



ICNOFÓSSEIS NO ARENITO DO GUAMÁ (PARÁ, BRASIL): POTENCIAIS REGISTROS SILURIANOS

TAYNARA CRISTINA MATOS MARTINS , JOELSON LIMA SOARES
& HUDSON PEREIRA SANTOS

Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Pará,
Rua Augusto Corrêa, 01, Guamá, 66075-110, Belém, Pará, Brasil.
taynamartinsgeol2@gmail.com (autor correspondente), jlsoares@ufpa.br, hudson@ufpa.br

ABSTRACT – Ichnofossils of the Guamá Sandstone (Pará, Brazil): potential Silurian records. The Guamá Sandstone is a unit restricted to the Bragantina Platform in the northeast Pará State. It is characterized by thick layers of well-rounded, well-sorted, medium-grained quartz-sandstone with textural and compositional maturity. In general, the layers exhibit few preserved primary sedimentary structures. The facies association indicates a sandy coastal paleoenvironment comprising the foreshore and shoreface zones. We found in the Guamá Sandstone the ichnospecies *Psammichnites* isp., cf. *Schaubcylindrichnus coronus*, *Skolithos* isp., *Skolithos linearis* and V-shaped vertical excavations, which commonly compose a mixture of the *Cruziana* and *Skolithos* ichnofacies. On the basis of the regular distribution alternating between *Skolithos* and *Psammichnites* in the sandstone layers, and the low ichnodiversity and local abundance, we suggest that periodic changes in energy and sedimentation rate occurred. These characteristics of the Guamá Sandstone ichnoassemblage are similar to those of the Ipu (Parnaíba Basin) and Nhamundá (Amazon Basin) formations, although only *Skolithos* occurs in both units.

Keywords: Guamá Sandstone, ichnofacies, foreshore-shoreface, Lower Silurian, paleoenvironment.

RESUMO – O Arenito do Guamá é uma unidade restrita à Plataforma Bragantina no nordeste do Estado do Pará. Caracteriza-se por espessas camadas de quartzo-arenito de grão médio, bem arredondadas, bem selecionadas, com maturidade textural e composicional. Em geral, as camadas apresentam poucas estruturas sedimentares primárias preservadas. A associação de fácies indica um paleoambiente costeiro arenoso compreendendo as zonas de *foreshore* e *shoreface*. Encontramos no Arenito do Guamá a icnoespécie *Psammichnites* isp., cf. *Schaubcylindrichnus coronus*, *Skolithos* isp., *Skolithos linearis* e escavações verticais em forma de V, que comumente compõem uma mistura das icnofácies *Cruziana* e *Skolithos*. Com base na distribuição regular alternada entre *Skolithos* e *Psammichnites* nas camadas de arenito e a baixa icnodiversidade e abundância local, sugerimos que ocorreram mudanças periódicas na energia e na taxa de sedimentação. Essas características da icnoassembléia do Arenito do Guamá são semelhantes às das formações Ipu (Bacia do Parnaíba) e Nhamundá (Bacia Amazônica), embora apenas *Skolithos* ocorra em ambas as unidades.

Palavras-chave: Arenito do Guamá, icnofácies, *foreshore-shoreface*, Siluriano Inferior, paleoambiente.

INTRODUÇÃO

Sequências sedimentares de idade siluriana localizadas em bacias intracratônicas nas porções norte e nordeste do Brasil são essencialmente siliciclásticas, ricas em grãos de quartzo e comumente apresentam um pobre conteúdo fossilífero, o que impede a sua datação e posicionamento estratigráfico (Caputo, 1984). Estas características sedimentares se devem principalmente às condições climáticas glaciais predominantes durante o Siluriano, as quais dificultaram a formação de depósitos carbonáticos pela influência de uma extensa geleira que ocupava uma ampla área do Gondwana Oeste desde o Ordoviciano até o Siluriano Inferior (Caputo & Crowell, 1985; Cuervo *et al.*, 2018; Assis *et al.*, 2019; Barrera *et al.*, 2020). Depósitos glaciais e costeiros deste intervalo são registrados na Formação Nhamundá, Bacia do

Amazonas (Nogueira *et al.*, 1999; Soares *et al.*, 2005; Cuervo *et al.*, 2018), e na Formação Ipu, Bacia do Parnaíba (Assis *et al.*, 2019; Barrera *et al.*, 2020).

Rochas siliciclásticas quartzosas que formam depósitos espessos e ocorrem de forma isolada na Plataforma Bragantina, nordeste do Estado do Pará, denominados de Arenito do Guamá, apresentam semelhanças litológicas com a Formação Nhamundá e provável associação com a Formação Ipu, sendo que estas características têm sido utilizadas para atribuir idade siluriana a esta unidade (Truckenbrodt & Alves, 1982; Caputo & Lima, 1984; Soares *et al.*, 2005). Além disso, corrobora o fato de a Plataforma Bragantina ocorrer entre as bacias do Amazonas e Parnaíba e os afloramentos do Arenito do Guamá estarem posicionados na região que, provavelmente, fazia a conexão entre estas bacias (Vasquez *et al.*, 2008; Oliveira & Truckenbrodt, 2019). Contudo, ainda existem poucos dados

geocronológicos e paleontológicos consistentes que possam confirmar esta associação e a idade siluriana (Martins *et al.*, 2007). Recentemente, estudos de proveniência sedimentar e diagênese têm auxiliado no entendimento da evolução geológica desta unidade e sustentado uma idade deposicional siluriana para o Arenito do Guamá (Oliveira & Truckenbrodt, 2019).

O Arenito do Guamá é caracterizado por espessas camadas de quartzarenito com alto grau de maturidade textural e composicional e que geralmente apresenta aspecto maciço ou estratificação plano-paralela obliterada (Truckenbrodt & Alves, 1982). Os principais afloramentos desta unidade ocorrem nas margens de rios e igarapés nos municípios de São Miguel do Guamá e Irituia, nordeste do Estado do Pará. A maioria dos dados estratigráficos do Arenito do Guamá aponta para depósitos marinhos costeiros entre as zonas de *foreshore* e *shoreface*; porém, a ausência de uma descrição faciológica mais detalhada e da distribuição destas fácies, tanto no empilhamento vertical como em extensão horizontal, dificulta uma melhor interpretação do ambiente deposicional.

Devido ao caráter predominantemente arenoso do Arenito do Guamá, o que inibe a preservação de corpos fósseis, o conteúdo icnofossilífero se traduz numa importante ferramenta para o entendimento da história paleobiológica destes depósitos. Os primeiros registros de icnofósseis no Arenito do Guamá foram feitos por Truckenbrodt & Alves (1982) que descreveram três agrupamentos de bioturbações, identificando apenas o icnogênero *Skolithos*. Martins *et al.* (2017) descrevem *Skolithos* e prováveis *Planolites*. Desde então, não foram mais identificados novos icnogêneros. A descoberta de novas ocorrências de icnofósseis e a presença de estruturas sedimentares primárias bem preservadas forneceram a oportunidade para estudos paleoambientais mais detalhados desses depósitos. Assim, este trabalho tem como objetivo a análise integrada da icnologia e da sedimentologia do Arenito do Guamá para propor interpretações referentes ao paleoambiente deposicional e aos fatores que condicionaram a colonização do substrato. Além disso, discute-se aqui a correlação com as unidades silurianas das bacias do Amazonas e Parnaíba.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização desse estudo foram visitadas quatro localidades, uma na cidade de Irituia, na Vila da Pedra Caída, e três em São Miguel do Guamá, sendo uma em frente ao colégio Externato Santo Antônio Maria Zacarias, a outra localizado no Rio Itaquiáçu no ramal da Pedreirinha e a última na Cachoeira do Apolônio Miranda (Figuras 1 e 2), todas no Estado do Pará. Os dados faciológicos e petrográficos de Oliveira & Truckenbrodt (2019), a partir de um testemunho de sondagem com 50 m de profundidade localizado 6 km ao norte da sede do Município de São Miguel do Guamá, foram incluídos nesse trabalho para auxiliar nas interpretações paleoambientais.

As melhores exposições do Arenito do Guamá ocorrem em Vila da Pedra Caída, que é um balneário de Irituia, e na Cachoeira do Apolônio, em São Miguel do Guamá, sendo que em Vila da Pedra Caída os depósitos do Arenito do Guamá alcançam até 18 m de espessura. Outros afloramentos menos expressivos são encontrados nas margens do rio Guamá, em frente à cidade de São Miguel do Guamá. As fácies deposicionais foram individualizadas com base em suas estruturas sedimentares e conteúdo icnológico (*e.g.*, Walker, 1992). Os icnofósseis foram classificados em nível de icnoespécie, com base nas suas principais feições morfológicas (Bromley, 1996). Na análise semiquantitativa das icnofábricas foram utilizadas as propostas de Droser & Bottjer (1986) e Miller & Smail (1997). Optou-se pelo método de Droser & Bottjer (1986) por considerar o grau de destruição das estruturas sedimentares pela bioturbação em diferentes níveis de profundidade, com utilização de diagramas esquemáticos de índice de icnofábricas. Este índice de icnofábrica (ii) é determinado como: I) índice ii = 1, sem bioturbação e todas as estruturas sedimentares preservadas; II) ii = 1–10% de bioturbação discreta, isolada; III) ii = 3, 10–40%; IV) ii = 4, 40–60%; V) ii = 5, estruturas totalmente bioturbadas, mas os icnofósseis ainda podem ser observados localmente e VI) ii = 6, camadas homogeneizadas pela bioturbação. O método semiquantitativo de Miller & Smail (1997) denominado de **BPBI** (*Bedding-Plane Bioturbation Index*) foi utilizado para avaliar a quantidade de bioturbação observada no topo das camadas. O BPBI é determinado a partir da análise de fotografias de áreas bioturbadas observadas em planta, onde: I) BPBI = 1, sem bioturbação; II) BPBI = 2, 0–10% de bioturbação; III) BPBI = 3, 10–40%; IV) BPBI = 4, 40–60% e V) BPBI = 5, 60–100% de bioturbação.

