

Gênese de fácies e processo hidrológico dominante em depósitos quaternários colúviais no semiárido de Alagoas: uma abordagem microsedimentológica

Facies genesis and dominant hydrological process in Quaternary deposits of colluvial in the semi-arid of Alagoas – a microsedimentological approach

Adelaine Firmino da Silva¹; Julio Cesar Paisani²; Flávia Jorge de Lima³

¹ Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Núcleo de Estudos PaleoAmbientais (NEPA), Francisco Beltrão/PR, Brasil. Email: adelaine_silva@outlook.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9806-8914>

² Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Núcleo de Estudos PaleoAmbientais (NEPA), Francisco Beltrão/PR, Brasil. Email: Julio.Paisani@unioeste.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8911-6477>

³ Universidade Federal de Alagoas, Campus Sertão, Delmiro Gouveia/AL, Brasil. Email: flavia.lima@delmiro.ufal.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4176-5854>

Resumo: Foram estudados colúvios dos setores distal, mediano e proximal de encostas colúviais no semiárido de Alagoas, com ênfase em sedimentos lama arenosa. Embora em campo seja frequentemente classificada como maciça, levantou-se a hipótese de que esses sedimentos correspondem a sucessões de camadas delgadas com fábrica laminada, formadas por escoamento superficial. O objetivo do estudo foi esclarecer a gênese das fácies e os processos hidrológicos dominantes, especialmente para a lama arenosa. Três perfis estratigráficos representativos de cada setor foram analisados por meio de descrições de campo e granulometria, complementado pela microsedimentologia para sedimentos lama arenosa. Os resultados indicam que todos os setores apresentam sucessões semelhantes de fácies: lama arenosa laminada, lama cascalhenta maciça e cascalho lamoso maciço, com predomínio da primeira. A microsedimentologia evidenciou que a aparente homogeneidade observada em campo é superficial, revelando laminações formadas por fluxos de alta-densidade-rasos originados do escoamento superficial. A microestrutura galáxia mostrou-se um marcador da turbulência interna dos fluxos. O escoamento superficial de alta-densidade foi o processo hidrológico predominante nos últimos 15.000 anos.

Palavras-chave: Colúvio; Microestrutura; Escoamento superficial.

Abstract: colluvial deposits from the distal, medial, and proximal sectors of colluvial hillslopes in the semi-arid region of Alagoas were studied, with a focus on sandy mud sediments. Although frequently classified in the field as massive, these sediments are hypothesized to correspond to successions of thin, laminated layers formed by overland flow. The aim of the study was to clarify the genesis of the facies and the dominant hydrological processes, particularly for sandy mud. Three representative stratigraphic profiles from each sector were analyzed through field descriptions and grain size analysis, complemented by microsedimentology for sandy mud sediments. The results indicate that all sectors display similar facies successions: laminated sandy mud, massive muddy gravel, and massive silty gravel, with the first predominating. Microsedimentology revealed that the apparent homogeneity observed in the field is superficial, exposing laminations formed by shallow high-density flows originating from overland flow. The galaxy microstructure proved to be a marker of internal turbulence within the flows. High-density overland flow was the predominant hydrological process over the last 15,000 years.

Keywords: Colluvium; Microstruture; Overland flow.

Recebido: 18/01/2026; Aceito: 03/06/2026; Publicado: 30/08/2026.

1. Introdução

Depósitos de colúvios são comuns em encostas de maciços cristalino e cristalofílicos, bem como nos rebordos de planaltos sedimentares no ambiente semiárido da região Nordeste do Brasil (CLAUDINO-SALES; FALCÃO SOBRINHO, 2024). Na região, estudos identificaram sedimentos do tipo lama arenosa intercalados com conglomerados de matriz tanto suportada quanto de clastos suportados, ambos maciços (CORRÊA, 2001; CORRÊA; LIRA; TAVARES 2020; LIMA et al., 2017; FONSÊCA; GOIS et al., 2021; LIMA et al., 2023). Em contraste, lama arenosa laminada é raramente reportada, provavelmente devido a dificuldade em identificar essa fábrica diretamente em campo.

Por outro lado, datações por luminescência opticamente estimulada (LOE) estabelecidas na base e topo de depósitos fácies lama arenosa maciça revelam diferenças de idades que podem atingir dezenas de milhares de anos. Isso sugere que a homogeneidade textural e a fábrica maciça dos depósitos de colúvio possam ser aparente, diante da inerente limitação da observação direta em campo. Dessa forma, os depósitos poderiam ser, na realidade, sucessões de camadas delgadas laminadas. Tal interpretação desafia a visão tradicional, que associa a fábrica maciça observada em campo a eventos de movimento de massa, questionando o processo hidrológico dominante.

Com base nisso, levantou-se a hipótese de que tais depósitos possam, de fato, corresponder a sucessões de camadas delgadas com fábrica laminada, com origem vinculada ao escoamento superficial. Para testar essa hipótese, foram estudados depósitos de colúvio dos setores distal, mediano e proximal de encostas coluviais no semiárido de Alagoas, utilizando-se prioritariamente a descrição de seções delgadas na perspectiva sedimentológica, aqui designada de microsedimentologia (análise com microscópio petrográfico – MENZES; VAN DER MEER, 2018; PAISANI; MANICA, 2025). Essa abordagem permitiu ainda interpretar o comportamento dinâmico dos agentes deposicionais. Em síntese, o presente trabalho teve como objetivo investigar a gênese de fácies e os processos hidrológicos responsáveis pelos depósitos quaternários de encostas coluviais no semiárido de Alagoas, com ênfase especial em camadas lama arenosa.

2. Métodos

2.1 Cenário geográfico da área de estudo

A área de estudo se encontra na porção oeste do estado de Alagoas (Figura 1), onde estão situados os maciços de Água Branca e Mata Grande. Os maciços são feições geomorfológicas que se destacam na paisagem semiárida pela sua amplitude topográfica que favorece à ocorrência de clima com temperaturas relativamente amenas (média 22^o) e maior índice pluviométrico (média >800 mm) em relação ao seu entrono (média ± 550 mm). Os topos desses maciços (convexos) passam a se comportar como áreas fornecedoras de materiais para as encostas coluviais. Os maciços são circundados por pedimentos, ambos mantidos, sobretudo, por rochas cristalinas e cristalofílicas da Província Borborema (CPRM, 2021), recobertos pela Caatinga e recortados majoritariamente por uma rede hidrográfica de regime intermitente.

2.2 Procedimentos

Os afloramentos de depósitos de colúvios com sucessões sedimentares contendo lama arenosa em modelados de encosta coluvial foram previamente identificados por ocasião do mapeamento da macrogeomorfologia nos Maciços de Água Branca e Mata Grande, semiárido de Alagoas (SILVA et al., no prelo). Dos afloramentos levantados, selecionou-se três com maior potencial para descrever seus depósitos em perfis estratigráficos, designados Baixa do Galo (setor distal), Preguiçoso (setor mediano) e Batuque (setor proximal), conforme os nomes das comunidades locais em que ocorrem (Figura 1). O afloramento Preguiçoso foi descrito inicialmente por Silva, Corrêa; Lima (2021), sendo aqui reanalisado usando a microsedimentologia.

