dentro PET, ENACTUS, Comissão Organizadora de SEGEPAR ou CEGEP.

Por fim, agradeço imensamente à minha família, meus principais apoiadores e cuja presença sempre foi imperativa para que eu tivesse forças e ânimo para seguir em frente. À minha mãe, Rosimar, que nunca mediu esforços para que eu pudesse ter todas as oportunidades possíveis mesmo que a custo de seu tempo e energia. Pela sua compreensão de que minhas escolhas acabam me deixando vários dias longe de casa, procurando afloramentos “no meio do mato” e por ser sempre meu porto e farol a quem recorrer. Por abraçar minhas decisões e sempre me incentivar, seja com palavras, abraços ou rochas que acha bonitas e faz questão de levar para casa e me mostrar. Também sou grato às minhas irmãs, Siméia e Joice, que, desde sempre foram meus modelos a seguir e, mesmo com todas as discussões e desencontros, sei que sempre estarão dispostas a me amparar quando necessário.

RESUMO

Este estudo investiga os produtos geológicos resultantes da interação sedimentação-vegetação na Floresta Fóssil de Ortigueira, preservada na Formação Rio Bonito, Bacia do Paraná, Brasil, com enfoque nas estruturas sedimentares induzidas pela vegetação (VISS). A pesquisa visa compreender a morfologia e os processos formadores dessas estruturas, utilizando um conjunto abrangente de dados de campo, análises estratigráficas e geofísicas com *Ground Penetrating Radar* (GPR). Durante o levantamento de campo, foram identificados 89 troncos de licófitas fossilizados em posição de vida, preservados em camadas de arenitos, siltitos e heterolitos. A análise estratigráfica revelou estruturas sedimentares associadas à presença da vegetação no local, como *upturned beds*, *downturned beds*, *mud filled hollows* e formas de acreção centroclinais, que refletem interações entre a vegetação e os processos sedimentares que atuaram na região. As estruturas sedimentares observadas e descritas apresentam evidências de processos de soterramento rápido na forma de sucessivos pulsos de aporte de sedimentos em um ambiente sujeito a flutuações de energia. Os radargramas gerados permitiram a identificação de troncos fossilizados e de formas de acreção centroclinais, possibilitando a análise tridimensional das estruturas sedimentares presentes e a caracterização da variação lateral e vertical dos estratos em questão, em detrimento das exposições bidimensionais oferecidas pelos afloramentos analisados. Os resultados sugerem uma relação direta entre o diâmetro dos troncos fossilizados e as dimensões das estruturas a eles associadas, indicando uma influência significativa das licófitas na dinâmica sedimentar local. O estudo também confirmou a predominância de paleocorrentes direcionadas para sudoeste, refletindo padrões deposicionais controlados por fluxos unidirecionais. Assim, a pesquisa reforça a relevância das VISS como indicadoras paleoambientais, fornecendo subsídios para reconstruções cada vez mais detalhadas das condições deposicionais e climáticas do intervalo geológico estudado.

Palavras-chave: Estruturas sedimentares; VISS; Formação Rio Bonito; licófitas.

ABSTRACT

This paper investigates the geological products resulting from sedimentation-vegetation interactions in the Ortigueira Fossil Forest, preserved in the Rio Bonito Formation of the Paraná Basin, Brazil, focusing on vegetation-induced sedimentary structures (VISS). This research aims to understand the morphology and formation processes of these structures, using a comprehensive set of field data, besides stratigraphic and geophysical analyses with Ground Penetrating Radar (GPR). During the field survey, 89 fossilized lycopsid trunks in life position were identified, preserved within sandstones, siltstones and heteroliths. The stratigraphic analysis revealed sedimentary structures related to the presence of in situ vegetation, such as upturned beds, downturned beds, mud filled hollows and centroclinal accretion forms, which reflect interactions between vegetation and sedimentary processes in the region. The observed and described sedimentary structures provide evidence of rapid burial processes in the form of successive pulses of sedimentation in a deltaic environment of varying energy. The radargrams generated enabled the identification of fossilized trunks and centroclinal accretion forms, supporting a three-dimensional analysis of the sedimentary structures and the characterization of the lateral and vertical variation of strata, to the detriment of the two-dimensional exposures offered by the analyzed outcrops. The results suggest a direct relationship between the diameter of the fossilized trunks and the dimensions of the associated structures, indicating a significant influence of lycopsids on the local sedimentary dynamics. The study also confirmed the predominance of paleocurrents directed to the southwest, reflecting depositional patterns controlled by unidirectional flows. Thus, the research reinforces the relevance of VISS as paleoenvironmental indicators, providing support for increasingly detailed reconstruction of the depositional and climatic conditions of the studied geological interval.

Keywords: Sedimentary structures; VISS; Rio Bonito Formation; lycopsids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização das áreas de afloramento da Floresta Fóssil de Ortigueira (PR).	3
Figura 2: Faixa de afloramentos do Grupo Guatá.	6
Figura 3: Ilustração com os principais atuantes na formação de escavações.....	9
Figura 4: Principais tipos de estruturas sedimentares induzidas pela vegetação....	11
Figura 5: Afloramento da Floresta Fóssil de Ortigueira, denotando o empilhamento de estratos com litotipos distintos.....	13
Figura 6: Detalhes de porções do afloramento estudado com indicação das estruturas sedimentares induzidas pela vegetação	14
Figura 7: Perfil GPR enfatizando o posicionamento das licófitas fossilizadas.....	15
Figura 8: Coleta de dados de GPR (<i>Ground Penetrating Radar</i>)	17
Figura 9: Interface do <i>software ReflexW 10.4</i>	18
Figura 10: Diagrama de roseta com as paleocorrentes dos siltitos posicionados estratigraficamente abaixo do paleossolo	20
Figura 11: Diagrama de roseta com as paleocorrentes dos heterolitos wavy em torno dos troncos fossilizados	21
Figura 12: Granodecrescência ascendente em lentes areníticas nos heterolitos.....	22
Figura 13: Estratos com caimento em direção à licófitas fossilizadas.	23
Figura 14: Exemplo de medida associando diâmetro de troncos fossilizados ao comprimento de onda de estruturas sedimentares induzidas pela vegetação	23
Figura 15: Laminações sedimentares com caimento oposto ao tronco fossilizado. .	26
Figura 16: Acúmulo de argilito logo acima de tronco fossilizado.	27
Figura 17: À esquerda, local de levantamento das colunas estratigráficas. À direita, posicionamento dessas colunas e distribuição simplificada dos litotipos presentes em cada local	28
Figura 18: Ponto em que é possível identificar três das quatro VISS presentes na Floresta Fóssil de Ortigueira (PR)	29
Figura 19: Licófitas fossilizadas com preservação de ranhuras características em bom estado.	30
Figura 20: Sequência de seções de GPR da Floresta Fóssil de Ortigueira (PR)	33

Figura 21: Radargrama já com os processamentos adequados, em que é possível observar a presença de diversas hipérboles.....	34
Figura 22: Bloco tridimensional gerado pelo <i>software</i> ReflexW através da interpolação de dados coletados em campo	34
Figura 23: Blocos tridimensionais com dados de radargrama coletados na Floresta Fóssil de Ortigueira	35
Figura 24: Resultados do processo de tratamento de dados de GPR	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Correlação entre o comprimento de onda das estruturas de acreção centroclinal e o diâmetro do tronco das licófitas associadas	25
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Correlação entre diâmetro do tronco fóssil e comprimento de onda da estrutura em "asa de gaivota" nas lentes areníticas.....	24
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

GPR Ground Penetrating Radar

VISS *Vegetation Induced Sedimentary Structures* (Estruturas Sedimentares Induzidas pela Vegetação)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. LOCALIZAÇÃO	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.1.1. Objetivo Geral	3
1.1.2. Objetivos específicos	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1. BACIA DO PARANÁ.....	4
2.2. FORMAÇÃO RIO BONITO.....	5
2.3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR FLUXOS UNIDIRECIONAIS	7
2.4. ESTRUTURAS SEDIMENTARES INDUZIDAS PELA VEGETAÇÃO (VISS)...	9
2.5. FLORESTA FÓSSIL DE ORTIGUEIRA (PR)	12
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
4. RESULTADOS	20
4.1. ESTRATIGRAFIA	20
4.2. LICÓFITAS	29
4.3. RADARGRAMAS	30
5. DISCUSSÃO	36
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAS.....	41
APÊNDICE 1 – COLUNAS ESTRATIGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

Rochas sedimentares registram processos que ocorreram no ambiente durante e após a deposição dos sedimentos. Logo, a análise das estruturas relacionadas a esses litotipos permite tirar conclusões a respeito das características de uma região em determinado momento da história evolutiva do planeta. A análise da granulometria de uma rocha pode, por exemplo, informar sobre o nível de energia do sistema no momento de deposição dos sedimentos, enquanto algumas estruturas internas indicam o agente de transporte das partículas e o tipo de fluxo quanto à direção, como unidirecional, bidirecional ou oscilatório (Allen, 1985; Bridge & Demicco, 2008).

A capacidade que um fluxo tem de erodir e transportar sedimentos, bem como as condições necessárias para a deposição de determinados tamanhos de grão em detrimento de outros depende de uma série de fatores, como a energia e tipo do fluxo, a geometria do canal e o aporte de sedimentos. Como sistemas naturais são extremamente variáveis, diferentes estruturas sedimentares podem se formar dependendo da variação das condições ambientais locais. Em um fluxo unidirecional, a presença de obstáculos altera as condições normais da corrente, podendo gerar turbulência e promover intensificação de processos erosivos em determinadas regiões em detrimento de outras (Rygel *et al.*, 2004; Schlömer *et al.*, 2024). Caso o obstáculo encontrado seja um tronco de árvore, por exemplo, podem ser formadas as VISS (*vegetation induced sedimentary structures*, ou estruturas sedimentares induzidas pela vegetação, em tradução direta). Tais estruturas estão relacionadas à interação de sedimentos inconsolidados com a vegetação, tanto durante a atuação de processos de erosão e sedimentação quanto após seu eventual soterramento total ou parcial (Rygel *et al.*, 2004).

Assim, a correta análise e interpretação das VISS presentes em determinada região pode fornecer importantes informações para criação e complementação de modelos paleoambientais e evolutivos da área (Davies *et al.*, 2024; Schlömer *et al.*, 2024). A construção e interpretação de perfis estratigráficos, com foco nas variações observadas nas regiões com influência da presença de troncos, permite compreender mudanças promovidas por eles. Nesse contexto, considerando que os afloramentos geralmente oferecem uma visão limitada a duas dimensões e que as estruturas sedimentares induzidas pela vegetação apresentam características variáveis que

podem ser melhor observadas tridimensionalmente, o emprego de técnicas de coleta de dados indiretos, como o GPR, possibilitam um melhor entendimento dos processos formadores das VISS.

A Floresta Fóssil de Ortigueira (Mottin *et al.*, 2022), objeto do atual trabalho, apresenta, preservadas em heterolitos em arenitos, siltitos e heterolitos, licófitas em posição de vida. No local, são observadas VISS de dimensões e geometria variadas, tanto de origem sin-deposicional quanto pós-deposicional (ligadas ao decaimento da matéria orgânica vegetal). Assim, configura um bom exemplo de relação dessas estruturas sedimentares com a vegetação, permitindo sua caracterização e classificação.

1.1. LOCALIZAÇÃO

Os afloramentos estudados estão expostos ao longo da Estrada da Campina e de uma ferrovia paralela (Figura 1), no município de Ortigueira. O Acesso se dá a partir da PR-340 e os cortes estão a aproximadamente 18 km do centro de Ortigueira (via BR-376 e PR 340) e 36 km do centro de Telêmaco Borba (via Estrada da Campina). No local, estão expostas rochas da Formação Rio Bonito, onde foram preservadas licófitas eopermianas em posição de vida (troncos verticalizados), indicando a ocorrência de um rápido processo de sedimentação e soterramento, pelo menos parcial (Mottin *et al.*, 2022). Além de ser um dos raros registros de florestas dessa idade em altas latitudes do supercontinente Gondwana, também permite a observação de diversas VISS e seu posicionamento e geometria em relação à vegetação.

Conforme indicado na Figura 1, o estudo compreende informações de dois locais. O primeiro, mais a sul, representa a área onde Mottin *et al.* (2022) realizou a coleta de dados de afloramentos e o levantamento os perfis de GPR. O segundo ponto é o local onde foi realizada a descrição dos afloramentos deste trabalho.

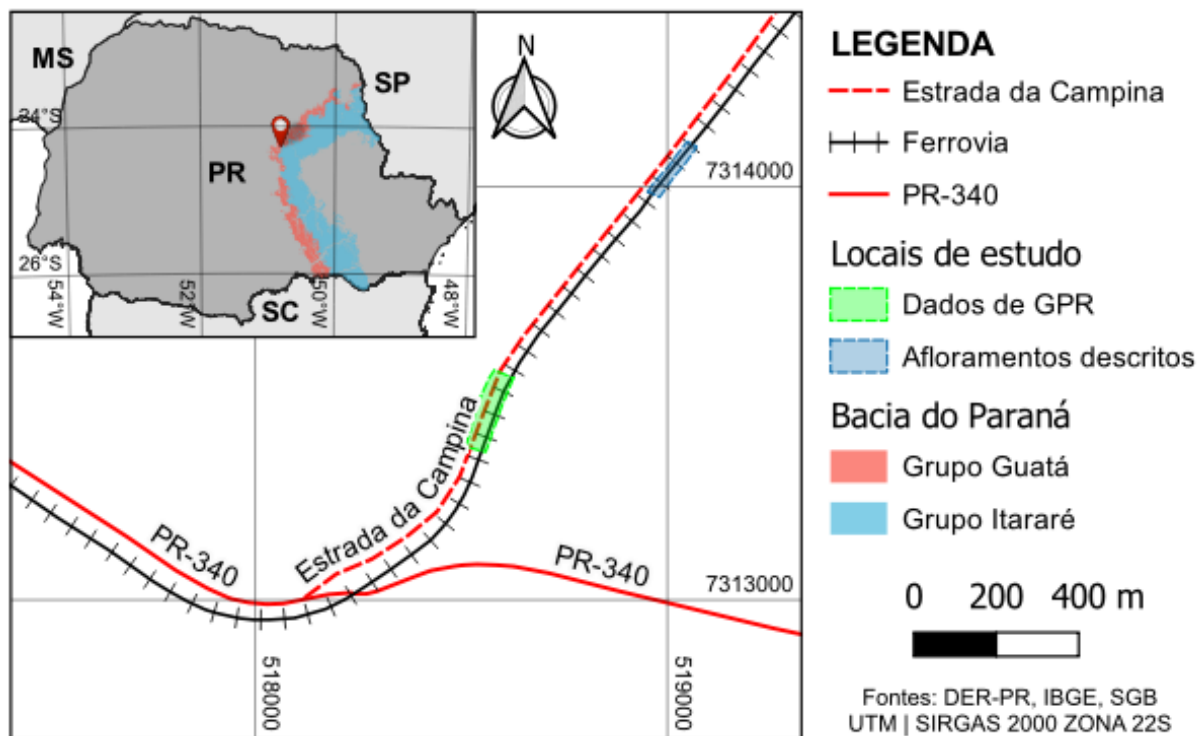


Figura 1: Mapa de localização das áreas de afloramento da Floresta Fóssil de Ortigueira. Fonte: O Autor, 2024.

1.2. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo desse trabalho é caracterizar a morfologia e interpretar os processos formadores das estruturas sedimentares da Floresta Fóssil de Ortigueira como forma de contribuir para o entendimento das VISS, raramente observadas nos registros do Gondwana durante o período estudado, além de agregar conhecimento paleoambiental à região entre o fim do Carbonífero e o início do Permiano.

1.1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar as fácies e estruturas sedimentares presentes nos afloramentos, que ocorrem associadas às licófitas em posição de vida;
- Descrever e classificar as VISS de acordo com suas características, como tamanho, orientação e geometria.
- Identificar e interpretar tais estruturas em perfis de GPR para determinar sua geometria tridimensional.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. BACIA DO PARANÁ

A Bacia do Paraná, uma bacia intracratônica localizada no centro-leste da América do Sul, abrange uma extensa área que se estende do centro-sul do Brasil, passando por Mato Grosso até o Rio Grande do Sul, incluindo também o nordeste da Argentina, o leste do Paraguai e o norte do Uruguai. Sua formação está intimamente ligada ao processo de convergência entre a margem sudoeste do Gondwana e a placa tectônica oceânica do Panthalassa, sendo moldada por forças compressivas (Milani *et al.*, 2007). Segundo Milani (1997), a Bacia do Paraná pode ser subdividida em seis supersequências deposicionais: Rio Ivaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru.