GEOLOGIA REGIONAL

O Arenito do Guamá no contexto da Plataforma Bragantina

Segundo Amorim (2016), durante o Cenozoico, a região equatorial norte do Brasil passou por um período tectonicamente estável, onde foram depositados os sedimentos das plataformas Bragantina e do Pará entre as bacias mesozoicas. A Plataforma Bragantina é uma extensa área plana, tectonicamente estável, limitada a oeste pela Fossa Vigia-Castanhã, que a separa da Bacia do Marajó, e a leste pela Bacia Bragança-Vizeu e Faixa Gurupi (Almaraz, 1977; Rossetti, 2001) (Figura 1). A sequência sedimentar é composta principalmente de rochas cenozoicas, com destaque para as formações Pirabas (Oligoceno–Mioceno) e Barreiras (Mioceno), além de corpos ígneos e sedimentares pré-cenozoicos isolados, entre eles o Arenito do Guamá. A ocorrência restrita dificulta o seu mapeamento e a definição de suas relações estratigráficas, o que não possibilita determinar ainda o posicionamento dentro de uma categoria litoestratigráfica, sendo o termo informal “Arenito do Guamá” usado até hoje. Dados gravimétricos sugerem que o limite inferior do Arenito do Guamá é discordante com o



Figura 2. Visão geral dos afloramentos nas regiões estudadas. **A**, afloramento na Vila da Pedra Caída, em Irituia. **B**, camadas onduladas de arenito maciço em frente ao colégio Externato Santo Antônio Maria Zacarias. **C**, afloramento no Rio Itaquiáçu no ramal da Pedreirinha exibindo arenitos maciços e bioturbados em camadas tabulares. **D**, lajeado de arenito maciço localmente bioturbado na Cachoeira do Apolônio Miranda.

Figure 2. Overview of the outcrops in the studied regions. **A**, outcrop in Vila da Pedra Caída, in Irituia. **B**, wavy layers of massive sandstone in front of the Externato Santo Antônio Maria Zacarias school. **C**, outcrop on the Itaquiáçu River in the Pedreirinha branch showing tabular layers of massive and bioturbated sandstones. **D**, massive sandstone outcrop with sparse bioturbations at Apolônio Miranda waterfall.

ou pelo menos eopaleozoica (Truckenbrodt & Alves, 1982; Caputo & Lima, 1984).

Segundo Truckenbrodt & Alves (1982), a datação mais aceita seria a pré-cretácea proposta por Kraatz-Koschlaue & Huber (1900), os quais consideram os contatos suturados entre os grãos de quartzo como resultado de dissolução por pressão. Esses contatos suturados sugerem que uma idade mais jovem seja menos provável, já que apenas o peso dos sedimentos

das formações Barreiras e Pirabas seriam insuficientes para formar estes tipos de contatos.

Trabalhos recentes determinaram a proveniência sedimentar desses arenitos com base na datação de zircões detríticos e na análise da assembleia de minerais pesados, além de estudos paleogeográficos. Segundo Martins *et al.* (2007), existem várias fontes para o Arenito do Guamá, sendo a primária as rochas dos ciclos Transamazônico e Brasiliano,

como as rochas cristalinas do Cráton Oeste-Africano e suas faixas móveis adjacentes, Cráton São Luís e a Faixa Gurupi. Outras fontes consideradas também foram a Província Borborema, porção oriental do Escudo das Guianas e a Faixa Araguaia. Moizinho *et al.* (2022) determinaram um padrão bimodal na distribuição das idades, com populações principais em torno de 588 Ma e uma subordinada de 2109 Ma, o que corrobora as interpretações de fontes neoproterozoicas e paleoproterozoicas. Estudos petrográficos somados aos altos teores de ZTR e ao arredondamento dos grãos de quartzo, turmalina e zircão, indicam que o Arenito do Guamá provavelmente é resultado da reciclagem sedimentar associada com uma longa abrasão de seus grãos em ambiente litorâneo de alta energia, o que explicaria sua alta maturidade composicional e textural (Martins *et al.*, 2007; Oliveira & Truckenbrodt, 2019).

O aspecto maciço e a escassez de estruturas sedimentares primárias têm dificultado a interpretação paleoambiental do Arenito do Guamá, baseada principalmente nas suas características petrográficas e na presença de alguns icnofósseis, como o icnogênero *Skolithos* e algumas estruturas tubulares horizontais (Truckenbrodt & Alves, 1982).

RESULTADOS

Fácies Sedimentares

Foram descritas seis fácies sedimentares que compõem uma associação de fácies representando um paleoambiente *foreshore/shoreface* (Tabela 1). As fácies apresentam aspectos texturais e composicionais semelhantes entre si, com predominância de quartzarenitos com granulometria média, bem selecionados e bem arredondados. Os arenitos são comumente maciços, porém estruturas sedimentares como laminações onduladas, planar e estratificação cruzada tabular são observadas localmente. A geometria das camadas, em sua maior parte, é tabular, e localmente apresentam geometria ondulada com truncamentos.

No afloramento na Vila da Pedra Caída estão expostos corpos tabulares de aproximadamente 18 m de espessura e continuidade lateral de dezenas de metros nas margens do rio Irituia (Figura 2A). Nos primeiros 3 m deste afloramento ocorrem camadas de arenitos com estratificação cruzada acanalada com areia grossa nos *foresets*, grânulos e seixos dispersos e paleocorrentes indicando fluxos para nordeste. Os próximos 15 m são constituídos principalmente por camadas de geometria tabular de arenitos maciços com bioturbações verticais intercalados com camadas tabulares a onduladas com truncamentos de baixo ângulo de arenitos com laminações onduladas e planar também bioturbados. No afloramento em frente ao colégio Externato Maria Zacarias, em São Miguel do Guamá, estão expostos corpos tabulares em forma de lajeado, com aproximadamente 5 m de espessura e que localmente apresentam também geometria ondulada (Figura 2B). As fácies descritas nesse afloramento são principalmente arenitos com estratificação cruzada acanalada e arenitos maciços com bioturbações horizontais (Tabela 1).

Os afloramentos localizados no Rio Itaquiáçu, no ramal da Pedreirinha e na Cachoeira do Apolônio Miranda, em São Miguel do Guamá, apresentam características semelhantes entre si. Os depósitos formam corpos tabulares que afloram nas margens de igarapés, encontrados em forma de lajeado. No Rio Itaquiáçu as exposições podem chegar a 6 m de espessura e são caracterizadas por arenito maciço com bioturbações e arenito com laminação ondulada e planar (Figura 2C). Na Cachoeira do Apolônio Miranda as camadas de arenito formam extensos lajeados e corredeiras; a espessura das camadas não é superior a 2 m e a única fácies descrita foi a de arenito maciço com bioturbações (Figura 2D, Tabela 1). Os testemunhos de sondagem do Arenito do Guamá mostram a predominância de arenitos maciços bioturbados, arenitos com laminação planar, arenitos com estratificação cruzada e conglomerados observados na base do testemunho. Porém, algumas dessas fácies não foram observadas nos afloramentos estudados (*e.g.*, Oliveira & Truckenbrodt, 2019) (Figura 3). Dessa forma, considerando a profundidade do testemunho e a espessura do maior afloramento estudado, estima-se que a espessura total do Arenito do Guamá na Plataforma Bragantina é de aproximadamente 70 m. Contudo, o testemunho de sondagem não alcançou o embasamento e, portanto, o Arenito do Guamá pode ser ainda mais espesso (Oliveira & Truckenbrodt, 2019).

Depósitos de *Foreshore/Shoreface*

A descrição das fácies de depósitos de *Foreshore/Shoreface* consiste em um agrupamento de camadas de quartzarenito com granulometria média, bem selecionado e bem arredondado que compõem camadas de cor esbranquiçada (Figura 4). As camadas têm aspecto maciço, bioturbações verticais e horizontais e estruturas como estratificação cruzada, plano-paralela e laminação ondulada e planar. É composta pelas fácies arenito com laminação ondulada e planar (**Alb**) (Figura 4A), arenito maciço com bioturbações (**Amb**), conglomerado com estratificação cruzada (**Cc**), arenito com estratificação plano-paralela (**App**) e arenito com estratificação cruzada acanalada (**Aa**) (Figura 4B, Tabela 1).

Os depósitos de *foreshore* são caracterizados por camadas tabulares da fácies Alb que apresentam laminação ondulada e planar levemente inclinadas, formando truncamentos de baixo ângulo. As laminações onduladas são caracterizadas por estruturas geralmente simétricas com crista suave. Truncamentos de muito baixo ângulo são observados separando os *sets* (Figura 4C). Esta fácies encontra-se intercalada com a fácies Amb, que é caracterizada por arenitos médios maciços como bioturbações verticais endocêntricas do icnogênero *Skolithos* (Figura 4D). No topo das camadas ocorrem bioturbações horizontais classificadas no icnogênero *Psammichnites* (Figuras 5A e B).

Quartzarenitos com laminações onduladas a planares sugerem deposição em leito plano sob regime de fluxo superior com influência de fluxos oscilatórios (Reineck & Singh, 1973). As laminações levemente inclinadas e com truncamentos de baixo ângulo sugerem deposição em superfícies inclinadas

Tabela 1. Descrição e processos de formação das fácies sedimentares do Arenito do Guamá.**Table 1.** Description and processes of the sedimentary facies of the Guamá Sandstone.

Fácies	Descrição	Processos
Arenito com estratificação cruzada acanalada (Aa)	Camadas de quartzo-arenito esbranquiçada com até 1 m de espessura, apresentando estratificação cruzada acanalada com areia grossa no <i>foreset</i> ; grânulos e seixos dispersos. Paleocorrentes para nordeste.	Migração de forma de leito 3D em regime de fluxo inferior, sob fluxo unidirecional.
Arenito maciço com bioturbações (Amb)	Camadas de quartzo-arenito esbranquiçado de aspecto maciço com até 1,85 m de espessura e bioturbações horizontais e verticais que ocorrem no topo e dentro das camadas, respectivamente. Os tubos horizontais são de <i>Psammichnites isp.</i> e os tubos verticais são de <i>Skolithos linearis</i> , <i>Schaubcylindrichnus coronus</i> e escavações verticais em forma de V	Deposição em condições de alta energia e elevada taxa de sedimentação com colonização por organismos que fugiam do soterramento. Esporádicas paradas na sedimentação possibilitavam a ocupação do substrato por organismos vermiformes na interface-água sedimento originando tubos horizontais.
Arenito com laminação ondulada e planar (Alb)	Camadas de quartzo-arenito esbranquiçada com até 1,5 m de espessura. Apresenta laminação ondulada e planar.	Deposição em leito plano sob regime de fluxo superior com influência de fluxo oscilatório.
Conglomerado com estratificação cruzada (Cc)	Camada de conglomerado apresentando estratificação cruzada.	Deposição em condições de alta energia com concentração de seixos no leito.
Arenito com estratificação plano-paralela (App)	Camada de quartzo-arenito, com granulometria média bimodal apresentando estratificação plano-paralela.	Deposição em leito plano em regime de fluxo inferior.

(Reineck & Singh, 1973). Os truncamentos de muito baixo ângulo refletem pequenas discontinuidades erosivas que separam os *sets*. Arenitos com laminações onduladas e planas são geralmente abundantes em praias ou áreas expostas a ação de ondas (Reineck & Singh, 1973; Della Fávera, 2001). Arenitos maciços podem ser formados por diferentes processos deposicionais e pós-deposicionais, entre eles deposição rápida, bioturbação, fluidificação/liquefação, além de alterações durante a diagênese e intemperismo (Reineck & Singh, 1973). A presença abundante de icnofósseis na fácies Amb indica que a bioturbação é provavelmente a principal responsável pela ausência de estruturas primárias.