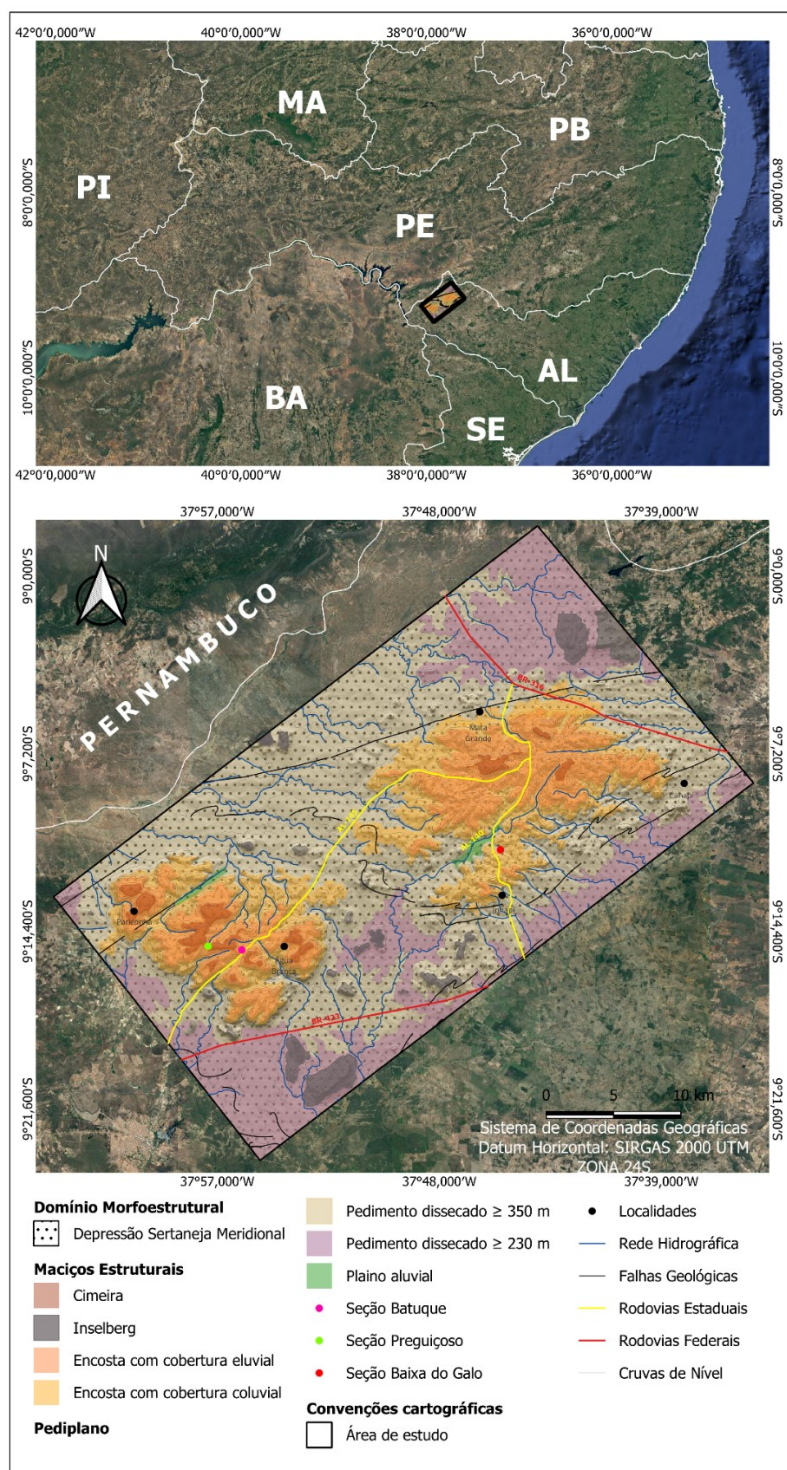


Figura 1 – Localização dos depósitos de colúvio dos setores distal (Baixa do Galo), mediano (Preguiçoso) e proximal (Batuque) das encostas colúviais no contexto das unidades geomorfológicas dos maciços de Água Branca e Mata Grande, semiárido de Alagoas, Nordeste do Brasil.

Fonte: Silva (2025).

Para individualização de camadas foi aplicado o critério litológico, fundamentado em descrições de campo (espessura, limite superior, textura, cor e fábrica - organização interna), tendências granulométricas (diagrama granulométrico) e análise microsedimentológica. No caso de camadas lama arenosa, a fábrica observada em campo foi aferida com a análise microsedimentológica e as tendências granulométricas contribuíram para aferir os limites verticais e identificar discontinuidades em litologias lama arenosa. As tendências se basearam nos percentuais de tamanho de grão da matriz (argila, areia, grânulo e seixo - escala WENTWORTH, 1922). Os diagramas resultaram de um total de 83 amostras coletadas a cada 10 cm de profundidade e determinadas em laboratório pelo método de pipetagem e peneiramento com separação via úmida. A soma dos referidos critérios descritivos permitiram identificar fácies, cujos códigos foram simplificados levando em consideração a litologia e estrutura adaptando-se critérios e códigos propostos por Ghibaudo (1992) para depósitos de fluxo de gravidade de sedimentos subaquosos. Além disso, compilou-se um total de sete idades por LOE obtidas por Silva, Côrrea; Lima (2021) e Silva (2025) de modo a se compreender o intervalo temporal das sucessões estratigráficas.

A fábrica das camadas lama arenosa foi analisada com base na técnica de microsedimentologia aplicada em um total de 22 seções delgadas. Quanto à descrição, cabe destacar a inexistência de uma nomenclatura universalmente consolidada e de critérios descritivos específicos para a análise microsedimentológica de depósitos de encosta (Paisani; Manica, 2025). Assim, neste trabalho, às descrições microsedimentológicas consideraram a individualização de laminações e suas organizações externa (limite superior baseado em CAMPBELL, 1967) e interna (tipo de matriz, composição das frações fina e grossa, microestrutura das frações fina e grossa), assim como modificações sin- e pós-deposicionais (poros, microfeições induzidas pela água e grau de pedalidade).

Para comparar a ocorrência das microestruturas da fração grossa, bem como identificar assinatura microsedimentológica do processo hidrológico de sedimentação, procedeu-se a morfometria das microestruturas da fração grossa. A ocorrência de microestruturas da fração grossa foi calculada aplicando-se o índice concentração de microestruturas (IMci) proposto por Paisani e Manica (2025). O parâmetro %Mi foi estimado por observação visual de imagem das seções delgadas comparando com diagrama de Fitzpatrick (1980), enquanto os parâmetros Ai e Ats foram calculados sobre imagem utilizando-se da ferramenta *macro curve meter* do *software* CorelDRAW2020. Para cada ocorrência de microestrutura do tipo galáxia (Apêndice 1) foi extraído: diâmetro médio ($d_{\text{médio-galáxia}}$), diâmetro máximo ($d_{\text{máximo-galáxia}}$), bem como às amplitudes dos valores do índice concentração de microestruturas ($\Delta\text{IMci-galáxia}$), do diâmetro médio ($\Delta d_{\text{médio-galáxia}}$) e do diâmetro máximo ($\Delta d_{\text{máximo-galáxia}}$). Os parâmetros $d_{\text{médio-galáxia}}$ e $d_{\text{máximo-galáxia}}$ foram extraídos dos valores de área. Enfim, os índices e parâmetros morfométricos (IMci, $d_{\text{médio-galáxia}}$, $d_{\text{máximo-galáxia}}$, $\Delta\text{IMci-galáxia}$, $\Delta d_{\text{médio-galáxia}}$ e $\Delta d_{\text{máximo-galáxia}}$) foram comparados entre si diante de correlação estatística (teste-T).