A primeira dessas supersequências, a Rio Ivaí, abrange rochas sedimentares que datam do Ordoviciano ao Siluriano, depositadas diretamente sobre o embasamento da bacia. O limite superior da Supersequência Rio Ivaí é marcado por uma discordância subaérea irregular. Posteriormente, durante a fase de subsidência da bacia, formou-se a Supersequência Paraná, que inclui um ciclo transgressivo-regressivo. Esse ciclo se inicia com sedimentos arenosos da Formação Furnas, datados do Devoniano, e evolui para sedimentos marinhos da Formação Ponta Grossa. Em algumas regiões, as fácies sedimentares dessas unidades foram intensamente erodidas, resultando em uma discordância neodevoniana que indica um hiato de aproximadamente 40 a 70 milhões de anos (Milani *et al.*, 2007; Pereira *et al.*, 2012).

A Supersequência Gondwana I, que se estende do Neocarbonífero ao Eotriássico, é bem representada ao longo da borda leste da bacia (Milani *et al.*, 2007). Essa sequência sedimentar reflete um ciclo transgressivo-regressivo associado a eventos glaciais e interglaciais, além do desenvolvimento de sistemas deltaicos, estuários e ilhas barreiras ao longo da costa. As unidades desta supersequência são o Grupo Itararé, Grupo Guatá e Grupo Passa Dois.

A Supersequência Gondwana II, presente apenas no estado do Rio Grande do Sul, está relacionada a um evento distensivo de idade triássica, com formação de bacias em estruturas do tipo graben. A Formação Santa Maria, que compõe essa

supersequência, é composta por depósitos de arenitos fluviais e pelitos lacustres com importantes registros fossilíferos de vertebrados que permitem sua correlação com unidades geológicas da Argentina e África (Milani *et al.*, 2007).

Já a Supersequência Gondwana III, que se estende do Eojurássico ao Eocretáceo, inclui arenitos eólicos na Formação Botucatu e os derrames basálticos da Formação Serra Geral. Por fim, a Supersequência Bauru, do Cretáceo Superior, consiste em depósitos aluviais, fluviais e eólicos, refletindo um ambiente continental semiárido a desértico (Milani *et al.*, 2007).

2.2. FORMAÇÃO RIO BONITO

A Formação Rio Bonito é uma unidade geológica do Permiano Inferior, inserida na base do Grupo Guatá, Supersequência Gondwana I (Gordon Jr., 1947; Rocha-Campos *et al.* 1967; Jatkoski & Batezelli, 2015), e sobreposta a depósitos com graus variáveis de influência glacial da Formação Taciba (Grupo Itararé; Vesely e Assine, 2004, 2006; Mottin *et al.*, 2023). A Figura 2 indica a área de afloramento do Grupo Guatá no Paraná, para facilitar a visualização da distribuição espacial das unidades descritas. A formação em questão é constituída pela intercalação de fácies sedimentares distintas, gerando porções estratigráficas em que há o predomínio de rochas areníticas ou pelíticas. Essa intercalação é interpretada como indicativo da oscilação das condições paleoambientais, registrando ciclos transgressivos e regressivos alternados e permitindo a subdivisão da Formação Rio Bonito em três membros, sendo eles, da base para o topo, Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis (Schneider *et al.* 1974; Popp, 1983; Milani *et al.* 2007; Zacharias e Assine, 2005; CPRM, 2024). A presença de depósitos de carvão associados a rochas da Formação Rio Bonito alavancou a execução de diversas campanhas de pesquisa geológica nas áreas de afloramento da unidade, promovendo importante enriquecimento do conhecimento geológico regional (Popp, 1983; Milani *et al.* 2007). Utilizando dados bioestratigráficos obtidos pela análise de palinomorfs, Daemon e Quadros (1970) atribuíram idade Eopermiana para a unidade em questão.

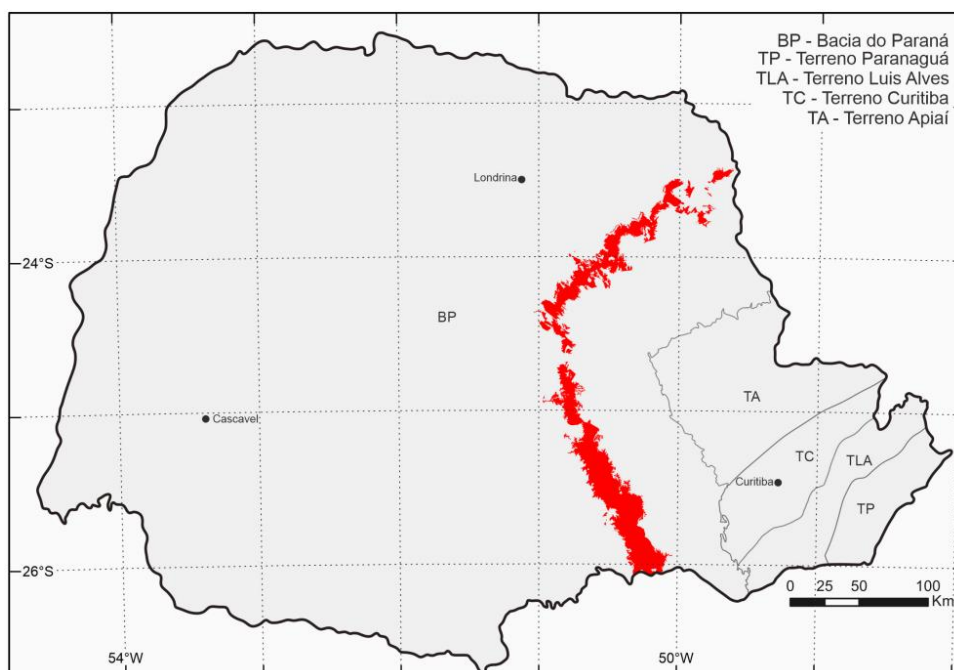


Figura 2: Faixa de afloramentos do Grupo Guatá, na base do qual encontra-se a Formação Rio Bonito, no estado do Paraná. Fonte: CPRM, 2024.

O Membro Triunfo é composto por pacotes de arenitos finos a médios e conglomerados intercalados com siltitos, pelitos carbonosos e camadas de carvão (Schneider *et al.* 1974; Castro *et al.*, 1999). Para Zacharias (2004), no nordeste do Paraná, a base deste membro se formou pelo preenchimento de vales incisos por uma sequência de arenitos feldspáticos, arenitos grossos a conglomerados com clastos e *drapes* argilosos seguidos por arenitos finos a muito finos com intercalações de siltitos e folhelhos com restos vegetais e marcas de raízes. Essa sequência foi interpretada como a passagem de um sistema de depósitos de maré e fluviais para um contexto de planícies deltáicas (Castro *et al.*, 1999; CPRM, 2024).

O Membro Paraguaçu, porção intermediária da Formação Rio Bonito, apresenta siltitos gradando lateralmente para folhelhos ricos em matéria orgânica e carvão intercalados a camadas lenticulares, por vezes sigmoidais, de arenitos grossos, sugerindo ambiente estuarino com influência de maré (Zacharias, 2004; Zacharias e Assine, 2005; Mottin *et al.*, 2023). Acima desses litotipos, ocorrem lamitos, bancos de calcário e arenitos, relacionados a ambiente marinho raso (Zacharias, 2004; CPRM, 2024).

Por fim, o Membro Siderópolis, que representa a unidade superior da formação em questão, é composto por arenitos finos a muito finos intercalados com pelitos,

carbonosos ou não, e camadas de carvão (Mineropar, 1986; Zacharias & Assine, 2005).

Na Formação Rio Bonito estão presentes importantes registros fossilíferos de flora eopermianas, especialmente associados a depósitos de carvão e inicialmente classificadas por Rösler (1978) em seis “taofloras” de acordo com seus respectivos posicionamentos estratigráficos na unidade a partir de dados coletados nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Posteriormente, Iannuzzi & Souza (2005) elaboraram uma nova proposta de divisão da vegetação, separando-a em “(1) *Pré-Glossopteris*, (2) *Phyllothea-Gangamopteris*, (3) *Glossopteris-Brasilodendros* e (4) *Polysolenoxylon-Glossopteris*”. Esses autores ainda subdividiram a Flora *Glossopteris-Brasilodendros* em assembleias específicas, as chamadas floras São João do Triunfo, Figueira, Bainha, Quitéria, Mina Faxinal, e Morro do Papaléo. A caracterização da vegetação fóssil classificada entre esses grupos foi sintetizada por Iannuzzi (2010), que descreve a grande variabilidade de taxa que compõem as assembleias citadas, destacando as *lycophytes*, *sphenophytes*, *ferns*, *pteridophylls*, *glossopterids*, e *cordaitaleans* e *conifers*.

2.3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR FLUXOS UNIDIRECIONAIS

Para melhor compreensão dos processos relacionados à formação de diferentes estruturas sedimentares, a seguir serão discutidos alguns aspectos relevantes com relação à atuação de correntes, especialmente unidirecionais, nos processos de transporte e deposição de sedimentos em meios naturais. É dada atenção especial ao comportamento do fluxo frente à interação com obstáculos, com o objetivo de fornecer uma base teórica para a interpretação da formação das estruturas sedimentares induzidas pela vegetação (VISS).

Com relação a correntes teóricas, alguns fatores importantes a se considerar para compreender a relação do agente de transporte com os sedimentos em si são o tipo de corrente (unidirecional ou bidirecional, por exemplo), velocidade da corrente, tamanho do canal e turbulências (Allen, 1985). A existência das turbulências torna o estudo do comportamento dos fluxos naturais muito mais complexo. Essas irregularidades podem estar relacionadas a fatores intrínsecos ao meio, como a

viscosidade (relacionada ao coeficiente de Reynolds) e velocidade de fluxo, mas também têm influência de fatores externos.

Mesmo em ambientes controlados, fluxos unidirecionais podem desenvolver vórtices pelo simples contato com o leito do canal devido à redução de velocidade associada ao atrito gerado (Sumer & Müller, 1982; Allen, 1985; Hsü, 2004). No caso de canais naturais, como rios, por exemplo, muitas variáveis são adicionadas e precisam ser levadas em consideração ao descrever o comportamento do fluido (nesse caso, a água). Esses fatores aumentam a complexidade do fluxo e, conseqüentemente, afetam as condições de transporte e deposição de sedimentos carregados (Allen, 1985; Bridge & Demicco, 2008).

Nesse contexto, além de fatores como a energia do fluxo e o tamanho das partículas carregadas, também é importante levar em conta as turbulências supracitadas quando se realiza a análise dos processos sedimentares de determinada região.

Ao encontrar um obstáculo cilíndrico, por exemplo, a velocidade do fluxo tende a diminuir devido ao atrito com a superfície do objeto. Se considerarmos um fluxo unidirecional, a corrente passa a se movimentar para baixo, podendo erodir os sedimentos ou solo presente na superfície basal à montante do obstáculo. Em seguida, se forma um vórtice em formato de ferradura (*horseshoe vortex*) que erode as laterais do obstáculo, criando uma escavação em formato de U, com a abertura no sentido de movimento da corrente. Além disso, à jusante do obstáculo se forma o chamado vórtice de esteira (*wake vortex*), que tem a capacidade de erodir ainda mais a região, dando, cada vez mais, um formato circular para a estrutura erosiva (Sumer & Müller, 1982; Allen, 1985; Bridge & Demicco, 2008).

Entretanto, com a redução da velocidade em direção ao fundo do canal e no contato com o obstáculo, caso a energia do fluxo não seja suficiente, ocorre a deposição de camadas de sedimento ao redor da barreira devido à dissipação de energia cinética causada pelos vórtices (Rygel *et al.*, 2004). A Figura 3 apresenta algumas das principais forças responsáveis pela formação de escavações ao redor de árvores em posição de vida. Considerando, ainda, que um fluxo natural não costuma ser uniforme ao longo do tempo, sequências de momentos com maior ou

menor energia no sistema tendem a gerar depósitos finais bastante complexos (Rygel *et al.*, 2004).

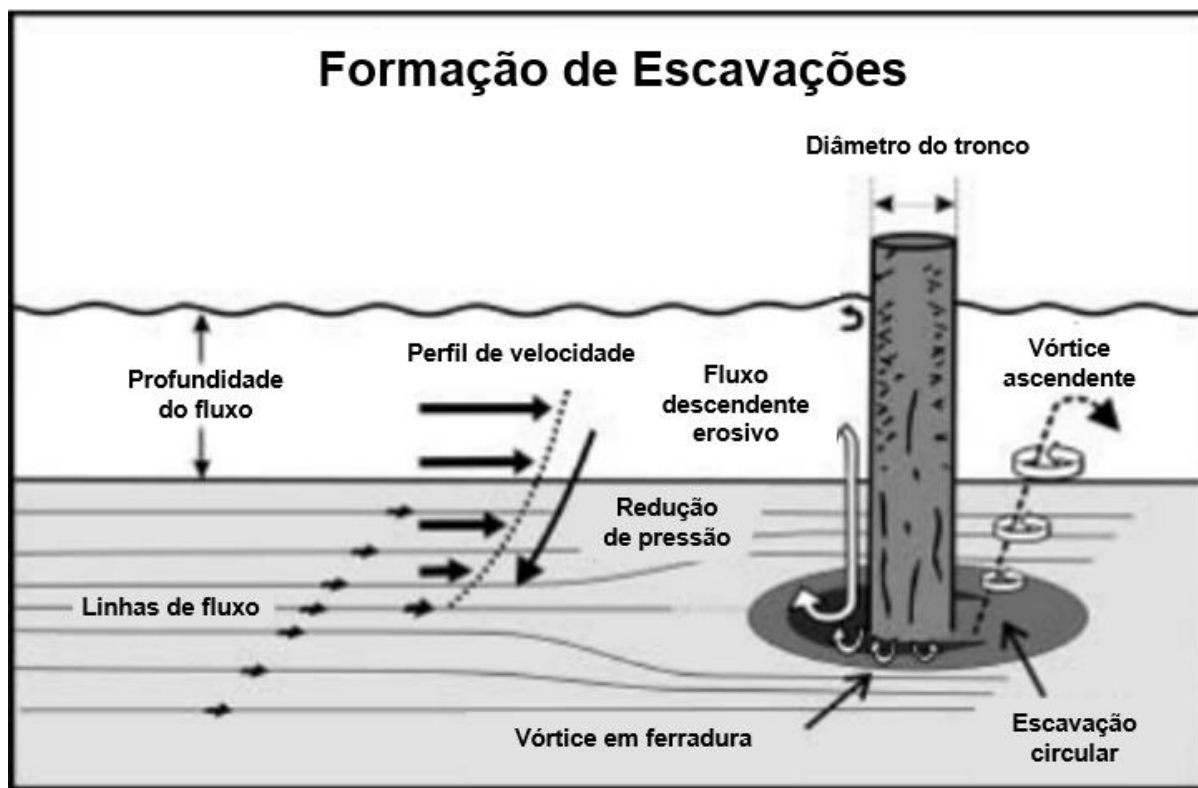


Figura 3: Ilustração com os principais atuantes na formação de escavações (*scours*) quando um fluxo unidirecional encontra um tronco verticalizado. Fonte: Modificado de Rygel *et al.* (2004).

2.4. ESTRUTURAS SEDIMENTARES INDUZIDAS PELA VEGETAÇÃO (VISS)

No registro geológico, os princípios supracitados podem ser observados nas chamadas estruturas sedimentares induzidas pela vegetação (VISS – *Vegetation Induced Sedimentary Structures*), atreladas à interação entre fluxos transportadores de sedimentos e obstáculos representados pelas plantas (Rygel *et al.*, 2004; Schlömer *et al.*, 2024). A definição de VISS engloba registros da hidrodinâmica local, que podem ser marcas deixadas por vegetação curvada pelo fluxo passante (mais comum em plantas rasteiras, com caules menos resistentes) e padrões deposicionais relacionados à variação da velocidade do fluxo ao encontrar troncos, por exemplo, Entretanto, também abarca estruturas formadas após a deposição dos sedimentos devido a processos de decomposição da matéria orgânica e estruturas vegetais após seu soterramento (Nakayama *et al.*, 2002; Rygel *et al.*, 2004).

Estruturas de acreção centroclinais (*centroclinal cross strata*) são caracterizadas por estratos com inclinação em direção à vegetação presente no local (Figura 4). São estruturas sedimentares que caracterizam um aumento na capacidade erosiva do fluxo devido à turbulência promovida por obstáculos, de forma a gerar superfícies com truncamento de camadas depositadas anteriormente. Devido à sua característica erosiva, estruturas de acreção centroclinais são mais bem representadas pelas superfícies erosivas que condicionam a orientação dos estratos depositados posteriormente. Enquanto isso, as *upturned beds* são identificadas como estratos com inclinação ascendente em direção ao obstáculo (Figura 4). Estão relacionadas a contextos deposicionais em que a energia do fluxo não é alta o suficiente para erodir, de forma que a redução de velocidade no ponto de contato com a superfície da vegetação propicia a deposição dos sedimentos carregados. Ambas são exemplos de estruturas de origem hidrodinâmica com formação induzida pela presença de vegetação *in situ* durante a atuação de processos deposicionais e erosivos (Rygel *et al.*, 2004).

