

PRODUÇÃO TÉCNICA ITV DS

CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E DETERMINAÇÃO DAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO NA ÁREA DE ENTORNO DO RIO VERMELHO SOBRE A EFC

Relatório Parcial do Projeto Recursos Hídricos na Bacia do Rio Itacaiúnas –
VALE/ITV.

José Tasso Felix Guimarães
Paulo Rógenes Monteiro Pontes
Renato Oliveira da Silva Júnior
Márcio Sousa da Silva
Gabriel Negreiros Salomão
Adayana Maria Queiroz de Melo

Belém / PA
Dezembro/2019

Título: Caracterização morfológica e determinação das manchas de inundação na área de entorno do Rio Vermelho sobre a EFC.	
PROD.TEC.ITV DS – N023/2019	Revisão 00
Classificação: () Confidencial () Restrita () Uso Interno (x) Pública	

Informações Confidenciais - Informações estratégicas para o Instituto e sua Mantenedora. Seu manuseio é restrito a usuários previamente autorizados pelo Gestor da Informação.

Informações Restritas - Informação cujo conhecimento, manuseio e controle de acesso devem estar limitados a um grupo restrito de empregados que necessitam utilizá-la para exercer suas atividades profissionais.

Informações de Uso Interno - São informações destinadas à utilização interna por empregados e prestadores de serviço

Informações Públicas - Informações que podem ser distribuídas ao público externo, o que, usualmente, é feito através dos canais corporativos apropriados

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

G963 Guimarães, José Tasso Felix
 Caracterização morfológica e determinação das manchas de inundação na área de entorno do Rio Vermelho sobre a EFC. / José Tasso Felix Guimarães... [et al.] – Belém, 2019.
 33 p.: il.

1. Geomorfologia. 2. Hidrologia - Inundação - Carajás, Serra dos (PA).
 3. Estrada de Ferro Carajás (EFC). I. Pontes, Paulo Rógenes Monteiro. II. Silva Júnior, Renato Oliveira da. III. Silva, Márcio Sousa da. IV. Salomão, Gabriel Negreiros. V. Melo, Adayana Maria Queiroz de. VI. Título.

CDD 23. ed. 551.098115

Bibliotecário(a) responsável: Nisa Gonçalves – CRB 2 -525

RESUMO EXECUTIVO

Em maio de 2009 a inundação do Rio Vermelho provocou a paralização total da Estrada de Ferro Carajás (EFC) no seu quilometro 765, entre a cidade de Marabá e a vila de Itainópolis. Esta inundação formou um lago de quase 1 km de extensão cobrindo os trilhos da EFC em mais de meio metro de altura. A análise prévia dos riscos de inundação considerando a geologia, geomorfologia e hidrologia desta área poderia indicar com precisão sua vulnerabilidade diante   eventos climáticos extremos, bem como sugerir medidas de controle para evitar a interrupção do transporte de minério pela Vale. Este trabalho visou a caracterização morfológica e determinação das manchas de inundação desta área para o entendimento da dinâmica fluvial ao longo do tempo em escala horizontal (mudanç as de área superficial) e vertical (mudanç as de volume). Desta maneira, foi observado que o Rio Vermelho na área de estudo apresenta um fluxo confinado em seu canal principal devido a um controle litológico e estrutural. Anomalias localizadas no terreno sofreram erosão ao longo do tempo e geraram áreas planas contiguas ao canal fluvial. Nas áreas mais baixas e protegidas dentro do conjunto de áreas planas foram formadas planícies de inundação, que serviram como amortecimento da hidráulica fluvial durante os períodos de cheia do rio. Entretanto, estas planícies foram ressecadas e tornaram-se resistentes a erosão física. A calha do rio tornou-se cada vez mais confinada, e aumentou a intensidade do fluxo de energia da água sobre as áreas baixas contiguas ao canal principal do Rio Vermelho. Foi estimado, a partir de monitoramento hidroclimatológico e técnicas de geoprocessamento, que eventos de precipitação sazonal na bacia do Rio Vermelho, que se intensificam a partir de janeiro, podem causar aumentos significativos do nível de água, ocasionando inundação de determinadas áreas e possível dano as estruturas de drenagem. As estruturas de drenagem produzidas após o evento de 2009 para evitar que as inundações do rio paralisassem a ferrovia devem ser periodicamente monitoradas, pois o aumento do fluxo de energia e volume das águas do rio podem comprometer estas estruturas, que hoje atuam como diques artificiais.

LISTA DE FIGURA

Figura 01 – Área de estudo no contexto da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas. Estrelas em vermelho representam os locais de sondagens.....	8
Figura 02 – Geologia da área de estudo com a identificação com estrelas em vermelho dos locais de sondagens dos testemunhos sedimentares sobre os depósitos aluvionares relacionados ao Rio Vermelho (modificado de CPRM, 2001).....	9
Figura 03 – Perfil longitudinal do rio Vermelho, da cabeceira até a confluência com o rio Itacaiúnas. A área em destaque (cor laranja) representa a área de estudo (elaborado pelo autor).....	10
Figura 04 – Procedimentos utilizado para cálculo do HAND: a) Definição da drenagem a partir de um MDE; b) cálculo dos pixels de terreno que drenam para cada pixel de drenagem; c) utilização do MDE; e d) cálculo da diferença de elevação de cada pixel para a elevação do pixel de drenagem mais próximo.....	11
Figura 05 – Localização do sensor de nível do rio Vermelho, monitorado pelo ITV (estrela em cor preta), das estações pluviométricas utilizadas na análise (círculos vermelhos) e área de estudo.....	12
Figura 06 – Sonda Percussiva Cobra Pro.....	13
Figura 07 – Amostragem de testemunhos com a sonda e hastes de captura de sedimento.....	13
Figura 08 – Perfis altimétricos sobre a área de estudo com a identificação dos ambientes sedimentares relacionados ao rio Vermelho.....	15
Figura 09 – Modelo digital de elevação da área de estudo.....	16
Figura 10 – Dique marginal (vegetado) sobre a planície de inundação do Rio Vermelho.....	17
Figura 11 – Antigo tributário do rio Vermelho, atualmente colmatado e vegetado por gramíneas.....	17
Figura 12 – Produto HAND para a região estudada. As figuras mostram a área potencialmente inundada caso o nível de água seja o mesmo da calha do rio Vermelho (A), até 1 m, (B) e até 5 m acima da calha do rio (C). A figura também indica a localização da EFC.....	18
Figura 13 – Nível no Rio Vermelho monitorado pelo ITV e indicação dos eventos hidrológicos analisados.....	18
Figura 14 – Manchas de inundação obtidas a partir do HAND e dos níveis monitorados no Rio Vermelho para os dois eventos analisados.....	19
Figura 15 – Fotos obtidas pela equipe do ITV no período de chuvas de 2018 na área de estudo. As fotos mostram as áreas inundadas e as estruturas locais.....	20
Figura 16 – Nível no rio Vermelho e precipitações nas estações analisadas.....	20
Figura 17 – Xistos de granulação fina da Formação Couto Magalhães expostos nas margens do rio Vermelho.....	22
Figura 18 – Testemunho (EFC 4) extraído integralmente com registro de parte do embasamento (intemperizado) dos depósitos do Quaternário identificados na área.....	23
Figura 19 – Registro sedimentar gráfico dos testemunhos de sedimentos deste trabalho.....	24

Figura 20 – Correlação de fácies dos testemunhos adjacentes ao rio Vermelho integrada com as datações por ¹⁴ C (idades calibradas: anos cal AP). Seta em vermelho indica o afloramento das rochas da Formação Couto Magalhães.....	26
Figura 21 – Normalização dos dados geoquímicos dos testemunhos sedimentares extraídos das formações Couto Magalhães (CM) e Itapecuru (IT1-2).....	28
Figura 22 – Análise fatorial dos dados geoquímicos das rochas das formações Couto Magalhães (CM) e Itapecuru (IT1-2), bem como dos sedimentos dos testemunhos do Holoceno.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Precipitações acumuladas (Pacm) em cada estação pluviométrica e nos dois eventos analisados.....	21
Tabela 2 – Datações por ^{14}C das amostras dos testemunhos de sedimento da EFC. pMC: carbono moderno.....	22
Tabela 3 – Fácies sedimentares identificadas nos testemunhos de sedimento da EFC.....	25

SUMÁRIO

1	<i>INTRODUÇÃO</i>	7
2	<i>OBJETIVO</i>	10
3	<i>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</i>	10
4	<i>RESULTADOS E DISCUSSÃO</i>	14
5	<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>	30
6	<i>RECOMENDAÇÕES</i>	30
7	<i>BENEFÍCIOS POTENCIAIS</i>	30
	<i>REFERÊNCIAS</i>	31

1 INTRODUÇÃO

Atualmente são transportados pela Vale 120 milhões de toneladas/ano de minério de ferro na Estrada de Ferro Carajás (EFC) ligando a maior mina de minério de ferro a céu aberto do mundo, em Carajás, no sudeste do Pará, ao Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM), em São Luís (MA) (Vale 2019), perfazendo quase 893 km de extensão. Ao longo deste percurso a EFC percorre trechos com diferentes feições geológicas e geomorfológicas incluindo propriedades rurais e aglomerados urbanos. Dentre as feições naturais, diversos rios e planícies de inundação quaternárias são cortadas por esta ferrovia. Estas feições são altamente dinâmicas ao longo do tempo em escala horizontal (mudanças de área superficial) como em escala vertical (mudanças de volume), relacionadas aos processos morfológicos de ambientes fluviais, que também são fortemente controlados por forçantes hidroclimatológicas (Latrubesse et al., 2005). Essas planícies de inundação são definidas como áreas planas, adjacentes ao rio, e inundadas sazonalmente. A inundação pode ocorrer ao longo de todo o rio, como também em pontos localizados nas planícies, onde a energia da água rompe os diques aluviais do rio, formando grandes bolsões de água. As planícies de inundação preservam os depósitos aluviais previamente estabelecidos pelos canais principais e servem como arquivo para entender os processos deposicionais e dinâmica do rio.

Neste sentido, a caracterização morfológica e determinação das manchas de inundação destas regiões são partes fundamentais da avaliação da vulnerabilidade e dos riscos geológico e geomorfológico de ferrovias, afim de evitar interrupções no escoamento da produção de minério de ferro.

1.1 Área de estudo

O Rio Vermelho é um dos afluentes da margem direita do Rio Itacaiúnas e possui uma área de drenagem de aproximadamente 7 mil km² até sua confluência com o Rio Itacaiúnas. Suas nascentes estão situadas no município de Sapucaia, em uma elevação de aproximadamente 200 m. Já a sua foz, situa-se a uma elevação de aproximadamente 70 m, percorrendo cerca de 270 km. A declividade média do rio é de 0.4 m/km, já a declividade média da bacia hidrográfica é em torno de 0.07 m/m (segundo modelo digital de elevação ALOS 30 m).