3. Resultados

3.1 Estratigrafia

Os perfis estratigráficos analisados têm de 200 cm (Setor Proximal) a 390 cm (Setor Distal) de espessura com litologias: lama arenosa, lama cascalhenta e cascalho lamoso (Figuras 2a, 3a, 4a). A fábrica observada em campo é maciça para todas essas litologias, porém, a análise microsedimentológica revelou que a lama arenosa é laminada (laminação horizontal) (item 3.2). A matriz dos depósitos são oxidicas com valor e croma da cor variando em detrimento dos teores de hematita, goethita e matéria orgânica (5YR 3/3, 4/2, 5/2, 5/8, 6/2, 6/4; 7.5YR 4/3, 4/6, 5/8, 6/8) (Figura 5).

O número de camadas dos perfis estratigráficos estão muito próximos entre si, sendo 12 para o Setor Distal e 11 para os Setores Mediano e Proximal, cujas espessuras variam de 10 a 50 cm (Figuras 2a, 3a, 4a). Desse quantitativo, 7 a 10 correspondem a camadas lama arenosa e de 1 a 2 são camadas lama cascalhenta e cascalho lamoso em cada perfil estratigráfico, cuja espessura variam de 10 a 50 cm. O limite superior gradual domina a sobreposição de camadas lama arenosa dos Setores Distal e Proximal, enquanto o limite erosional prevalece no Setor Mediano. Quanto a cronologia das camadas, as idades por LOE dos três afloramentos variam de 560 ± 40 a 15.070 ± 1.100 anos AP (Figuras 2a, 3a, 4a).

As camadas dos setores de encosta analisados foram agrupadas em três fácies: lama arenosa laminada (laminação horizontal - SMd), lama cascalhenta maciça (GMm) e cascalho lamoso maciço (MGm) (Figura 5). No Setor Mediano percebe-se sucessão de fácies SMd e MGm no intervalo de tempo > 3.400 e > 10.200 anos (camadas I a VI) e sucessão de fácies GMm e SMd de 3.400 anos até o presente (camadas VII a XI) (Figuras 2a, 3a, 4a). No Setor Proximal, essas tendências parecem se repetir com menor número de intercalação de fácies, sendo a primeira sucessão no intervalo de tempo > 3.525 e > 15.070 anos (I a VI) e a segunda sucessão no intervalo de 3.525 anos até o presente (VII a XI). No Setor

Distal, a sucessão de fácies se restringe à única ocorrência de GMm e SMD de 5.000 anos até o presente. Quanto a espessura das fácies proporcional a espessura do depósito, SMD é proeminente em todos os setores analisados (Figura 6).

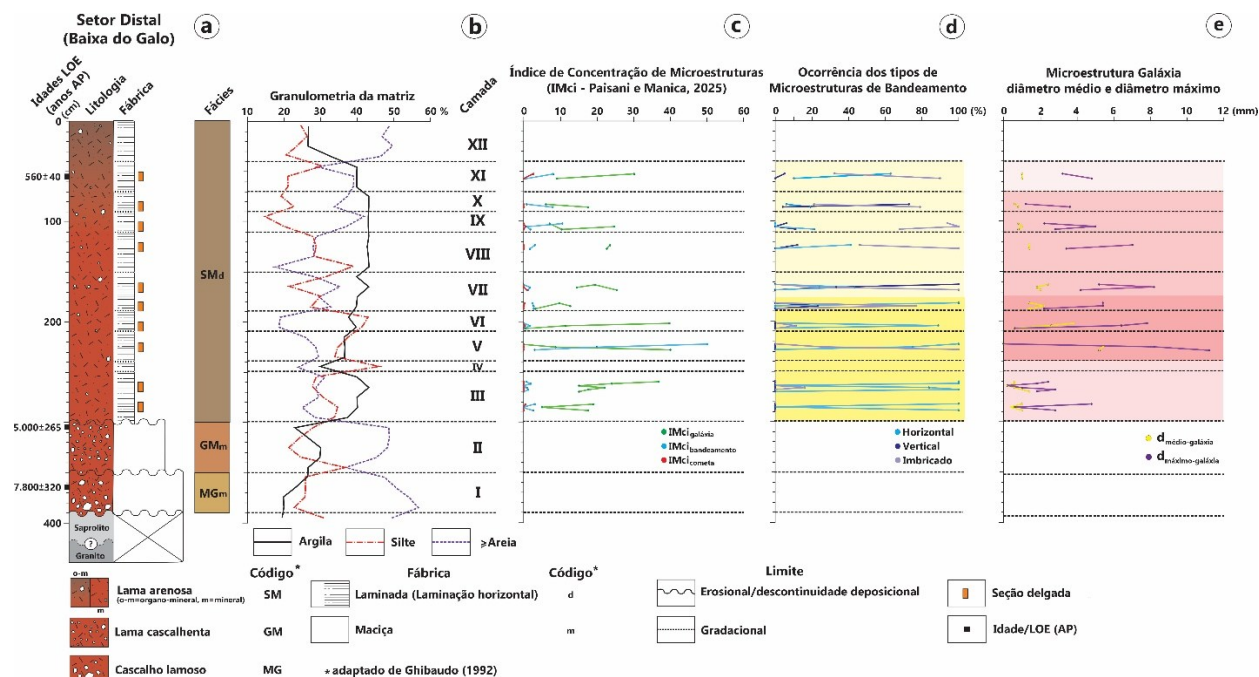


Figura 2 – Seção colunar Baixa do Galo individualizando idades por LOE, litologia, fábrica, fácies sedimentares e localização de seções delgadas e parâmetros micromorfométricos.

Fonte: Silva (2025).

