

EXPLORAÇÃO DA EROÇÃO FLUVIAL POR MEIO DO GEORADAR

Data de aceite: 01/03/2023

Data de submissão: xx/xx/2022

Gustavo Nogueira Dias

Lucia Maria Costa e Silva

Vanessa Mayara Souza Pamplona

de obras de contenção de erosão fluvial, bem como possivelmente outras.

PALAVRAS-CHAVE – Erosão, contenção, GPR.

RESUMO: O radar de penetração do solo (GPR) foi utilizado ao longo de 600 m da margem do rio Guamá, entre a ponte do rio Tucunduba e o Porto de Canoagem, dentro do campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém/PA (Brasil), durante a maré baixa e a maré alta, na tentativa de mapear os caminhos preferenciais em subsuperfície para a entrada de água trazida pela maré alta e, por esse meio, inspecionar a eficácia de obras de contenção de erosão. Como também poderá utilizar para buscar água. Em maré baixa, a erosão está ligada à perturbação da continuidade das camadas e a contenção pode causar forte absorção das ondas eletromagnéticas. Em relação às medidas obtidas na maré baixa, as medidas em maré alta mostram a acentuação de reflexões obtidas com o GPR onde a erosão é fortemente atuante e onde a obra de contenção não está sendo efetiva. O GPR pode ser usado para inspecionar a eficácia

1 | INTRODUÇÃO

Inaugurado em 13 de agosto de 1968, o campus pioneiro da Universidade Federal do Pará (UFPA) inseriu-se dentro da filosofia adotada nas universidades brasileiras, na década de 1960, de definição de um território universitário capaz de centralizar as atividades de administração, pesquisa, ensino e extensão. No caso da UFPA, essas atividades eram, até então, realizadas em unidades isoladas, instaladas em prédios localizados em diferentes pontos de Belém (PINTO, 2007).

Tendo como um dos limites o rio Guamá, esse campus homônimo goza de uma orla de 3 km de extensão que lhe empresta uma especial beleza. Nos últimos vinte anos, contudo, a orla do Campus vem suportando um processo de erosão

fluvial marcante. As tentativas de contenção do problema, como a colocação de sacos de cimento nas regiões de erosão mais acentuada, têm se mostrado frustrantes, porque apenas atenuaram o problema em parte, sendo, conseqüentemente, esperadas obras de grande porte.

A área é, conseqüentemente, um laboratório para se testar a eficiência da Geofísica em detectar as zonas em que a ação da erosão, embora ainda não observável em superfície, atue, de modo a auxiliar obras de contenção da orla antes do seu desmoronamento.

O método Radar de Penetração do Solo (GPR do inglês *Ground Penetrating Radar*) emprega a radiação de ondas eletromagnéticas a partir de uma antena transmissora colocada próxima à superfície do terreno, as quais se propagam nos materiais da subsuperfície sofrendo reflexão, refração e difração.

As ondas refletidas retornam à superfície, sendo detectadas na mesma antena transmissora ou em antena receptora colocada próximo da antena transmissora. O radar vem sendo aplicado para fins diversos, como: meio ambiente, geologia, geotecnia, arqueologia, planejamento urbano, etc. (NUNES, 2005). O radar pode ajudar na detecção de tubos hidráulicos e tubos elétricos subterrâneos presentes na orla, bem como de zonas desagregadas e propensas à erosão. Xavier (2006) apresenta resultados GPR obtidos no campo de petróleo de Fazenda Belém, Bacia Potiguar (CE), com o objetivo de entender os mecanismos de geração de colapsos do terreno associados à existência de um substrato carbonático intensamente fraturado. Augustin & Aranha (2001) estudaram na cidade de Gouvêa (MG) a detecção de dutos naturais subterrâneos (pipes) presentes no processo de erosão com o GPR, com ou sem a ocorrência de colapso do teto.

Estudos mais recentes, Brito et. al (2021) utilizaram o método GPR para estudar a problemática da intrusão salina em áreas costeiras no litoral do Estado do Pará e Oliveira et al. (2021), utilizaram o método para imageamento do subsolo em áreas sem cobertura de solo em uma jazida de calcário

2 | ÁREA SOB ESTUDO

A área sob estudo está localizada no interior do Campus do Guamá da UFPA, que ocupa 450 ha entre a Av. Augusto Correa e a Av. Perimetral no bairro do Guamá da cidade de Belém (PA), à beira do Rio Guamá, entre a ponte do rio Tucunduba e a Sede da Canoagem, distando cerca de 3 km do centro de Belém (Figura 2.1).

Os pontos de localização foram obtidos com o GPS Geodésico, modelo EGM96, e com o GPS de navegação, modelo GARMIN MAP 76CSX, apresentando para marco inicial longitude 48°27'13,04"W (783349 WE - UTM) e latitude 1°28'34,9"S (9836654 SN - UTM),

próximo à ponte do Tucunduba, e para marco final longitude 48° 26'55,57"W (783890 WE - UTM) e latitude 1° 28'25,90"S (9836930 SN - UTM), próximo à Sede do Porto de Canoagem, no dia 1° de dezembro de 2011.

2.1 Relevo

No município de Belém, a topografia apresenta-se pouco variável e baixa, atingindo a altitude máxima de 25 m na ilha de Mosqueiro (SEPOF, 2008). O relevo das imediações da Universidade Federal do Pará apresenta um desnível topográfico muito inferior, com 9 m a montante caindo para 3 m a jusante, segundo dados de curvas de nível fornecidos pela Prefeitura do Campus da UFPA (RIBEIRO, 1992).

2.2 Clima

Na cidade de Belém, o clima é quente úmido. A precipitação média anual fica em torno de 230 mm/ano, com maior frequência de chuvas no período de janeiro a junho e menor na estação seca de julho a dezembro. A temperatura média é de 26° C, com máxima de 34° C e mínima de 18° C. A umidade relativa do ar é de 85% (INMET, 2010).

A Figura 2.3 mostra a pluviosidade média nos meses de janeiro a setembro de 2010, período dos trabalhos de campo desta dissertação.

2.3 Hidrografia

A rede hidrográfica do município de Belém é formada por furos, baías, rios e igarapés, que drenam inclusive o centro urbano de Belém. Os elementos hídricos de maior significado para o município são as baías do Guajará, Marajó, Sol e Santo Antônio, e os rios Guamá, Maguari, Murubira, Pratiqara e Aurá, além de inúmeros igarapés que deságuam nas drenagens principais formando uma drenagem bem distribuída do tipo dendrítica (MERCÊS, 1997).