Já as *downturned beds* são formadas por processos de decomposição da matéria orgânica após o soterramento e morte da vegetação. Esse processo reduz a capacidade de sustentação de sedimentos sobrepostos aos troncos e promove o colapso desses estratos, que normalmente ainda estão em estado inconsolidado. Como consequência, são formadas depressões e vazios posicionados acima das porções vegetais preservadas. Esses espaços tendem a ser preenchidos por sedimentos finos devido a condições de baixa energia, promovendo deposição por processos de decantação e formando as estruturas sedimentares chamadas de *mud filled hollows* (depressões preenchidas por sedimentos finos; Rygel *et al.*, 2024; Figura 4).

A Figura 4 sintetiza os principais tipos de VISS identificadas e descritas por Rygel *et al.* (2004). As traduções sugeridas são adotadas para facilitar o entendimento dos processos e estruturas, mas não reflete convenções ou acordos prévios, visto que o tema não é abordado em trabalhos produzidos em português. No caso das *upturned beds* e *downturned beds*, por falta de termos adequados, serão mantidas as nomenclaturas originais em inglês.

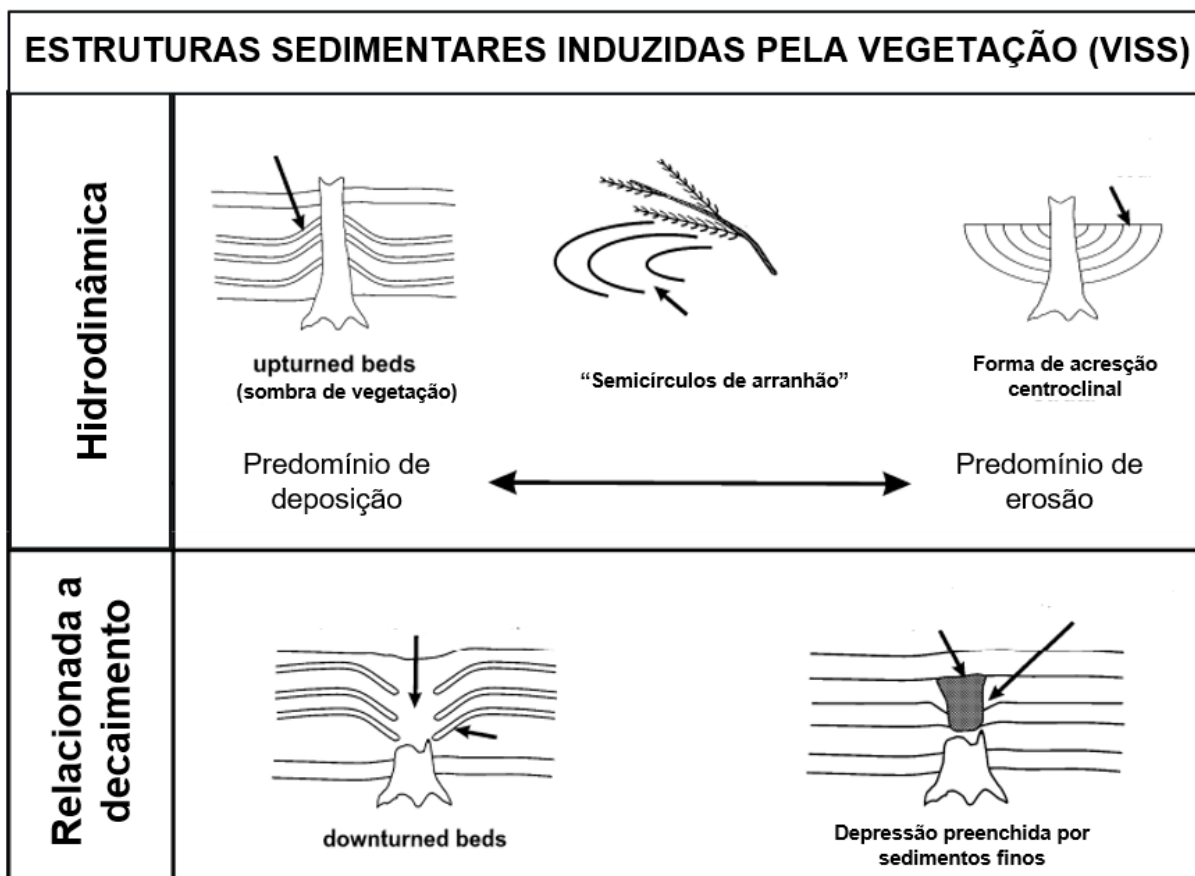


Figura 4: Principais tipos de estruturas sedimentares induzidas pela vegetação. Alguns dos termos foram traduzidos, mas atualmente não há uma convenção que determine a nomenclatura adequada das VISS em português. Fonte: Adaptado de Rygel *et al.* (2004).

As características dessas estruturas, especialmente daquelas criadas por variação das condições de fluxo, podem configurar importantes fontes de informação sobre as características físicas do ambiente em que se formaram (como a profundidade do canal ou a existência de pulsos de enchente, por exemplo), aumentando o grau de conhecimento sobre as condições paleoambientais da região. Embora presentes em diversos ambientes deposicionais atuais, registros de VISS em trabalhos mais antigos são relativamente raros. Isso porque é comum a confusão entre essas estruturas e outros registros sedimentares resultantes unicamente de processos hidrodinâmicos (como pequenos paleocanais e estruturas de deformação em sedimentos inconsolidados), especialmente nos casos em que a vegetação envolvida na formação das estruturas não foi preservada no registro geológico (Rygel *et al.* 2004). Schlömer *et al.* (2024) ressaltam que a atuação da vegetação como obstáculo em fluxos e sua influência nos processos erosivos e deposicionais devem

levar em conta, ainda, as características como a permeabilidade das próprias plantas, o que aumenta ainda mais a complexidade das análises desses aspectos.

2.5. FLORESTA FÓSSIL DE ORTIGUEIRA (PR)

Em afloramentos resultantes de cortes recentes para construção de uma rodovia e uma ferrovia (projetos da empresa Klabin), Mottin *et al.* (2022) identificaram e descreveram uma floresta fóssil de licófitas em posição de vida nas proximidades da cidade de Ortigueira – PR. Ao todo, foram mapeados 115 troncos expostos ao longo de 4 afloramentos, além de outros 64 identificados em subsuperfície com auxílio de GPR (aplicado em uma área de 20 m²). A descoberta foi de grande relevância, pois adicionou o afloramento à lista de regiões de alta/média paleolatidade do Gondwana com registro de licófitas carbonífero-permianas em posição de vida, que até então só possuía dois representantes.

Conforme descrito por Iannuzzi (2010), o intervalo estratigráfico entre topo do Membro Triunfo e base do Membro Paraguaçu é caracterizado pela presença de registros das floras de São João do Triunfo e Figueira. Entretanto, a falta de características diagnósticas que permitisse a definição da espécie levou Mottin *et al.* (2022) a adotar a nomenclatura *Brasilodendron-like* (semelhante a *Brasilodendron*, em tradução livre), baseada apenas no gênero que mais se assemelha à vegetação observada.

De acordo com Mottin *et al.* (2022), as raízes dos troncos fossilizados se desenvolveram em solo clástico imaturo sobre siltitos laminados, enquanto os sedimentos ao redor da maior parte da vegetação, assim como aqueles que a cobrem, correspondem a arenitos finos maciços a laminados, heterolitos *flaser* e lamitos maciços, sendo todos os litotipos correspondentes ao Membro Paraguaçu da Formação Rio Bonito (Figura 5). Juntamente à caracterização das estruturas vegetais fósseis e sedimentares (estratificações cruzadas e plano-paralelas e *ripples*, por exemplo) preservadas, os autores também observaram estruturas sedimentares que denotavam interação entre o fluxo responsável pela deposição dos sedimentos e os troncos no local. Vale ressaltar que, para que os troncos tenham sido preservados em posição de vida, o soterramento necessita ter acontecido de forma relativamente

rápida (antes da morte da planta, já que isso resultaria em sua queda). Tal soterramento foi condicionado por acomodações eustáticas e aumento do suprimento de sedimentos para a bacia, ambos ligados a soerguimentos tectônicos ou mudanças hidroclimáticas regionais (Mottin *et al.*, 2022).

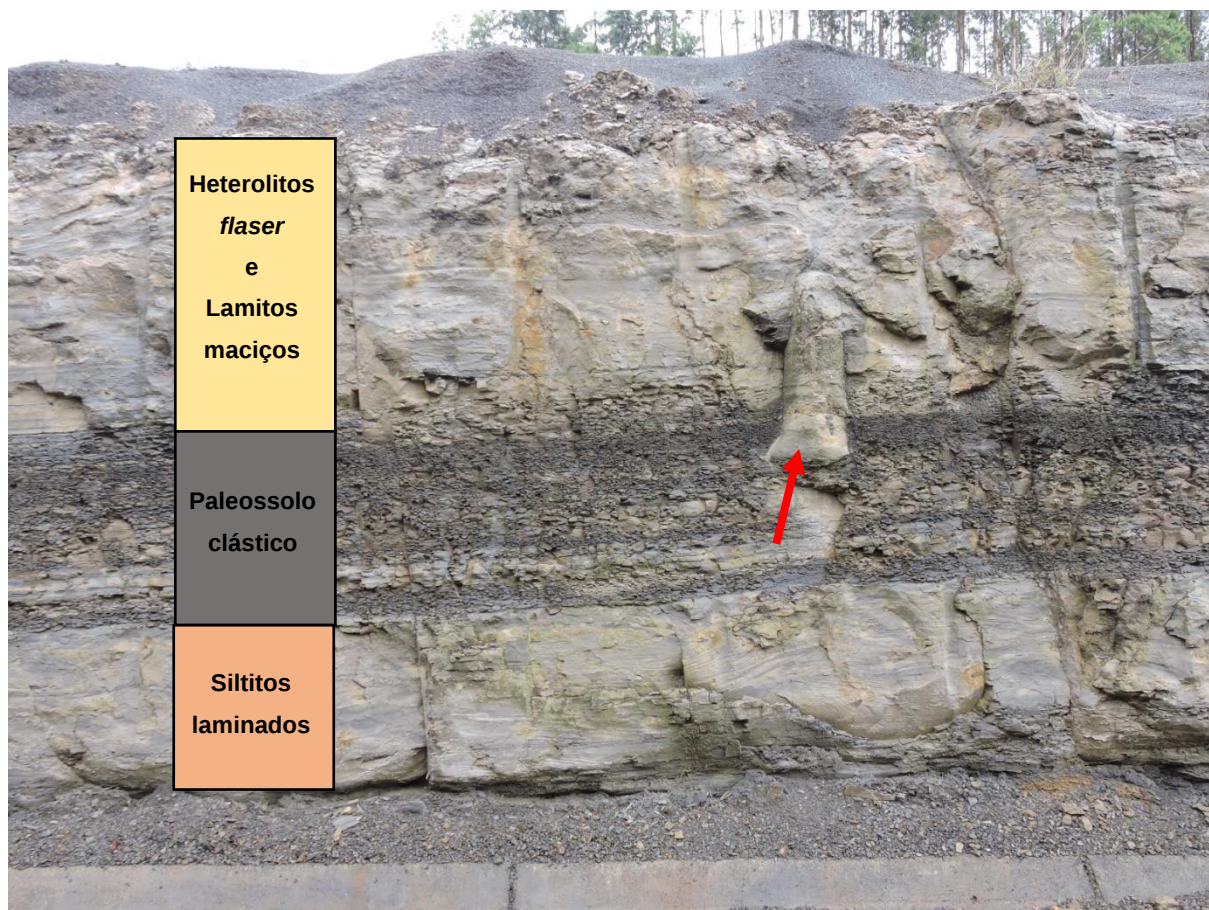


Figura 5: Afloramento da Floresta Fóssil de Ortigueira, denotando o empilhamento de estratos com litotipos distintos. Seta vermelha indica a posição de uma licófito fossilizada. Fonte: Thammy Mottin, 2021.

A floresta fóssil de Ortigueira apresenta exemplos de quase todas as estruturas sedimentares influenciadas pela vegetação descritas por Rygel *et al.* (2004) (por exemplo, as apresentadas na Figura 6), a exceção daquelas relacionadas a vegetações gramíneas ou mais maleáveis (Mottin *et al.*, 2022).

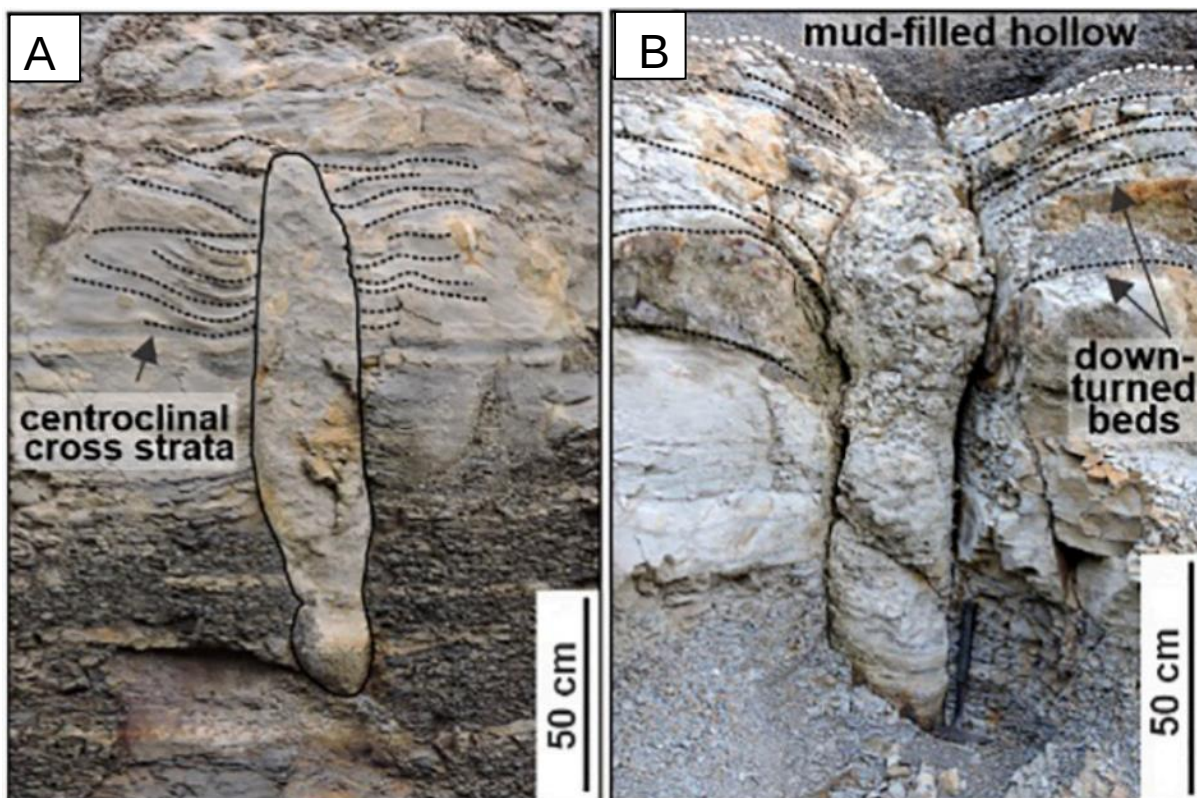


Figura 6: Detalhes de porções do afloramento estudado com indicação das estruturas sedimentares induzidas pela vegetação observadas no local. Fonte: Mottin *et al.*, 2022.

Além das descrições de afloramento, Mottin *et al.* (2022) também realizaram um levantamento com uso de GPR (*Ground Penetrating Radar*) na área estudada. Foram produzidas 20 seções de 10 metros de comprimento e espaçamento de 0,1 metro entre cada uma. O objetivo principal era a identificação da distribuição espacial dos troncos fossilizados considerando 3 dimensões, de modo a permitir a melhor compreensão do comportamento das comunidades da vegetação. Foram identificados 64 troncos fossilizados e, na seção apresentada (Figura 7), também foram interpretadas as geometrias dos estratos, além de uma feição classificada como estrutura sedimentar induzida pela vegetação.