A Bacia do Rio Vermelho, assim como a Bacia do Rio Itacaiúnas, passou por um grande processo de desmatamento desde a década de 1970. De sua área total, cerca de 76.8% são áreas desmatadas. O restante corresponde a áreas de floresta (23%) e uma pequena parcela de áreas urbanas (0.2%) (análise feita a partir do satélite óptico Sentinel-2).

Na porção do baixo Rio Vermelho, onde o mesmo corta a EFC, está inserida a área de estudo desse trabalho (município de Marabá, sudeste do Estado do Pará) (Figura 1).

Figura 1 – Área de estudo no contexto da Bacia Hidrográfica do Rio Itacaiúnas. Estrelas em vermelho representam os locais de sondagens.

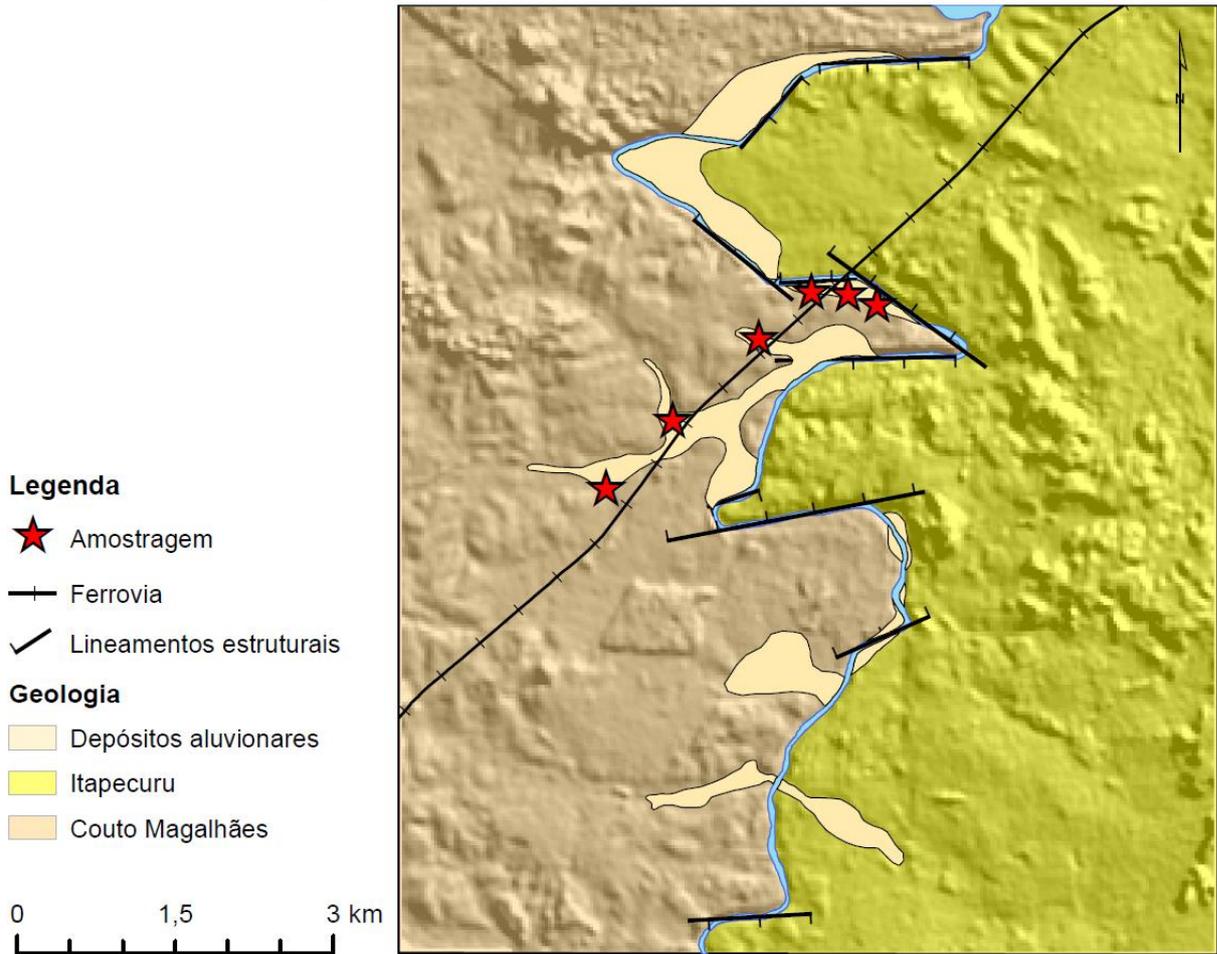


Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

Esta área está inserida entre o Cinturão Araguaia e a Bacia do Parnaíba, representados pelos filitos, ardósias, xistos (de granulação fina), quartzitos e calcários com baixo grau de metamorfismo da Formação Couto Magalhães, e arenitos conglomeráticos da Formação Itapecuru (Figura 2; CPRM, 2001). O Rio Vermelho desenvolveu-se em um sistema de lineamentos estruturais entre estas duas unidades. Depósitos aluvionares (quaternários) podem ser localmente observados em alguns trechos deste rio.

O clima regional é de monções tropicais, com uma média anual da temperatura de aproximadamente 26°C (Alvares et al. 2013). A precipitação total anual foi de 1792 mm (calculada no período entre 1973-2016; Xavier et al., 2015), com um total de ~ 1564 mm durante a estação chuvosa (novembro a maio) e ~ 228 mm durante a estação seca (junho a outubro) (Cavalcante et al., 2019).

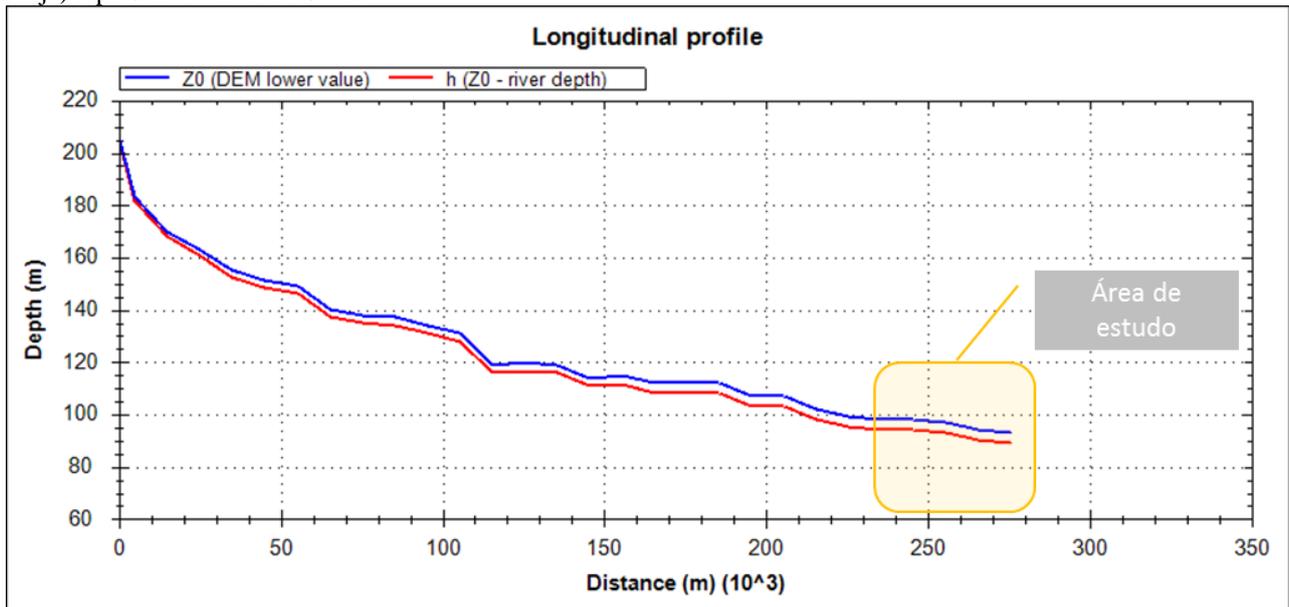
Figura 2 – Geologia da área de estudo com a identificação com estrelas em vermelho dos locais de sondagens dos testemunhos sedimentares sobre os depósitos aluvionares relacionados ao Rio Vermelho.



Fonte: modificado de CPRM, (2001).

Além dos depósitos aluvionares, as características físicas da bacia indicam que a área está sujeita a inundações periódicas. A Figura 3 apresenta o perfil longitudinal do rio Vermelho (considerando o modelo numérico do terreno e estimativa do nível de fundo do rio). A região em destaque (cor laranja) corresponde a área de estudo, situada cerca de 7 km da confluência com o rio Itacaiúnas. Como pode ser visto, essa região é mais plana, e recebe fluxo de áreas de cabeceira, com declividade acentuada. Além disso, como é uma área de confluência, a vazão possivelmente sofre efeito de remanso, estando sujeita a um “represamento”.

Figura 3 – Perfil longitudinal do rio Vermelho, da cabeceira até a confluência com o rio Itacaiúnas. A área em destaque (cor laranja) representa a área de estudo.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

2 OBJETIVO

- Caracterizar a morfologia do terreno da área de influência do rio Vermelho com a Estrada de Ferro Carajás (EFC).
- Analisar em nível de superfície e sub-superfície a dinâmica e evolução sedimentar dos ambientes fluviais relacionados ao rio Vermelho.
- Estimar as manchas de inundação na área de influência do rio Vermelho, próximo a EFC e sua relação com a precipitação.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Geomorfologia

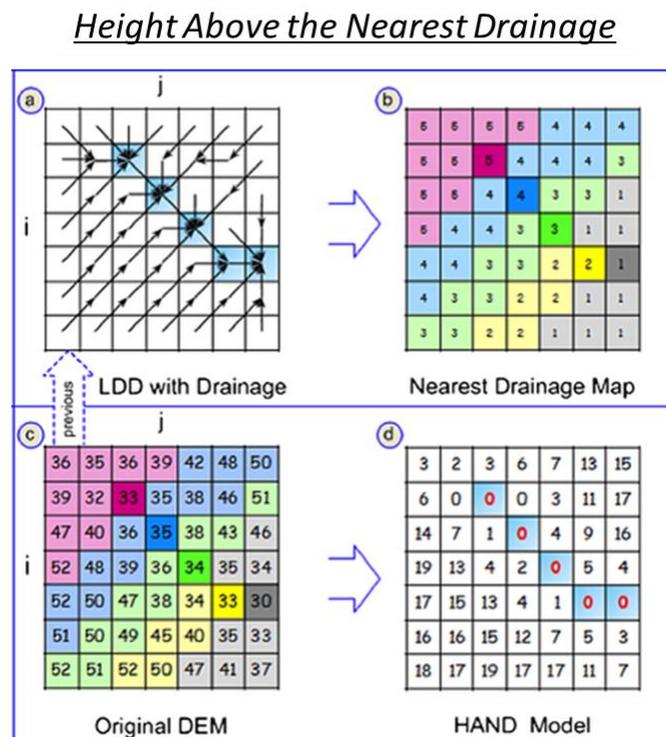
A análise morfológica da área de estudo foi realizada por meio da interpretação de imagens de alta resolução do *DigitalGlobe's imagery collections* do Google Earth, seguida por validação em campo. Afloramentos rochosos, terraços expostos ao longo das margens do rio Vermelho, bem como, trincheiras rasas auxiliaram no detalhamento superficial das feições morfológicas interpretadas. Foi utilizado o modelo digital de elevação do ALOS (*Advanced Land Observing Satellite Digital Elevation Model*) com resolução espacial de 30 metros.