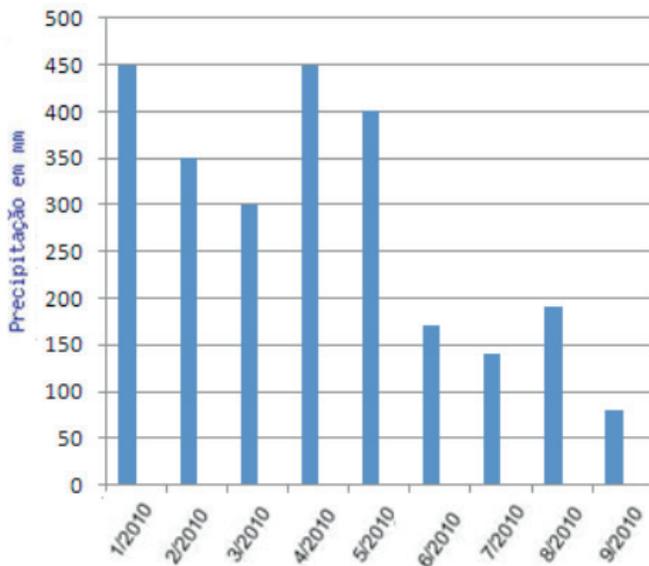


Figura 2.3 Representação do índice pluviométrico em Belém durante os trabalhos de campo em 2010 (INMET, 2010).

A Baía de Guajará, parte do estuário do rio Pará, foz do rio Amazonas, tem forma alongada e estreita, apresentando continuidade na baía de Marajó a Norte. Situa-se a Oeste da cidade de Belém e recebe as águas dos rios Pará, Acará e Guamá. Suas águas são barrentas e, no período de baixa pluviosidade na região, ficam salobras devido à influência das águas oceânicas (PINHEIRO, 1987).

A Figura 1 fornece informações sobre a baía do Guajará e a localização da UFPA.

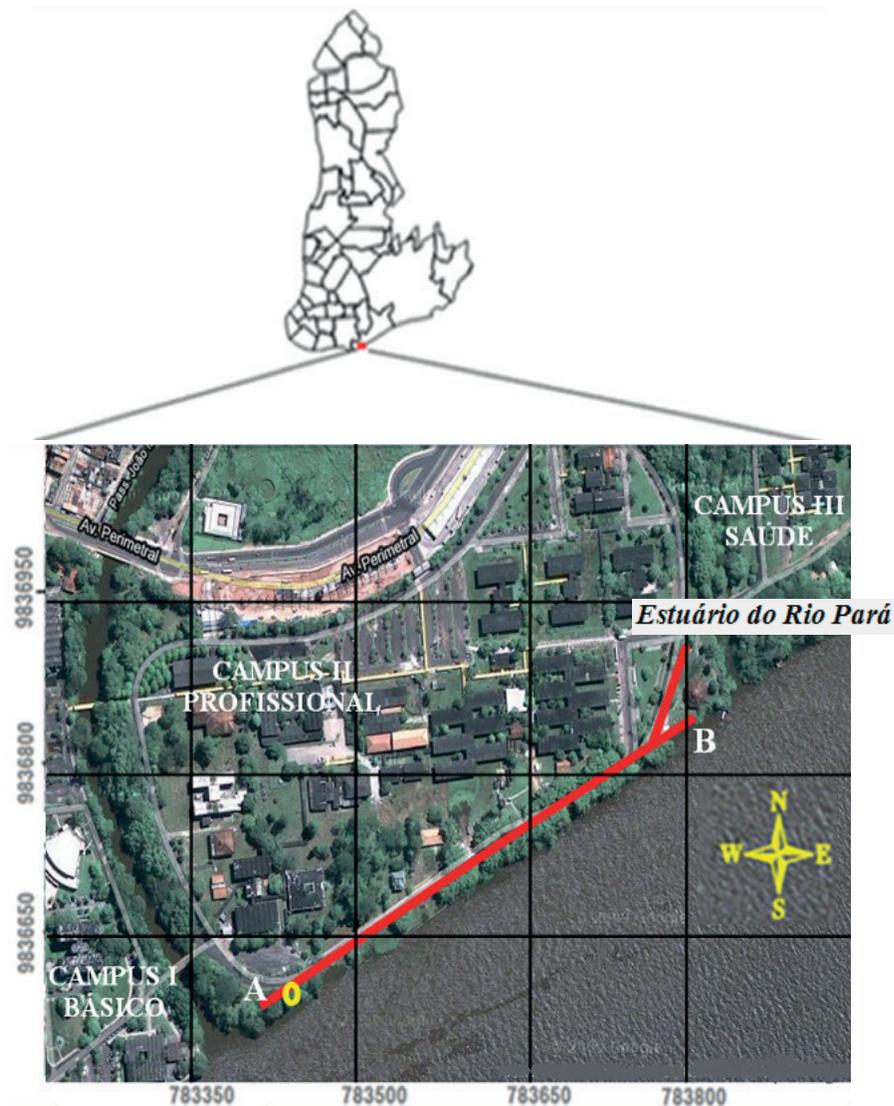


Figura 1. Área sob estudo no Campus da UFFPA, nas imediações do perfil AB (GOOGLE, 2010). O círculo amarelo identifica local onde foi descrita seção geológica.

2.4 Geologia

A cidade de Belém é dividida em três perfis litológicos: sedimentos recentes, sedimentos Barreiras/Pós Barreiras e formação de Pirabas, , que compreende sedimentos recentes representados por areias de granulometria fina a média, marrons, inconsolidadas, com predominância de grãos de quartzo (COSTA, 2001).

As areias são intercaladas por argilas escuras, com restos vegetais, distribuídos nas orlas dos rios e igarapés; por sedimentos continentais do Grupo Barreiras, composto por arenitos ferruginosos, areias finas a médias, siltsosas e argilosas e por sedimentos pertencentes à Formação Pirabas (SAUMA FILHO, 1996 e MATTA, 2002). A Formação Pirabas é constituída por calcários diversificados intercalados com arenitos calcíferos, argilas negras e folhelhos rítmicos. Apresenta um variado conteúdo macro e micro fossilífero animal e vegetais piritizados (ROSSETI *et al.*, 2001).

Pelo menos parte do campus do Guamá foi projetada nos terrenos desapropriados de Affonso Freire, Antonio Cabral e outros. Essa área abastecia de argila uma antiga olaria que funcionava em seu interior. Os buracos deixados pela retirada de argila contribuíam para o alagamento da área, tendo sido necessária a realização de um grande trabalho de aterro hidráulico. Utilizando uma draga de sucção para a retirada de areia de granulometria grossa do leito do rio Guamá, foi realizado o aterro e a compactação do solo (PINTO, 2010).