Os depósitos de *shoreface* são caracterizados pela fácies Aa, que exibe areia grossa no *foreset* e grânulos e seixos dispersos (Figura 4E). Os grãos de areia grossa dos *foresets* são subarredondados a subangulosos e de composição quartzosa. Os grânulos e seixos são geralmente oblatos e de composição quartzosa. Este material se concentra principalmente no limite entre *foresets* e o *bottomset*. Os dados de paleocorrente para NE indicam áreas fontes em direção à região sudoeste. Estratificação cruzada acanalada é formada pela migração de forma de leito 3D em regime de fluxo inferior. Os grãos de areia grossa que se concentram na base dos *foresets* são originados pelo processo de avalanche que ocorre na frente de dunas subaquosas relacionados a variações de energia durante o transporte. A predominância de grãos de quartzo bem selecionados e bem arredondados sugere uma alta maturidade composicional e textural comumente encontrada em regiões costeiras.

ICNOLOGIA

Os icnofósseis encontrados no Arenito do Guamá ocorrem principalmente na fácies arenito maciço e esporadicamente

na fácies arenito com laminação ondulada a planar. Estas estruturas biogênicas são visíveis tanto no topo das camadas como internamente. Cinco morfotipos são observados: 1) Traços horizontais meandantes interpretados como *Psammichnites isp.*; 2) Traços subverticais simples atribuídos a cf. *Schaubcylindrichnus coronus*; 3) Tubos levemente curvados de *Skolithos isp.*; 4) Tubos verticais identificados como *Skolithos linearis*; e 5) Escavações verticais afunilados em forma de V.

ICNOLOGIA SISTEMÁTICA

Psammichnites Torrell, 1870

Psammichnites isp.
(Figuras 5A–C)

Diagnose. Traços predominantemente horizontais, sinuosos, meandantes ou formando loopings com uma estrutura interna transversal ou arqueada e uma estrutura dorsal mediana distinta, comumente representada por uma crista/ranhura senoidal ou reta, ou montes/furos circulares regularmente espaçados. Preservado em relevo cheio no topo das camadas ou, mais raramente, em hiporrelevo negativo (Mángano *et al.*, 2002a).

Espécimes. Foram descritos vários espécimes em campo, na Vila da Pedra Caída, no colégio Externato Santo Antônio Maria Zacarias e no Rio Itaquiaçú, ramal da Pedreirinha.

Descrição. Estruturas horizontais, cilíndricas, meandantes, geralmente formando *loops*, e preservadas em epirrelevo convexo. Alguns traços exibem uma estrutura dorsal média pouco desenvolvida. Traços mais curtos podem apresentar formas retilíneas ou curvadas. As paredes das escavações são

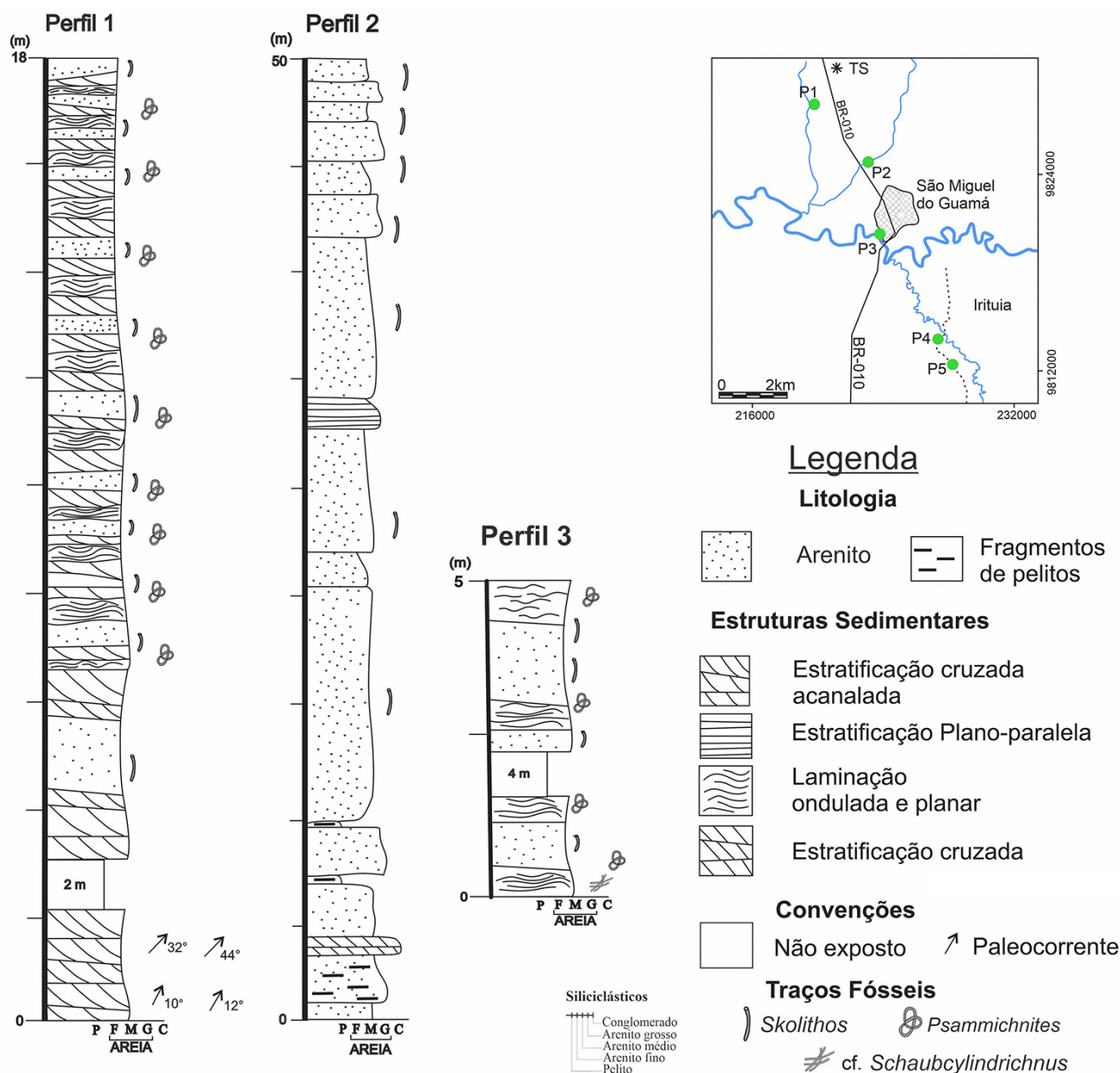


Figura 3. Perfis estratigráficos do Arenito do Guamá destacando as fácies sedimentares e a distribuição dos icnofósseis. Perfil 1 (Ponto 4 = P4) região de Irituia, Vila da Pedra Caída, perfil 2 (TS) do testemunho de sondagem de São Miguel do Guamá (Oliveira & Truckenbrodt, 2019) e perfil 3 (P2) no Rio Itaquiáçu no ramal da Pedreirinha.

Figure 3. Stratigraphic profile of the Guamá Sandstone showing the sedimentary facies and ichnofossils distribution. Profile 1 (point 4 = P4), Irituia region, Vila da Pedra Caída, profile 2 (TS) from the drill core of São Miguel do Guamá (Oliveira & Truckenbrodt, 2019), and profile 3 (P2) in the Itaquiáçu River, Pedreirinha branch.

lisas e o preenchimento apresenta granulometria muito mais fina que da rocha hospedeira (areia média). O diâmetro das escavações varia entre 0,8 e 1 cm e o comprimento é variado. **Observações.** *Psammichnites* é o registro da atividade de alimentação (*fodinichnia*) de um animal em subsuperfície usando um dispositivo semelhante a um sifão (Mángano *et al.*, 2002a), como gastrópodes (Mángano *et al.*, 2002b; Seilacher, 2007). Assim, *Psammichnites* representaria o preenchimento ativo de sedimentos por um organismo que escava de forma efêmera durante o seu deslocamento intraestratal ao se alimentar (Mángano *et al.*, 2002a).

O sedimento que preenche as escavações foi processado por pastadores de nutrientes na porção mais superficial do substrato (Seilacher, 2007). Quatro icnoespécies são conhecidas para o icnogênero *Psammichnites*, diferenciadas pela forma da estrutura dorsal média: *Psammichnites plummeri*, *Psammichnites gramula*, *Psammichnites gigas* e *Psammichnites implexus*. se caracteriza por uma preservação parcial da estrutura dorsal média, que não é observada ao longo de toda a escavação (Mángano *et al.* 2002b). Contudo, devido à má preservação da estrutural dorsal média, optou-se por manter a nomenclatura icnoespecífica aberta para os