3.2 Manchas de inundação

Essa etapa foi dividida em duas partes: definição das áreas potencialmente inundáveis; e mancha de inundação para eventos ocorridos e sua relação com a precipitação.

Para a definição das áreas com potencial de inundação foi utilizado o mapa de profundidades de água acima da calha do rio. Esse mapa, definido na literatura como *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) define qual a diferença de elevação entre cada pixel do terreno e a drenagem mais próxima. A Figura 4 apresenta o procedimento para obtenção do HAND e o produto final.

Figura 4 – Procedimentos utilizado para cálculo do HAND: a) Definição da drenagem a partir de um MDE; b) cálculo dos pixels de terreno que drenam para cada pixel de drenagem; c) utilização do MDE; e d) cálculo da diferença de elevação de cada pixel para a elevação do pixel de drenagem mais próximo.

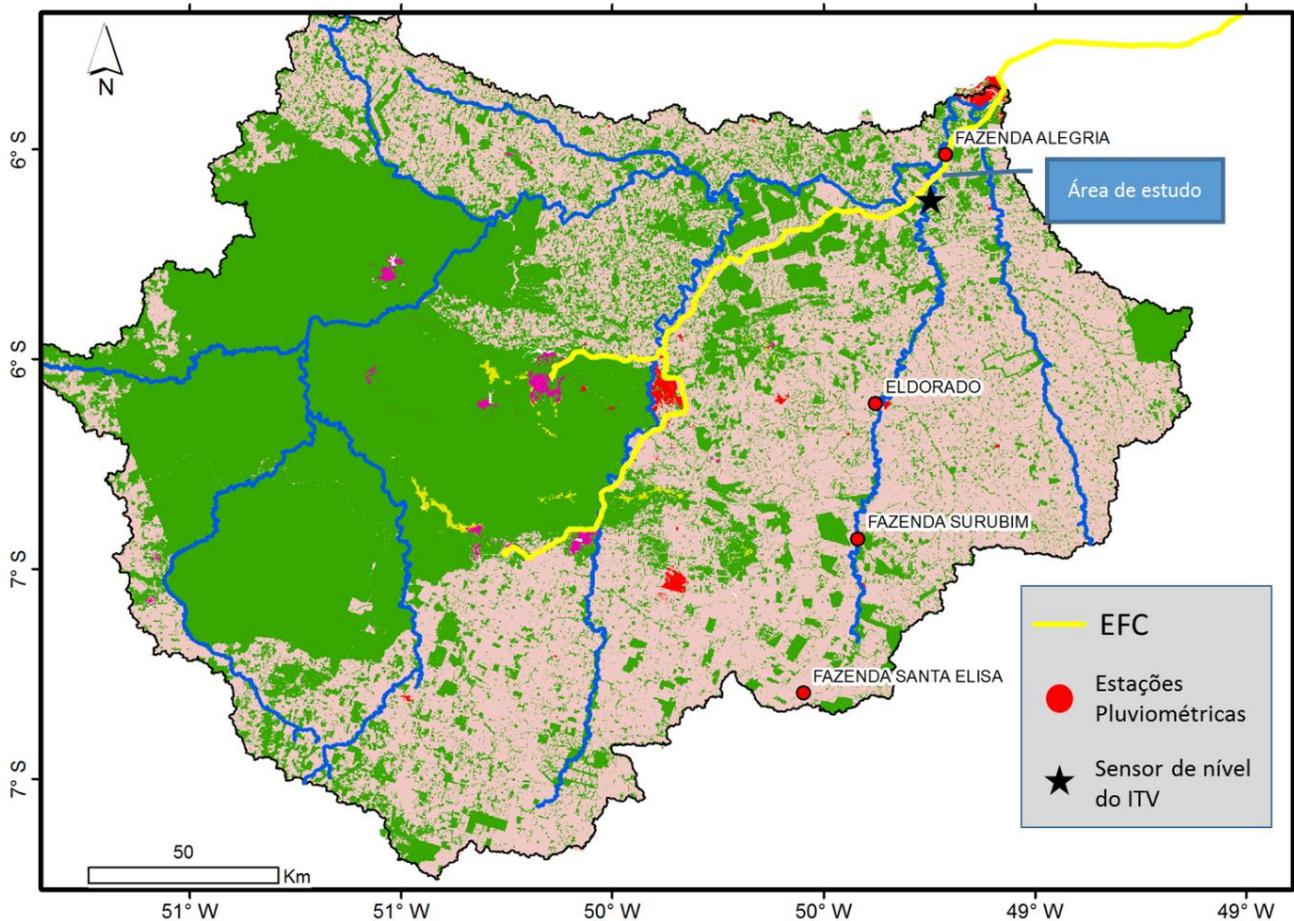


Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

A segunda etapa consiste em utilizar um evento de cheia ocorrido na região, utilizando o nível observado e os mapas de inundação do HAND para obter a mancha de inundação. Os eventos de cheia podem ser obtidos por meio de estações hidroclimatológicas *in-situ*, que disponibilizem dados de nível de água e precipitação. Em regiões com escassez de dados, podem também ser utilizados modelos hidrológicos para obtenção dessa informação.

Em um primeiro momento, foi utilizado o nível monitorado automaticamente pelo ITV, localizado a montante da área de estudo (aproximadamente 5km da área de estudo). Para estimar a precipitação relacionada com os níveis observados, foram utilizadas as estações pluviométricas Fazenda Santa Elisa e Fazenda Surubin (localizadas no alto rio Vermelho), Eldorado (localizada no médio rio Vermelho) e Fazenda Alegria (localizada a jusante da área de estudo) (Figura 5).

Figura 5 – Localização do sensor de nível do rio Vermelho, monitorado pelo ITV (estrela em cor preta), das estações pluviométricas utilizadas na análise (círculos vermelhos) e área de estudo.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

3.3 Coleta de testemunhos e faciologia

Foram realizadas 6 sondagens de sedimentos utilizando uma sonda percussiva Cobra Pro (Atlas Capco) (Figura 6 e 7). Os registros litológicos e sedimentares envolvem feições superficiais, terraços expostos, bem como sondagens. Seguindo a proposta de Walker (1992), a análise de fácies incluiu descrições de cor, tipologia de rochas e sedimentos, textura e estruturas. As fácies sedimentares foram codificadas de acordo com Miall (1978).

Figura 6 – Sonda Percussiva Cobra Pro.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

Figura 7 – Amostragem de testemunhos com a sonda e hastes de captura de sedimento.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