A presença de heterogeneidades da subsuperfície nessas áreas, natural ou introduzida pela ação humana de lavra de argila e posterior aterro, pode ter gerado zonas mais susceptíveis à erosão, devido à introdução de material de maior permeabilidade.

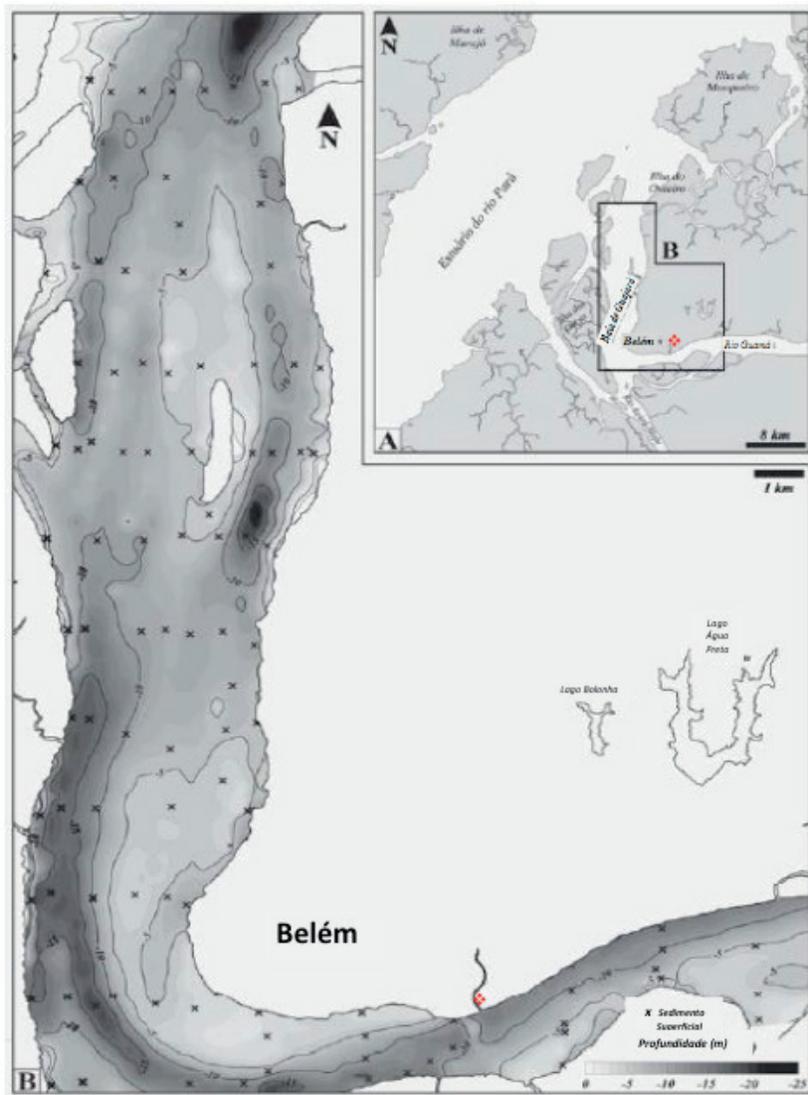


Figura 2 A) Trecho da margem direita do estuário do rio Pará onde se localiza a baía do Guajará. B) Trecho do Rio Guamá. Área sob estudo. A profundidade varia de acordo com a tonalidade mais escura, como indicado no canto inferior direito (GREGÓRIO e MENDES, 2009).

No dia 4 de fevereiro de 2010, foi realizado um furo de sondagem a trado na estação 75 NE do perfil AB (Figura 2.1) de cerca de 1,8 m de profundidade, para descrição da seção geológica. O nível hidrostático foi observado a cerca de 0,8 m de profundidade na maré baixa. A Figura 3 mostra a seção geológica obtida.

Profundidade (m)	Representação	Descrição
NÍVEL 1 0,18		Camada de húmus Rica em raízes que ajudam na sustentação.
NÍVEL 2 0,50		Camada Areno-argilosa Cor amarelada
NÍVEL 3 0,67		Camada de Argila e Seixos Cor vermelho alaranjada contendo concreções ferruginosas
NÍVEL 4 0,99 NH 0,8 m		Camada de Silte e Argila Com coloração vermelho-amarelada
NÍVEL 5 ≥ 1,45		Camada Argilosa Com coloração cinza claro, e espessura de pelo menos 46 cm

Figura 3. Seção geológica para o furo na orla da UFPA. Nível hidrostático em tracejado.

3 | MÉTODO GEORADAR

O método radar de penetração do solo ou, simplesmente, GPR, abreviatura de *ground penetrating radar*, é voltado para a detecção de parte da irradiação de ondas eletromagnéticas na faixa de frequências de 2 a 2500 MHz, geradas por uma antena transmissora, as quais se propagam na subsuperfície, sofrendo reflexão, refração e difração ao encontrarem mudanças nas propriedades eletromagnéticas do meio (resistividade elétrica, constante dielétrica e permeabilidade magnética); o sinal refletido pode ser detectado por uma antena receptora.

Segundo Silva (2021) e Ferreira et al (2022), o método baseia-se nos fenômenos físicos da eletricidade e do magnetismo e conjectura a identificação dos contrastes dos elementos em subsuperfície. A profundidade de penetração do sinal depende da condutividade elétrica do meio em que ele se propaga e da frequência emitida pelas antenas

do equipamento. As frequências mais altas estão relacionadas à menor profundidade de alcance do sinal e maiores profundidades são atingidas por frequências mais baixas (Akinsunmade et al. 2019)

O tempo de chegada da onda refletida, da ordem de nano segundos, é lançado em uma escala vertical para diferentes pontos do perfil. Esse registro vertical que associa tempo e amplitude é chamado de *scan* ou traço. Uma sequência desses scans forma um radargrama. A Figura 4 ilustra o princípio básico de operação do GPR e um radargrama.

O sinal detectado permite estimar as profundidades das interfaces de reflexão desde que se conheça a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas.