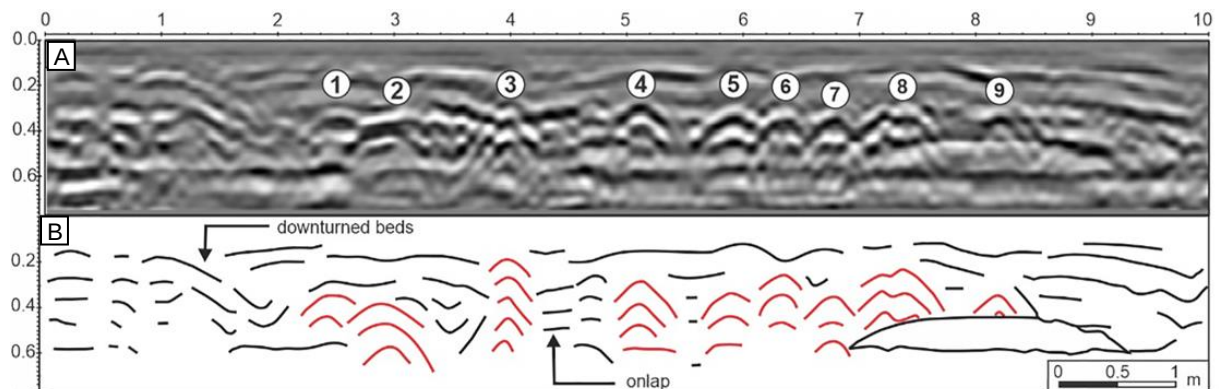


Figura 7: Perfil GPR enfatizando o posicionamento das licófitas fossilizadas. (A) identificação e numeração dos troncos presentes. (B) Interpretação dos estratos sedimentares em preto e das hipérboles interpretadas como vegetação fóssil em vermelho. Fonte: Modificada de Mottin *et al.* (2022).

Embora tenham sido identificadas, as VISS da floresta fóssil não foram descritas em detalhe, uma vez que o foco do trabalho de Mottin *et al.* (2022) foi a vegetação em si. Dessa forma, o estudo focado nessas estruturas pode ser determinante para a melhor compreensão do ambiente em que essa floresta se desenvolveu e foi sepultada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho teve início com a pesquisa bibliográfica em artigos e livros sobre a geologia da região estudada, informações prévias do afloramento em questão e processos e produtos geológicos relacionados a ambientes costeiros, em especial deltaicos e estuarinos. Também fizeram parte das referências trabalhos sobre princípios físicos de transporte de sedimentos e mecânica de fluidos básica. Os materiais utilizados estão disponíveis para consulta na internet ou na Biblioteca de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Nessa fase, foram utilizados *notebook* próprio e computadores do Laboratório de Análise de Bacias (LABAP), no Departamento de Geologia da UFPR.

Além disso, foi realizado em novembro de 2023 um trabalho de campo na região estudada com o objetivo de descrever a estratigrafia dos afloramentos, além de visualizar e medir espessura e largura dos estratos e das VISS presentes. Foram gerados 6 perfis estratigráficos com foco nas variações litológicas e distribuição de estruturas sedimentares ao longo dos afloramentos e sua relação com a proximidade aos troncos fossilizados. Com auxílio de trena e bússola do tipo Clar foram coletadas informações de paleocorrentes, geometria e forma das estruturas sedimentares e vegetação fóssil presentes.

Ground Penetrating Radar (GPR) é um método de investigação geofísica que utiliza ondas eletromagnéticas para determinar o posicionamento, em subsuperfície, de corpos ou regiões com propriedades elétricas distintas. As ondas nesse método são geradas por uma antena localizada na superfície do terreno, que gera os sinais em frequências específicas de acordo com a antena utilizada (Duarte *et al.*, 2012). Os pulsos refletidos são, então, captados por receptores também posicionados na superfície. Como resultado após os processamentos, é gerada uma imagem de alta resolução da subsuperfície, o radargrama, com nível de detalhamento diretamente proporcional e profundidade da imagem inversamente proporcional à frequência da antena utilizada (Barros *et al.*, 2021). Algumas das variáveis importantes a se considerar para a aquisição de dados de GPR é a quantidade de água, minerais dissolvidos, argilas expansivas e conteúdo de minerais pesados, já que esses fatores são determinantes das características elétricas dos materiais (Benson, 1995).

Os dados brutos de GPR utilizados neste trabalho foram coletados por Mottin *et al.* (2022). A coleta dos dados foi realizada em superfície plana acima dos afloramentos descritos pelos pesquisadores utilizando o equipamento *ASIR3000 GPR System* (GSSI) com antena de 400 MHz (Figura 8). Conforme indicado anteriormente, o levantamento foi realizado com a construção de seções de 10 metros de comprimento, com orientação nordeste-sudeste e 20 distribuídas paralelamente com espaçamento de 0,1 metros entre elas, formando um polígono com 20 m² (2m x 10m) de área. Os parâmetros de aquisição foram apresentados por Mottin (2022), como indicado: “(a) 512 amostras por traçado; (b) intervalo de amostragem temporal de 0,19 ns; e (d) abertura temporal de 100 ns; (c) amostragem espacial de 0,02 metros”. Como citado, o objetivo inicial dos pesquisadores era identificar a distribuição das licófitas ao longo da área, em detrimento da visão bidimensional fornecida pelos afloramentos.



Figura 8: Coleta de dados de GPR (*Ground Penetrating Radar*) com *ASIR3000 GPR System* (GSSI) com antena de 400 mhz. Fonte: Thammy Mottin, 2021.

Para o presente trabalho, os dados adquiridos foram submetidos a uma rotina de tratamentos e correções a fim de gerar seções que destacassem o comportamento dos estratos relacionados às VISS, e, portanto, foram selecionadas para interpretação apenas as seções com melhores exemplos dessas estruturas sedimentares. O tratamento dos dados foi realizado com o software *ReflexW 10.4* (Figura 9), cuja licença foi disponibilizada pelo LPGA (Laboratório de Pesquisa em Geofísica Aplicada). A sequência de procedimentos realizada e os principais valores utilizados está apresentada a seguir: (1) ajuste do tempo zero (*static correction*) para remoção da onda aérea, com corte de cerca de 40 centímetros; (2) remoção do ruído de fundo (*background removal*), que visa reduzir o efeito de indução entre as antenas do

equipamento; (3) aplicação de ganho por decaimento de energia (*energy decay*) com valor de 1,468, para amenizar as perdas de sinal devido à distância da fonte; (4) utilização de filtro passa banda de frequência (*bandpass frequency*), (com frequências de 100, 200, 700 e 800 para o primeiro, segundo, terceiro e quarto cortes, respectivamente), buscando reduzir ruídos nos sinais através da filtragem por frequência dos valores de respostas de cada seção; e (5) filtragem *fk* (*fk filter*) para reduzir alguns ruídos de refletores com inclinação, destacando tais superfícies (Furtado *et al.*, 2010). A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas nas rochas estudadas foi estimada em 0,1 m/ns, seguindo as sugestões apresentadas no manual do equipamento para fins de determinar a profundidade aproximada dos refletores (GSSI, 2017). A partir dessas seções, já com o devido tratamento, o software também permitiu a geração de seções perpendiculares e cortes em planta com a interpolação dos dados, culminando na possibilidade de geração de um bloco tridimensional.

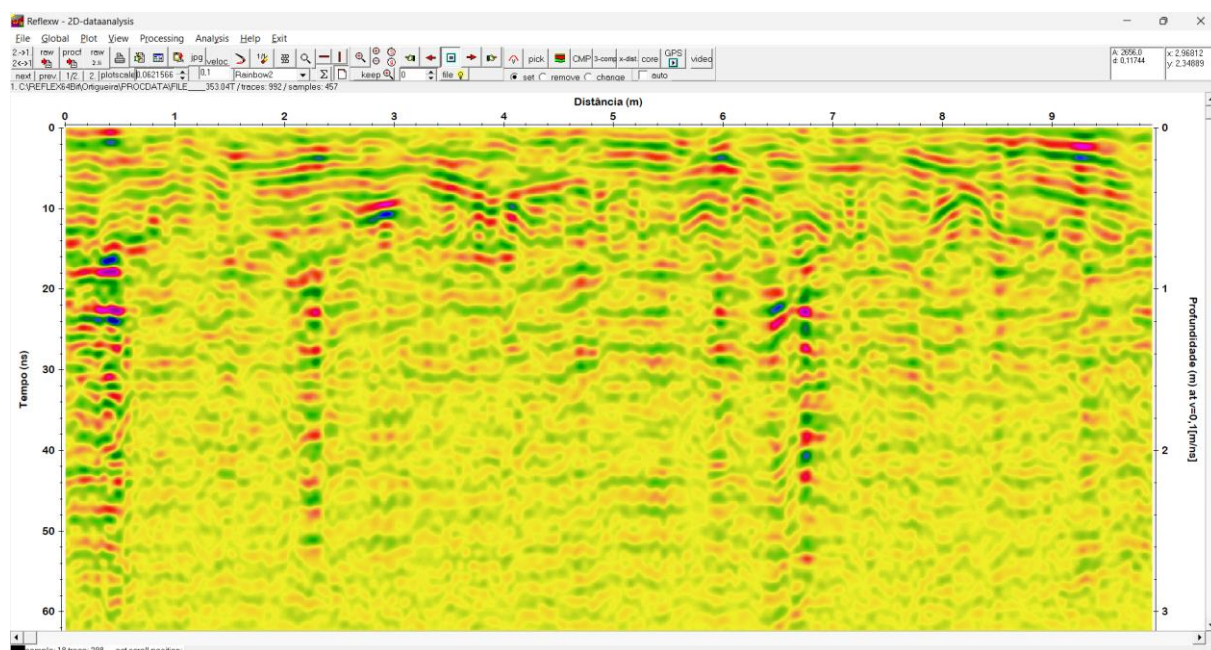


Figura 9: Interface do software *ReflexW* 10.4. Fonte: O Autor, 2024.

Além disso, as informações de orientação, geometria e dimensão das estruturas identificadas em campo foram submetidas a análises com auxílio de softwares como o *Microsoft Excel*, para criação de gráficos de distribuição numérica dos dados. O software *Stereonet* foi empregado para representação das paleocorrentes medidas na forma de diagramas de roseta. Por fim, para a

representação das colunas estratigráficas e interpretação de fotografias e perfis de GPR gerados, foram utilizados os *softwares Corel DRAW* e *AutoCAD*.

4. RESULTADOS

4.1. ESTRATIGRAFIA

Durante os trabalhos de campo realizados, foram identificados, ao longo de afloramentos posicionados cerca de 700 metros a nordeste daqueles descritos por Mottin *et al.* (2022), 89 troncos de licófitas preservados em posição de vida.

A maior parte das colunas estratigráficas levantadas têm sua base em uma camada de siltito castanho com estratificações cruzadas, topo irregular e aparentemente ondulado, com paleocorrentes medidas indicando orientação preferencial aproximada de N257 (Figura 10). Devido à sua geometria, esses siltitos não estavam expostos em algumas porções do afloramento.

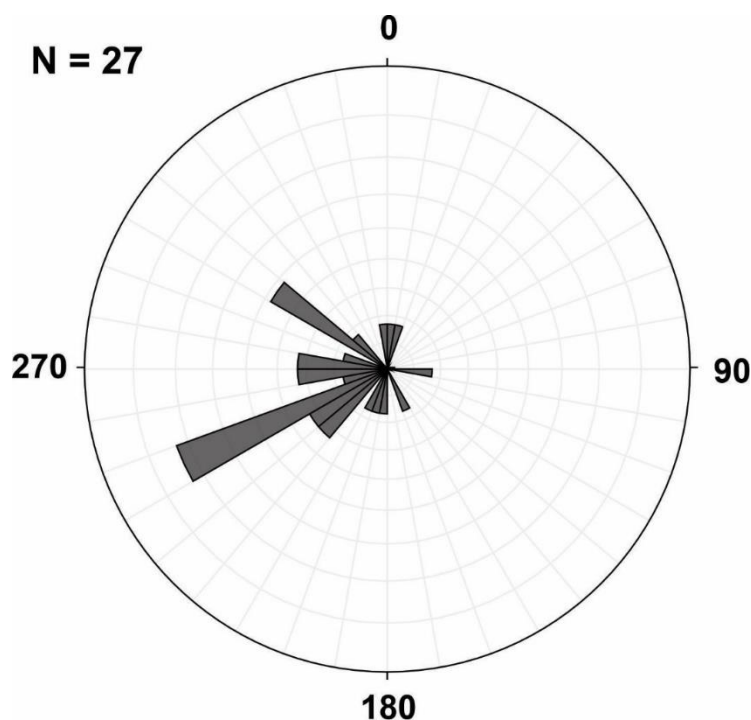


Figura 10: Diagrama de roseta com as paleocorrentes dos siltitos posicionados estratigraficamente abaixo do paleossolo. N = 27, vetor médio é N257,3° ± 11,7°. Fonte: O Autor, 2024.

Sobre esses estratos, foi identificado material silto-argiloso cinza escuro a castanho com raras laminações plano-paralelas, bastante fragmentado e com espessura variando entre 40 e 70 centímetros.

Sobrepostos a essas rochas, foram identificados lamitos (siltitos e argilitos) cinza com lentes areníticas finas de espessura centimétrica com continuidade lateral considerável, caracterizando heterolitos wavy. Associadas especialmente às porções

areníticas, mas também em porções de siltito, foram identificadas laminações e estratificações cruzadas e *ripples* que indicaram orientação preferencial da paleocorrente para sudoeste (N200; Figura 11).

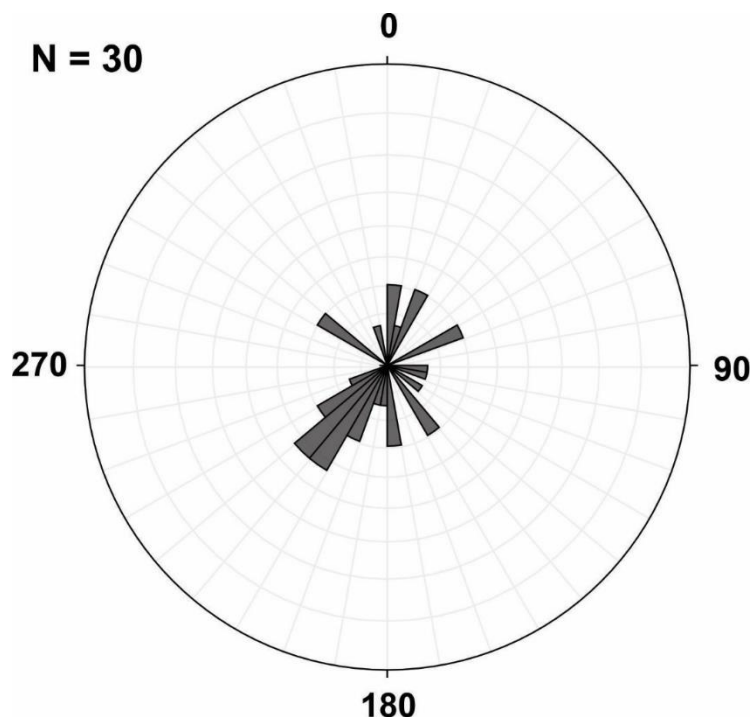


Figura 11: Diagrama de roseta com as paleocorrentes dos heterolitos wavy em torno dos troncos fossilizados. N=30, vetor médio é N200,6° ± 30°. Fonte: O Autor, 2024.

As lentes areníticas tendem a aumentar de espessura e largura em direção ao topo dos afloramentos, chegando a alcançar mais de 60 centímetros de espessura próximo aos troncos das licófitas. Foi possível identificar granodecrescência ascendente em algumas lentes areníticas, gradando de arenitos médios ou finos na base para siltitos no topo, seguidos de contato abrupto com uma nova camada de arenito. A espessura de cada ciclo varia entre 8 e 25 centímetros e a distinção de cor entre as rochas de diferentes granulações auxilia na identificação das variações descritas (Figura 12). Em alguns pontos, as lentes areníticas apresentam base côncava, com evidências de truncamento das camadas sotopostas. Nos pontos de maior espessura das camadas de arenito, é frequentemente possível identificar a presença de um ou mais troncos fossilizados. O posicionamento descrito resulta na formação de cunhas areníticas com largura de até 2,3 metros de largura em torno das licófitas fósseis, com aspecto que se assemelha a uma “asa de gaivota” (Figura 13).

Essas feições caracterizam formas de acreção centroclinal e são identificadas por superfícies com caimento em direção ao tronco fossilizado, com distância entre a vegetação e os estratos não afetados podendo passar de 2 metros (Tabela 1). Elas são mais facilmente identificadas pela presença das lentes espessas de arenito. Como são estruturas que indicam aumento da erosão, relacionada à atuação de turbulência no fluxo, a base erosiva e o truncamento de estratos mais antigos também auxiliam na identificação das formas de acreção centroclinal.