3.4 Análise geoquímica (datação e multielementar)

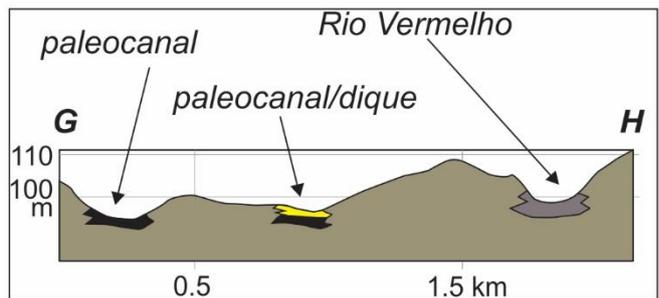
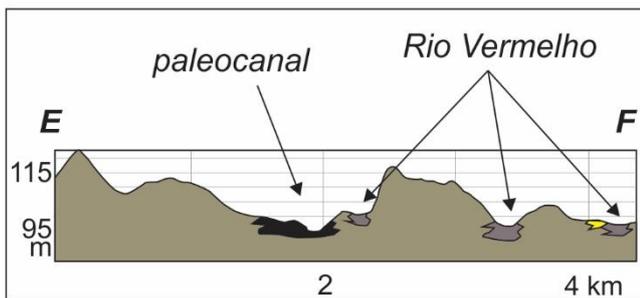
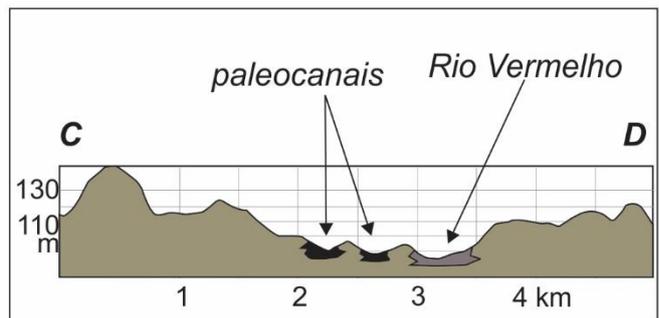
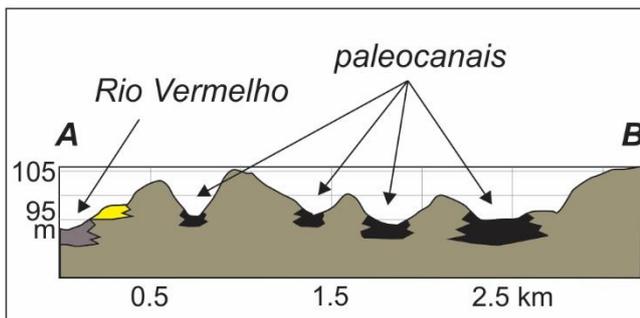
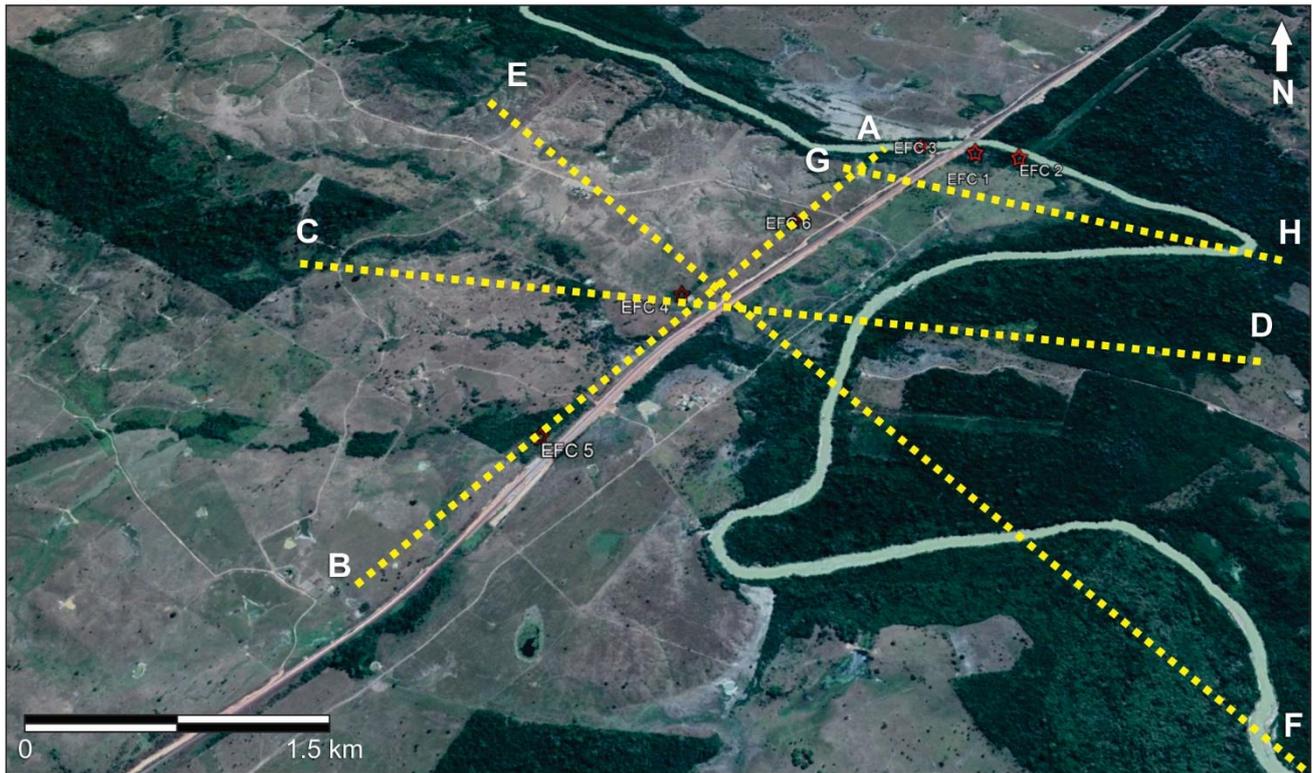
Os testemunhos foram descritos de acordo com análise de fácies (Walker, 1992). Sete amostras com aproximadamente 2 g foram utilizadas para datação por ^{14}C utilizando um Espectrômetro de Massa com Acelerador (AMS) no laboratório da *Beta Analytic*, Miami, EUA. Rochas da Formação Couto Magalhães e Itapecuru aflorantes na área de estudo, bem como amostras das fácies sedimentares dos testemunhos (sequências de 10 cm, com aproximadamente 500 g cada) foram secas e pulverizadas, bem como tiveram seus elementos maiores e menores analisados por Fluorescência de Raio-X (FRX). Os elementos traços foram analisados por meio do ICP-MS, após fusão com tetraborato e digestão com ácido nítrico diluído, exceto As, Se, Hg, Ni, Cu, Sc, Pb e Zn que passaram por digestão por água régia. O enxofre total (TS) e o carbono orgânico total (TOC) foram analisados em 0,2 g de amostras secas ao ar com o analisador de combustão LECO CS-300. Por fim o LOI (*loss on ignition*) foi obtido com a diferença de massa após a ignição a 1000 ° C.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Morfologia fluvial

A área de estudo possui amplitudes altimétricas que variam de 10 a 40 m, declividades médias de 1.5 a 3% e médias máximas de 6%, que constituem formas de relevo predominantemente compostas por colinas suaves e áreas planas (Figura 5), conforme (IPT, 1981). Colinas (declividades: 5-15%) e morrotes (declividades >15%) são muito localmente observadas. Estas formas de relevo mais íngremes estão situadas nas cotas altimétricas de 160 a 110 m, e são limitadas por áreas planas transitórias (cotas altimétricas entre 110 a 95 m) com os ambientes morfológicos modernos do rio Vermelho e seus tributários inativos. Estas unidades modernas possuem cotas altimétricas entre 80 a 95 m (Figura 8).

Figura 8 – Perfis altimétricos sobre a área de estudo com a identificação dos ambientes sedimentares relacionados ao rio Vermelho.



Depósitos de canais/planícies
 Dique marginal
 Embasamento

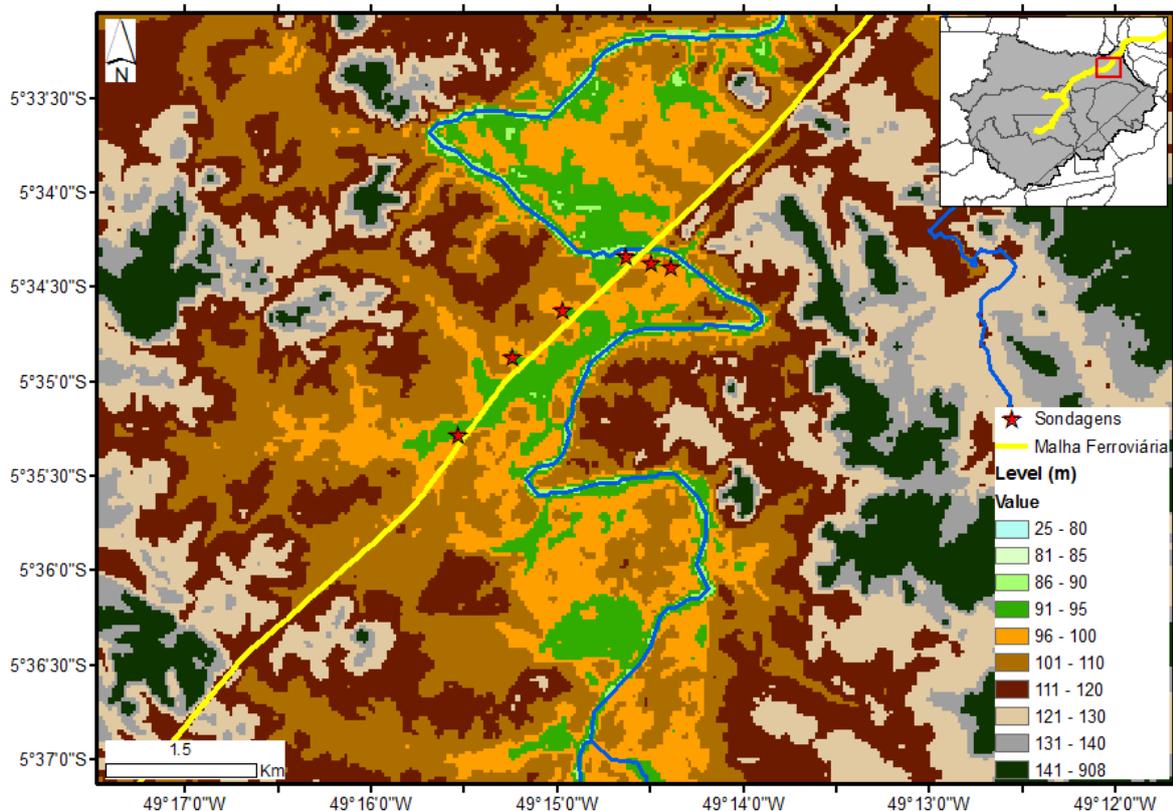
Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

Entre os ambientes morfológicos modernos destacam-se o canal fluvial do Rio Vermelho composto por cascalhos a areias grossas a médias, pobremente selecionadas. Este canal é extensamente confinado por rochas do Grupo Itapecuru e Formação Couto Magalhães. Barras arenosas de meio de canal são comumente encontradas, e caracterizam o canal fluvial como tipo *braided*. De uma forma

geral, a calha do rio Vermelho é bem definida, e em alguns pontos, como pode ser visto no perfil E-F e G-H, suas planícies de inundação não são de grande extensão. Entretanto, existem diques marginais que são frequentes sob estas planícies (Figura 8 e 10). Na área de estudo todos os tributários do rio foram completamente colmatados (Figura 9), formando campos gramíneos sazonalmente inundáveis. Somando-se a essa característica, existem paleocanais que se encontram a uma altitude semelhante ou até inferior ao rio Vermelho. Essas áreas, quando sujeitas a grandes eventos de chuva, onde o nível do rio supera o limite da calha principal, são zonas inundáveis sazonalmente. Esse comportamento é potencializado pela característica da bacia, que possui maiores declividades na porção alta da bacia e mais plana no baixo Vermelho (Figura 3), contribuindo para volumes de água propagados com grande energia a montante, e sendo amortizado na região mais plana, a jusante.

Reforça-se que o relevo, extraído do modelo digital de elevação, considera a vegetação. Desta forma, algumas áreas, consideradas elevadas, podem ainda ser inundadas, quando retirado o efeito da altura da vegetação. Essa limitação pode ser solucionada e melhor analisada futuramente com o uso de sensores de radar, que conseguem penetrar a vegetação e obter a elevação no solo.

Figura 9 – Modelo digital de elevação da área de estudo.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

Figura 10 – Dique marginal (vegetado) sobre a planície de inundação do Rio Vermelho.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

Figura 11 – Antigo tributário do rio Vermelho, atualmente colmatado e vegetado por gramíneas.