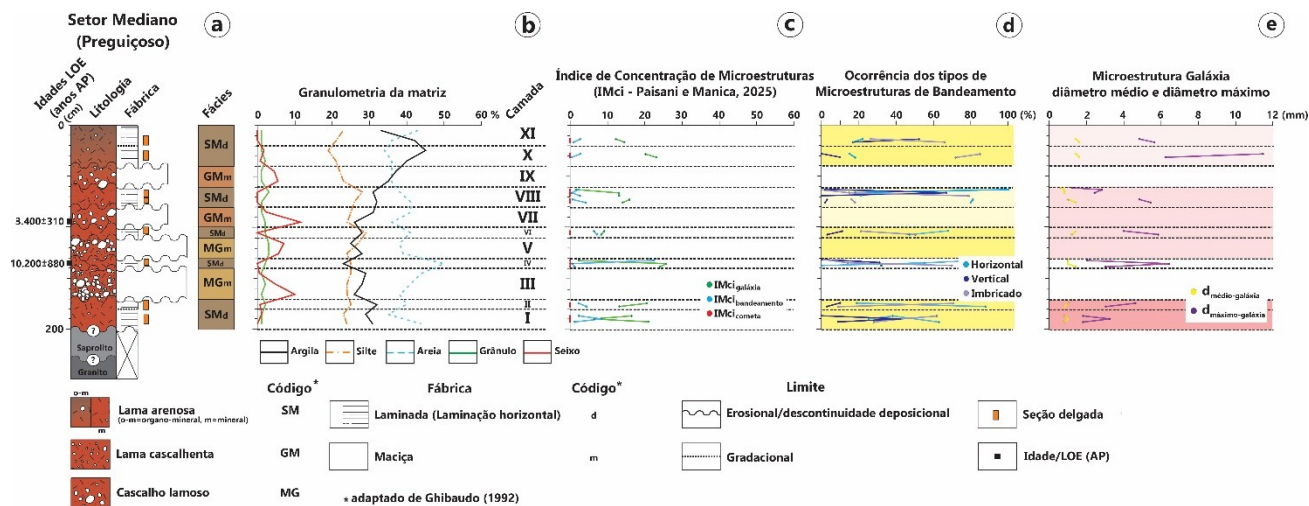


Figura 3 – Seção colunar Preguiçoso individualizando idades por LOE, litologia, fábrica, fácies sedimentares e localização de seções delgadas e parâmetros micromorfométricos.

Fonte: Silva (2025) e idades de LOE obtidas por Silva et al (2021).

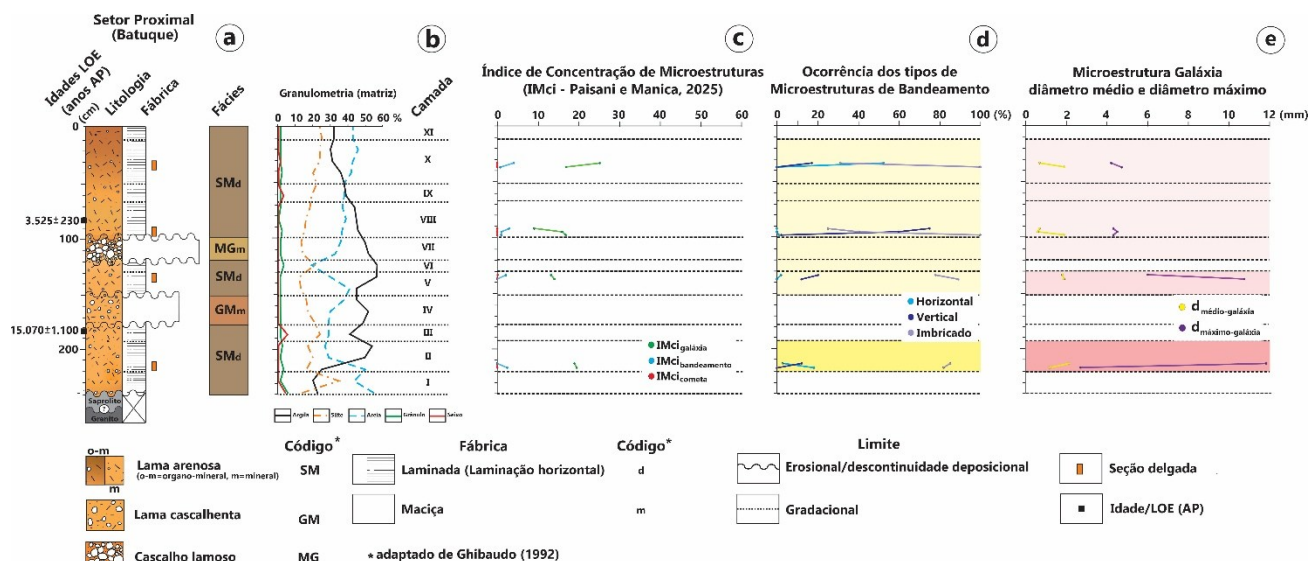


Figura 4 – Seção colunar Batuque individualizando idades por LOE, litologia, fábrica, fácies sedimentares e localização de seções delgadas e parâmetros micromorfológicos.

Fonte: Silva (2025).

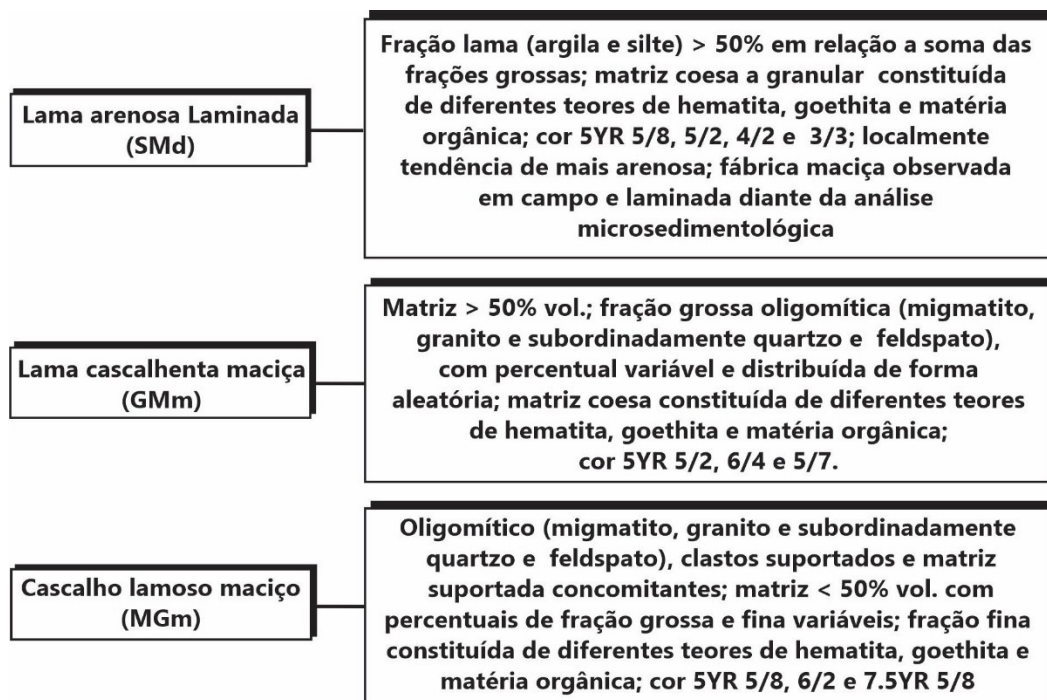
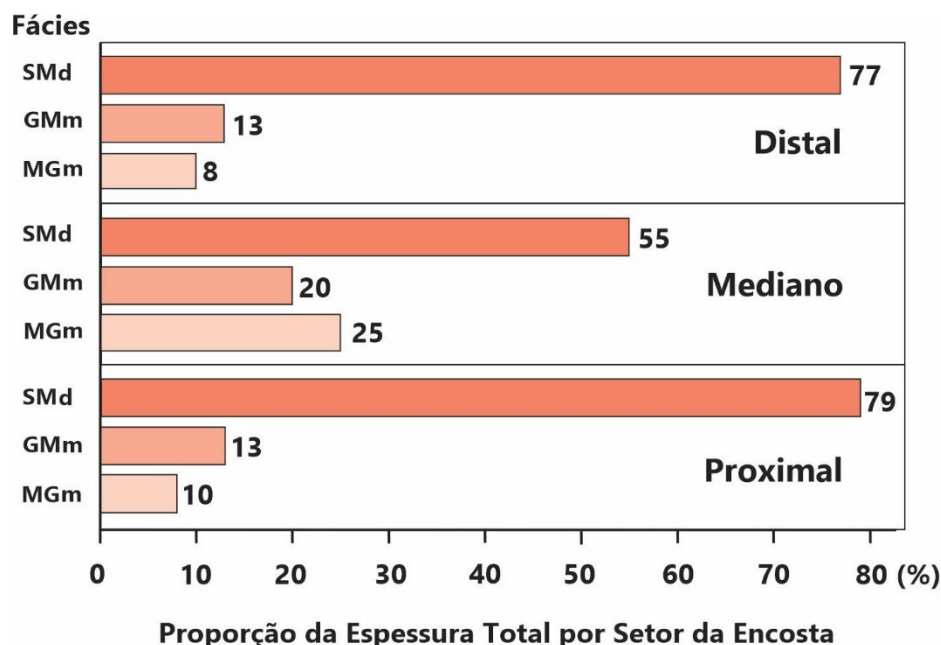