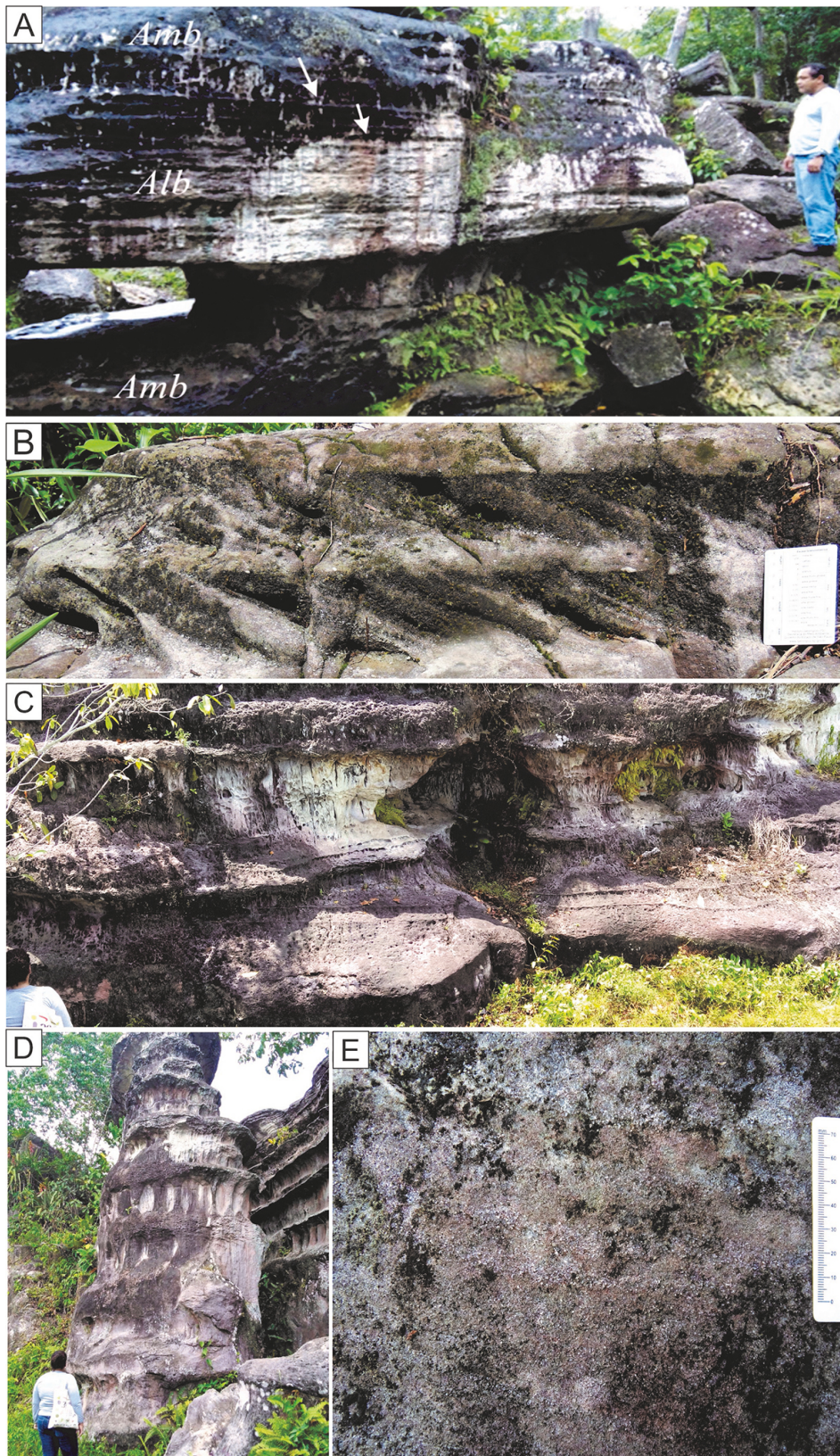


Figura 4. Fácies sedimentares. **A**, camadas tabulares de arenito com laminação ondulada e planar (**Alb**) que mostram truncamentos de muito baixo ângulo (setas) que ocorrem intercalados com arenitos maciços (**Amb**). **B**, arenito com estratificação cruzada acanalada (**Aa**). **C–D**, intercalações entre fácies Alb e a fácies Amb exibindo bioturbações horizontais e verticais, respectivamente. **E**, detalhe da fácies Aa exibindo areia grossa e grânulos dispersos.

Figure 4. Sedimentary facies. **A**, tabular sandstone layers with wavy and planar lamination (**Alb**) showing very low angle truncations (arrows) that occur interbedded with massive sandstones (**Amb**). **B**, trough cross-stratification sandstone (**Aa**). **C–D**, Intercalations between Alb and Amb facies displaying horizontal and vertical bioturbations, respectively. **E**, detail of Aa facies showing coarse sand and scattered granules.

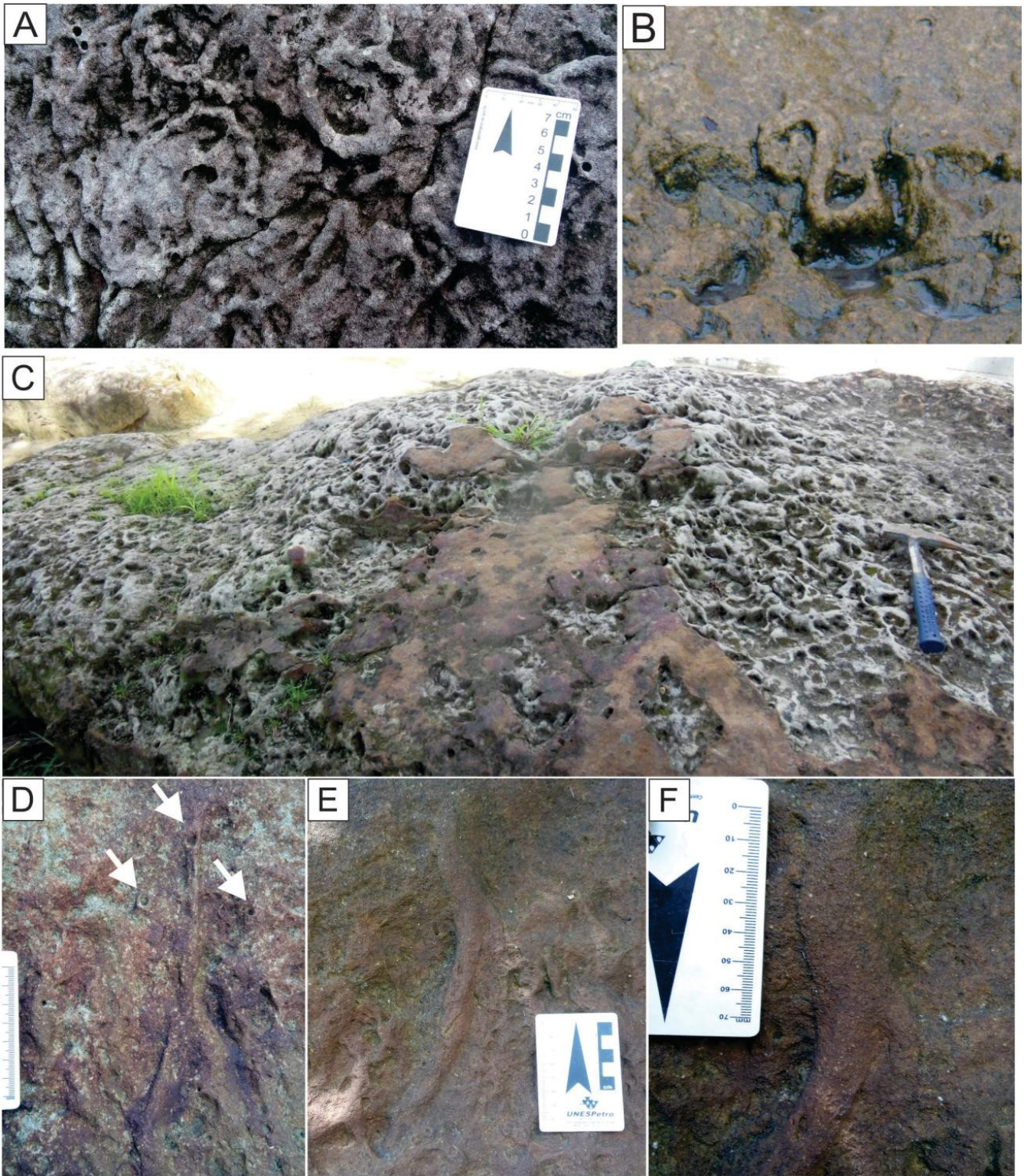


Figura 5. Icnofósseis do Arenito do Guamá. **A**, topo da camada de arenito densamente bioturbado por *Psammichnites* isp. que exibem formas meandrantas e curvadas. **B**, em destaque os *Psammichnites* isp. formando loopings. **C**, visão geral do afloramento com *Psammichnites* isp. cobrindo quase todo o topo da camada. **D**, tubos subverticais simples de cf. *Schaubcylindrichnus coronus* com as setas destacando. **E**, camada de arenito maciço densamente bioturbado por tubos verticais retilíneos de *Skolithos*.

Figure 5. Ichnofossils from the Guamá Sandstone. **A**, top of the sandstone layer densely bioturbated by *Psammichnites* isp. that exhibit meandering and curved shapes. **B**, highlighting the *Psammichnites* isp. forming loops. **C**, outcrop overview with *Psammichnites* isp. covering almost the entire top of the layer. **D**, simple subvertical tubes of cf. *Schaubcylindrichnus coronus* with arrows highlighting. **E**, massive sandstone layer densely bioturbated by straight vertical tubes of *Skolithos*.

espécimes estudados. *Psammichnites* é comumente reportado em depósitos de ambientes marinhos rasos e de intermaré de idades entre Cambriano e Carbonífero (Álvaro & Vizcaino, 1999; Mángano *et al.*, 2002a,b).

Schaubcylindrichnus Frey & Howard, 1981

cf. *Schaubcylindrichnus coronus* (Miller, 1995)
(Figura 5D)

Diagnose. Grupos ou feixes distintos e isolados de tubos alinhados e congruentes que normalmente não se ramificam ou se interconectam. Preservado como relevo cheio (Frey & Howard, 1981). Tubos substancialmente cilíndricos, isolados ou agrupados com paredes espessas e duplas (Nara, 2006).

Espécimes. Foram descritos em campo, quatro espécimes na Cachoeira do Apolônio Miranda.

Descrição. Escavações subverticais, cilíndricas, retilíneas a levemente inclinadas e sem *spreite*. Preservada com relevo cheio e parede delimitada e sem ramificação. Seu comprimento é de aproximadamente 10 cm e diâmetro de 1,5 cm. O preenchimento das escavações é maciço e de mesmo material da rocha hospedeira. Alguns espécimes quando observados em planta exibem formas que variam de circulares a achatadas com diâmetro de 1 cm.

Observações. *Schaubcylindrichnus* é um feixe de tubos de habitação (*domichnia*)/alimentação (*fodinichnia*) gerado por organismos vermiformes que se alimentam de materiais em suspensão. A ausência de conexão entre os tubos distingue *Schaubcylindrichnus* de outros tubos “*bundled*” tais como *Phycodes*, *Lanicoidichnia* e *Teichichnus* (Frey & Howard, 1981). A congruência, orientação e espaçamento (aglomeração) de tubos distinguem-no dos espécimes de *Skolithos*, *Terebellina* e *Sabellarifex* (Frey & Howard, 1981). O arranjo dos tubos de *Schaubcylindrichnus* e sua ocorrência na forma de discretos aglomerados indica uma relação genética próxima entre esses componentes, já que bifurcações e interconexões são raras ou ausentes (Frey & Howard, 1981).

Schaubcylindrichnus coronus é a única icnoespécie válida atualmente (Löwemark & Nara, 2010). *S. coronus* apresenta morfologia em três partes diferentes: um feixe de tubos de linhas grossas convergentes construídas uma depois da outra, um funil de alimentação conectado a uma terminação do tubo e um montículo fecal em outra terminação do tubo (Nara, 2006). Estas feições, associadas à presença de paredes espessas e lisas, sugerem que *Schaubcylindrichnus* são estruturas de habitação. Para Nara (2006) e Löwemark & Hong (2006), a variação de tamanho dentro de um único traço sugere que o tubo foi produzido por um organismo em constante crescimento e não por diferentes organismos que habitavam o mesmo substrato. Estes tubos seriam formados provavelmente por vermes poliquetas suspensívoros (Howard & Frey, 1975). *Schaubcylindrichnus* são encontrados em depósitos de ambientes costeiros de alta energia (Frey & Pemberton, 1991; Nara, 2006).