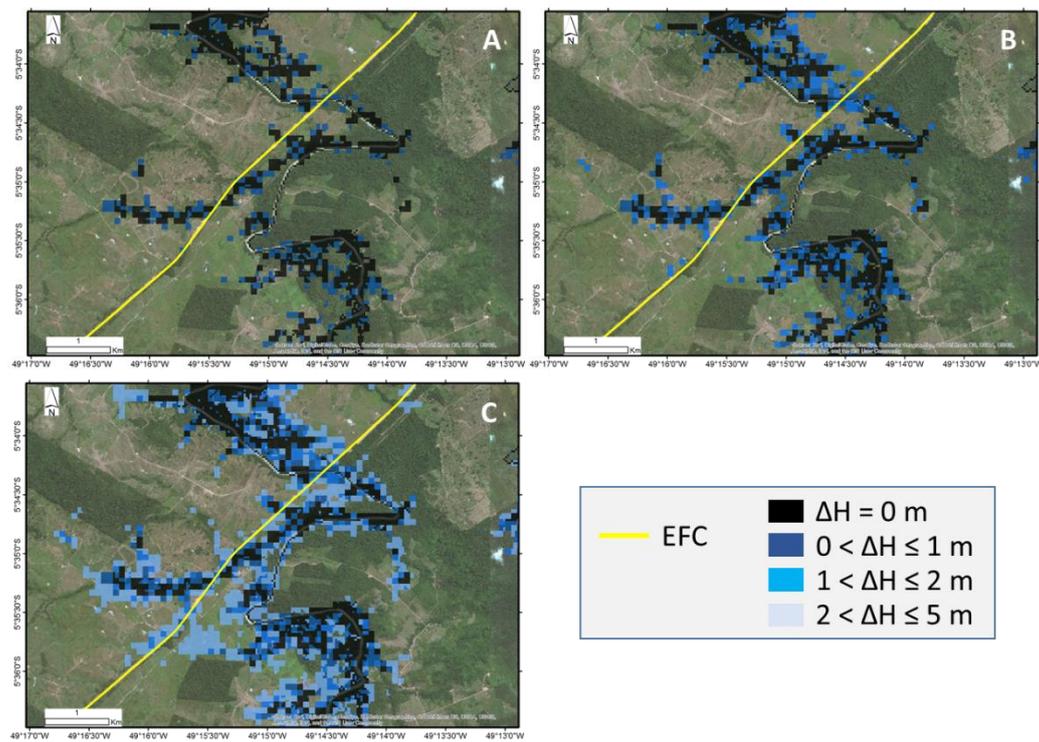


Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

4.2 Manchas de inundação

A Figura 12 apresenta o resultado do produto HAND para a área de estudo. Os mapas mostram quando o nível hipotético de água em cada pixel da imagem está acima do nível do rio Vermelho. Ou seja, caso o nível de água esteja na mesma cota do Rio Vermelho, devido as características planas do terreno, os pixels de cor preta podem estar inundados (Figura 12 – A). À medida que o nível de água sobe, áreas situadas em uma elevação maior que a do Rio Vermelho serão inundadas (Figura 12 – B e C). Nota-se que, apesar de os pelecocanais não funcionarem ativamente, em situações de cheia, eles transportam volumes de água e podem sofrer efeito de remanso do Rio Vermelho (isto é, represamento), potencializando a inundação na área da EFC. Apesar da resolução espacial limitar a análise dos resultados, percebe-se que a inundação ocorre a partir do rompimento e/ou transbordamento dos diques marginais do Rio Vermelho.

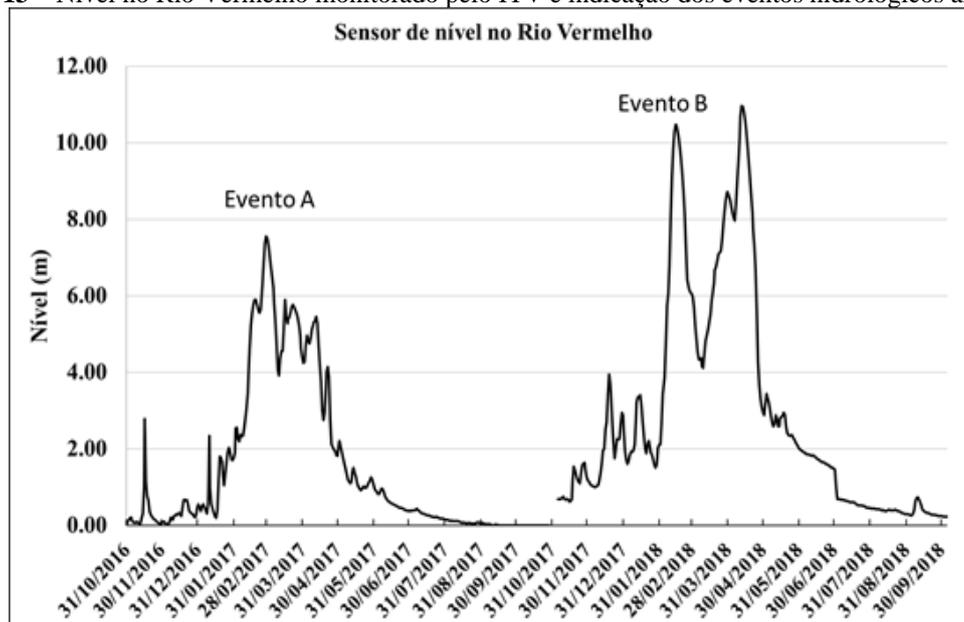
Figura 12 – Produto HAND para a região estudada. As figuras mostram a área potencialmente inundada caso o nível de água seja o mesmo da calha do rio Vermelho (A), até 1 m, (B) e até 5 m acima da calha do rio (C). A figura também indica a localização da EFC.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

Para se estimar a mancha de inundação de um evento ocorrido na bacia, utilizou-se o sensor de nível do Instituto Tecnológico Vale (ITV). Esse sensor registrou dados de nível de água entre 2016 e 2018. Durante esse período houveram dois eventos marcantes na bacia (Figura 13).

Figura 13 – Nível no Rio Vermelho monitorado pelo ITV e indicação dos eventos hidrológicos analisados.

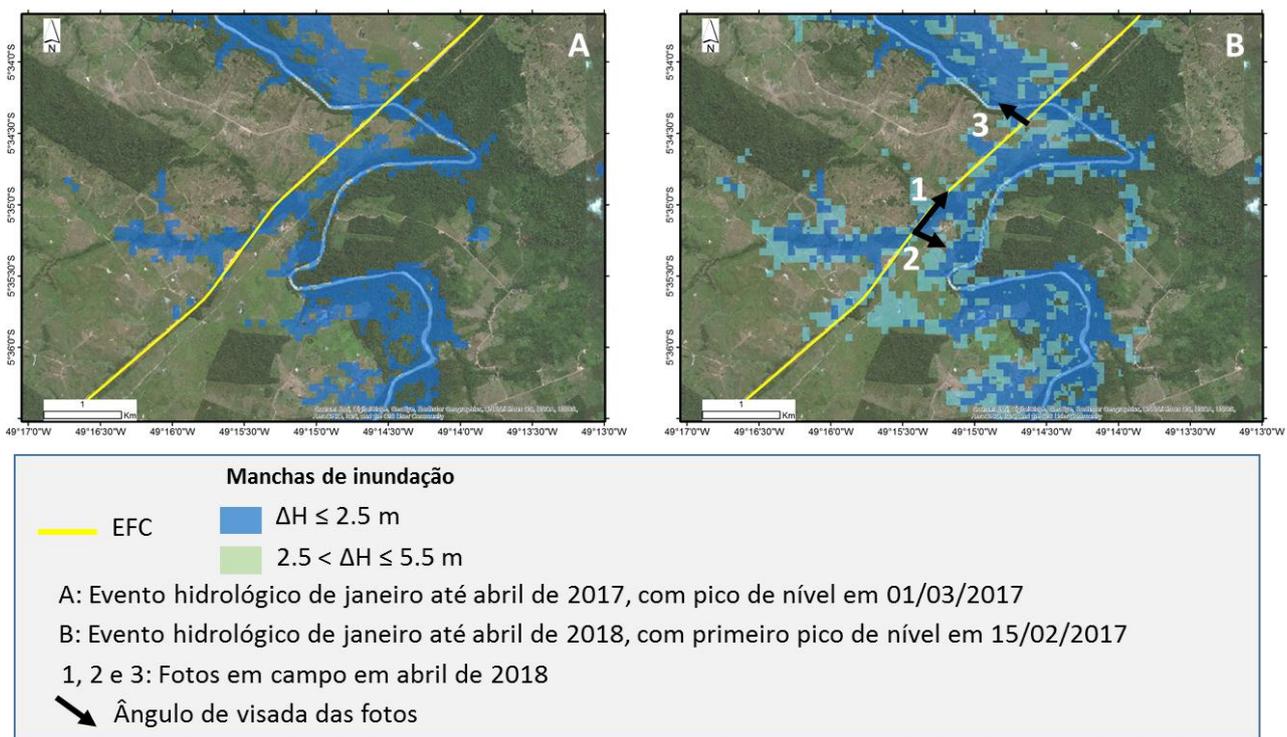


Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

O primeiro evento, ocorrido entre 16/01/2017 e 01/03/2017 (45 dias), registrou no sensor um nível de água de cerca de 7.5 m. O segundo, é composto por dois picos de nível de água, 10.5 m e 11 m. Nesse evento, o nível do rio Vermelho começa a subir no início de dezembro do ano anterior. Os acumulados de precipitação registrados entre dezembro de 2017 até janeiro de 2018 podem ter contribuído para a saturação do solo na bacia. Após esses eventos de precipitação, o volume de água registrado após fevereiro forma o primeiro pico de nível em apenas 16 dias. Assim, o segundo evento ocorre entre 01/12/2017 e 15/02/2018, totalizando 77 dias desde o início da subida do nível no Rio Vermelho até o primeiro pico de nível.

No ponto de medição monitorado pelo ITV, o Rio Vermelho possui uma profundidade de 5 m, aproximadamente. Isso significa que a diferença entre o nível do primeiro evento e o nível da calha do rio é de aproximadamente 2.5 m ($\Delta H = 7.5-5$). Analisando o segundo evento, essa diferença passa a ser de 5.5 m ($\Delta H = 10.5-5$), quando se considera o primeiro pico de nível de água. A Figura 14 apresenta a possível mancha de inundação para os dois eventos.

Figura 14 – Manchas de inundação obtidas a partir do HAND e dos níveis monitorados no Rio Vermelho para os dois eventos analisados.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

A Figura 15 apresenta o registro fotográfico de campo realizado em abril de 2018, após o segundo evento analisado. Na Figura 14 é indicado o ângulo de visada das fotos. Como pode ser visto, a foto 1 mostra uma área inundada, adjacente ao rio Vermelho e à EFC. Essa área provavelmente foi inundada devido tanto a elevação do nível do Rio Vermelho, como também do paleocanal afluente. A foto 2 mostra um dos bueiros ao longo do talude da EFC funcionando em condição hidráulica de

afogamento. A foto 3 apresenta uma medida estrutural (bueiro) construída pela Vale para mitigar o efeito da inundação.