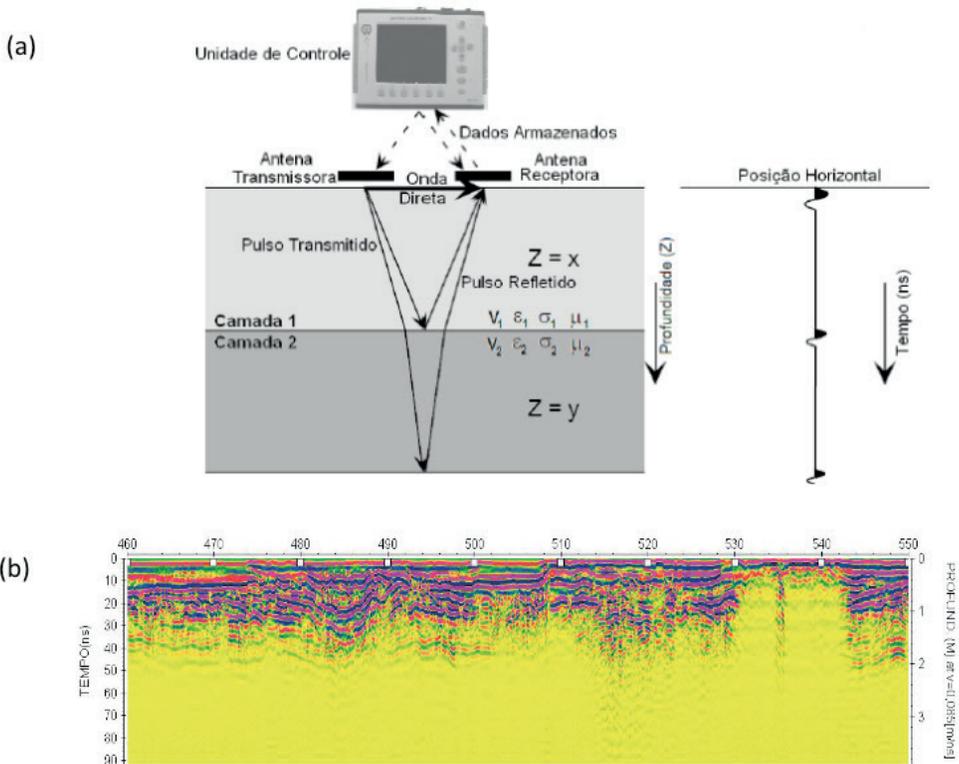


Figura 4 (a) Princípio básico de operação do GPR (adaptação de VAN DAM, 2001 in NASCIMENTO, 2009). (b) Radargrama obtido nos levantamentos deste trabalho.

A velocidade da onda eletromagnética (v) depende da constante dielétrica ou permissividade elétrica relativa (k), da permeabilidade magnética relativa (μ_r) e do fator de perda (P) :

$$v = \frac{c}{\left\{ \frac{k\mu_0}{2} \left[(1 + P^2)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2}} \quad (4.17)$$

sendo:

$$P = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \quad e \quad (4.18)$$

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \quad (4.19)$$

com "c" como a velocidade da luz no vácuo (0,3 m/ns) e ϵ e ϵ_0 como a permissividade elétrica respectivamente, no meio e no vácuo ($8,84 \times 10^{12}$ F/m).

O fenômeno base da aplicação do GPR é regido pelas mesmas equações do item 4.1.1, mas as constantes de propagação, atenuação e fase não permitem simplificações nas suas equações originais. Por outro lado, com as altas frequências do GPR, o produto $\omega^2\epsilon^2$ é muito maior do que σ^2 , de modo que a equação da velocidade da onda pode, então, nos meios não magnéticos ($\mu_r = 1$), ser simplificada para:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}}. \quad (4.20)$$

O coeficiente de reflexão R da interface que separa os meios 1 e 2 é dado por:

$$R = \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2}. \quad (4.21)$$

Substituindo-se o valor de v dado por (4.20) na equação do coeficiente de reflexão, obtém-se:

$$R = \frac{\sqrt{k_2} - \sqrt{k_1}}{\sqrt{k_2} + \sqrt{k_1}}, \quad (4.22)$$

em que k_1 e k_2 representam as constantes dielétricas das camadas no meio superior e inferior respectivamente.

A relação obtida mostra que quanto menor for o contraste entre as constantes dielétricas menor será a quantidade de energia refletida, o que explica a extrema sensibilidade do GPR ao conteúdo de água no meio. Argilas saturadas de água absorvem de tal maneira as ondas que são virtualmente opacos ao radar. O lençol freático é um grande refletor e pode prejudicar a penetração do sinal, pois grande parte da energia refletida volta à superfície.

A permeabilidade magnética relativa, parâmetro de especial interesse para este trabalho, influi tanto na velocidade como na atenuação da onda eletromagnética, de modo que quanto menor o seu valor, menor será a atenuação e maior será a velocidade da onda.

A frequência e a resistividade elétrica do meio são fatores que influenciam diretamente na profundidade de penetração. Resistividades baixas e frequências mais altas contribuem para uma maior absorção de energia da onda contribuindo para diminuir a profundidade de penetração. Frequências altas aumentam a resolução e permitem identificar alvos pequenos, obedecendo à relação:

$$v = \lambda f \quad (4.23)$$

3.1 Arranjos

Os dados de radar podem ser obtidos por meio do arranjo de afastamento constante (*common mid point*) ou CMP e *wide angle reflection and refraction* ou WARR.

O levantamento com afastamento constante emprega uma antena mono-estática ou então um par de antenas bi-estáticas separados por uma distância fixa que é conduzido passo a passo nos perfis. Com o arranjo CMP, por sua vez, a abertura entre as antenas (transmissora e receptora) é crescente em sentidos opostos, partindo-se de um ponto central fixo. Com o arranjo WARR, uma das antenas é mantida fixa enquanto a outra é consecutivamente espaçada da primeira. Neste trabalho, a aquisição foi realizada através do afastamento constante (Figura 5).

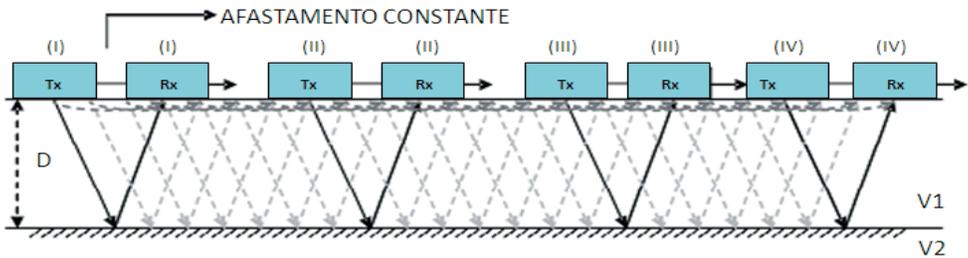


Figura 5 - Aquisição de dados com afastamento constante (REYNOLDS, 1997). Antenas: transmissora – Tx e receptora – Rx.