Foi realizada a medição da extensão dessas estruturas e correlação com o diâmetro de tronco da vegetação associada, sempre considerando o topo das ondulações das cunhas, de forma que a distância entre elas caracteriza o comprimento de onda da feição. A medição do diâmetro dos troncos foi realizada apenas com as porções expostas ao longo dos afloramentos, já que a maior parte dos troncos não permitia a observação de sua circunferência completa. A coleta foi padronizada com a altura do peito dos pesquisadores e foram observados valores variando entre 20 e 50 centímetros. (Figura 14; Tabela 1).



Figura 12: Granodecrescência ascendente em lentes areníticas nos heterolitos. Triângulos à esquerda indicam a variação da granulação ao longo da rocha. Fonte: O Autor, 2023.



Figura 13: Estratos com caimento em direção à licófito fossilizada. Ressaltado em vermelho está a forma semelhante a "asas de gaivota". Destaca-se que, quanto maior a distância com relação ao tronco fossilizado, maior a tendência de horizontalização do estrato. Fonte: O Autor, 2023.



Figura 14: Exemplo de medida associando diâmetro de troncos fossilizados ao comprimento de onda de estruturas sedimentares induzidas pela vegetação (VISS). Nesse caso, devido à proximidade entre duas licófitas, optou-se por realizar a soma dos seus diâmetros. Fonte: O Autor, 2024.

Tabela 1: Correlação entre diâmetro do tronco fóssil e comprimento de onda da estrutura em "asa de gaivota" nas lentes areníticas.

Ponto	Diâmetro	Comprimento de onda
1	35	220
2	50	860
3	27	175
4	28	180
5	38	220
6	23	103
7	32	199
8	20	122
9	25	130
10	31	147
11	73*	464
12	21	140
13	30	200
14	29	193
15	21	116
16	29	150
17	26	110

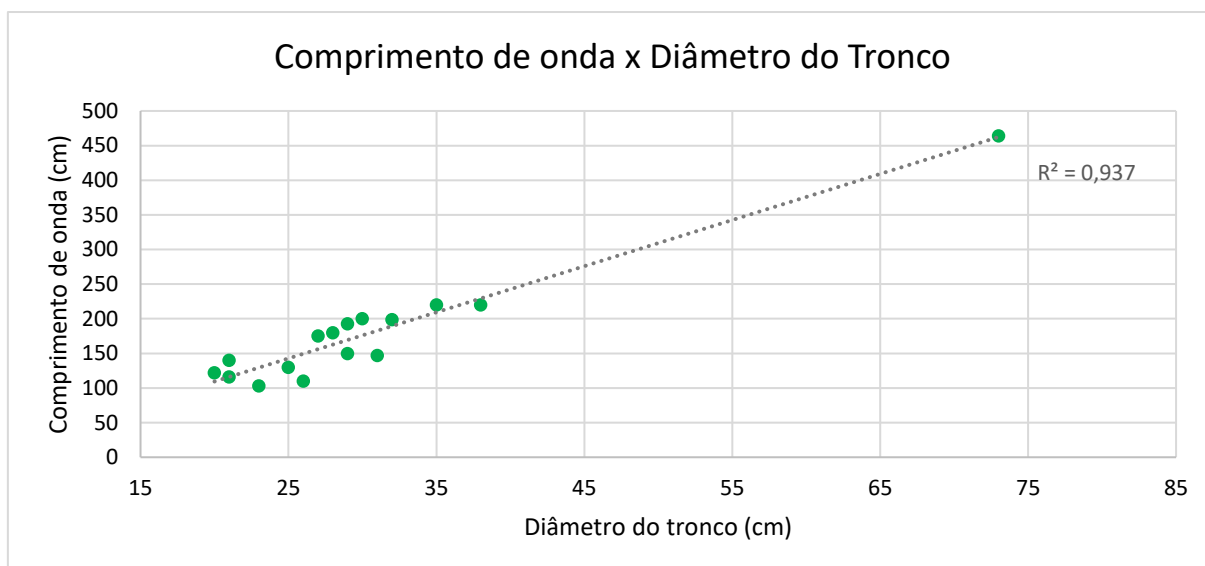
Notas: * O Ponto 11 apresenta as duas licófitas fossilizadas lado a lado apresentadas na Figura 14.

Fonte: O Autor, 2024.

A partir da análise dos dados apresentados na Tabela 1, foi identificada uma relação entre o diâmetro dos troncos fossilizados e o comprimento de onda das feições

em questão. O Gráfico 1 evidencia que o comprimento de onda das estruturas de acreção centroclinal é diretamente proporcional ao diâmetro do tronco localizado em sua porção central. Essa análise é verdadeira inclusive no caso de dois troncos posicionados lado a lado (Figura 14), de forma que sua relação se encaixa à linha de tendência dos resultados com grande grau de correlação. Essa correlação indica que as dimensões da vegetação atuando como obstáculo durante a formação das estruturas sedimentares na Floresta Fóssil de Ortigueira (PR) influenciam no tamanho e geometria das VISS geradas.

Gráfico 1: Correlação entre o comprimento de onda das estruturas de acreção centroclinal e o diâmetro do tronco das licófitas associadas. O R^2 diz respeito ao grau de aproximação da linha de tendência gerada para os dados. O ponto isolado na porção superior direito é referente às medidas coletadas no Ponto 11, indicado na Tabela 1.



Fonte: O Autor, 2024.

No contato entre os arenitos e a vegetação fossilizada, também foram identificadas estratificações de largura centimétrica e caimento oposto aos troncos (Figura 15). De acordo com suas características, foram classificadas como *upturned beds*.

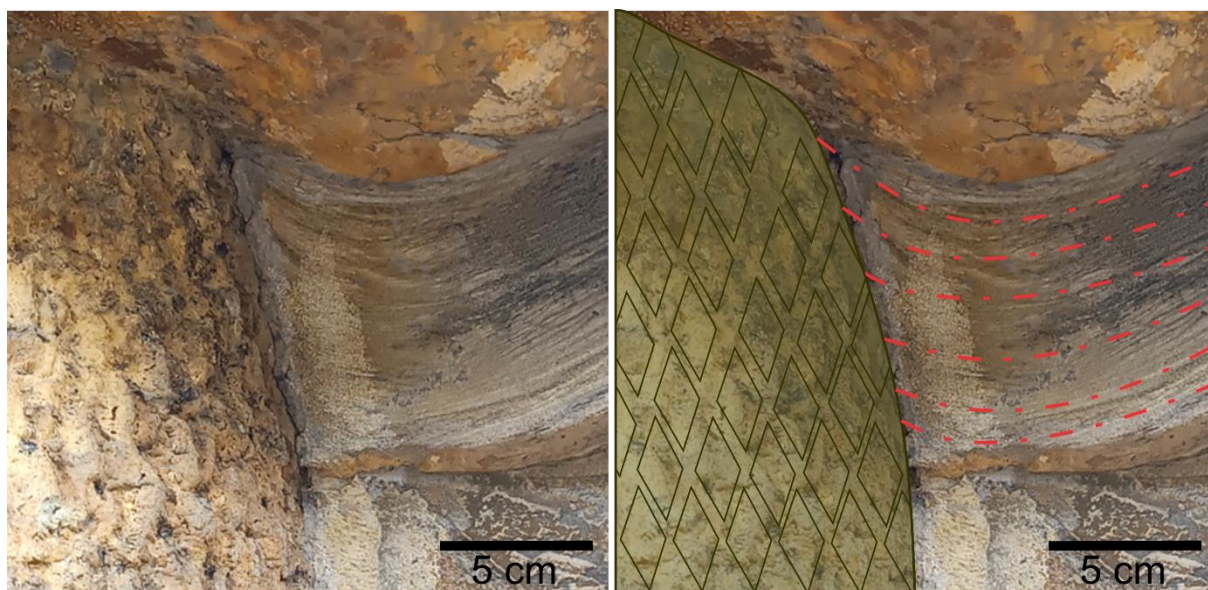


Figura 15: Laminações sedimentares com caimento oposto ao tronco fossilizado. À direita, interpretação, em vermelho tracejado, a orientação das laminações. Fonte: O Autor, 2023.

As estruturas classificadas como *downturned beds* são caracterizadas também pelo caimento dos estratos em direção às licófitas, mas pode ser diferenciada das estruturas de acreção centroclinal por dois fatores principais. *Downturned beds* são formadas pelo decaimento da matéria orgânica vegetal, que deixa de fornecer suporte aos estratos depositados acima delas, o que resulta no colapso dessas camadas. Com isso, a inclinação das superfícies que marcam essa estrutura tende a ser elevada, pois os sedimentos são movidos essencialmente na vertical, enquanto sua influência lateral é menor, chegando a apenas 20 centímetros já que a variação no volume devido à decomposição orgânica não é tão expressiva a ponto de gerar grandes depressões

Acima das licófitas fósseis, as *downturned beds* formam depressões preenchidas por argilitos escuros (Figura 16). Esses argilitos são de difícil identificação por fotografias devido à sua coloração escura e sua característica de criar caminhos preferenciais para escoamento de água superficial, o que o deixa úmido e reduz o contraste com os materiais ao seu redor. Tais feições foram classificadas como *downturned beds* e *mud filled hollows* (depressões preenchidas por sedimentos finos).

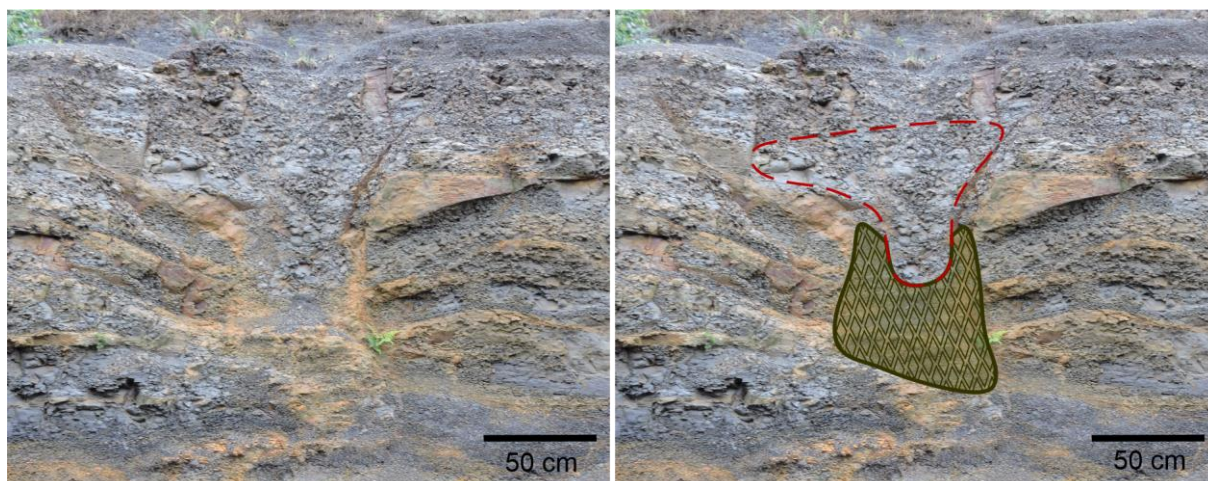


Figura 16: Acúmulo de argilito logo acima de tronco fossilizado. Polígono tracejado em vermelho indica a posição da concentração de materiais finos (argilito) e área castanho-esverdeada com hachura indica a posição da licófita. Fonte: O Autor, 2023.

Os perfis estratigráficos construídos foram úteis para identificar as variações litológicas descritas ao longo do empilhamento estratigráfico e como elas variam lateralmente. A Figura 17 apresenta as colunas estratigráficas construídas em campo, associadas à posição de levantamento juntamente com uma interpretação simplificada dos estratos presentes nos pontos de levantamento. As colunas estratigráficas também estão dispostas no APÊNDICE 1, onde é possível observá-las com maior detalhe.

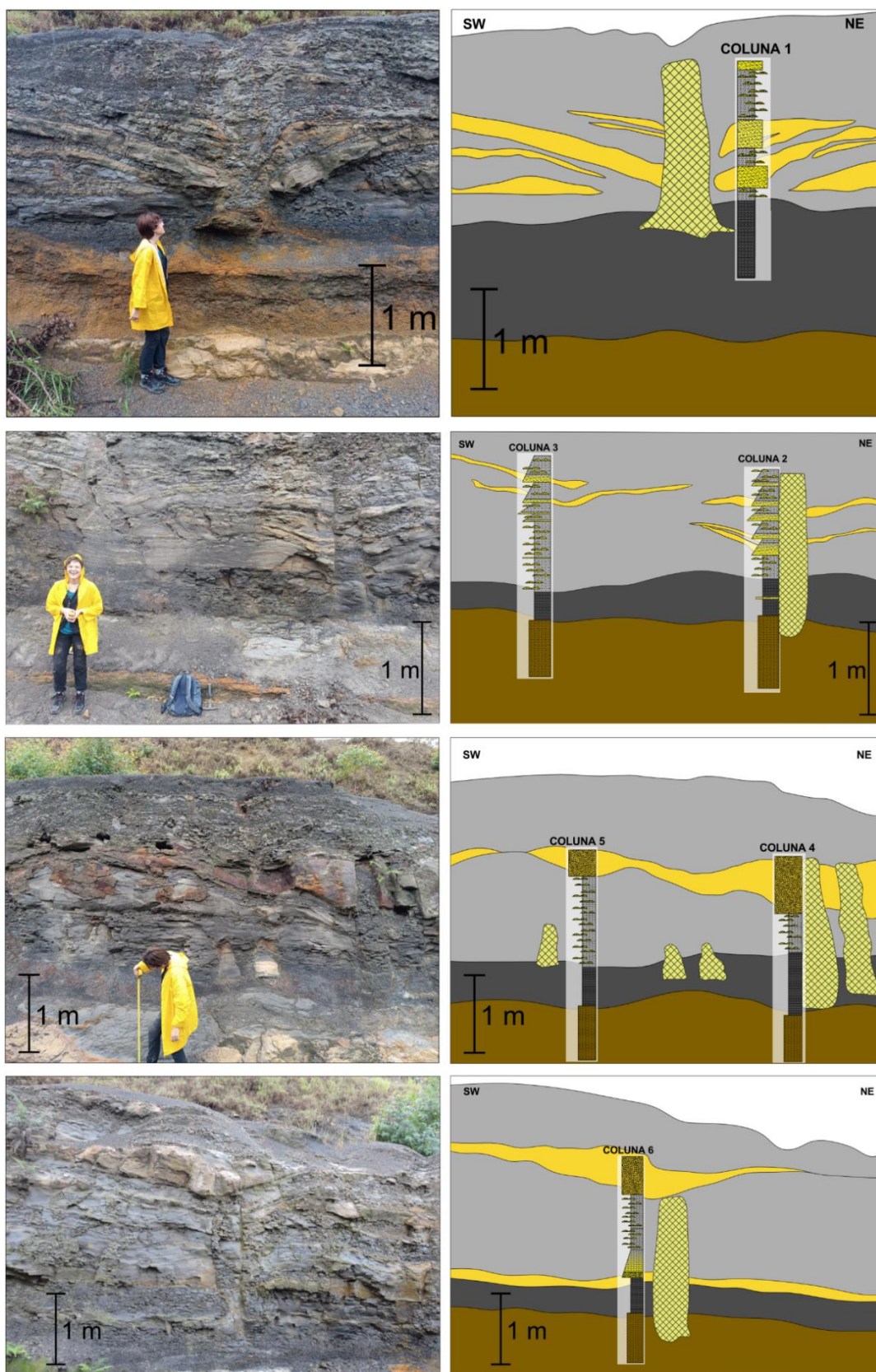


Figura 17: À esquerda, local de levantamento das colunas estratigráficas. À direita, posicionamento dessas colunas e distribuição simplificada dos litotipos presentes em cada local. Cada cor representa um dos litotipos presente: em marrom, siltito estratificado; em cinza escuro, paleossolo clástico; em cinza claro, heterolitos wavy; em amarelo, lentes areníticas; e em amarelo claro hachurado, tronco de licófito fóssil. Fonte: O Autor, 2024.

A análise das colunas litoestratigráficas levantadas ao longo dos afloramentos evidencia que as lentes areníticas tendem a ser mais espessas e mais frequentes próximo aos troncos fossilizados, o que corrobora com a proposta de que existe uma relação direta entre a presença das licófitas e a dinâmica sedimentar no local.