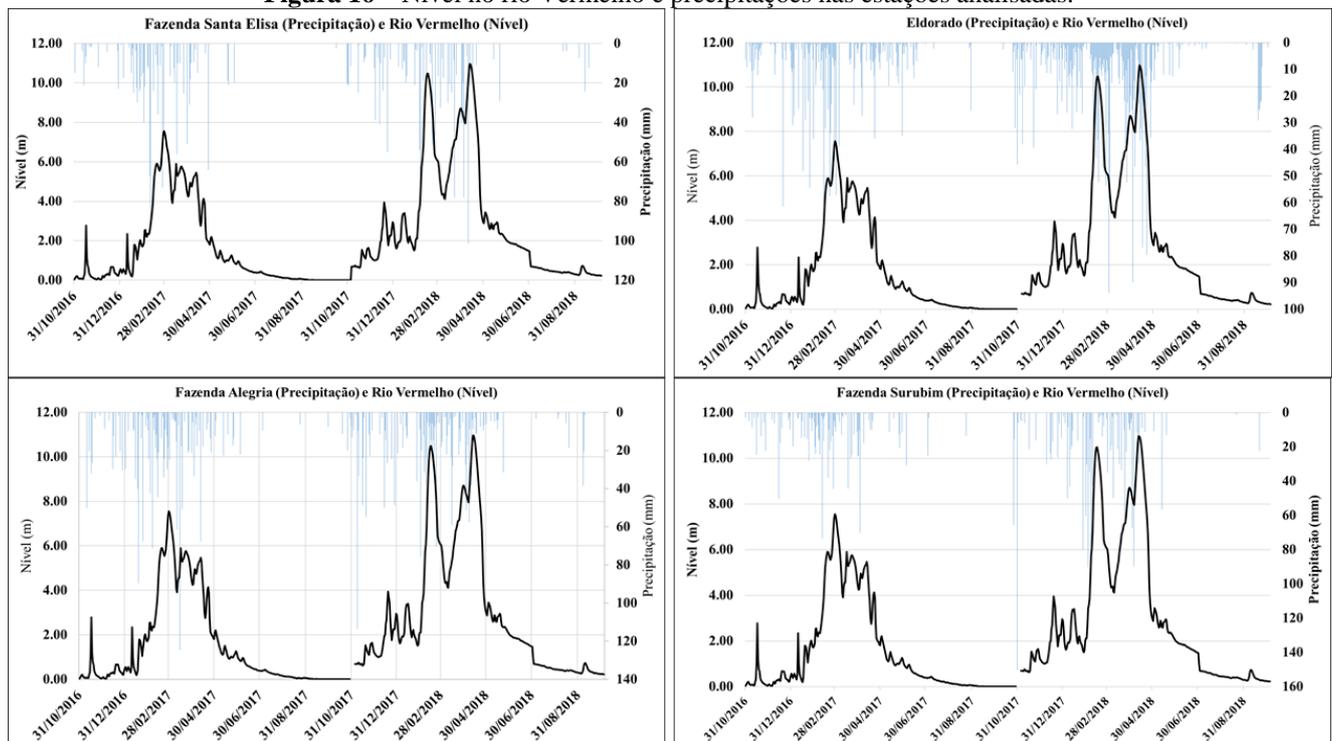
Figura 15 – Fotos obtidas pela equipe do ITV no período de chuvas de 2018 na área de estudo. As fotos mostram as áreas inundadas e as estruturas locais.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

A Figura 16 apresenta o nível monitorado no rio Vermelho pelo ITV, entre 2016 e 2018, e as precipitações em cada uma das estações analisadas: Fazenda Santa Eliza, Fazenda Surubim, Eldorado e Fazenda Alegria.

Figura 16 – Nível no rio Vermelho e precipitações nas estações analisadas.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

As precipitações acumuladas que causaram a subida dos níveis do Rio Vermelho nos dois eventos, assim como sua duração são apresentadas na Tabela 1, abaixo.

Tabela 1 – Precipitações acumuladas (Pacm) em cada estação pluviométrica e nos dois eventos analisados.

Estações	Pacm do Evento A (mm) em 45 dias	Pacm do Evento B (mm) em 77 dias
Faz. Santa Eliza	473.5	486.0
Faz. Surubim	467.8	781.0
Eldorado	664.8	623.0
Faz. Alegria	674.5	572.8

Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

Analisando o histórico de precipitações na Bacia do Rio Itacaiúnas, o acumulado médio precipitado entre dezembro e fevereiro é de aproximadamente 760 mm (Cavalcante et al., 2019). Assim, apesar dos acumulados de precipitações observadas nos eventos de 2017 e 2018 serem altos, ainda estão abaixo da média histórica, fazendo com que esses eventos tenham probabilidade relativamente alta de ocorrerem anualmente no período chuvoso.

Analisando o primeiro evento, a precipitação média nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro foram de aproximadamente 100 mm, 250 mm e 410 mm, respectivamente. Esses valores, em uma análise ainda preliminar, podem representar limiares para alerta de inundação (2.5 metros acima da calha do Rio Vermelho) na área de entorno da EFC. Portanto, devido a essa recorrência nos períodos de chuva, é de suma importância o desenvolvimento e instalação de um sistema de alerta de cheias em pontos estratégicos para a Vale.

4.3 Datação por ¹⁴C

Os dados radiométricos calibrados dos testemunhos indicam idades de deposição máxima de 11215-11410 anos cal. AP, cobrindo assim todo o Holoceno (a cerca de 11,65 mil anos antes do presente - AP). Além disso, a proporção entre idade e profundidade é direta, que indicando que não houve inversão das idades.

Tabela 2 – Datações por ^{14}C das amostras dos testemunhos de sedimento da EFC. pMC: carbono moderno

Profundidade (cm)	Código Lab.	Idade convencional ^{14}C	Idade calibrada (anos cal AP)
EFC 1 50 cm	BETA 540165	3250 ± 30	3440-3560
EFC 1 120 cm	BETA 540166	4110 ± 30	4520-4710
EFC 1 270 cm	BETA 540171	9910 ± 50	11215-11410
EFC 3 140 cm	BETA 540167	1030 ± 30	910-990
EFC 4 14 cm	BETA 540169	111.02 ± 0.41 pMC	-
EFC 4 110 cm	BETA 540168	1060 ± 30	930-1005
EFC 80 cm	BETA 540172	1100 ± 30	950-1060
EFC 6 160 cm	BETA 540170	3670 ± 40	3890-4095

4.3 Fácies sedimentares

O embasamento dos depósitos holocenos desta área de estudo está relacionado a xistos de granulação fina intemperizados da Formação Couto Magalhães. Este tipo de rocha também foi observado em afloramentos na margem do Rio Vermelho, próximo aos pilares da ponte da EFC (Figura 17). Parte deste embasamento foi amostrado nos testemunhos EFC 1 e EFC4-5 (Figura 18).

Figura 17 – Xistos de granulação fina da Formação Couto Magalhães expostos nas margens do rio Vermelho.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

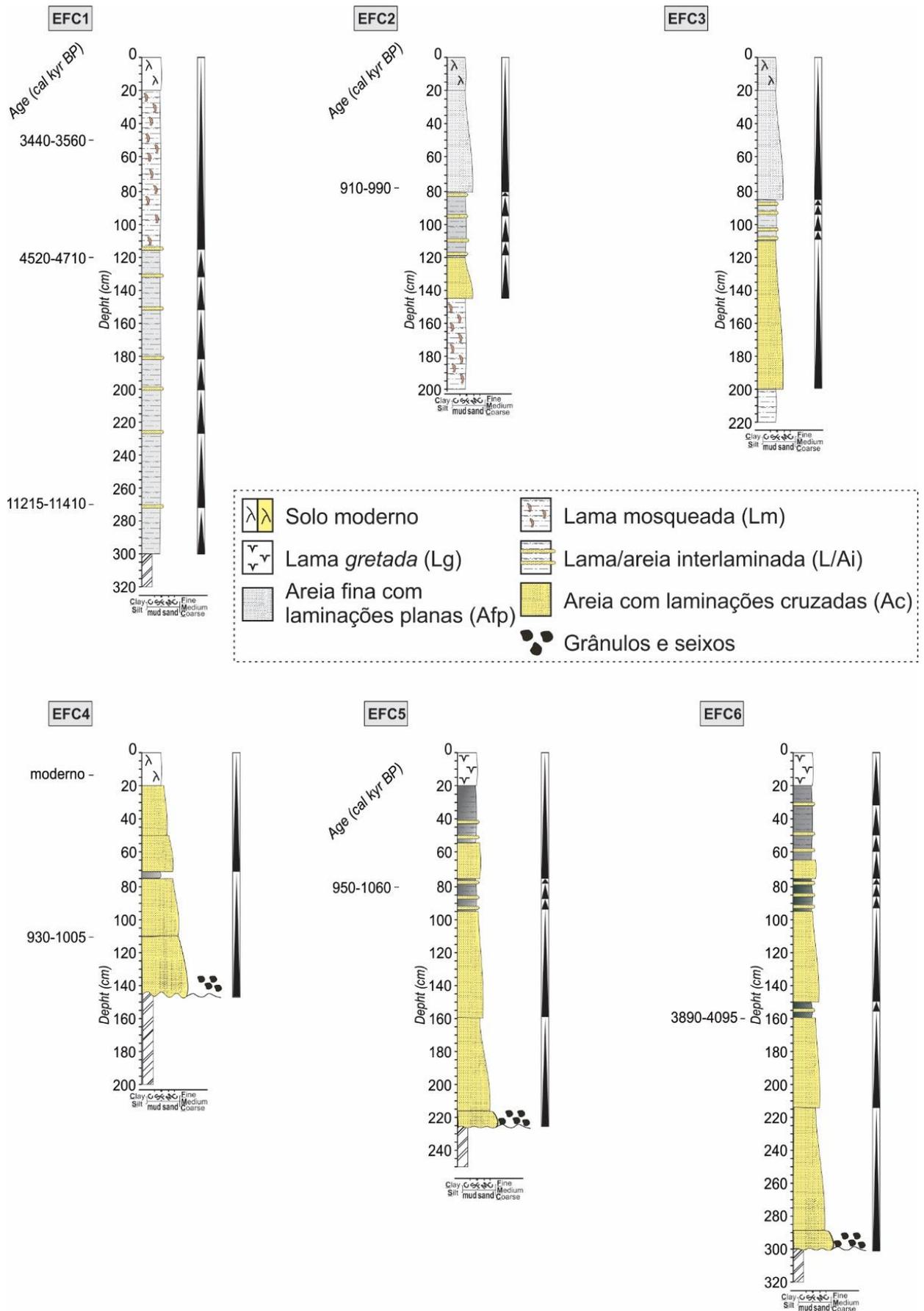
Figura 18 – Testemunho (EFC 4) extraído integralmente com registro de parte do embasamento (intemperizado) dos depósitos do Quaternário identificados na área.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

Os sedimentos holocenos são compostos de lama muito compacta, por vezes, com gretas de contração (Fácies Lg), feições de mosqueamento (Fácies Lm) ou intercalaminações de areia fina (Fácies L/Ai), bem como areia com laminações planas (Afp) ou cruzadas (Ac) com grânulos e seixos (Figura 19; Tabela 3). Estas fácies representam em geral uma planície com dique, bem como o preenchimento sedimentar natural e abandono de tributários do Rio Vermelho (Figura 20).