Figura 5 – Descrição de fácies.

Fonte: Autores (2025).



Proporção da Espessura Total por Setor da Encosta
 Figura 6 – Proporção de espessura total de cada fácies para os Setores Distal, Mediano e Proximal.
 Fonte: Silva (2025).

3.2 Microsedimentologia

3.2.1 Descrição qualitativa

A fácies lama arenosa individualizada nos Setores Distal, Mediano e Proximal tem propriedades similares, porém com ocorrência heterogênea. A similaridade é, sobretudo, quanto a fábrica (organização interna) laminada (laminação horizontal), cujas laminações têm espessura média de 13 mm (Figura 7). Os limites superiores são do tipo ondulado-paralelo-contínuo, dominante no Setor Distal, e não-paralelo-ondulado-contínuo, dominante nos Setores Proximal e Mediano, respectivamente. A matriz é densa > granular e localmente granular > densa com mistura de minerais primários e pedosedimentos tipo pápula, nódulo e agregado de solo (PAISANI et al., 2023a) (Apêndice 1). As laminações são delimitáveis pela distribuição das microestruturas da fração grossa, com microestruturas tipo galáxia (minerais primários > pedosedimentos), bandeamento (horizontal, vertical e imbricado), cometa, empilhamento de grãos e randômica (PAISANI et al., 2023a) (Apêndice 1). A microestrutura randômica é comum, a cometa é rara, o empilhamento de grãos ocorre localmente e a galáxia é dominante (Figura 7). A microestrutura da fração fina (Apêndice 1) é homogênea, composta de salpicada, indiferenciada e localmente poroestriada e granoestriada. Microfeições decorrentes de transformação pós-deposicional dos tipos poros (fissuras, cavidades e canais biogênicos) e tipo induzidas pela água (depleção, ou impregnação, de oxi-hidróxidos de ferro na matriz e em poros e em grãos da fração grossa) têm fraca ocorrência. Nos locais de matriz granular a porosidade intergranular é dominante, como esperado.

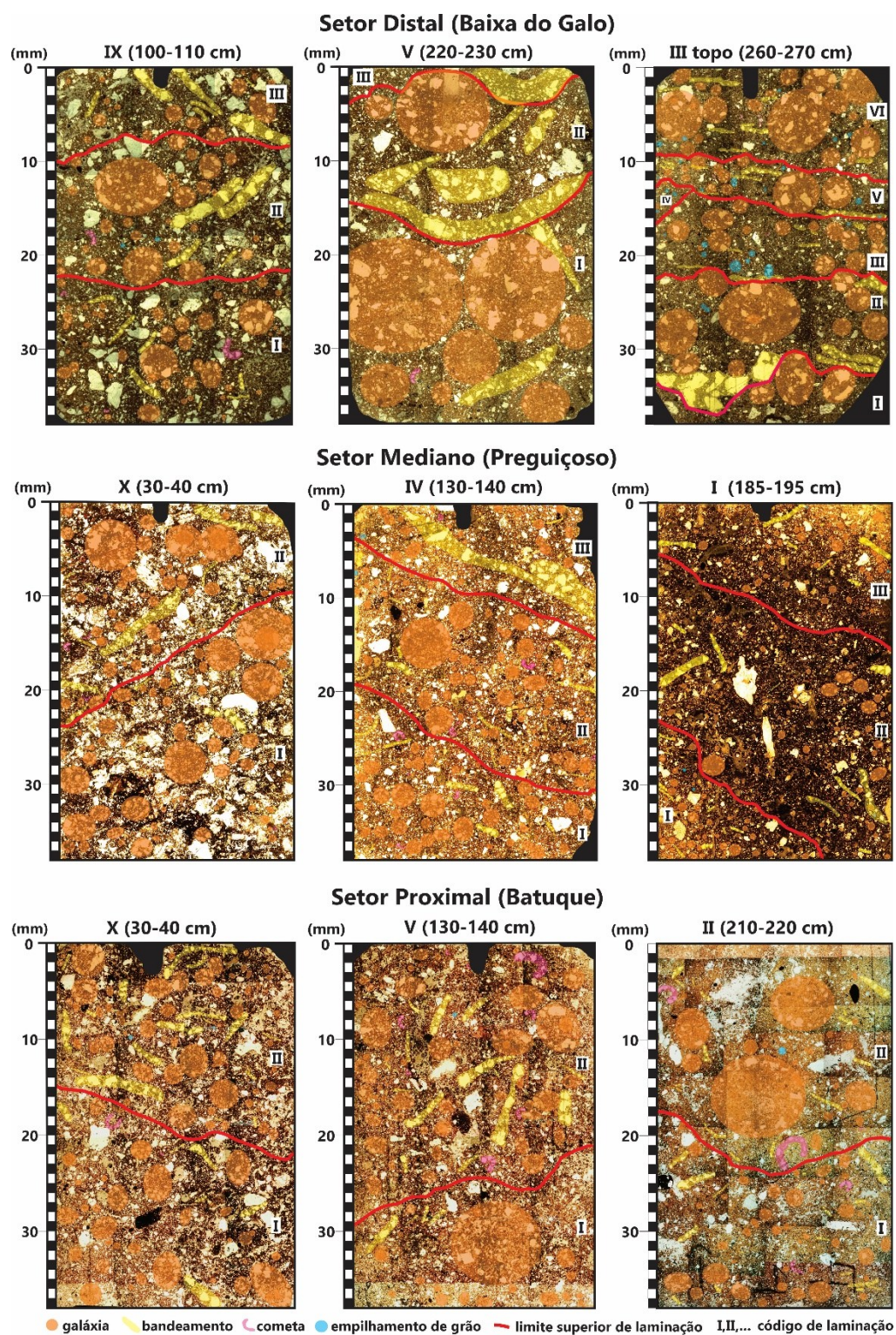


Figura 7 – Microestruturas da fácies SMd.