A Figura 18 representa uma interpretação da disposição de diferentes VISS em um ponto dos afloramentos estudados. Nela é possível observar a presença de estruturas com distintos ângulos de inclinação em direção ao tronco fóssil, cada uma caracterizando um tipo de estrutura sedimentar induzida pela vegetação (aquelas mais inclinadas foram classificadas como *downturned beds*, e as com comprimento de onda maior são as formas de acreção centroclinais). Já a cavidade preenchida por lama está localizada logo acima da vegetação preservada e, embora sua cor dificulte a identificação, esta é facilitada pela presença de um sulco gerado pela erosão pluvial no afloramento.

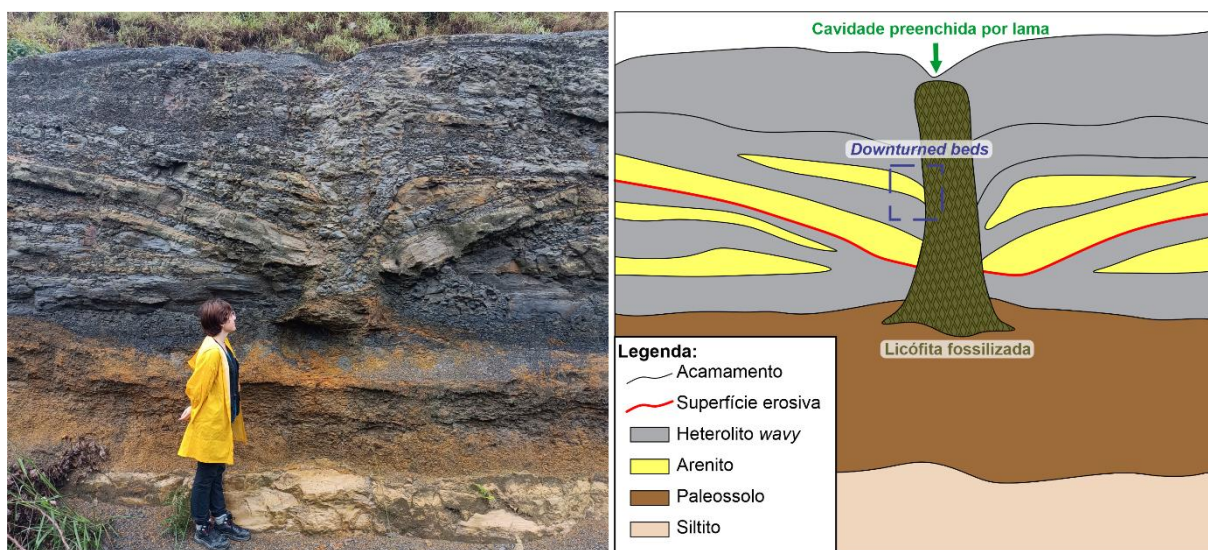


Figura 18: Ponto em que é possível identificar três das quatro VISS presentes na Floresta Fóssil de Ortigueira (PR). À direita, interpretação das principais estruturas e litotipos presentes. Vale ressaltar que as formas de acreção centroclinal são identificadas, nesse caso, pelas lentes areníticas com base erosiva e inclinação em direção ao tronco fóssil. Fonte: O Autor, 2024.

4.2. LICÓFITAS

As licófitas fossilizadas aparentam ter se desenvolvido utilizando como substrato os siltes e argilas escuros descritos. Como evidência, foram identificados diversos troncos com raízes preservadas na rocha e conectadas aos troncos. Embora

a vegetação tenha sido parcialmente deteriorada, de forma que os troncos raramente passam de 1,5 metros de altura, não foram identificados indivíduos tombados ou que indicassem morte anterior ao soterramento pelo menos parcial, a não ser por impressões de caules de licófitas preservados em meio aos sedimentos que recobrem os caules em posição de vida. Alguns troncos apresentam estruturas vegetais características de licófitas em bom estado de preservação (Figura 19).

Também foi possível observar a presença de raízes centimétricas da vegetação preservadas nos estratos de material silto-argiloso cinza escuro, além de outros fragmentos vegetais dispersos ao longo da camada.



Figura 19: Licófitas fossilizadas com preservação de ranhuras características em bom estado.
Fonte: O Autor, 2023.

4.3. RADARGRAMAS

Considerando que o levantamento realizado na Floresta Fóssil de Ortigueira (PR) envolveu, além de estratos com diferentes granulometrias, a presença das

licófitas fossilizadas, os principais refletores observados nas seções geradas dizem respeito a variações litológicas e à presença dos troncos. Por serem corpos sem grande extensão lateral, os troncos fósseis são identificados na forma de hipérboles, enquanto as lentes areníticas métricas formam linhas tão contínuas quanto as próprias estruturas representadas.

A análise das seções foi realizada visando identificar a presença de estratos com inclinação em direção à vegetação fossilizada que pudessem representar estruturas sedimentares induzidas pela vegetação. Importante ressaltar que a resolução do radargrama, embora bastante alta, não permitiu a identificação de todas as lentes areníticas centimétricas, apenas das com maior espessura. Dessa forma, as estruturas de menor porte, como as laminações inclinadas em direção oposta aos troncos (Figura 15), não são identificáveis.

Uma vez identificada a licófitas e os estratos inclinados, essas mesmas feições foram então mapeadas nas seções adjacentes para identificar sua variação lateral ao longo dos cortes. A Figura 20 indica a variação lateral de uma estrutura sedimentar induzida pela vegetação em 8 seções adjacentes. Cada seção está apresentada em sua forma original e com uma interpretação do posicionamento das licófitas fossilizadas e da geometria de um refletor com inclinação em direção ao tronco analisado. No caso apresentado, os radargramas 2, 5 e 7 marcam, respectivamente, o surgimento, ápice e desaparecimento dos estratos inclinados. Com isso, a estrutura em questão teria aproximadamente 50 cm de largura, além de comprimento máximo de cerca de 1,2 m e profundidade máxima de 20 cm (conforme observado no radargrama 5), caracterizando uma geometria elipsoidal com eixo maior subparalelo à direção de paleocorrente medida em afloramento.

Importante ressaltar que, como as licófitas são representadas como hipérboles, seu padrão de resposta às ondas eletromagnéticas tende a dificultar a interpretação da geometria exata dos estratos próximos. Esse processo é especialmente prejudicado na análise de regiões em que ocorre a concentração de troncos, a exemplo da seção apresentada na Figura 21.

A partir das 20 seções adquiridas, o *software ReflexW* permite a interpolação dos dados para gerar outros cortes com orientação perpendicular e em planta. Com

isso, foi possível gerar um bloco tridimensional com representação dos refletores observados no radargrama (Figura 22). A variação no comportamento dos refletores ao longo de 7 seções paralelas dentro do bloco 3D está representada na Figura 23, onde a distribuição de alguns estratos e licófitas foram interpretados para facilitar a percepção das mudanças identificadas.

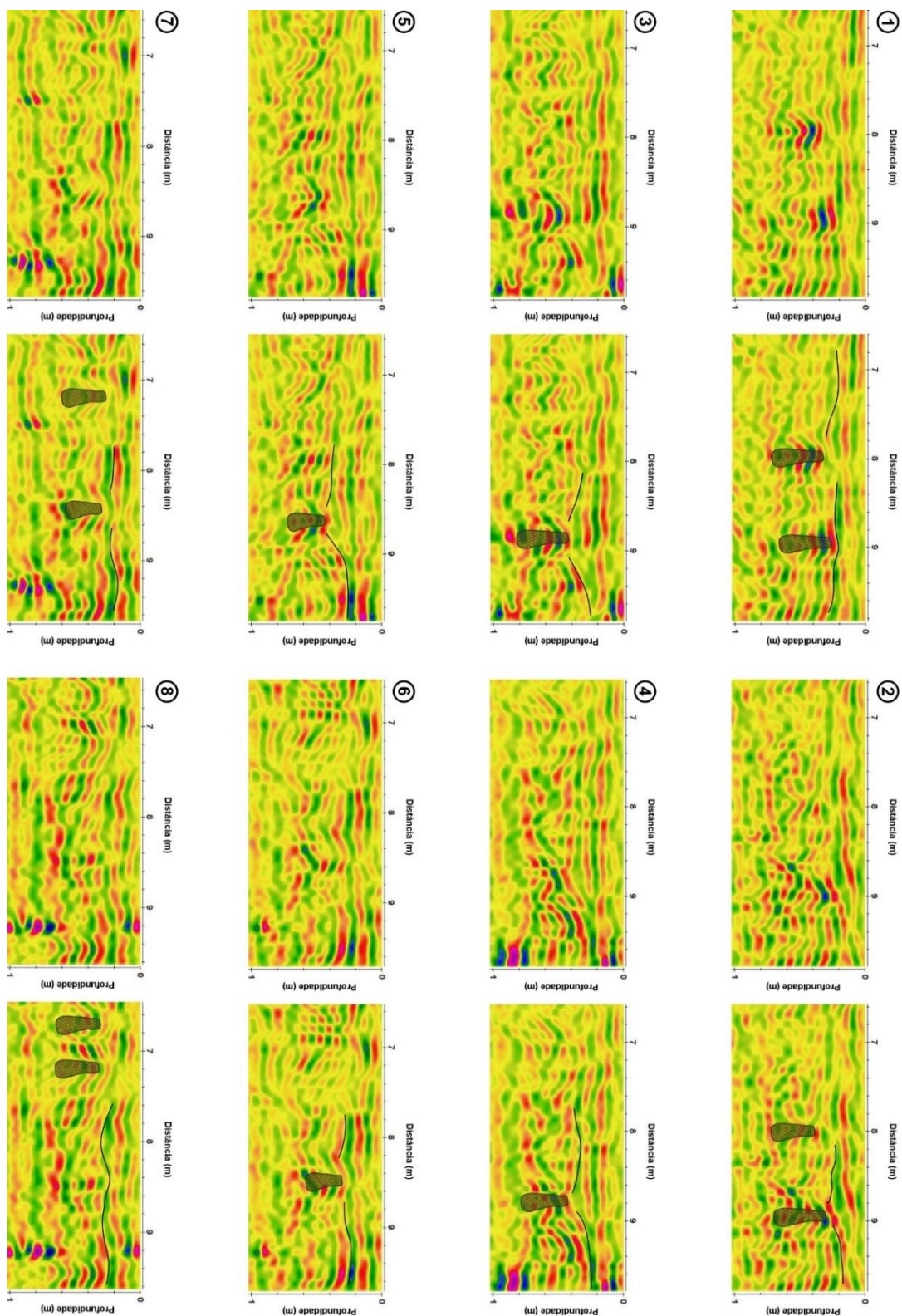


Figura 20: Sequência de seções de GPR da Floresta Fóssil de Ortigueira (PR). Cada radargrama tem um par com indicação do posicionamento dos principais troncos identificados e dos estratos inclinados em direção a eles. A numeração indica a posição relativa das seções. Atenção especial para a licófita na porção direita dos cortes, sobre a qual é possível ver a variação morfológica dos estratos ao longo das diferentes seções. Fonte: O Autor, 2024.

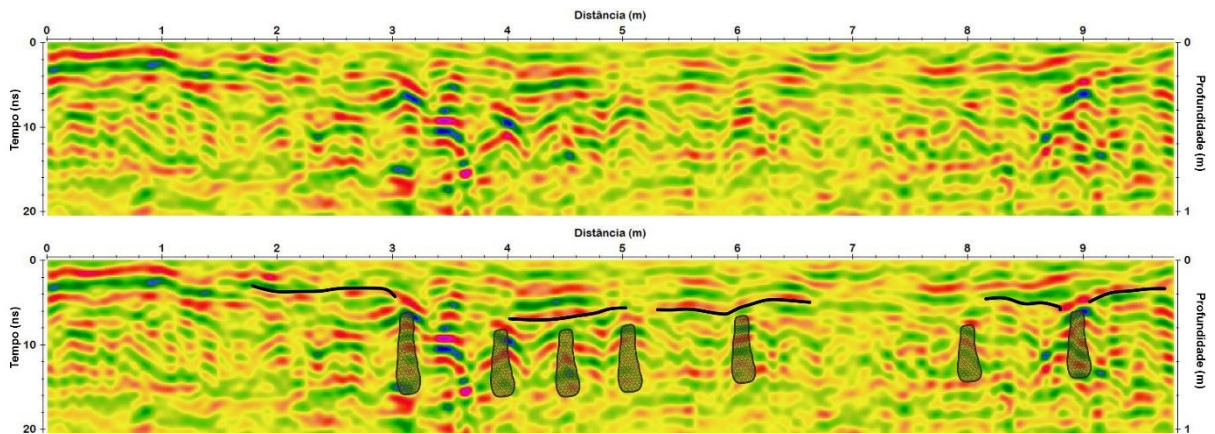


Figura 21: Radargrama já com os processamentos adequados, em que é possível observar a presença de diversas hipérboles, interpretadas como troncos fossilizados. Abaixo, interpretação do posicionamento da vegetação e geometria de um estrato aproximadamente no mesmo nível ao longo da seção. Destaca-se que, na região onde se concentram mais licófitas fósseis, os estratos parecem ter menor continuidade lateral, o que ocorre, parcialmente, devido à interferência das hipérboles com os refletores estratigráficos em si. Fonte: O Autor, 2024.

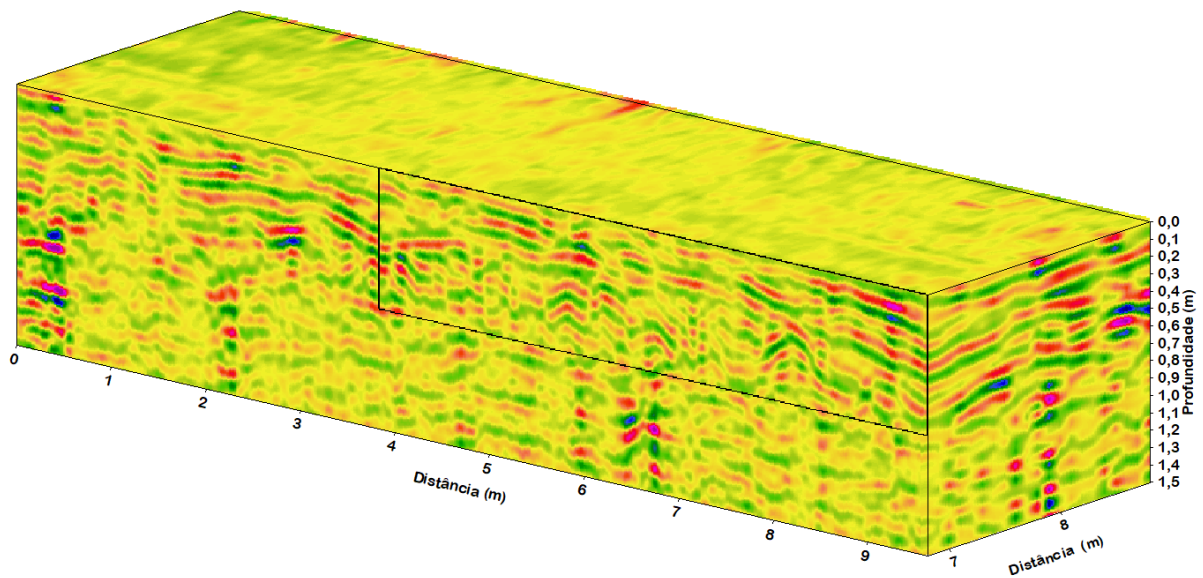


Figura 22: Bloco tridimensional gerado pelo *software* ReflexW através da interpolação de dados coletados em campo. A profundidade apresentada em metros foi calculada usando velocidade de propagação de 0,1 m/ns. Fonte: O Autor, 2024.