3.2 Aquisição dos Dados

Neste trabalho, a aquisição de dados foi realizada por meio de perfis de reflexão com afastamento constante com o equipamento TerraSIRch System-3000, fabricado pela empresa Geophysical Survey Systems, Inc., usando antena de 200 MHz (Figura 6).

A velocidade da onda foi calculada tendo como base a assinatura de um macaco de veículo enterrado a 30 cm de profundidade na estação 300NE (Figura 7).

Para a investigação 2D foi levantado o perfil 0-600NE com marcações no terreno a cada 10 m em ambas as marés nos dias 14 e 15 de março de 2010. Para facilitar a abordagem a seguir, esse perfil foi segmentado em oito perfis, PI de 0 a 100NE, PII de 100 a 180NE, PIII de 180 a 230NE, PIV de 230 a 280NE, PV de 280 a 380NE, PVI de 380 a 460NE, PVII, de 460 a 550NE e PVIII de 560 a 600NE (Figura 4.11). Entre 550 e 560NE, a existência de bambuzal impediu a passagem do radar.



Figura 6. Antena de 200MHz e Unidade de Controle SIR 3000, usados na aquisição de dados.



Figura 7. Procedimento de campo para cálculo da velocidade. Macaco, envolto em saco plástico, enterrado em 300NE afastado 3 m da pista.

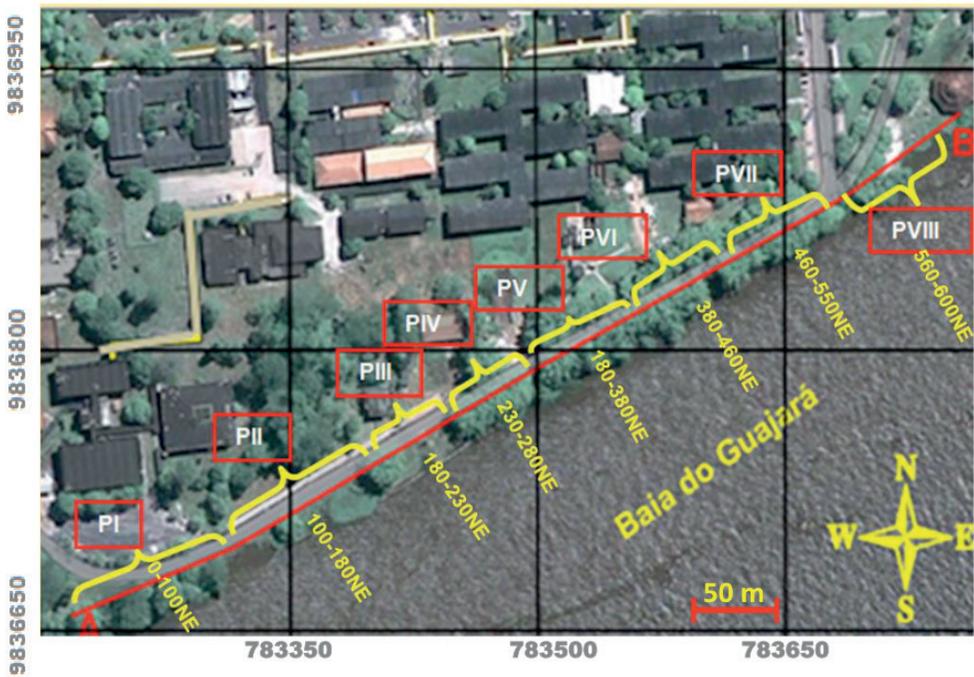


Figura 8. Segmentação do perfil AB na investigação GPR 2D.



Figura 9 Área vista lateralmente. Seta indica direção do levantamento para NE.



Figura 10 Área vista lateralmente. Seta indica direção do levantamento para NE.

3.3 Processamento

O processamento de dados GPR consiste das etapas que seguem.

- I. Pré-processamento, que envolve a obtenção do dado bruto (porque ainda no campo é possível fazer algumas modificações nos dados), posteriormente a esta, inclusão de informação sobre a topografia, correção estática (que permite eliminar do traço a parte na qual ele reflete as variações provocadas pela emissão da onda e seu encontro com a interface ar-superfície do terreno devida às instabilidades da antena durante a aquisição), correção de erros na amostragem do sinal etc.
- II. Aplicação de ganho, que compensa atenuações sofridas pelo sinal ao penetrar no subsolo.
- III. Filtragem, que permite a eliminação ou redução de ruídos (postes, canos, cabos de alta-tensão, raízes).
- IV. Conversão do tempo em profundidade, que envolve a modificação dos tempos medidos de retorno das ondas em profundidades, de forma a obter a profundidade das feições investigadas, o que exige o conhecimento da velocidade de propagação do meio, que pode ser obtida por meio de hipérboles de reflexão presentes no radar grama.

Neste trabalho, o processamento dos dados de GPR foi realizado com o programa REFLEX-WIN 5.2 desenvolvido pela *Sandmeier Software*. Foram feitos os seguintes processamentos:

- Correção estática,
- Interpolação das marcas de posicionamento,
- Remoção do ganho inicial,
- Aplicação do ganho linear e exponencial,
- Aplicação de filtros 1D (*Butterworth* e *Dewow*),
- Aplicação de filtro 2D (*Running Average*) e
- Conversão do tempo em profundidade a partir do cálculo da velocidade por meio do ajuste de hipérbole aos dados obtidos para o macaco de veículo enterrado de 30 cm de profundidade, o que forneceu 0,085 m/ns (Figura 11).