Fonte: Silva (2025).

3.2.2 Descrição quantitativa

3.2.2.1 IMciGaláxia, Bandeamento e Cometa, $d_{\text{médio-galáxia}}$ e $d_{\text{máximo-galáxia}}$

A quantificação de microestruturas sedimentológicas vinculadas a fração grossa é importante como chave-interpretativa dos processos de sedimentação dos depósitos de colúvio. O Índice de Concentração de Microestruturas (IMci), proposto por Paisani e Manica (2025), foi aplicado para avaliar o grau de ocorrência das microestruturas sedimentares mais recorrentes no registro estratigráfico e com maior significado processual. Destacam-se, nesse contexto, as microestruturas galáxia (IMci_{galáxia}), bandeamento (IMci_{bandeamento}) e cometa (IMci_{cometa}), cujos valores variaram de 0,1 a 50 no Setor Distal, e apresentando menores amplitudes nos Setores Proximal e Distal (0,1 à 26). Os maiores valores relativos desses índices correspondem a microestrutura galáxia nos três perfis estratigráficos, com exceção da camada V do Setor Distal, onde predomina bandeamento (Figura 2c, 3c e 4c). O bandeamento horizontal é predominante nas camadas III-VII do Setor Distal e I-VIII do Setor Mediano. Nas demais camadas prevalece bandeamento imbricado, o qual é dominante nas camadas do Setor Proximal (Figura 2d, 3d e 4d). O diâmetro médio ($d_{\text{médio-galáxia}}$) das microestruturas galáxia variou entre 0,2 e 5,4 mm, 0,6 e 1,6 mm e 0,6 e 2,1 mm para os Setores Distal, Mediano e Proximal, respectivamente (Figura 2e, 3e e 4e). Já o diâmetro máximo ($d_{\text{máximo-galáxia}}$) situa-se entre 0 e 11,2 mm, 1,4 e 11,2 mm e 2,7 e 11,8 mm, nos referidos setores. De modo geral, as microestruturas galáxia apresentam variação interna de $d_{\text{máximo-galáxia}}$ dentro de uma mesma camada, mas revelam tendências distintas de aumento do diâmetro máximo com a profundidade nos três perfis estratigráficos analisados.

3.2.2.2 Correlações estatísticas IMciGaláxia, $d_{\text{médio-galáxia}}$ e $d_{\text{máximo-galáxia}}$

A correlação estatística entre o conjunto dos índices microsedimentológicos IMci_{Galáxia}, $d_{\text{médio-galáxia}}$ e $d_{\text{máximo-galáxia}}$ das camadas dos perfis estratigráficos dos Setores Distal, Mediano e Proximal é importante para verificar o grau de dependências entre essas variáveis e o grau de atuação dos processos de sedimentação conforme os respectivos setores de encosta. A comparação entre IMci_{galáxia} e IMci_{bandeamento} de todas as seções delgadas para os três perfis estratigráficos mostra ausência de correlação estatística (R^2 0,04; r -0,19; valor- p <0,001) entre eles (Figura 8a). Por outro lado, a amplitude do IMci_{galáxia} ($\Delta\text{IMci}_{\text{galáxia}}$ = diferença entre máximo e mínimo IMci_{galáxia}) registra aumento progressivo das camadas do Setor Proximal (Batuque) para o Setor Distal (Baixa do Galo) ($\Delta\text{IMci}_{\text{galáxia-Proximal}}$ 16, $\Delta\text{IMci}_{\text{galáxia-Mediano}}$ 24, e $\Delta\text{IMci}_{\text{galáxia-Distal}}$ 40). A amplitude do $d_{\text{máximo-galáxia}}$ segue essa tendência de aumento progressivo das camadas do Setor Proximal (Batuque) para o Setor Distal (Baixa do Galo) ($\Delta d_{\text{máximo-galáxia-Proximal}}$ 9,1, $\Delta d_{\text{máximo-galáxia-Mediano}}$ 9,8, e $\Delta d_{\text{máximo-galáxia-Distal}}$ 11). A comparação entre esses índices mostra correlação estatística (R^2 0,99; r 0,99; valor- p >0,05) (Figura 8e). Apenas a amplitude do $d_{\text{médio-galáxia}}$ não segue essa tendência, sendo menor para as camadas do Setor Mediano ($\Delta d_{\text{médio-galáxia-Mediano}}$ 1, $\Delta d_{\text{médio-galáxia-Proximal}}$ 1,5 e $\Delta d_{\text{médio-galáxia-Distal}}$ 5,2), mas o maior valor é registrado para as camadas do Setor Distal (Baixa do Galo), contudo, denota significativa correlação estatística quando comparadas $\Delta\text{IMci}_{\text{galáxia}}$ e $\Delta d_{\text{médio-galáxia}}$ (Figura 8f). No geral, as camadas do Setor Distal (Baixa do Galo) têm os maiores valores de $\Delta\text{IMci}_{\text{galáxia}}$, $\Delta d_{\text{máximo-galáxia}}$ e $\Delta d_{\text{médio-galáxia}}$. Enfim, existe uma correlação positiva significativa entre $d_{\text{máximo-galáxia}}$ e $d_{\text{médio-galáxia}}$ de microestruturas galáxia e entre todas as camadas dos três setores (R^2 0,60; r 0,76; valor- p <0,001) (Figura 8b). Por outro lado, comparando IMci_{galáxia} com $d_{\text{máximo-galáxia}}$ e $d_{\text{médio-galáxia}}$ percebe-se ausência de correlação tanto entre IMci_{galáxia} e $d_{\text{médio-galáxia}}$ (R^2 0,22; r 0,47; valor- p >0,05) quanto entre IMci_{galáxia} e $d_{\text{máximo-galáxia}}$ (R^2 0,19; r 0,44; valor- p <0,01) (Figura 8c,d).