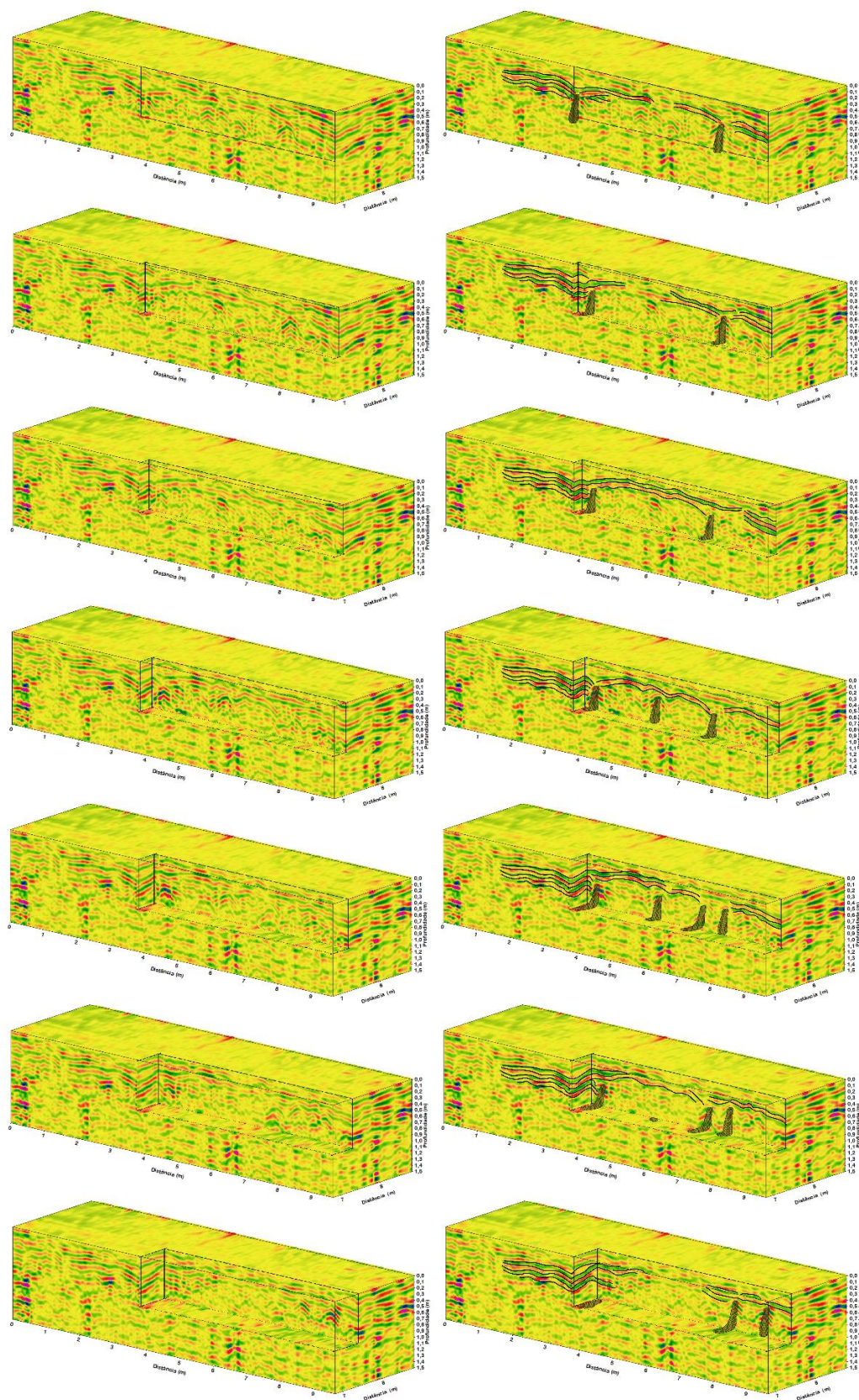


Figura 23: Blocos tridimensionais com dados de radargrama coletados na Floresta Fóssil de Ortigueira. Cada corte revela as informações de uma linha de levantamento, além de permitir a visualização da representação desses dados em planta e em cortes perpendiculares. À direita, são apresentadas interpretações de posicionamento das licófitas fósseis e do comportamento dos estratos ao longo das seções. Fonte: O Autor, 2024.

5. DISCUSSÃO

A presença de material fino, de coloração escura, com espessura relativamente pequena (40 a 70 cm), com desenvolvimento de raízes das licófitas sugere que sua classificação possa ser feita como um paleossolo pouco desenvolvido que serviu como substrato para ao desenvolvimento da vegetação na área. O desenvolvimento de solo e a presença de vegetação arbórea indicam provável exposição subaérea, com redução considerável da energia do sistema, considerando que os siltitos posicionados abaixo apresentam maior granulação e estruturas sedimentares de tração (como estratificações cruzadas). Os heterolitos *wavy* identificados acima do paleossolo indicam um novo aumento no nível de energia do sistema, com uma corrente capaz de transportar sedimentos de granulometria ainda maior. Além disso, o espessamento das camadas areníticas em direção ao topo das seções e os estratos com bases erosivas corroboram com a proposta de um sistema deposicional com cada vez maior capacidade de transporte de sedimentos. Com isso, a caracterização estratigráfica realizada por Mottin *et al.* (2022) pode também ser aplicada ao afloramento analisado.

O predomínio de paleocorrentes de sentido SW, tanto em sedimentos anteriores quanto naqueles posteriores ao desenvolvimento da vegetação sugere um sistema deposicional com correntes essencialmente unidirecionais, provavelmente em ambiente de planície deltaica conforme indicado por Mottin *et al.* (2022). A variação entre os padrões de distribuição das paleocorrentes nas rochas dessas duas porções do afloramento pode indicar que a região passou a ter influência de correntes de outras direções (possível atuação de correntes de maré). Outra possibilidade, levando em conta que a tendência SW ainda persiste nos heterolitos, é de que a presença da floresta tenha interferido nas correntes locais, reduzindo a eficiência do transporte de sedimentos e causando maior dispersão nos sentidos de fluxo.

A classificação das estruturas identificadas nos afloramentos e radargramas descritos é bastante coerente com o observado por Rygel *et al.* (2004). Para a caracterização das formas de acresção centroclinais, por exemplo, os autores observaram licopsídeas com diâmetro de tronco variando entre 0,1 e 0,54 m, enquanto neste trabalho foram registrados os valores foram de 0,2 a 0,5 m. Para Rygel *et al.* (2004), as VISS em si variavam entre 0,21 e 3,55 m de diâmetro (de acordo com a

descrição do trabalho, essa medida foi realizada de forma semelhante ao procedimento utilizado neste trabalho), enquanto na Floresta Fóssil de Ortigueira as medidas ficaram entre 1,3 e 4,6 m. Logo, a classificação utilizada se mostra eficiente não apenas em relação à geometria das estruturas, mas também das dimensões observadas.

Mottin *et al.* (2022) propõem, em seu modelo evolutivo para a Floresta Fóssil de Ortigueira, que o soterramento da vegetação se iniciou antes de sua morte, possivelmente devido ao rompimento de dique marginal na região interdistributária de uma planície deltaica. Para os autores, o aporte de sedimentos promovido por esse evento teria condicionado a atuação de fluxos episódicos, mas contínuos a médio e longo prazo, que, eventualmente levaria à morte da vegetação devido ao esmagamento das raízes e asfixia. Essa interpretação é coerente com o observado nos afloramentos descritos neste trabalho. A identificação de lentes de arenito com gradação normal corrobora com a proposta de múltiplos ciclos com pulsos de sedimentação. Além disso, a presença de superfícies de truncamento, relacionadas às formas de acreção centroclinal, sobrepostas por camadas areníticas em que estão presentes *upturned beds* (características de sistemas com menos energia) também apoia essa interpretação.

Com relação aos dados de GPR coletados e interpretados por Mottin *et al.* (2022), percebe-se que, para o objetivo de quantificar as licófitas presentes e a distribuição dos indivíduos dentro da floresta, as análises realizadas pelos pesquisadores foi bastante eficiente. Além de determinar a posição dos troncos, os autores sugeriram a ocorrência de uma *downturned bed* associada à presença das licófitas. Entretanto, após análise mais detalhada, a estrutura interpretada aparenta ser mais semelhante a uma forma de acreção centroclinal. Isso porque a dimensão registrada no radargrama (cerca de 20 cm de altura e 1 metro de largura da porção mais alta até a mais baixa), aparenta ser grande demais para o padrão de *downturned beds* identificadas em afloramento.

Mesmo assim, o radargrama interpretado por Mottin *et al.* (2022) traz dados interessantes e revela uma das principais dificuldades relacionadas à aplicação do GPR para mapeamento das estruturas sedimentares induzidas pela vegetação. A interferência gerada pela hipérbole que marca a posição das licófitas com os estratos

adjacentes dificulta a interpretação contínua dos refletores. Provavelmente esse é o motivo de só ter sido possível identificar um dos flancos da estrutura que, nessa direção deveria ser praticamente simétrica, conforme indicado nas interpretações do presente trabalho (Figuras 20 e 23).

Assim, é notável a dificuldade na interpretação dos estratos em sua totalidade, especialmente nas regiões entre os troncos das licófitas fossilizadas. Isso porque as hipérboles geradas pela interação das ondas eletromagnéticas do GPR com a vegetação interferem na distribuição dos refletores que marcam os estratos ao seu redor. Uma possibilidade para reduzir esse empecilho seria realizar o tratamento conhecido como migração fk (nesse trabalho, foi utilizada o filtro fk que, embora tenha uma nomenclatura semelhante, tem finalidade bastante diferente, conforme descrito no Capítulo 3), que permitiria a representação do topo das licófitas na forma de refletores pontuais ou pelo menos mais apertadas (Porsani *et al.*, 2006). No entanto, isso também reduziria o contraste e poderia modificar a geometria dos estratos adjacentes, dificultando a análise e identificação das formas de acreção centroclinal da forma em que foi possível com os tratamentos utilizados.

Por exemplo, no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP, Porsani *et al.* (2006) realizaram levantamentos de GPR e submeteram os dados a tratamentos com o objetivo de realizar um teste inicial da infraestrutura instalada e das possibilidades associadas às análises com essa técnica geofísica. Os autores submetem os dados coletados a diversos tratamentos (Figura 24) até chegarem ao resultado esperado. Destaca-se a diferença entre os radargramas c) e d). Na distância 20 m, em c) os refletores apresentam um padrão de interferência que, em ambientes naturais poderia dificultar ou impedir a interpretação de feições próximas. Após a aplicação da migração fk, as hipérboles são quase todas convertidas em pontos, facilitando a individualização dos corpos. Entretanto, ao mesmo tempo, observa-se a atenuação das respostas de refletores mais visíveis anteriormente, o que, no caso de uma análise com foco em estratigrafia, reduz a aplicabilidade desse procedimento.

Assim, embora a definição dos radargramas seja suficiente para identificar pelo menos a presença das lentes areníticas descritas, o aprofundamento das interpretações a partir das imagens se torna incompleta caso não exista a possibilidade de correlação com os dados observados nos afloramentos.

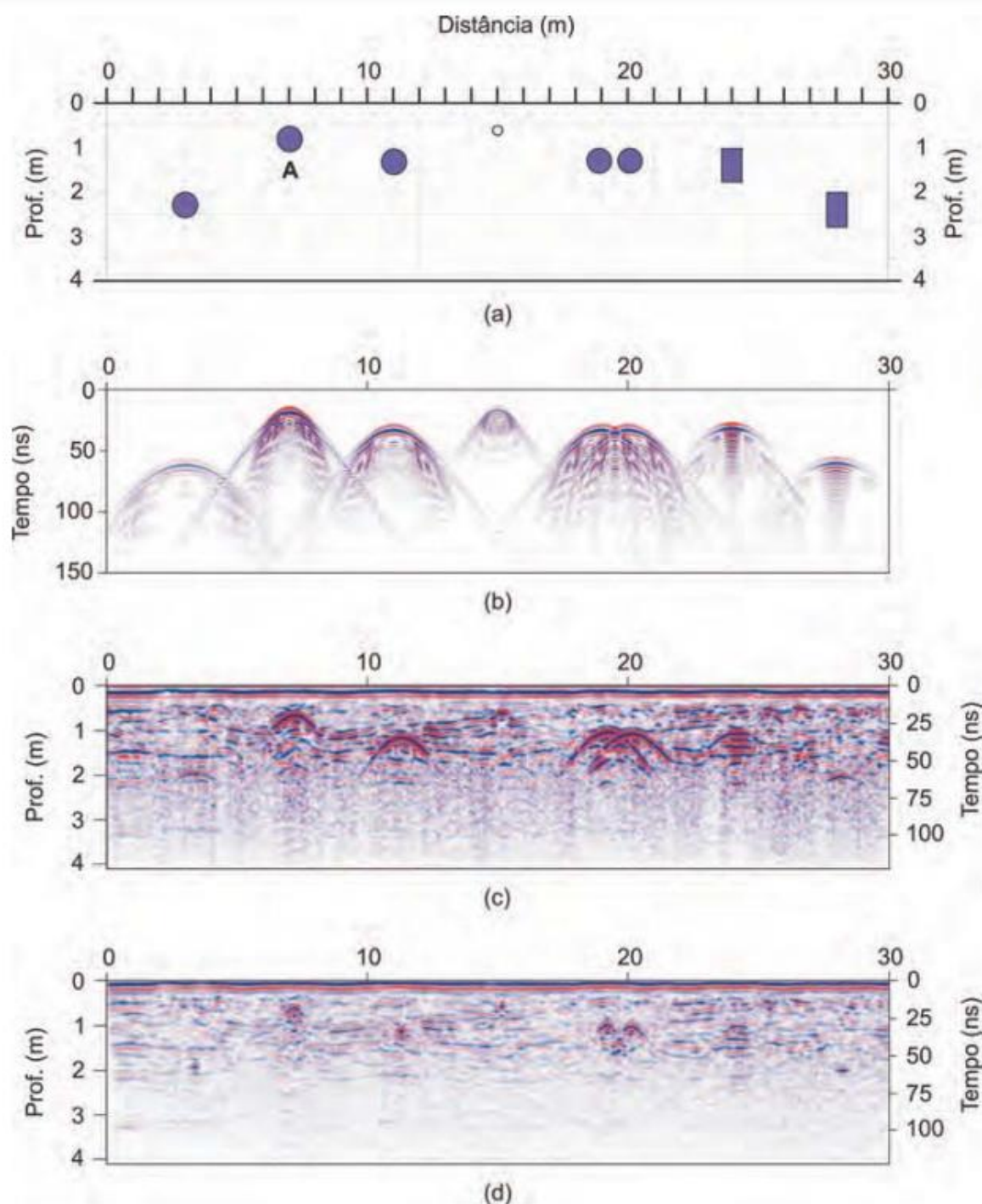


Figura 24: Resultados do processo de tratamento de dados de GPR. a) distribuição espacial dos objetos avaliados; b) perfil GPR sintético de 250 Mhz resultante de modelagem numérica 2D; c) Perfil GPR de 250 Mhz antes da migração; d) perfil GPR de 250 Mhz migrado com velocidade constante de 0,065 m/ns. Fonte: Porsani *et al.* (2006).

A presença de *mud filled hollows*, que também deveria ser facilmente identificada no radargrama devido ao contraste de propriedades elétricas com os materiais próximos, não foi caracterizada devido à falta de evidências concretas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Floresta Fóssil de Ortigueira (PR) apresenta bons exemplos de estruturas resultantes da interação entre processos de sedimentação e a presença da vegetação, com diversas VISS cuja identificação é facilitada pela preservação dos troncos em posição de vida.

Com base nos dados apresentados e discutidos, é possível concluir que a observação e caracterização das estruturas sedimentares induzidas pela vegetação podem fornecer importantes informações a respeito da dinâmica sedimentar e, conseqüentemente, dos parâmetros controladores de processos atuantes durante seu desenvolvimento. Assim, se apresentam como importantes fontes de dados para enriquecer modelos de evolução paleoambiental da região onde se encontram.

Como o desenvolvimento de estruturas sedimentares induzidas pela vegetação prevê condições relativamente comuns nos ambientes naturais, a correlação entre estudos de processos em desenvolvimento atualmente e os dados de produtos geológicos preservados em rochas sedimentares pode permitir melhor entendimento do sistema de formação das VISS (Nakayama *et al.*, 2002; Bridge & Demicco, 2008). Ensaios laboratoriais também podem auxiliar no desenvolvimento do entendimento dos processos formadores dessas estruturas, assim como já auxiliaram no entendimento de diversas outras áreas da sedimentologia (Bridge & Demicco, 2008). Além disso, a aplicação de técnicas computacionais já se provou eficiente em simular as características de um meio natural de modo a permitir a realização de simulações que melhorem o conhecimento a respeito do tema (Tinoco *et al.*, 2020).

Assim, percebe-se que o avanço do conhecimento a respeito das estruturas sedimentares induzidas pela vegetação, ainda pouco discutido, poderá contar com o auxílio de diversas técnicas e abordagens. Portanto, o atual trabalho pode, além de agregar ao conhecimento paleoambiental da região estudada, alavancar interesse em outros pesquisadores para que consigam interpretar estruturas semelhantes em outros afloramentos e desenvolver pesquisas específicas sobre tais estruturas.