Figura 19 – Registro sedimentar gráfico dos testemunhos de sedimentos deste trabalho.



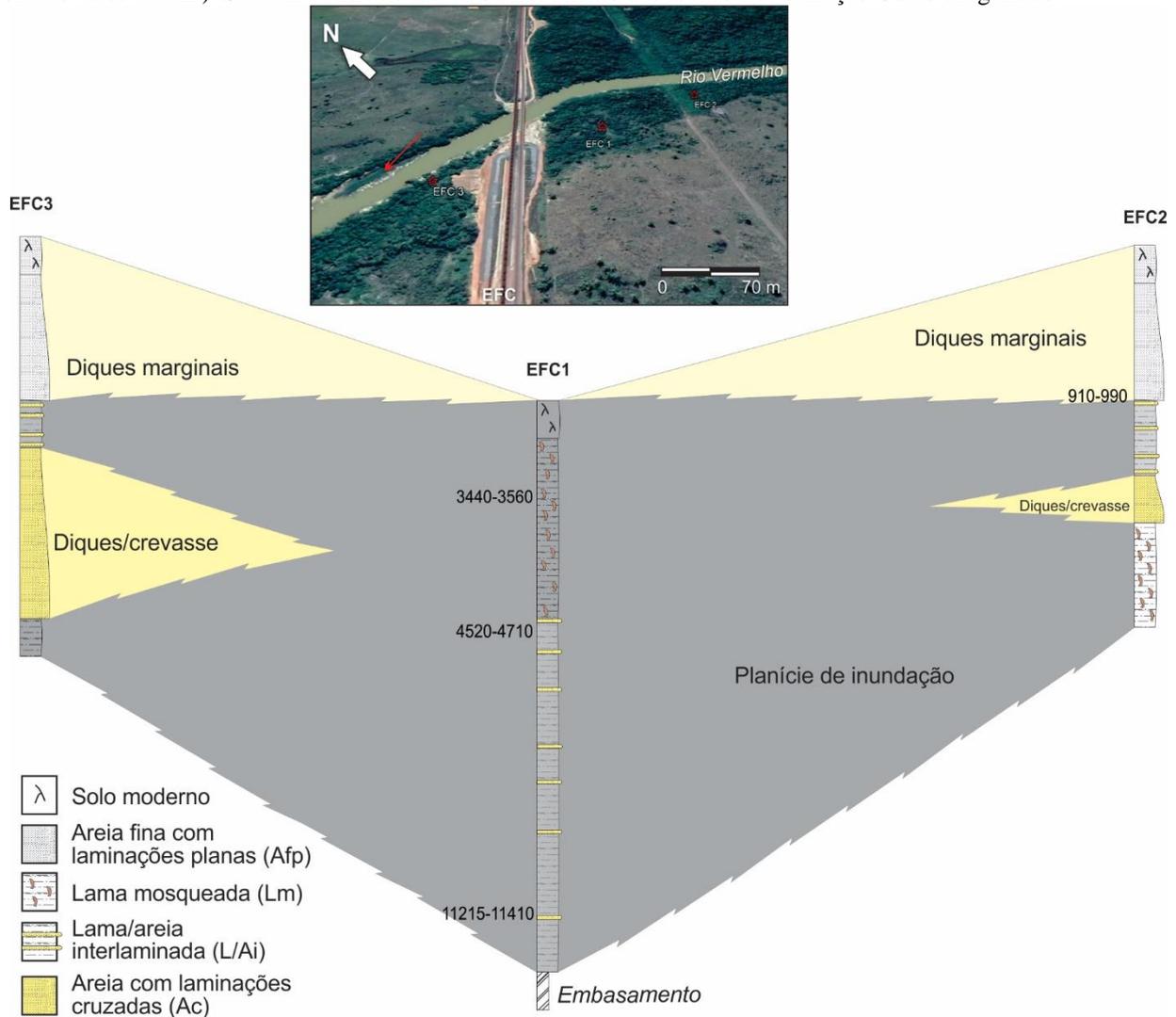
Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

Tabela 3 – Fácies sedimentares identificadas nos testemunhos de sedimento da EFC.

Fácies	Descrição	Processo
Fácies Ac	Areia fina a muito grossa com laminações cruzadas, por vez maciça, moderadamente ou muito pobremente selecionada. Localmente podem ser observados clastos de argila, bem como seixos arredondados e grânulos angulosos.	Areias são depositadas por tração produzindo estruturas truncadas formadas pela migração de dunas ou marcas onduladas subaquáticas. Clastos de argila são formadas pelo retrabalhamento de depósitos lamosos de planícies de inundação. Grânulos e seixos representam depósitos residuais de canais fluviais (<i>lags</i>) depositados sob alta energia de fluxo.
Fácies L/Ai	Lama compacta a muito compacta cinza claro a médio com laminações de areia fina.	Lama depositada sob suspensão em ambiente de baixa energia com influxos episódicos de areia por tração.
Fácies Lm	Lama altamente compacta, com várias manchas de óxido de ferro verticalizadas.	A lama foi depositada por suspensão em ambiente de baixa energia. Este ambiente possivelmente era vegetado, mas a ocorrência de períodos prolongados de seca e exposição subaérea, oxidaram o depósito e as manchas podem ser vestígios antigos de fitoturbação.
Fácies Afp	Areia fina a muito fina muito bem selecionada com laminações plano-paralelas.	Areia depositada durante o transbordamento de canal fluvial e posterior retrabalhamento local eólico.
Fácies Lg	Lama cinza médio com gretas de contração e sinérese.	A lama foi depositada por suspensão em ambiente de baixa energia, que é submetido a exposição subaérea sazonal. Sinérese evolui para contração em decorrência da umidade intersticial.

Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

Figura 20 – Correlação de fácies dos testemunhos adjacentes ao rio Vermelho integrada com as datações por ^{14}C (idades calibradas: anos cal AP). Seta em vermelho indica o afloramento das rochas da Formação Couto Magalhães.



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

4.4 Preenchimento sedimentar

A formação da planície de inundação do Rio Vermelho na área de estudo iniciou em torno de 11215-11410 anos cal AP com a deposição de lamas por suspensão e esporadicamente areia com o transbordamento do canal fluvial durante períodos de cheias sob os xistos metamorfozados da Formação Couto Magalhães (Figura 20). Estes transbordamentos também resultaram no acúmulo de areias do canal principal para as bordas do rio formando diques marginais descontínuos. O aumento de energia das águas fluviais durante as cheias também resultou em rompimento parcial destes diques e deposição de areais formando leques sob planície de inundação (*crevasse splay*).

A ocorrência frequente de períodos secos prolongados produziu um forte ressecamento, oxidação e compactação dos depósitos de planície, e também resultou no aumento da resistência a erosão física das águas fluviais. Por outro lado, este processo também eliminou os espaços intersticiais

dos sedimentos, formando um espesso pacote impermeável a inundações sazonais. A partir de 910-990 anos cal AP ocorreu a formação dos diques marginais modernos sob a planície ressecada (Figura 20).

4.5 Proveniência dos sedimentos

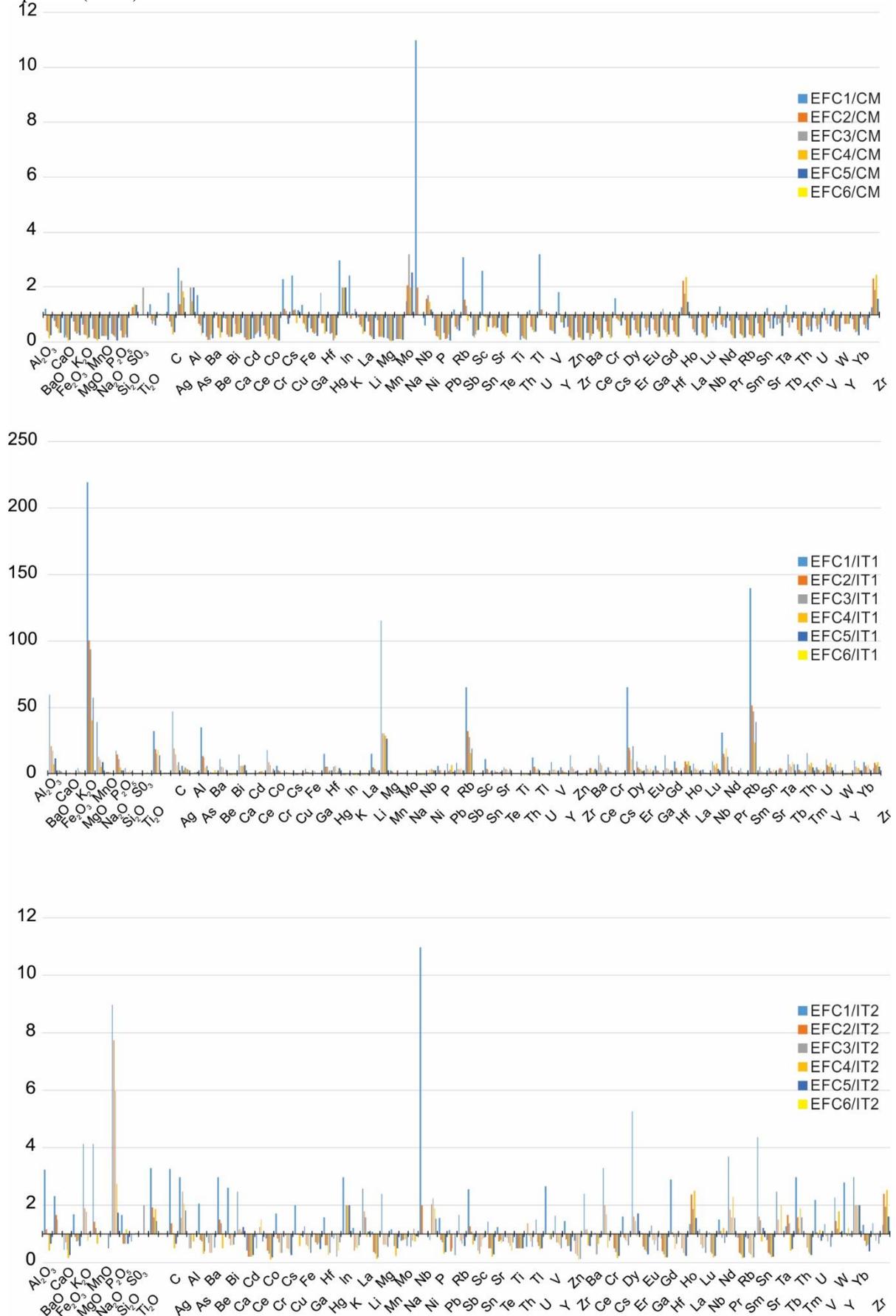
Os sedimentos holocenos da área de estudo são constituídos basicamente por SiO_2 com concentrações medianas em torno de 65-95%. Al_2O_3 (2-17%) e Fe_2O_3 (2-5%) ocorrem secundariamente. Estes dois últimos são mais abundantes no testemunho EFC1. Entre os elementos traços destacam-se o Zr (330-640‰), Ba (85-530‰), Rb (20-130‰), Cr (50-130 ‰) e Mn (65-95‰). COT apresentou concentrações muito baixas (< 0,3 %).