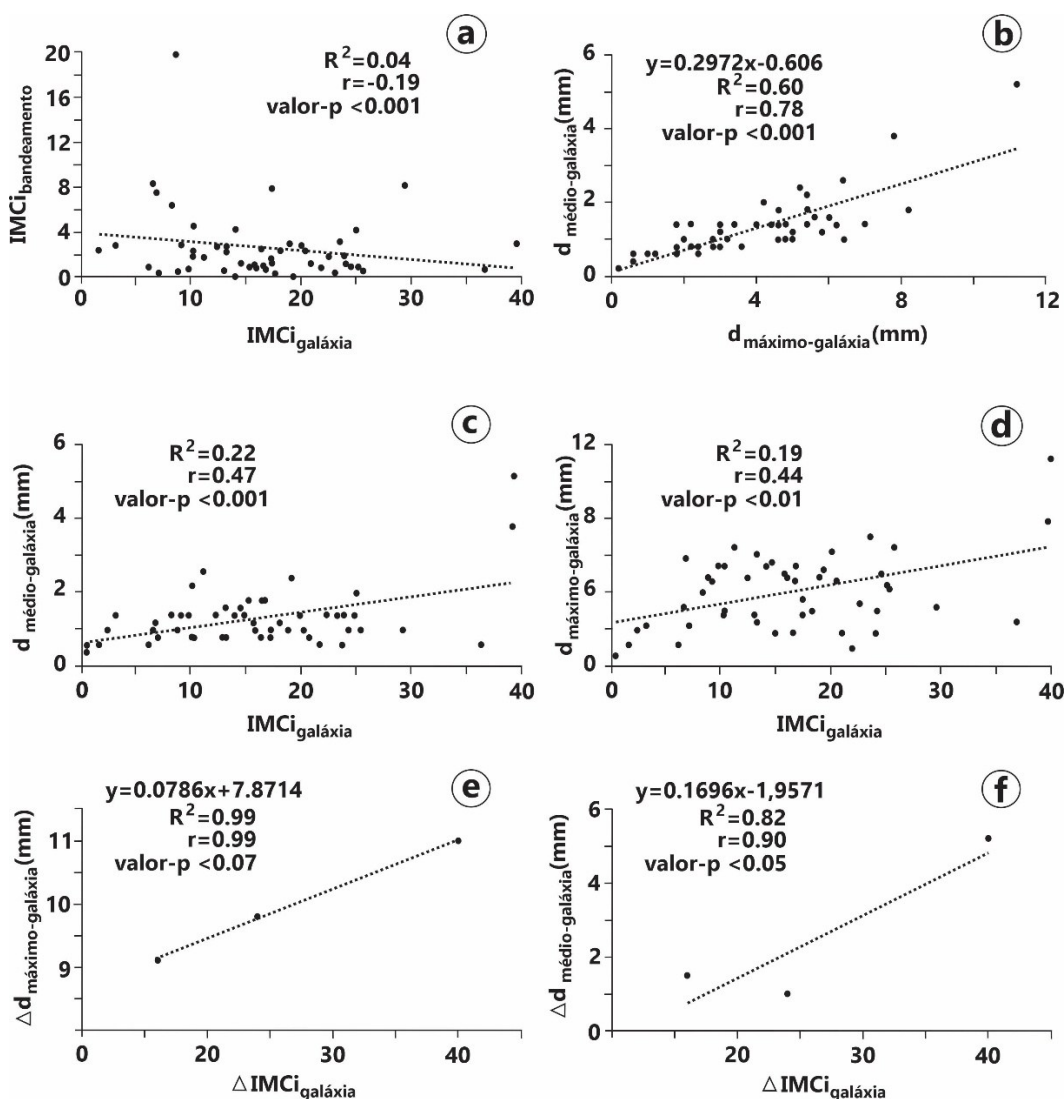


Figura 8 – Correlações estatísticas entre $IMCi_{galáxia}$ e $IMCibandeamento$ (a), $d_{máximo-galáxia}$ e $d_{médio-galáxia}$ (b), $IMCi_{galáxia}$ e $d_{médio-galáxia}$ (c), $IMCi_{galáxia}$ e $d_{máximo-galáxia}$ (d), $\Delta IMCi_{galáxia}$ e $\Delta d_{máximo-galáxia}$ (e) e $\Delta IMCi_{galáxia}$ e $\Delta d_{médio-galáxia}$ (f).

Fonte: Silva (2025).

4. Discussão

4.1 Gênese de fácies

4.1.1 Lama arenosa laminada

A fácies lama arenosa é composta por camadas com laminação horizontal e espessura média de 20 cm, cujas organizações internas foram identificadas por meio da análise microsedimentológica. A homogeneidade textural e a fábrica maciça observadas em campo são, portanto, aparentes, refletindo as limitações inerentes a esse tipo de observação. A lama arenosa laminada predomina nos registros dos perfis estratigráficos dos três setores, variando entre 7 a 10 camadas, com maior recorrência no Setor Distal (Baixa do Galo) (Fig.2-4). A análise microsedimentológica das laminações revelou propriedades semelhantes, porém com ocorrência heterogênea. Essa similaridade refere-se, sobretudo, a espessura média das laminações (13 mm), aos limites superiores ondulado-paralelo-contínuos no Setor Distal e não-paralelo-ondulado-

contínuos nos Setores Proximal e Mediano, a predominância de matriz densa > granular, localmente granular > densa e a mistura de minerais primários e pedosedimentos. Se destaca o fato de a microestrutura da fração grossa ser dominada por galáxia (minerais primários > pedosedimentos), seguida por bandejamento horizontal > imbricado > vertical, com microestrutura cometa rara. Soma-se a essas propriedades a homogeneidade da microestrutura da fração fina, composta por salpicada, indiferenciada e, localmente, poroestriada e granoestriada, além da fraca transformação pós-deposicional dada ausência de pedalidade.

O processo de sedimentação dessas fácies foi similar para os Setores Proximal (Batuque), Mediano (Preguiçoso) e Distal (Baixa do Galo) das encostas colúviais, sendo caracterizado por fluxos de alta-densidade predominantemente coesivos (matriz densa) e, ocasionalmente, não coesivos (matriz granular), com espessura compatível com a formação de cada laminação (PAISANI et al., 2023a). Assim, pressupondo que a espessura média dos fluxos originais podem ser inferidas a partir da espessura média das laminações (13 mm), estima-se que a profundidade desses fluxos tenha atingido cerca de $90,8 \pm 26$ mm (Apêndice 2), o que indica a ocorrência de fluxos de alta-densidade-rasos (PAISANI et al., 2023a,b). Diante do exposto, os fluxos de alta-densidade-rasos, responsáveis pela fácies lama arenosa laminada, se originaram pelo escoamento superficial (processo hidrológico) com alta concentração de sedimentos desde a área fonte. Essa interpretação é sustentada pelo fato do Setor Proximal (Batuque) já apresentar características microsedimentológicas semelhantes às observadas nos demais setores, ainda que tenha diferenças de concentração.

As microestruturas galáxia e bandejamento (horizontal, vertical e imbricado), especialmente a galáxia, constituem propriedades essenciais para a compreensão da dinâmica de fluxos de alta-densidade-rasos gerados a partir do escoamento superficial. A microestrutura galáxia é predominante, enquanto bandejamento é menos frequente e a cometa é rara, conforme denota o Índice de Concentração de Microestruturas (IMci). Embora as microestruturas galáxia, cometa e bandejamento possam ocorrer concomitantemente, apenas galáxia e cometa compartilha, presumivelmente, mecanismos de formação semelhantes. A microestrutura cometa apresenta morfologia circular análoga à galáxia, contudo com arqueamento incompleto dos grãos de areia, refletindo a disponibilidade limitada de fração grossa necessária para completar a morfologia circular. Assim, supõe-se que o mecanismo formador de galáxia e cometa seja o mesmo, a turbulência (PAISANI et al., 2023a,b), enquanto o bandejamento possui mecanismo independente. Esta independência é corroborada pela ausência de correlação estatística entre $IMci_{galáxia}$ e $IMci_{bandejamento}$, indicando que essas microestruturas sedimentares se originam por mecanismos distintos.