REFERÊNCIAS

- Allen, J.R.L. 1985. *Principles of Physical Sedimentology*. 1 ed. Chapman & Hall, Londres, 272 pp.
- Bridge, J.S.; Demicco, R.V. 2008. *Earth Surface Processes, Landforms and Sediment Deposits*. 1 ed. Cambridge University Press, Cambridge, 835 pp.
- Castro, M. R.; Perinotto, J. A. J.; Castro, J. C. 1999. Fácies, análise estratigráfica e evolução pós-glacial do Membro Triunfo/Formação Rio Bonito, na faixa subaflorante do norte catarinense. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(4):533-538.
- Brumatti, M.; Spsila, A. L.; Besser, M. L. 2024. Geologia e recursos minerais do estado do Paraná, escala 1:600.000, nota explicativa. CPRM : Instituto Água e Terra : UFPR, Curitiba, 129 pp.
- Cruz, A.S.; Dias, M.V.F.; Reis, L.T.; Calzavara, E.; Duszczak, S.C.; Pereira, R.C.R. 1986. Carvão Campina dos Pupos. *Relatório Final de Pesquisa*, Minerais do Paraná S/A – Mineropar, Curitiba, 106 pp.
- Daemon, R. F.; Quadros, L. P. 1970. Bioestratigrafia do Neopaleozóico da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 24. *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia*. Brasília: SBG, 1970. p. 359-412.
- Davies, N. S.; McMahon, W. J.; Berry, C. M. 2024. Earth's earliest forest: fossilized trees and vegetation-induced sedimentary structures from the Middle Devonian (Eifelian) Hangman Sandstone Formation, Somerset and Devon, SW England. *Journal of the Geological Society*. v. 181, 23 pp.
- Furtado, C. P. Q.; Souza, D. M.; Silva, M. W. C.; Borges, W. R. 2010. GPR – Processamento e Modelagem. *IV Simpósio Brasileiro de Geofísica*. Sociedade Brasileira de Geofísica, Brasília. 5 pp.
- Gordon Jr., M. 1947. Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. *Notas Preliminares e Estudos*, Rio de Janeiro, 38:1-20.
- Geophysical Survey Systems, Inc. 2003-2017. *SIR 3000 Manual*. GSSI, New Hampshire, 99 pp.
- Hsü, K. J. 2004. *Physics of Sedimentology*, 2 ed., Springer, Berlin, 244 pp.

- Iannuzzi, R., 2010. The flora of early Permian coal measures from the Paraná Basin in Brazil: a review. *International Journal of Coal Geology*, 83:229–247. doi.org/10.1016/j.coal.2010.05.009.
- Iannuzzi, R., Souza, P.A., 2005. Floral succession in the Lower Permian deposits of the Brazilian Paraná Basin: an up-to-date overview. *In*: Lucas, S.G., Zigler, K.E. (Eds.), *The Nonmarine Permian: New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin*, 30:144–149.
- Jatkoski, H.; Batezelli, A. 2015. Arcabouço estratigráfico da Formação Rio Bonito na região centro-norte do Estado do Paraná. *Terrae*, 12(1-2):36-48.
- Milani, E. J.; Henrique, J.; Melo, G.; Souza, P. A.; Fernandes, L. A.; França, A. B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15:265-287.
- Milani, E. J. 1997. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana sul-ocidental*. Tese de Doutorado, v. 2, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Mottin, T. E. 2022. *Stratigraphic Record of Environmental Changes During the Late Paleozoic Glacial-Postglacial Transition in Northeastern Paraná Basin, Brazil*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, 172 pp.
- Mottin, T.E.; Iannuzzi, R.; Vesely, F.F.; Montañez, I.P.; Griffis, N.; Canata, R.E.; Barão, L.M.; Da Silveira, D.M.; Garcia, A.M. 2022. A glimpse of a Gondwanan postglacial fossil forest. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 588, 14 pp. doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110814
- Mottin, T. E.; Vesely, F. F. Iannuzzi, R.; Griffis, N. P.; Montañez, I. P. 2023. Spatiotemporal variability of the Paleozoic glacial-to-postglacial transition across eastern Paraná Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, v. 453, 21 pp. doi.org/10.1016/j.sedgeo.2023.106420
- Nakayama, K., Fielding, C. R.; Alexander, J. 2002. Variations in character and preservation potential of vegetation-induced obstacle marks in the variable discharge Burdekin River of north Queensland, Australia. *Sedimentary Geology*, 149:199-218. doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00173-7
- Pereira, E.; Carneiro, C.R.; Bergamaschi, S.; Almeida, F.F.M. 2012. Evolução das sinéclises paleozóicas: Províncias Solimões, Amazonas, Parnaíba e Paraná. *In*:

- Hasui, Y.; Carneiro, C.R.; Almeida, F.F.M.; Bartorelli, A. (Org.). *Geologia do Brasil*, Beca, São Paulo, p. 392-421.
- Popp J.H. 1983. Fácies, ambientes e carvões na Formação Rio Bonito no sul do Estado do Paraná: uma análise estratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências*, 13(1):27-36.
- Porsani, J. L.; Borges, W. R.; Rodrigues, S. I.; Hiodo, F. Y. O sítio de geofísica rasa do IAG/USP: instalação e resultados GPR 2D-3D. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(1):49-61.
- Rocha-Campos, A. C. 1967. The Tubarão Group in the Brazilian portion of the Paraná Basin. In: Bigarella, J. J.; Becker, R. D.; Pinto, I. D. (ed.). *Problems in Brazilian Gondwana Geology*. UFPR, Curitiba, p. 27-103.
- Rösler, O., 1978. The Brazilian Eogondwanic Floral Succession. *Boletim do Instituto de Geociências — USP*, 9:85–90.
- Rygel, M.C.; Gibling, M.R; Calder, J.H. 2004. Vegetation-induced sedimentary structures from fossil forests in the Pennsylvanian Joggins Formation, Nova Scotia. *Sedimentology*, 51:531-552. doi.org/10.1111/j.1365-3091.2004.00635.x
- Schlömer, O; Luneau, S., Rodrigues, S., Herget, J. 2024. Vegetation Induced Sedimentary Structures: Porosity of riparian shrubs as control parameter of sedimentary processes during floods. *International Journal of Sediment Research*, 39:497-513. doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.006
- Schneider, R. L.; Muhlmann, H.; Tommasi, E.; Medeiros, R. A.; Daemon, R. F.; Nogueira, A. A. 1974. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 28. *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia*. Porto Alegre: SBG, 1:41-65.
- Sumer, B. M.; Müller, A. (ed.).1982. *Mechanics of Sediment Transport*, 1 ed. Taylor & Francis, Nova Iorque, 296 pp. doi.org/10.1201/9781003079019
- Tinoco, R. O.; San Juan, J. E.; Mullarney, J. C. 2020. Simplification bias: lessons from laboratory and field experiments on flow through aquatic vegetation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45:121-143. doi.org/10.1002/esp.4743
- Vesely, F.F., Assine, M.L., 2004. Sequências e Tratos de Sistemas Depositionais do Grupo Itararé, Norte do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 34:219–230. doi.org/10.25249/0375-7536.2004342219230

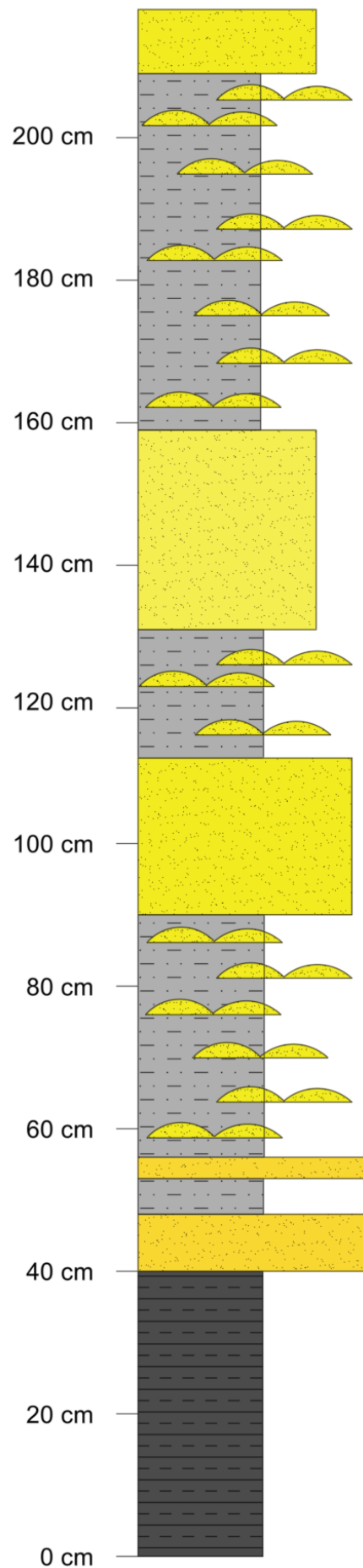
- Vesely, F.F., Assine, M.A., 2006. Deglaciation sequences in the Permo-Carboniferous Itararé Group, Paraná Basin, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 22(3-4):156-168. doi.org/10.1016/j.jsames.2006.09.006
- Zacharias, A. A. 2004. *Preenchimento de vales incisos por associações de fácies estuarinas, Formação Rio Bonito, nordeste do Paraná*. Tese de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências – Área de Concentração em Geologia Regional, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, 112 pp.
- Zacharias, A. A.; Assine, M. L. 2005. Modelo de preenchimento de vales incisos por associações de fácies estuarinas, Formação Rio Bonito no norte do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(4):573-583.

APÊNDICE 1 – COLUNAS ESTRATIGRÁFICAS

COLUNA 01

Legenda

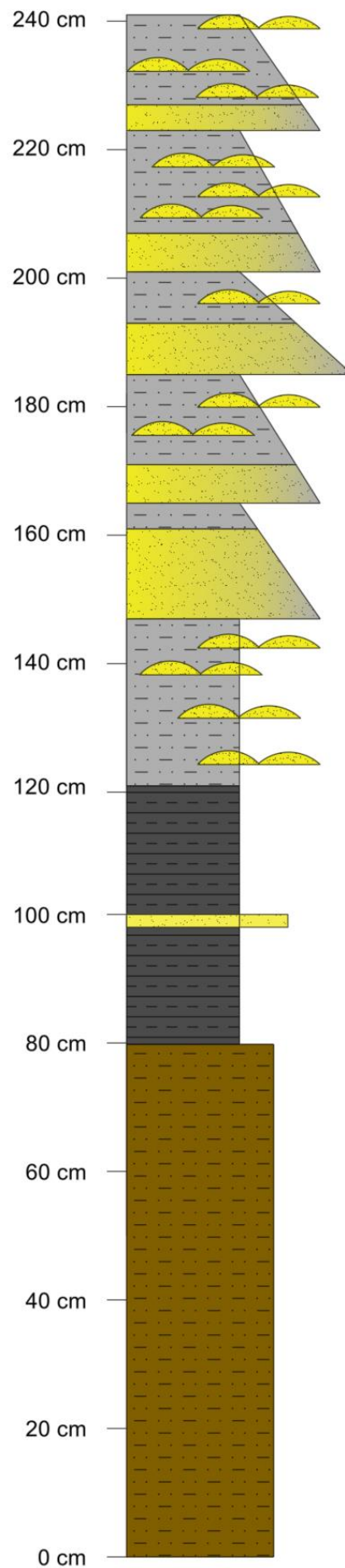
-  Siltito laminado
-  Paleossolo
-  Heterolito wavy
-  Arenito muito fino
-  Arenito fino
-  Arenito médio



COLUNA 02

Legenda

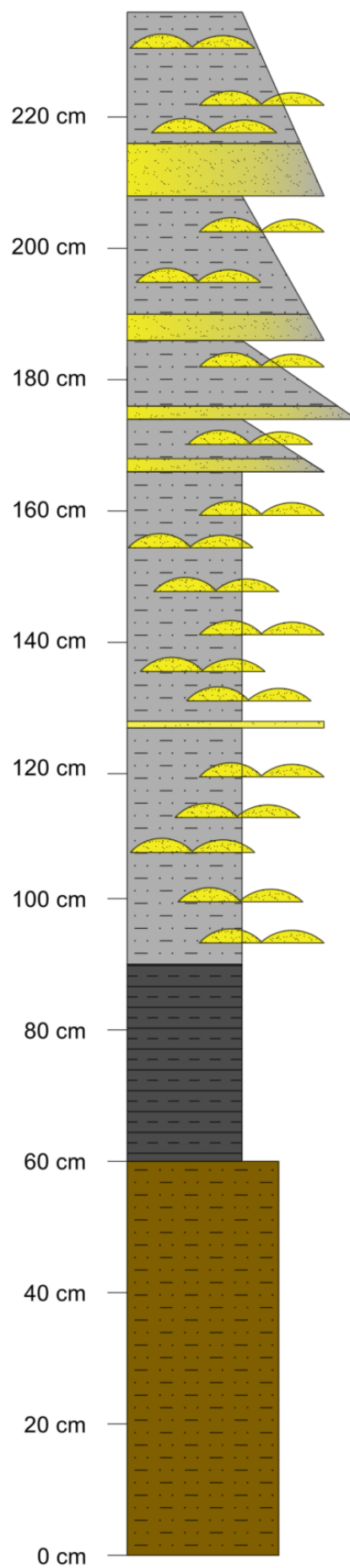
-  Siltito laminado
-  Paleossolo
-  Heterolito wavy
-  Arenito muito fino
-  Arenito fino
-  Arenito médio



COLUNA 03

Legenda

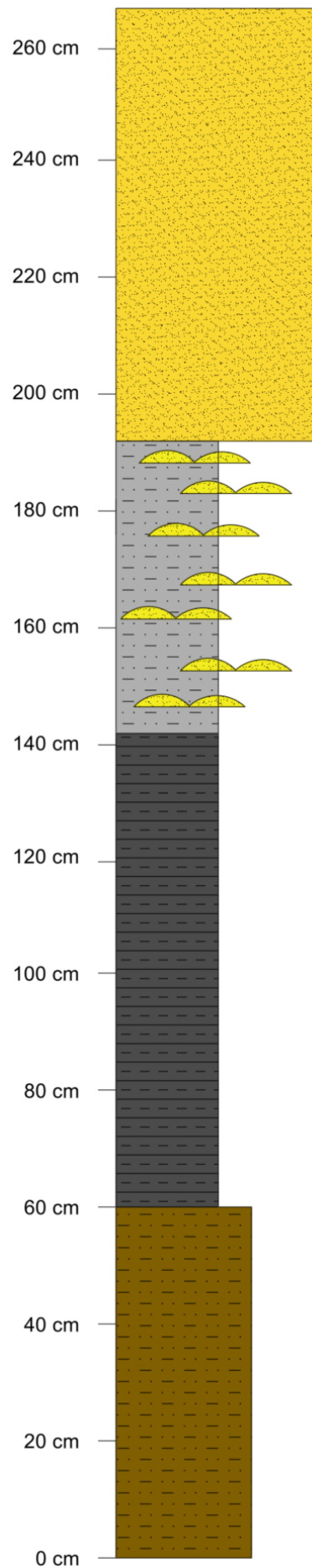
-  Siltito laminado
-  Paleossolo
-  Heterolito wavy
-  Arenito muito fino
-  Arenito fino
-  Arenito médio



COLUNA 04

Legenda

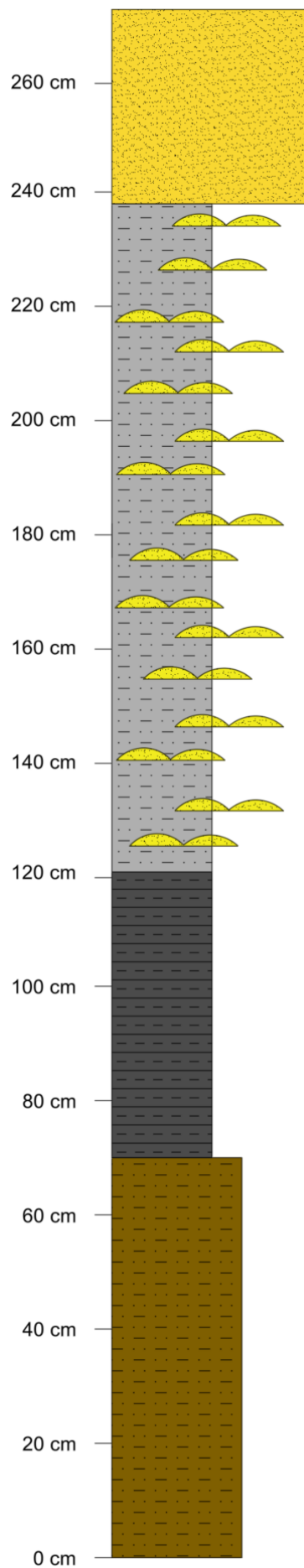
-  Siltito laminado
-  Paleossolo
-  Heterolito wavy
-  Arenito muito fino
-  Arenito fino
-  Arenito médio



COLUNA 05

Legenda

-  Siltito laminado
-  Paleossolo
-  Heterolito wavy
-  Arenito muito fino
-  Arenito fino
-  Arenito médio



COLUNA 06

Legenda

-  Siltito laminado
-  Paleossolo
-  Heterolito wavy
-  Arenito muito fino
-  Arenito fino
-  Arenito médio