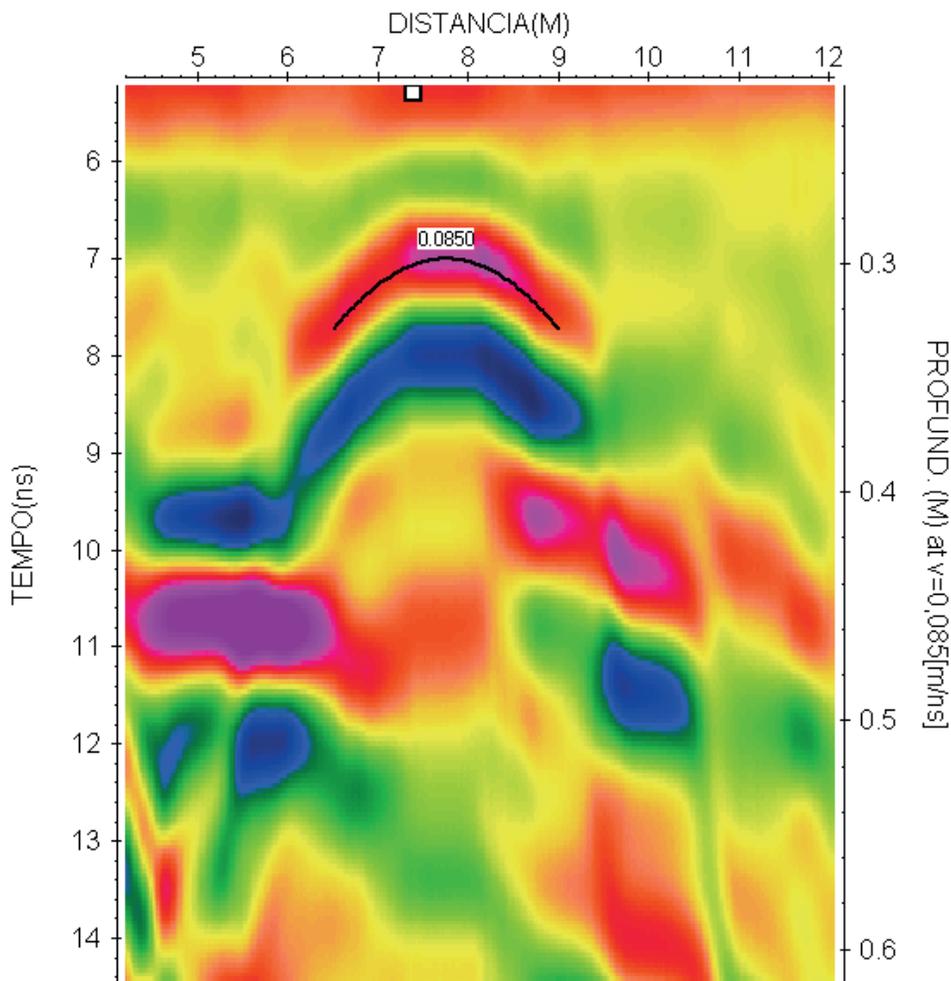


Figura 11 Radar grama mostrando a hipérbole relacionada ao macaco veicular enterrado na profundidade de 0,3 m. Velocidade de ajuste de 0,085m/ns.

3.4 Interpretação

Radar gramas (2D)

Os resultados obtidos ao longo do perfil AB foram reunidos nas figuras 12 e 13. No topo dessas figuras são apresentados os radares gramas brutos, em sua porção intermediária, os radar gramas após o processamento e na base dessas figuras, os radar gramas interpretados. A localização das feições mostradas nas fotos em anexo é apresentada no radar grama interpretado da maré baixa com as letras usadas para designar as referidas fotos reunidas no anexo dispostas no eixo dos x. Os dados do perfil 100-180NE

(Figura 12) foram obtidos algo afastados (cerca de 3 m) na direção NW em relação ao perfil original, devido à erosão.

A comparação entre os radares gramas para as duas marés mostra que o sinal refletido é mais nítido nos radares gramas obtidos com a maré alta e tanto mais nítido quanto mais estiver a zona submetida à erosão. A erosão perturba a continuidade dos refletores. Zonas com contenção de cimento podem mostrar o sinal atenuado e ser menos afetadas pela mudança de maré. Raízes parecem reduzir a reflexão. O nível hidrostático, localizado a cerca de 0,8 m de profundidade mais a camada argilosa que segue a camada que funciona como aquífero livre causam a atenuação do sinal a partir de cerca de 1 m e quase 2 m entre 460-550NE (Figura 13), que é a zona com a erosão mais intensa. Nos radares gramas, essas observações aparecem destacadas.