Skolithos Haldeman, 1840

Skolithos isp.
(Figuras 5E–F)

Espécimes. Foram descritos dois espécimes na Vila da Pedra Caída, na Cachoeira do Apolônio Miranda e no Rio Itaquiáçú, ramal da Pedreirinha.

Descrição. Tubos subverticais, levemente curvados, cilíndricos, sem ornamentações ou ramificações; preservado como relevo cheio. Sua parede é lisa, sem estrutura com preenchimento maciço e a mesma composição da rocha hospedeira. Possui diâmetros variados ao longo do tubo sempre próximo a 1 cm e o comprimento é de 20 cm.

Observações. Tubos verticais são estruturas biogênicas muito comuns em depósitos costeiros arenosos e são geralmente produzidos por organismos vermiformes, moluscos, crustáceos e vários outros animais de hábito principalmente suspensívoro ou filtrador.

Skolithos Haldeman, 1840

Skolithos linearis (Haldeman, 1840)
(Figuras 6A–D)

Diagnose. Tubos verticais a suavemente inclinados, cilíndricos a subcilíndricos, retilíneos a levemente curvados, sem ramificações. Apresentam uma parede mais ou menos distinta, com preenchimento homogêneo e relação comprimento-diâmetro muito alta (Knaust *et al.*, 2018).

Espécimes. Foram descritos em campo, vários espécimes na Vila da Pedra Caída, na Cachoeira do Apolônio Miranda e no Rio Itaquiáçú, ramal da Pedreirinha.

Descrição. Estruturas verticais, cilíndricas e retilíneas preservadas com relevo cheio. As paredes são lisas e sem ornamentações e o preenchimento é passivo, do tipo *downward advection*, e similar ao da rocha hospedeira. O diâmetro dos tubos é de 1 cm e o comprimento varia conforme a espessura da camada, podendo chegar a 1 m de comprimento.

Observações. *Skolithos* são considerados tubos de habitação (*domichnia*) encontrados desde ambientes continentais até marinhos profundos, produzidos por diferentes organismos como foronídeos, anelídeos poliquetas e sipúnculos, amphipodas, peixes semelhantes a enguias, anêmonas (Osgood, 1970; Bromley, 1996; Buatois & Mángano, 2011; Knaust *et al.*, 2018), aracnídeos, coleópteros e larvas de insetos (Ratcliffe & Fagerstrom, 1980; Netto, 2007; Nascimento & Netto, 2019). A densidade dos tubos está relacionada a variações na taxa de deposição (Alpert, 1974). A densidade de icnofósseis do icnogênero *Skolithos* variando de baixa a moderada ($ii=3-4$) nos arenitos estudados sugere sedimentação rápida e contínua (McIlory & Garton, 2004). O preenchimento do tipo *downward advection* é gerado pelo colapso de material arenoso inconsolidado que se encontra na saída dos tubos (Buatois & Mángano, 2011).

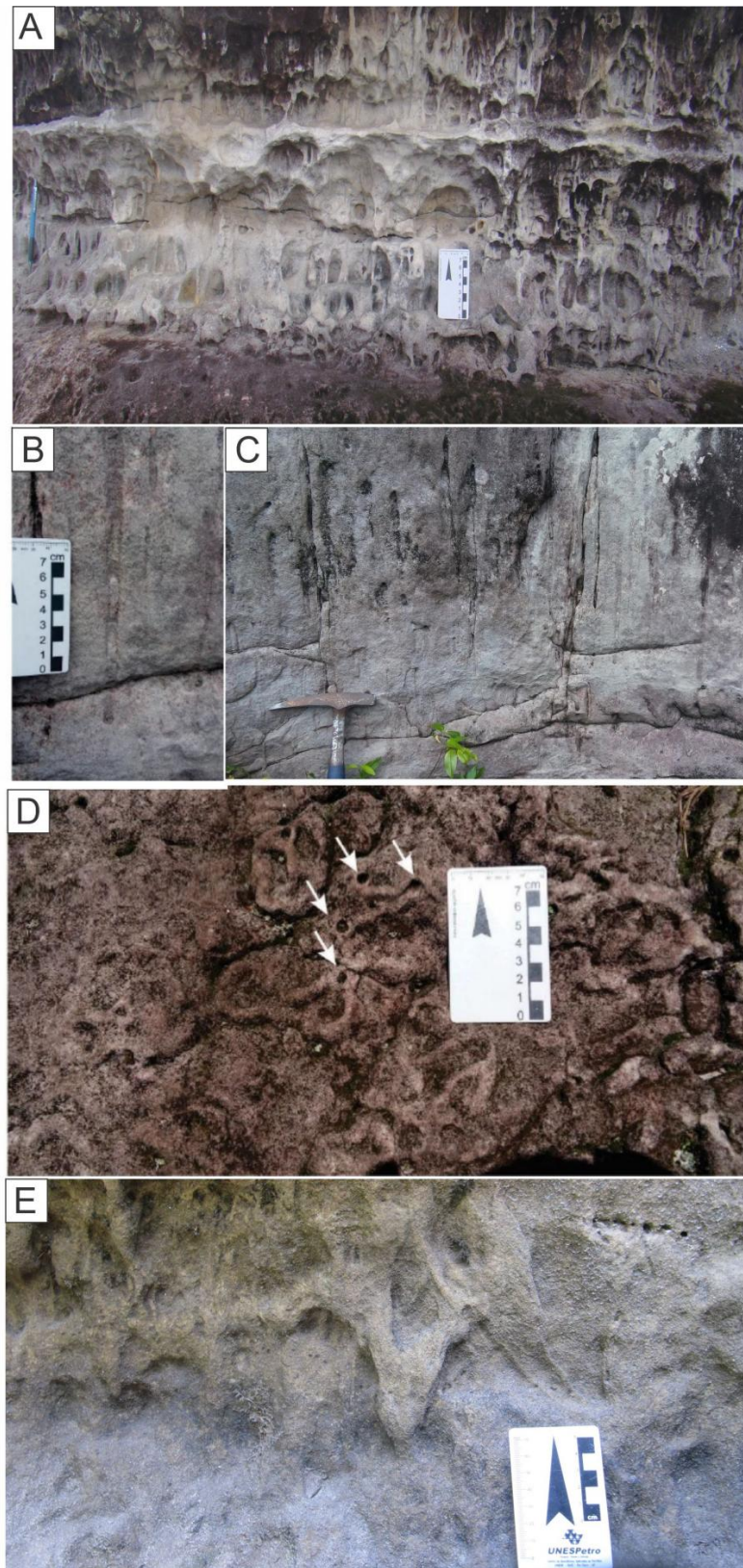


Figura 6. Icnofósseis do Arenito do Guamá. **A**, preenchimento passivo do tipo *downward advection* em tubo vertical de *Skolithos*. **B**, camada de arenito maciço esparsamente bioturbada por *Skolithos*. **C**, vista em planta das aberturas dos tubos verticais de *Skolithos* intersectando tubos horizontais de *Psamichnites* isp. (setas brancas). **D**, tubos em forma de V. **E**, tubo vertical simples indeterminado.

Figure 6. Ichnofossils of the Guamá Sandstone. **A**, passive downward advection filling in *Skolithos*. **B**, Massive sandstone layer sparsely bioturbated by *Skolithos*. **C**, plan view of the openings of *Skolithos* vertical tubes intersecting *Psamichnites* isp. horizontal tubes (white arrows). **D**, V-shaped tube. **E**, undetermined vertical single tube.

Escavações verticais em forma de V
(Figura 6E)

Espécimes. Foram identificados em campo, 10 espécimes concentrados em uma camada de arenito na Cachoeira do Apolônio Miranda.

Descrição. Escavações verticais, em forma de V, retilíneas a suavemente inclinadas em relação ao plano de acamamento e preservadas em relevo cheio; exibe raros intercruzamentos. Em seção perpendicular ao plano de acamamento, apresentam formas elípticas. As escavações exibem cerca de 15 cm de comprimento e 2 cm de diâmetro. O preenchimento é semelhante à rocha hospedeira. Alguns espécimes exibem finas laminações côncavas semelhantes à morfologia em funil das escavações.

Observações. *Conichnus*, *Cylindrichnus*, *Lingulichnus*, *Monocraterion* e *Rosselia* (Buatois & Mángano, 2011), além de estruturas de escape são alguns exemplos de bioturbações que podem exibir formas em V semelhantes às encontradas no Arenito do Guamá. As estruturas observadas no Arenito do Guamá são semelhantes a *Monocraterion* ou uma estrutura relacionada à má preservação de *Rosselia*.

DISCUSSÃO

Icnofácies e Icnofábrica

Nos depósitos estudados foram identificadas assembleias icnofossilíferas com elementos típicos das icnofácies *Cruziana* e *Skolithos*, que são comumente associadas a ambientes marinhos rasos e costeiros (Seilacher, 1967; Pemberton & Frey, 1984; MacEachern & Pemberton, 1992; Pemberton *et al.*, 1992). A presença de camadas com abundantes icnofósseis verticais representados por *Skolithos* isp., *Skolithos linearis*, cf. *Schaubcylindrichnus coronus* e Escavações verticais em forma de V, que são geralmente substituídos em direção ao topo por camadas densamente bioturbadas por tubos horizontais (*Psammichnites* isp.), indicam mudanças periódicas na energia do ambiente e na forma de disponibilidade de alimento (Netto, 2001). Durante períodos de maior energia e alimento disponível em suspensão foram gerados *Skolithos linearis* e cf. *S. coronus*, enquanto que durante pausas ou redução na taxa de sedimentação e aumento da disponibilidade de alimento no substrato foram gerados *Psammichnites* isp. A presença de *S. linearis* também reflete variação na taxa de sedimentação e/ou erosão que exigiu a reconstrução frequente das aberturas e reposicionamento da escavação no substrato (Netto, 2001; Fernandes *et al.*, 2007; Buatois & Mángano, 2011).

A distribuição regular, porém, heterogênea, das camadas bioturbadas (icnofósseis verticais ou horizontais) limitadas por camadas sem bioturbação no Arenito do Guamá sugere períodos de colonização do substrato intercalados com condições deposicionais menos favoráveis para os organismos infaunais, o que pode estar associado à variação regular dos parâmetros físico-químicos do local (Gingras *et al.*, 2011). Em geral, as camadas bioturbadas apresentam um grau de bioturbação muito alto, com pouca preservação das estruturas

primárias; porém, a icnodiversidade continua extremamente baixa.