A normalização dos dados geoquímicos dos sedimentos com as rochas da Formação Couto Magalhães neste trabalho indica que maioria dos elementos dos sedimentos holocenos está empobrecida, exceto Na, Hg, Rb e Tl, que possuem conteúdos relativamente superiores no perfil EFC1. Hf e Zr estão enriquecidos em todos os testemunhos (Figura 21).

As rochas do grupo Itapecuru na área de estudo são predominantemente ricas em SiO_2 (> 80%). Neste sentido, a normalização entre os sedimentos dos testemunhos e estas rochas revelam um enriquecimento em vários elementos dos sedimentos, em especial Al_2O_3 , K_2O , MgO , TiO_2 , Na, Ba, Rb e Cs (Figura 22).

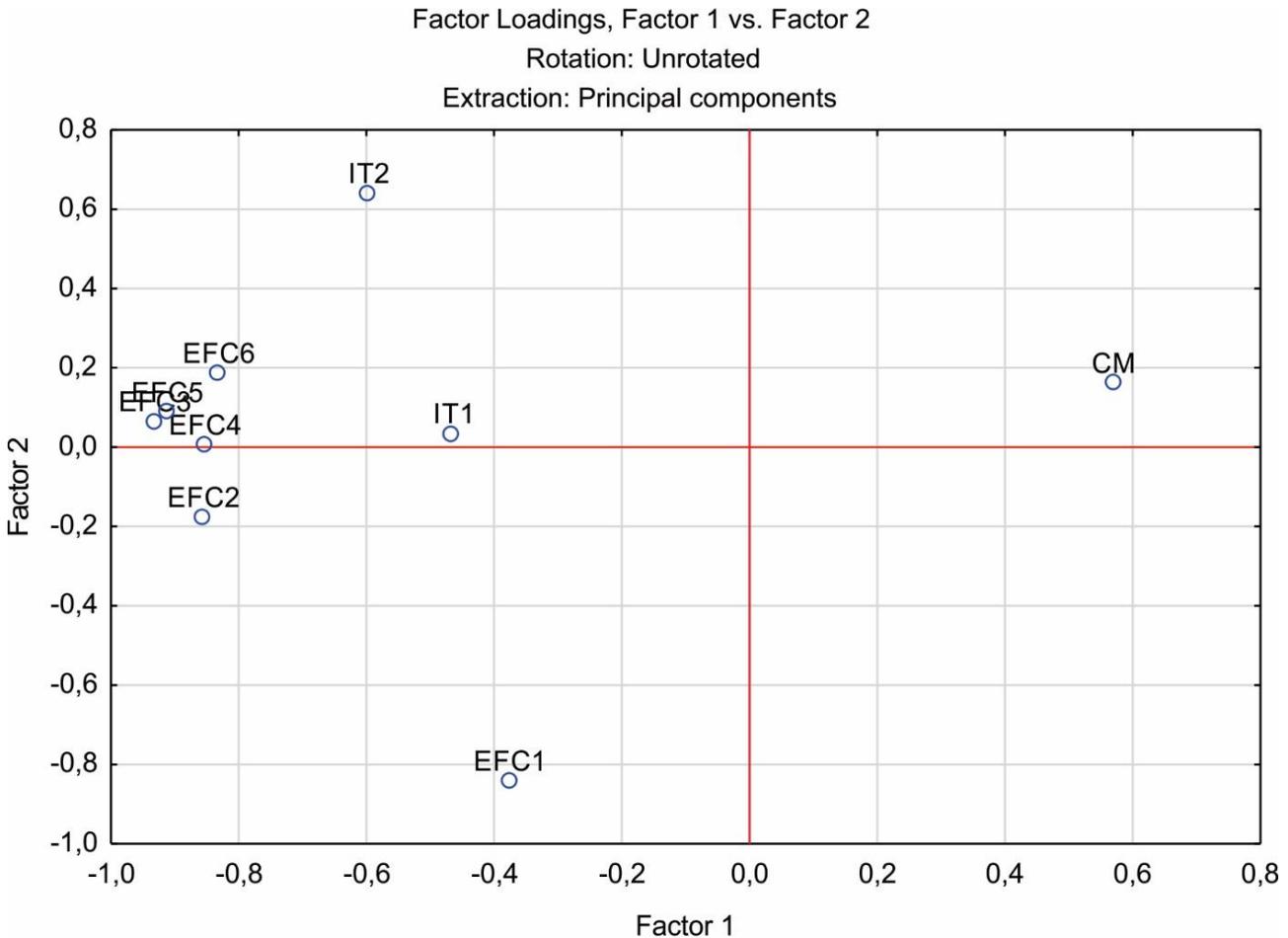
A análise estatística fatorial dos dados geoquímicos relevou que os sedimentos holocenos dos testemunhos possuem maior similaridade com as rochas do Grupo Itapecuru, com base na variância total de 52,8 % no Fator 1, enquanto que uma baixa similaridade foi observada para as rochas da Formação Couto Magalhães (Figura 23). Isto sugere que estes sedimentos foram primariamente originados do intemperismo das rochas do Grupo Itapecuru. Entretanto, análises estatísticas mais robustas deverão ser realizadas para melhor correlacionar estes dados, uma vez que a variância cumulativa para os fatores foi pequena (aprox. 67,6 %).

Figura 21 – Normalização dos dados geoquímicos dos testemunhos sedimentares extraídos das formações Couto Magalhães (CM) e Itapecuru (IT1-2).



Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

Figura 22 – Análise fatorial dos dados geoquímicos das rochas das formações Couto Magalhães (CM) e Itapecuru (IT1-2), bem como dos sedimentos dos testemunhos do Holoceno.



	Eigenvalue	% total variance	cumulative eigenvalue	cumulative %
FATOR 1	4,224613	52,80766	4,224613	52,80766
FATOR 2	1,189651	14,87064	5,414264	67,67830

Fonte: elaborado pelo autor, (2019).

4.6 Relação da arquitetura deposicional e hidrodinâmica moderna do Rio Vermelho

O Rio Vermelho na área de estudo segue um fluxo fortemente confinando em seu canal principal devido a um controle litológico e estrutural. Em alguns pontos é possível observar anomalias no terreno produzidas por processos morfológicos naturais e neotectônicos, que geraram através da erosão do embasamento rochoso, áreas planas contíguas ao canal fluvial. Nestes locais foram formadas planícies de inundação, que serviram como amortecimento da hidráulica fluvial durante os períodos de cheia do rio. Entretanto, devido a recorrente e prolongados períodos de estiagem, os depósitos destas planícies foram completamente ressecados e compactados, bem como seus componentes minerais sofreram forte cimentação e recristalização. Neste sentido, estes depósitos tornaram-se resistentes a erosão física. Assim, somente acreção vertical da planície tem ocorrido ao longo do tempo. Isto vem diminuindo o amortecimento hidráulico do Rio Vermelho.

Este fato deve-se também à rápida estabilização dos diques marginais. Como não há geração de espaço de acomodação por erosão, diques marginais formados a cada ciclo de cheia também sofrem acreção vertical e posterior estabilização por vegetação arbórea e arbustiva. Esta característica pode aumentar a intensidade do fluxo de energia da água sobre as áreas baixas contíguas ao canal principal do Rio Vermelho, caso haja rompimento dos diques marginais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em maio de 2009 a inundação do Rio Vermelho provocou a paralização total da Estrada de Ferro Carajás (EFC) no seu quilometro 765, entre a cidade de Marabá e a vila de Itainópolis. Esta inundação formou um lago de quase 1 km de extensão cobrindo os trilhos da EFC em mais de meio metro de altura. Em resposta a este evento a Vale realizou o alteamento da EFC, bem como instalou novas tubulações para escoamento da água por baixo da EFC. A estrutura da EFC nesta área funciona com um dique artificial que represa parte da área inundável do Rio Vermelho. Estas estruturas devem ser periodicamente monitoradas, pois o aumento do fluxo de energia e volume das águas do rio conforme indica neste trabalho podem comprometer estas estruturas.

6 RECOMENDAÇÕES

Há a necessidade de realização de um imageamento com radares de alta resolução como o Lidar, para a delimitação com precisão das áreas potencialmente inundáveis, bem como a aquisição e instalação de novos sensores hidrológicos na área de estudo.

7 BENEFÍCIOS POTENCIAIS

Sugestão: Indicar benefícios destes resultados parciais, especialmente para a Vale, mas também para aquilo que o ITV pode realizar e prover como desenvolvimento de pesquisa.

REFERÊNCIAS

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapeamento Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo. Escala 1:500.000, v. 2, 1981. 130p

LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C.; SINHA, R. Tropical rivers. **Geomorphology**, v. 70, n. 3-4, p. 187-206, 2005.

VALE. **Estrada de Ferro Carajás: o caminho onde passa a nossa riqueza**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/carajas-railway/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 11 nov 2019.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Folha Marabá (SB-22-X-D)**. 2001. Escala 1:250.000

CAVALCANTE, R. B. L.; PONTES, P. R. M.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; SOUZA, E. B. de. Opposite Effects of Climate and Land Use Changes on the Annual Water Balance in the Amazon Arc of Deforestation. **Water Resources Research**, v. 5, n. 4, p. 3092-3106, 2019.

MIALL, A. D. (Ed.). **Fluvial sedimentology**. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1978.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1-2, p. 13-29, 2011.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; MOMO, M. R.; SEVERO, D. L.; PINHEIRO, A.; NOBRE, A. A. Hand contour: a new proxy predictor of inundation extent. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 2, p. 320-333, 2015.

WALKER, R. G. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: WALKER, R. G.; JAMES, N. P. (Eds.). **Facies models-response to sea level change**. Ontario: Geological Association of Canada, 1992. p. 1–14.