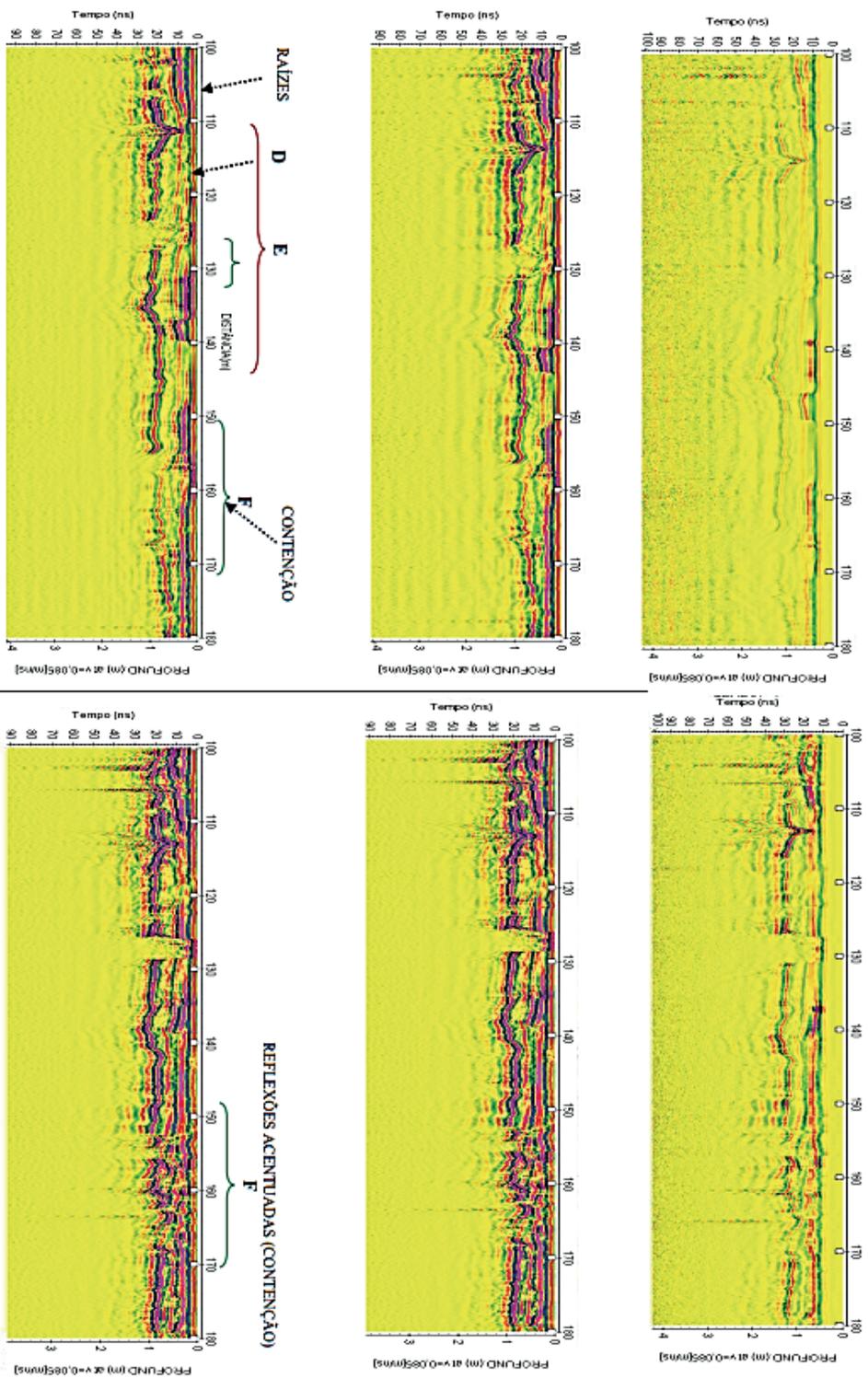


Figura 12 Trecho 100-180NE. Radargramas bruto (topo), processado (meio) e interpretado (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

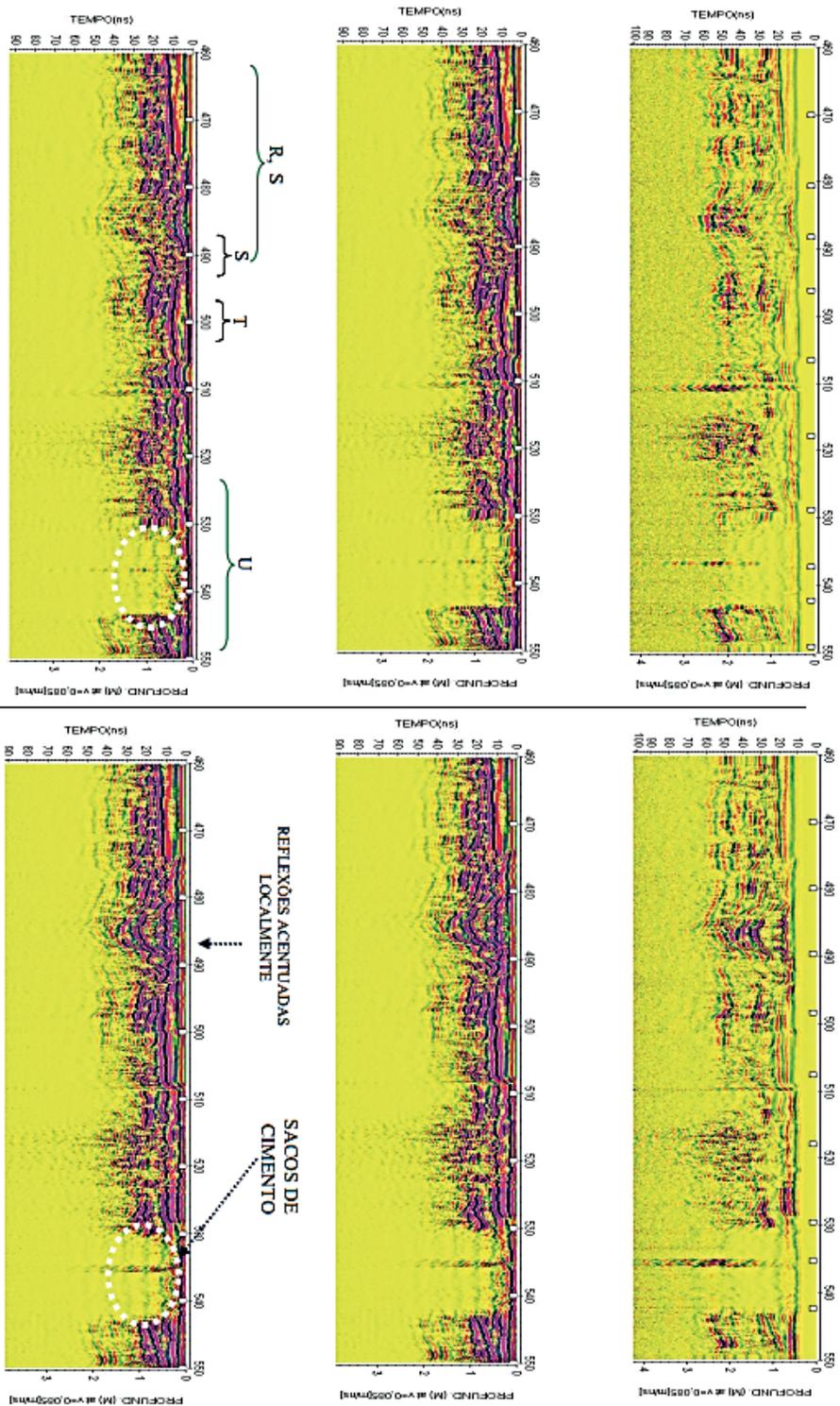


Figura 13 Trecho 460-550NE. Radargramas bruto (topo), processado (meio) e interpretado (base) obtidos nas marés baixa (lado esquerdo) e alta (lado direito).

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho introduz-se, a investigação do efeito da erosão na orla de rio por meio da Geofísica.

A investigação teve como base o levantamento de medidas tanto na maré baixa como na maré alta e a comparação entre os resultados, como forma de rastrear a penetração de água no terreno trazido pela maré alta, tanto maior quanto mais efetivo o caminho introduzido pelo fenômeno da erosão.

Na área investigada aparece a erosão e, localmente, diferentes tipos de contenção, o que torna a mesma um campo de testes para a modelagem em escala real geológica.

Finalmente, o trecho 460-550NE levantado com o GPR mostra atenuação do sinal entre 520 e 550NE devido à contenção com cimento e manutenção do sinal entre 460-490NE devido à contenção com muro; acentuações locais do sinal podem indicar onde a contenção perde em eficácia.

O problema, contudo, não é simples, porque a água infiltrada no solo a partir da superfície pode ser dividida em três partes. A primeira permanece na zona não saturada (zona onde os vazios do solo estão parcialmente preenchidos por água e ar), acima do nível freático. A segunda parte, denominada Inter fluxo (escoamento subsuperficial) pode continuar a fluir lateralmente, na zona não saturada, a pequenas profundidades, quando existem níveis pouco permeáveis imediatamente abaixo da superfície do solo e alcançar os leitos dos cursos d'água. A terceira parte pode percolar até o nível freático constituindo os recursos renováveis dos aquíferos (FEITOSA, 2000). Todos esses são, portanto, caminhos que podem oferecer contraste nas propriedades elétricas. Os caminhos preferenciais da água subsuperficial podem também representar rotas para a entrada de água trazida pela maré alta e, por esse meio, para o trabalho erosivo. É necessário considerar também que variações litológicas dão também sua contribuição aos dados. Finalmente, para a área estudada, que ela se encontra com eventos de erosão com contenção, às vezes, diversa.