No afloramento da Vila da Pedra Caída esta distribuição é mais evidente. Os espécimes de *Psammichnites* se concentram no topo das camadas bioturbadas e exibem uma alta densidade de tubos com BPBI igual a 5, que indicam um retrabalhamento do substrato por organismos escavadores entre 60%–100%. Em outras localidades, as camadas bioturbadas com *Psammichnites* apresentam BPBI entre 4 (40%–60%) e 5. Os espécimes de *Skolithos linearis* ocorrem dentro das camadas bioturbadas e o índice de bioturbação varia entre ii 2 e 3 (Figura 7). A associação entre *Skolithos linearis* e *Psammichnites* isp. é observada também no topo das camadas, onde é possível visualizar *Skolithos linearis* intersectando *Psammichnites* isp. e *S. coronus* ocorrendo isolados ou associados a *S. linearis* em camadas bioturbadas de outras localidades com índice de bioturbação (ii) também entre 2 e 3.

Paleoambiente

Os depósitos do Arenito do Guamá são tradicionalmente interpretados como o registro de ambientes costeiros, mais precisamente nas zonas de *foreshore* e *shoreface* (Truckenbrodt & Alves, 1982; Oliveira & Truckenbrodt, 2019). As fácies deposicionais descritas com predominância de quartzo-arenitos subarredondados a arredondados e bem selecionados, com estruturas que indicam a ação de ondas e correntes, sugerem alta maturidade textural e composicional associada a condições de alta a moderada energia em uma região costeira. Oliveira & Truckenbrodt (2019), analisando amostras de testemunho de sondagem, também interpretaram o Arenito do Guamá como maduro em composição e textura.

A presença de arenitos com laminações onduladas e planar com truncamentos de baixo ângulo e pouca bioturbação também sugerem um ambiente de *foreshore*. Zonas de *foreshore* são geralmente caracterizadas pelas condições de alta energia e intenso processo de *swash-backwash*, nas quais são depositados sedimentos bem selecionados com grãos variando de médio a grosso. Devido à alta energia, os depósitos de *foreshore* tendem a ser pouco bioturbados e apresentar baixa icnodiversidade (MacEachern & Pemberton, 1992; Pemberton *et al.*, 2001). Localmente, zonas com intensa bioturbação por organismos detritívoros, como as observadas nas fácies de arenitos maciços, são comuns (Pemberton *et al.*, 2001; Buatois & Mángano, 2011). Estruturas verticais profundas utilizadas como moradia por organismos suspensívoros, como os produtores de *Skolithos*, encontrados em abundância no Arenito do Guamá, são elementos típicos da zona de *foreshore* e *shoreface* superior principalmente porque refletem a abundância de alimento em suspensão e a constante sedimentação ocasionada pela ação de ondas e correntes (MacEachern & Pemberton, 1992; Pemberton *et al.*, 2001; Buatois & Mángano, 2011).

O registro de depósitos de *shoreface* no Arenito do Guamá se restringem às fácies de arenito com estratificação cruzada acanalada que indicam a migração de dunas subaquosas pela ação de correntes e ondas. Depósitos de *shoreface* superior são

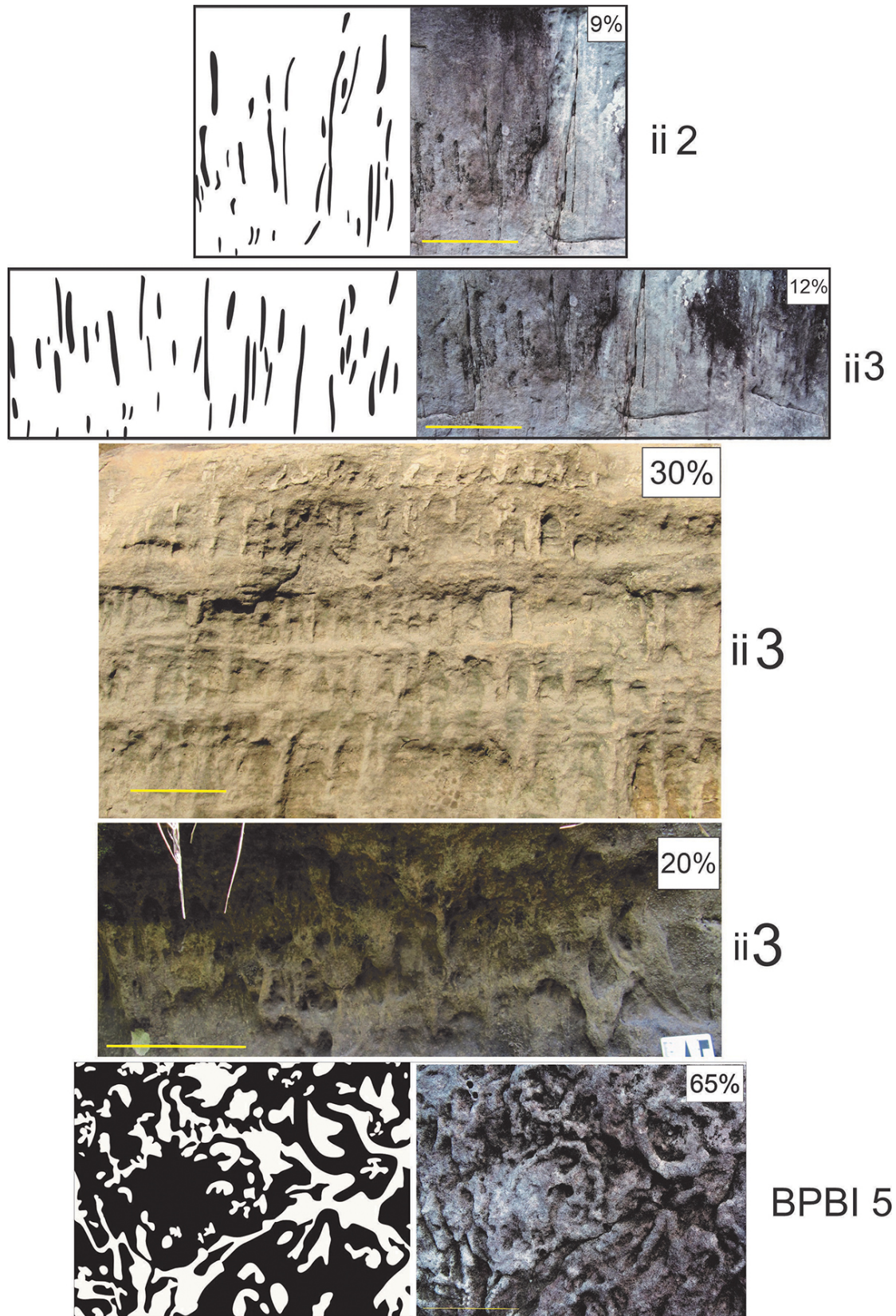


Figura 7. Variações do índice de bioturbação (*ii*) nos depósitos estudados. Os *Skolithos linearis* com índice de bioturbação entre 2 e 3 (9%–30%); os *Schaubcylindrichnus coronus*, tubos em forma de V e tubos verticais indeterminados possuem um *ii* = 3 (~20%); as camadas com *Psammichnites* isp. apresentam BPBI igual a 5 (65%). Escalas = 20 mm.

Figure 7. Variations in the bioturbation index (*ii*) in the studied deposits. *Skolithos linearis* with a bioturbation index between 2 and 3 (9%–30%); *Schaubcylindrichnus coronus*, V-shaped tubes, and undetermined vertical tubes have *ii* = 3 (~20%); the layers with *Psammichnites* isp. present BPBI equal to 5 (65%). Scale bars = 20 mm.

comumente não bioturbados e semelhantes às icnoassembléias de *foreshore* (Buatois & Mángano, 2011).

Correlação com as formações Nhamundá e Ipu

O Arenito do Guamá está exposto em uma área restrita, dificultando a determinação de sua relação estratigráfica com as outras unidades da Plataforma Bragantina que afloram próximos a esses corpos arenosos. Vasquez *et al.* (2008) descrevem a existência de um arco com aproximadamente 230 km de comprimento e direção NW-SE passando na região dos afloramentos em São Miguel do Guamá e Irituia; esse arco foi descrito a partir de dados gravimétricos que indicaram um alto estrutural. O Arenito do Guamá apresenta um contato discordante tanto na porção inferior com outras unidades pré-cambrianas e superior com a Formação Itapecuru de idade cretácea.

A idade do Arenito do Guamá ainda é muito discutida, assim como o seu papel na evolução da Plataforma Bragantina e sua relação com as unidades sedimentares que ocorrem nas bacias do Amazonas e Parnaíba (Truckenbrodt & Alves, 1982; Caputo, 1984; Martins *et al.*, 2007). Correlações com as formações Ipu da Bacia do Parnaíba e Nhamundá da Bacia do Amazonas, que são de idade siluriana, foram propostas por Caputo (1984) e Caputo & Lima (1984). Em geral, o Arenito do Guamá é considerado um registro destas formações, que foram separadas apenas no Triássico com o desenvolvimento da Bacia do Marajó (Oliveira & Truckenbrodt, 2019). A Plataforma Bragantina foi marcada por sistemas transcorrentes, apresentando estruturas principais de direção NE-SW e por falhas normais E-W e NW-SE gerando subsidência de blocos tectônicos e formação de grabens e semigrabens orientados na direção NW-SE (Costa *et al.*, 1996, 2002; Rossetti & Góes, 2004; Soares Jr. *et al.*, 2011). Estes eventos favoreceram a preservação deste registro do Siluriano na Plataforma Bragantina.

Segundo Caputo (1984), o Arenito do Guamá poderia ser a porção distal dos depósitos glaciais da Formação Ipu. Devido à ausência de fósseis, a idade da Formação Ipu foi estimada por relações estratigráficas entre o final do Ordoviciano e início do Siluriano (Caputo & Lima, 1984; Barrera *et al.*, 2020). Este intervalo corresponde ao período em que o Gondwana Oeste estava sob influência de uma extensa geleira (Caputo & Crowell, 1985; Cuervo *et al.*, 2018; Assis *et al.*, 2019; Barrera *et al.*, 2020). Assim, a Formação Ipu registra esta glaciação na Bacia do Parnaíba na forma de extensos e espessos depósitos fluviais e glaciomarinhos que afloram principalmente na Serra de Ibiapaba, Estado do Ceará (Assis *et al.*, 2019; Barrera *et al.*, 2020). Viana *et al.* (2010) descrevem uma diversa assembleia de icnofósseis na Formação Ipu que aflora na Serra de Ibiapaba e nos morrotes de Santana do Acaraú (Tabela 2). Os depósitos com a icnofácies *Skolithos* que ocorrem no topo da sucessão são os que mais se aproximam das características faciológicas e icnológicas do Arenito do Guamá. Estes depósitos são arenitos grossos, silicificados, esbranquiçados e exibem icnofósseis que representam estruturas de alimentação e habitação, porém com maior diversidade que a do Arenito do Guamá,

sendo composto pelos icnogêneros *Arenicolites*, *Circulichnis*, *Conichnus*, *Cylindrichnus*, *Furnasichnus* (atualmente considerado sinônimo júnior de *Didymaulyponomos*; Sedorko *et al.*, 2017), *Palaeophycus*, *Planolites* e *Skolithos*, além de nove icnogêneros não identificados (Viana *et al.*, 2010). Contudo, a porção distal da Formação Ipu descrita por Viana *et al.* (2010) pouco se parece com as fácies litorâneas do Arenito do Guamá, que são em geral quartzarenitos finos a médios, bem selecionados. Desta forma, o Arenito do Guamá seria apenas cronocorrelato à Formação Ipu, com os seus depósitos costeiros estando mais distantes da influência da sedimentação glacial.