A despeito das dificuldades, os resultados confirmam que a Geofísica pode ser uma ferramenta auxiliar na previsão de locais onde o desmoronamento do terreno provocado pela erosão está prestes a ocorrer bem como na análise da eficácia da obra de contenção realizada.

A despeito das contenções mais efetivas, temos o trecho 150 – 180 NE e 205 a 260 NE, sendo esta última a menos suscetível a desmoronamentos.

Contrariamente, os trechos mais suscetíveis à desmoronamentos são 80 – 140 NE, 180 – 200 NE, 440 - 460 NE e 520 – 550 NE, sendo as duas últimas já afetando a pista com

várias rachaduras. Em todos esses trechos observamos contenções com sacos de cimento que não são suficientes para conter o efeito da erosão.

As contenções de cimento têm apresentado várias alterações e desagregação dos sacos de cimento, muitas vezes ocasionados devido aos efeitos da maré e chuvas constantes onde o cimento exposto vai se deteriorando e se soltando dos demais, não sendo uma obra efetiva ao longo do tempo, somente uma medida paliativa.

REFERÊNCIAS

- AKINSUNMADE, A., KARCZEWSKI, J., MAZURKIEWICZ, E. & TOMECKASUCHOŃ S. 'Finite-difference time domain (FDTD) modeling of ground penetrating radar pulse energy for locating burial sites', Acta Geophysica, vol. 67, pp. 1945–53. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00352-9>
- AUGUSTIN, C.H.R.R. & ARANHA, P.R.A. Timbó-Elmiro ET AL. **A ocorrência de pipes descontínuos em Gouveia MG, Brasil, detectado com o auxílio do Ground Penetrating Radar (GPR)**. Anais do XI Congresso Latino americano de Geologia, Montevideu, Uruguai, CD-ROM: nº 275(pdf), 2001.
- BRITO, E. O.; FRANCO, P. B. G. T.; OLIVA, P. A. C.. **Utilização da ferramenta Ground Penetrating Radar (GPR) e da modelagem 3-D para a detecção da interface de interação água doce/salgada da Vila do Bonifácio, Praia de Ajuruteua (Bragança-PA)**
- COSTA, T. C. D. D. (2001). **Análise crítica das metodologias gerais de mapeamento geotécnico visando formulação de diretrizes para a cartografia geotécnica no trópico úmido e aplicação na região metropolitana de Belém escala 1:50.000**. 256 f. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica), Universidade Federal do Pará, Belém.
- FEITOSA, FERNANDO A.C. **Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações** 2ª edição, Fortaleza: CPRM, 2000
- FERREIRA, A. A.; OHNUMA JÚNIOR, A. A.; SALOMÃO, M. S. **Avaliação do Potencial de Captação de Água Subterrânea em Áreas Rurais de Municípios do Noroeste Fluminense-RJ, Brasil**. Anuário do Instituto de Geociências, v.45, 2022.
- GREGÓRIO, A.M.S.; MENDES, A. C. **Batimetria e Sedimentologia da Baía de Guajará, Belém, Estado do Pará, Brasil**, revista Amazônia, Cia e Desenvolvimento, v. 5, n. 9, jul./dez. 2009.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. – **Rede de Monitoramento de Eventos Extremos na Amazônia**. Dados diários de precipitação pluviométrica em Belém, estação convencional do INMET. Belém, 2010.
- MERCÊS, S. **Relatório Ambiental da Região Metropolitana de Belém- RMB**. Belém: COHAB, 1997.
- MATTA, M.A.S. **Fundamentos hidro geológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil**. 2002. 292 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2002

NASCIMENTO, W.G. **Investigação Geofísica Ambiental e Forense nos Cemitérios do Bengui e do Tapanã (Belém – PA)**; Dissertação de Mestrado; Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará; 2009

NUNES, Lana Patrícia Martins **Caracterização geoeétrica da área de curtume localizado no Distrito Industrial de Icoaraci, Belém-Pará**; Dissertação de Mestrado; Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará; 2005

OLIVEIRA, J.; OLIVEIRA SANTOS, J.; GOMES GOLÇALVES, ÍTALO. **Aplicação do Radar de Penetração do Solo (GPR) na Caracterização Estrutural e Planejamento de Lavra em Mina de Calcário**. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 13, n. 3, 16 nov. 2021.

PINHEIRO, R. V. L. **Estudo Hidrodinâmico e Sedimentológico do Estuário Guajará Belém (PA)**. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 164p. (Dissertação de Mestrado), 1987.

PINTO, W. Disponível em: <www.ufpa.br/beiradorio/novo/index.php/2007/108-edicao-especial-50-anos-da-ufpa/309-a-fundacao-do-campus-pioneiro-da-ufpa>, acessado 30/10/ 2010.

ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M. **Imagine upper Tertiary to Quaternary deposits from northern Brasil applying ground penetrating radar**. Revista Brasileira de Geociências, Curitiba, v.31 n. 2, p. 101-128, 2001.

RIBEIRO, H.M.C. **Avaliação atual da qualidade das águas superficiais dos lagos Bolonha e Água Preta situados na área fisiográfica do Utinga (Belém-Pa)**. 1992. 205 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém. 1992.

SAUMA FILHO, M. **As águas subterrâneas de Belém e adjacentes: Influência da formação Pirabas e parâmetros físico-químicos para medidas de qualidade**. 1996. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – UFPA, Centro de Geociências, Belém, 1996.

SECRETARIA DE ESTADO DE PLANEJAMENTO ORÇAMENTO E FINANÇAS- SEPOF. **Diretoria de pesquisas e informações socioeconômicas**. Estatística municipal. 2008.

SILVA, Andréa Alves Ferreira. **Avaliação do potencial de captação de água subterrânea em áreas rurais de municípios do Noroeste Fluminense**. 2021. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

XAVIER, N. P. **Processamento e Interpretação de Dados 2D e 3D de GPR: Aplicações no Imageamento de Feições Kárticas e Estruturas de Dissolução no Campo de Petróleo de Fazenda Belém – CE**. Tese de Doutorado. UFRN, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, 2006.