A Formação Nhamundá apresenta fácies deposicionais muito semelhantes às do Arenito do Guamá (exceto pela presença de diamictitos e arenitos deformados), principalmente as do ambiente de *foreshore*. A partir das fácies descritas por Soares *et al.* (2005) é possível fazer uma correlação direta com o Arenito do Guamá: tais fácies são de caráter costeiro assim como as fácies descritas no Arenito do Guamá. Além disso, apresentam também características petrográficas semelhantes, como a dissolução de sílica fortemente presente na Formação Nhamundá e que também é observada nas camadas do Arenito do Guamá. Outra semelhança importante são as paleocorrentes do Arenito do Guamá que apontam para nordeste, assim como as paleocorrentes encontradas na Formação Nhamundá.

A presença de níveis intensamente bioturbados e a baixa diversidade também são características da Formação Nhamundá (Nogueira *et al.*, 1999; Soares *et al.*, 2005). Contudo, a assembleia icnofossilífera do Arenito do Guamá é um pouco mais diversificada que a da Formação Nhamundá. *Arthropycus alleghaniensis*, *A. lateralis*, *Lockeia* isp. e *Skolithos linearis* são encontrados na Formação Nhamundá (Nogueira *et al.*, 1999; Soares *et al.*, 2005; Rindsberg & Martin, 2003). *S. linearis* é o único icnofóssil em comum entre as duas unidades, mas não é marcador estratigráfico do Siluro-Devoniano, como o é *Arthropycus* (e.g., Seilacher, 2007; Sedorko *et al.*, 2017). Dessa forma, se o Arenito do Guamá tem uma relação com as formações silurianas das bacias do Amazonas e Parnaíba, como apontado por Caputo & Lima (1984), então águas de degelo poderiam se misturar as águas marinhas nas regiões costeiras da Amazônia durante o Siluriano. Contudo, a presença abundante de *Psammichnites* e *Skolithos*, além da ocorrência *Schaubcylindrichnus* indicam ambientes marinhos rasos de alta energia e sem variações na salinidade (Frey & Pemberton, 1991; Álvaro & Vizcaino, 1999; Knaust *et al.*, 2018). As características faciológicas que indicam variações na taxa de sedimentação e erosão, também podem explicar a baixa icnodiversidade. Neste caso, as estruturas mais superficiais poderiam não ter se preservado devido a erosão que ocorre na interface água-sedimento em ambientes costeiros.

Considerando que as formações Ipu e Nhamundá registram o período em que as bacias do Amazonas e Parnaíba estavam conectadas durante o Siluriano por um mar epicontinental e que ambas estavam sob influência do avanço e recuo de geleiras, a semelhança faciológica e icnológica do

Tabela 2. Relação dos icnogêneros descritos nos depósitos silurianos do Arenito do Guamá e das formações Nhamundá e Ipu.
Table 2. Ichnogenera described for the Silurian deposits of the Guamá Sandstone and for the Nhamundá and Ipu formations.

Idade	Paleoambiente	Formação Nhamundá	Arenito do Guamá	Formação Ipu
Siluriano (Llandovery/Wenlock)	Glacial	Sem icnofósseis	Não há registro deste ambiente	Sem icnofósseis
Siluriano (Llandovery)	Foreshore/Praia	Skolithos	Escavações verticais em forma de V	<i>Arenicolites</i> <i>Circulichnis</i> <i>Conichnus</i> <i>Cylindrichnus</i> <i>Furnasichnus</i> <i>Palaeophycus</i> <i>Planolites</i> <i>Skolithos</i> 9 icnogêneros indefinidos
	Shoreface Estuário	<i>Arthropycus Lockeia</i>	Sem icnofósseis	
Ordoviciano	Fluvial	Não há registro deste ambiente	Não há registro deste ambiente	Sem icnofósseis

Arenito do Guamá com a Formação Nhamundá e a porção intermediária da Formação Ipu, este pode ser também de idade siluriana. Desta forma, um importante hiato erosivo pode ser sugerido na Plataforma Bragantina entre o Arenito do Guamá e a Formação Barreiras de idade miocena, com duração de aproximadamente 420 Ma.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas regiões de São Miguel do Guamá e Irituia, nordeste do estado do Pará, foram identificadas três icnoespécies e dois traços indeterminados no Arenito do Guamá, sendo que destes somente *Skolithos* já havia sido reportado anteriormente, aumentando o número de icnofósseis previamente descritos para esta unidade. Estes icnofósseis registram as atividades de alimentação, moradia e locomoção de organismos vermeformes e moluscos. Estes organismos habitavam uma região costeira de águas rasas e de alta energia, na qual foi possível a definição das icnofácies *Cruziana* e *Skolithos*. A abundância local (entre 30–100% do substrato bioturbado), associada a baixa icnodiversidade e aos dados faciológicos sugerem que fatores energéticos relacionados a dinâmica costeira influenciaram a colonização do substrato e a preservação dos icnofósseis.

A icnoassembleia do Arenito do Guamá mostra características semelhantes às de outras unidades silurianas do norte do Brasil (Formações Ipu e Nhamundá), apesar de compartilharem entre si apenas o icnogênero *Skolithos*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à A.C.B. Bezerra Junior; G.N. Salomão, e G.R. Romero, por todo auxílio e ajuda em campo. Agradecemos também aos revisores M. Verde e R. Netto por todos os comentários e sugestões para a melhora da versão final.

REFERÊNCIAS

- Almaraz, J.S.U. 1977. *Aspectos geoquímicos e ambientais dos calcários da Formação Pirabas – Estado do Pará*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Ph.D. thesis, 272 p.
- Alpert, S.P. 1974. Systematic review of the genus *Skolithos*. *Journal of Paleontology*, **48**:661–669.
- Álvaro, J.J. & Vizcaino, D. 1999. Biostratigraphic significance and environmental setting of the trace fossil *Psammichnites* in the Lower Cambrian of the Montagne Noire, France. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **170**:821–828.
- Amorim, K.B. 2016. *Paleoambiente, Paleogeografia e Isótopos de Carbono e Oxigênio de Depósitos Carbonáticos Miocenos da Plataforma Bragantina, Nordeste do Estado do Pará, Brasil*. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Ph.D. thesis, 130 p.
- Assis, A.P.; Porto, A.L.; Schmitt, R.S.; Linol, B.; Medeiros, S.R.; Correa Martins, F. & Silva, D.S. 2019. The Ordovician-Silurian tectono-stratigraphic Evolution and palaeogeography of Eastern Parnaíba Basin, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **95**:102241. doi:10.1016/j.jsames.2019.102241
- Barrera, I.A.R.; Nogueira, A.C.R. & Bandeira, J. 2020. The Silurian glaciation in the eastern Parnaíba Basin, Brazil: palaeoenvironment, sequence stratigraphy and insights for the evolution and paleogeography of West Gondwana. *Sedimentary Geology*, **406**:105714. doi:10.1016/j.sedgeo.2020.105714
- Bromley, R.G. 1996. *Trace Fossils: biology, taphonomy and applications*. 2ª ed. London, Chapman and Hall, 361 p.
- Buatois, L.A. & Mángano, M.G. 2011. *Ichnology: organism-substrate interactions in space and time*. 1ª ed. New York, Cambridge University Press, 358 p.
- Caputo, M.V. 1984. *Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology, and paleogeography of northern basins of Brazil*. University of California, Ph.D. thesis, 583 p.
- Caputo, M.V. & Crowell, J.C. 1985. Migration of glacial centers across Gondwana during Paleozoic Era. *GSA Bulletin*, **96**:1020–1036. doi:10.1130/0016-7606(1985)96<1020:MOG CAG>2.0.CO;2
- Caputo, M.V. & Lima, E.C. 1984. Estratigrafia, idade e correlação do Grupo Serra Grande-Bacia do Parnaíba. In: CONGRESSO

- BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, 1984. *Anais*, Rio de Janeiro, SBG, v. 2, p. 740–753.
- Costa, J.B.S.; Bemerguy, R.L.; Hasui, Y.; Borges, M.S.; Ferreira Jr., C.R.P.; Bezerra, P.E.L.; Costa, M.L. & Fernandes, J.M.G. 1996. Neotectônica da região amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. *Geonomos*, 4:23–43.
- Costa, J.B.S.; Hasui, Y.; Bemerguy, R.L.; Soares-Júnior, A.V. & Villegas, J.M.C. 2002. Tectonics and paleogeography of the Marajó Basin, northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 74:519–531. doi:10.1590/S0001-37652002000300013.
- Costa, J.L.; Araujo, A.A.F.; Villas Boas, J.M.; Faria, C.A.S.; Silva Neto, C.S. & Wanderley, V.J.R. 1977. *Projeto Gurupi: relatório final de etapa*, Serviço Geológico do Brasil, CPRM, 258 p.
- Cuervo, H.D.R.; Soares, E.A.A.; Caputo, M.V. & Dino, R. 2018. Sedimentology and stratigraphy of new outcrops of Silurian glaciomarine strata in the Presidente Figueiredo region, northwestern margin of the Amazonas Basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 85:43–56. doi:10.1016/j.jsames.2018.04.023
- Della Fávera, J.C. 2001. *Fundamentos de Estratigrafia Moderna*. 1ª ed. Rio de Janeiro, EdUERJ/Petrobrás, 264 p.
- Droser, M.L. & Bottjer, D.J. 1986. A semiquantitative field classification of ichnofabric. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56:558–559.
- Fernandes, A.C.S.; Carvalho, I.S. & Agostinho, S. 2007. Icnofósseis: conceitos gerais. In: I.S. Carvalho & A.C.S. Fernandes (eds.) *Icnologia*, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 8–23.
- Frey, R.W. & Howard, J.D. 1981. *Conichnus* and *Schaubcylindrichnus*: redefined trace fossils from the Upper Cretaceous of the Western Interior. *Journal of Paleontology*, 55:800–804.
- Frey, R.W. & Pemberton, G. 1991. The ichnogenus *Schaubcylindrichnus*: morphological, temporal, and environmental significance. *Geological Magazine*, 128:595–602.
- Gingras, M.K.; MacEachern, J.A. & Dashtgard, S.E. 2011. Process ichnology and the elucidation of physico-chemical stress. *Sedimentary Geology*, 237:115–134. doi:10.1016/j.sedgeo.2011.02.006
- Howard, J.D. & Frey, R.W. 1975. Estuaries of the Georgia coast, U.S.A.: sedimentology and biology. Part II. Regional animal-sediment characteristics of Georgia estuaries. *Senckenbergiana Maritima*, 7:33–103.
- Knaust, D.; Thomas, R.D.K. & Curran, H.A. 2018. *Skolithos linearis* Haldeman, 1840 at its early Cambrian type locality, Chickies Rock, Pennsylvania: Analysis and designation of a neotype. *Earth-Science Reviews*, 185:15–31. doi:10.1016/j.earscirev.2018.05.009
- Kraatz-Koschlau, K.A. & Huber, J. 1900. Zwischen Ocean und Guamá: Beitrag zur Kenntnis des Staates Pará. *Memórias do Museu Paraense de Historia Natural e Ethnographica*, 2:19–39.
- Löwemark, L. & Hong, E. 2006. *Schaubcylindrichnus formosus* isp. nov. in Miocene sandstones from Northeastern Taiwan. *Ichnos*, 13:267–276. doi:10.1080/10420940600843757
- Löwemark, L. & Nara, M. 2010. Morphology, ethology and taxonomy of the ichnogenus *Schaubcylindrichnus*: Notes for classification. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 297:184–187. doi:10.1016/j.palaeo.2010.07.028
- MacEachern, J.A. & Pemberton, S.G. 1992. Ichnological aspects of Cretaceous shoreface successions and shoreface variability in the Western Interior Seaway of North America. In: S.G. Pemberton (ed.) *Applications of Ichnology to Petroleum Exploration: A Core Workshop*, SEPM – Society for Sedimentary Geology, nº 17, p. 57–84.
- Mángano, M.G.; Buatois, L.A. & Rindsberg, A.K. 2002a. Carboníferos *Psammichnites*: Systematic re-evaluation, taphonomy and autecology. *Ichnos*, 9:1–22. doi:10.1080/10420940190034175
- Mángano, M.G.; Buatois, L.A.; West, R.R. & Maples, C.G. 2002b. Ichnology of Pennsylvanian equatorial tidal flat: The Stull Shale Member at Waverly, eastern Kansas. *Bulletin of the Kansas Geological Survey*, 245:1–133.
- Martins, P.S.; Truckenbrodt, W. & Moura, C.A.V. 2007. Proveniência do Arenito Guamá (Siluriano Inferior) com base em petrografia e datação de grãos de zircão por evaporação de Pb. In: L.T. Rosa-Costa; E.L. Klein & E.P. Viglio (eds.) *Contribuição à Geologia da Amazônia*, Sociedade Brasileira de Geologia – Núcleo Norte, vol. 5, p. 39–48.
- Martins, T.C.M.; Soares, J.L. & Bezerra Júnior, A.C.B. 2017. Traços fósseis e fácies sedimentares do Arenito Guamá, nas regiões de Irituia e São Miguel do Guamá, Estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 15, 2017. *Resumos expandidos*, Belém, SBG, p. 396–399.
- McIlroy, D. & Garton, M. 2004. A worm's eye view of the Early Palaeozoic sea floor. *Geology Today*, 20:224–230. doi:10.1111/j.1365-2451.2004.00485.x
- Miller, M.F. & Smail, S.E. 1997. A semiquantitative field method for evaluating bioturbation on bedding planes. *Palaios*, 12:397–396. doi:10.2307/3515338
- Moizinho, G.R.; Vieira, L.C.; Santos, R.V.; Nogueira, A.C.R.; Dantas, E.L. & Roddaz, M. 2022. Provenance of Miocene-Pleistocene siliciclastic deposits in the Eastern Amazonia coast (Brazil) and paleogeographic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 587:110799. doi:10.1016/j.palaeo.2021.110799
- Nara, M. 2006. Reappraisal of *Schaubcylindrichnus*: A probable dwelling/feeding structure of a solitary funnel feeder. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240:439–452. doi:10.1016/j.palaeo.2006.02.015
- Nascimento, D.L. & Netto, R.G. 2019. *Skolithos serratus* in paleosols: paleobiological, paleoecological, and paleobiogeographical insights. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 530:152–162. doi:10.1016/j.palaeo.2019.05.044
- Netto, R.G. 2001. Icnologia e Estratigrafia de Sequências. In: H.J.P.S. Ribeiro (org.) *Estratigrafia de Sequências: Fundamentos e aplicações*, UNISINOS, p. 219–259.
- Netto, R.G. 2007. *Skolithos*-dominated piperock in non-marine environments: An example from the Triassic Caturrita Formation, Southern Brazil. In: R.G. Bromley; L.A. Buatois; M.G. Mángano; J.F. Genise & R.N. Melchor (eds.) *Sediment-Organism Interactions: a Multifaceted Ichnology*, SEPM - Society for Sedimentary Geology, p. 109–121.
- Nogueira, A.C.R.; Truckenbrodt, W. & Soares, E.A.A. 1999. O icnogênero *Arthropycus* de depósitos sublitorâneos da Formação Nhamundá (Siluriano inferior) da Bacia do Amazonas, região de Presidente Figueiredo. *Revista Brasileira de Geociências*, 29:135–140.
- Oliveira, R.S. & Truckenbrodt, W. 2019. Provenance and diagenesis of Guamá Sandstone, northeastern Pará, Brazil: A Silurian link between the Amazonas and Parnaíba basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 90:265–281. doi:10.1016/j.jsames.2018.12.014
- Osgood, R.G. 1970. Trace fossils of the Cincinnati area. *Palaeontographica Americana*, 6:281–444.

- Pemberton, S.G. & Frey, R.W. 1984. Ichnology of storm-influenced shallow marine sequence: Cardium Formation (Upper Cretaceous) at Seebe, Alberta. In: D.F. Stott & D.J. Glass (eds.) *The Mesozoic of middle North America*, Canadian Society of Petroleum Geologists, p. 281–304.
- Pemberton, S.G.; MacEachern, J.A. & Frey, R.W. 1992. Trace fossil facies models: environmental and allostratigraphic. In: R.G. Walker & N.P. James (eds.) *Facies Models: response to sea level change*, 1ª ed., Geological Association of Canada, p. 47–70.
- Pemberton, S.G.; Spila, M.; Pulham, A.J.; Saunders, T.; MacEachern, J.A.; Robbins, D. & Sinclair, I.K. 2001. *Ichnology and Sedimentology of Shallow to Marginal Marine Systems. Ben Nevis and Avalon Reservoirs, Jeanne d'Arc Basin*. St. John's, Geological Association of Canada Petroleum Geology, Short Course 15, 341 p.
- Ratcliffe, B.C. & Fagerstrom, J.A. 1980. Invertebrate lebensspuren of Holocene floodplains: their morphology, origin and paleoecological significance. *Journal of Paleontology*, **54**:614–630.
- Reineck, H.-E. & Singh, I.B. 1973. *Depositional sedimentary environments: with reference to terrigenous clastics*. 1ª ed. Berlin, Springer-Verlag, 437 p.
- Rindsberg, A.K. & Martin, A.J. 2003. *Arthropycus* in the Silurian of Alabama (USA) and the problem of compound trace fossils. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **192**:187–219. doi:10.1016/S0031-0182(02)00685-5
- Rossetti, D.F. 2001. Late Cenozoic sedimentary evolution in Northeastern Pará, Brazil, within the context of sea-level changes. *Journal of South America Earth Science*, **14**:77–89. doi:10.1016/S0895-9811(01)00008-6
- Rossetti, D.F. & Góes, A.M. 2004. *O Neógeno da Amazônia Oriental*. 1ª ed. Belém, Coleção Friedrich Katzer, Museu Paraense Emílio Goeldi, 225 p.
- Sedorko, D.; Netto, R.G.; Savrda, C.E.; Assine, M.L.; Tognoli, F.M.W. 2017. Chronostratigraphy and environment of Furnas Formation by trace fossil analysis: Calibrating the lower Paleozoic Gondwana realm in the Paraná Basin (Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **487**:307–320. doi:10.1016/j.palaeo.2017.09.016
- Seilacher, A. 1967. Bathymetry of trace fossils. *Marine Geology*, **5**:413–428.
- Seilacher, A. 2007. *Trace Fossil Analysis*. 1ª ed. Berlin, Springer, 226 p.
- Soares, E.A.A.; Truckenbrodt, W. & Nogueira, A.C.R. 2005. Fácies litorâneas e subglaciais da Formação Nhamundá (Siluriano Inferior), região de Presidente Figueiredo, Bacia do Amazonas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências Naturais*, **1**:89–116.
- Soares Júnior, A.V.; Costa, J.B.S. & Hasui, Y. 2008. Evolução da margem Atlântica Equatorial do Brasil: três fases distensivas. *Geociências-UNESP*, **27**:427–437.
- Soares Júnior, A.V.; Hasui, Y.; Costa, J.B.S. & Machado, F.B. 2011. Evolução do rifteamento e paleogeografia da margem Atlântica Equatorial do Brasil: Triássico ao Holoceno. *Geociências-UNESP*, **30**:669–692.
- Truckenbrodt, W. & Alves, R.J. 1982. Sobre a petrologia do Arenito do Guamá, região de São Miguel do Guamá, NE do Estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Geologia*, **27**:1–22.
- Vasquez, M.L.; Rosa-Costa, L.T.; Silva, C.M.G. & Klein, E.L. 2008. Compartimentação Tectônica. In: M.L. Vasquez & L.T. Rosa-Costa (orgs.) *Geologia e recursos minerais do estado do Pará: Sistemas de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do estado do Pará. Escala 1:1.000.000*, CPRM, p. 39–112.
- Viana, M.S.S.; Oliveira, P.V.; Sousa, M.J.G.; Barroso, F.R.G.; Vasconcelos, V.A.; Melo, R.M.; Lima, T.A.; Oliveira, G.C. & Chaves, A.P.P. 2010. Ocorrências icnofossilíferas do Grupo Serra Grande (Siluriano da Bacia do Parnaíba), nordeste de Estado de Ceará. *Revista de Geologia*, **23**:77–89.
- Walker, R.G. 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: R.G. Walker & N.P. James (eds.) *Facies models: response to sea level change*, 1ª ed., Geological Association of Canada, p. 1–14.

Received in 01 February, 2022; accepted in 14 May, 2022.