A ocorrência de microestrutura galáxia indica significativa deformação interna em fluxo de alta-densidade-raso, a qual é controlada pela turbulência, um mecanismo já reconhecido em fluxos carregado de sedimentos argilo-arenosos e areno-argilosos (SUMNER; TALLING; AMY, 2009), e que também regula a formação de microestrutura galáxia em fluxos transicionais a alta-densidade tanto de matriz densa quanto granular (PAISANI et al., 2023a,b). Nos fluxos coesivos, a turbulência atua rompendo a rede estrutural contínua formada pela agregação de partículas coloidais, reduzindo a tensão de cisalhamento e a viscosidade do fluxo (SUMNER; TALLING; AMY, 2009). Dessa forma, a microestrutura galáxia configura-se como um indicador-chave da atuação da turbulência na deformação de fluxos de alta-densidade-rasos.

Os diferentes graus de turbulência entre laminações de camadas estratigráficas podem ser inferidos a partir dos valores relativos do diâmetro máximo das microestruturas galáxia ($d_{máximo-galáxia}$). De maneira similar, o grau de turbulência entre laminações pode ser avaliado pela comparação da amplitude de ocorrência da microestrutura galáxia ($\Delta_{IMci-galáxia}$) e das amplitudes de seus diâmetros máximo e médio ($\Delta d_{máximo-galáxia}$ e $\Delta d_{médio-galáxia}$). Os valores do $d_{máximo-galáxia}$ variaram com a profundidade, indicando tendências cíclicas de aumento ($> d_{máximo-galáxia}$) ou decréscimo ($< d_{máximo-galáxia}$) da turbulência, como sugerem as mudanças de tendência observadas no Setor Distal (Baixa do Galo). Ao comparar a amplitude de ocorrência da microestrutura galáxia ($\Delta_{IMci-galáxia}$) entre as laminações dos diferentes setores de encosta, a turbulência mostra-se crescente do Setor Proximal ($< \Delta_{IMci-galáxia}$) para o Setor Distal ($> \Delta_{IMci-galáxia}$), conforme esperado. Essa tendência é reforçada pela correlação positiva entre $\Delta_{IMci-galáxia} - \Delta d_{máximo-galáxia}$ e $\Delta_{IMci-galáxia} - \Delta d_{médio-galáxia}$, que aumenta progressivamente nas laminações do Setor Proximal (Batuque) até o Setor Distal. Desta forma, as propriedades morfométricas da microestrutura galáxia funcionam como assinatura sedimentológica tanto do grau de turbulência em fluxo de alta-densidade-raso quanto da localização do setor da encosta onde o depósito colúvial foi formado. Adicionalmente, constatou-se que é possível estimar o $d_{médio-galáxia}$ das microestruturas galáxia a partir do $d_{máximo-galáxia}$, dado a correlação positiva muito significativa entre esses parâmetros. Por outro lado, os diâmetros das microestruturas galáxia mostram-se independentes do grau de ocorrência dessas feições, conforme sugerido pelas ausências de correlações estatísticas entre $IMci_{galáxia} - d_{máximo-galáxia}$ e $IMci_{galáxia} - d_{médio-galáxia}$.

A microestrutura de bandejamento, embora menos frequente, apresenta-se com disposição horizontal, embricado e vertical, frequentemente associada a microestruturas do tipo galáxia e cometa. Não se tem clareza quando ao mecanismo de formação desses bandeamentos em fluxos de alta-densidade-rasos (matriz densa ou granular).

4.1.2 Lama cascalhenta maciça e cascalho lamoso maciço

A espessura da fácies lama cascalhenta maciça varia de 20 a 50 cm, com média de 28 cm, enquanto a fácies cascalho lamoso maciço variou de 20 a 30 cm de espessura, e média 23 cm de espessura. Essa última, geralmente apresenta uma distribuição radômica dos seixos e tem sido designada nas pesquisas de geomorfologia do quaternário na região semiárida do nordeste do Brasil como “cascalheira” (CORRÊA, 2001; FONSECA et al., 2020; LIMA et al., 2023). A exceção é a camada V do Setor Mediano (Fig. 3), cuja fácies cascalho lamoso maciço assume disposição típica de linha de pedras. Nesse caso, à primeira vista, esse nível de cascalho com disposição de linha de pedras poderia ser interpretado enquanto paleopavimento detrítico como postula a literatura clássica (BIGARELLA et al., 1965), contudo a concentração crescente de seixo em direção ao topo, gradação inversa, demonstrada no diagrama granulométrico, é sugestiva de fluxo de alta-densidade-coesivo, comumente designado de fluxo de detrito coesivo (Lowe, 1979). A gradação inversa é esperada em fluxos de detritos coesivos com baixo grau de diluição, cujos cascalhos de maior tamanho podem ser transportados por flutuação dentro da matriz até o topo do fluxo diante de forças matriciais (POSTMA; NEMEC; KLEINSPEHN, 1988). No geral, a lama cascalhenta maciça é interpretada aqui como decorrente de fluxo de detrito coesivo (fluxo de alta-densidade-coesivo), porém mais diluído de modo que os seixos assumem uma distribuição randômica dentro da matriz.

O cascalho lamoso maciço ainda não se pode determinar a gênese. Ele deve ter decorrido de fluxo de detritos não-coesivo, cujo mecanismo de suporte dos grãos é, sobretudo, pressões dispersivas (MIDDLETON; HAMPTON, 1973), ou atribuído ao retrabalhamento de fluxo de detrito coesivo pré-existe (PAISANI et al., 2023a). Nesse último caso, a incidência da retirada da matriz de um depósito de fluxo de detrito coesivo pré-existente pelo escoamento superficial promove uma resedimentação dos seixos enriquecendo, relativamente, o depósito em fração grossa (NEMEC; KAZANI, 1999).

Enfim, a fácies lama cascalhenta maciça é interpretada como decorrente de fluxo de detritos coesivo (fluxo de alta-densidade-coesivo) enquanto a fácies cascalho lamoso maciço pode ter sido gerada por fluxo de detritos não-coesivo (fluxo de alta-densidade-não-coesivo) ou por retrabalhamento de fluxo de detrito coesivo pré-existente.

4.2 Processo hidrológico dominante na acumulação de sedimentos nas encostas coluviais

A dinâmica deposicional observada nos Setores Distal (Baixa do Galo), Mediano (Preguiçoso) e Proximal (Batuque) revela similaridade notável de fácies, constituída de lama arenosa laminada (laminação horizontal), lama cascalhenta maciça e cascalho lamoso maciço. Entre elas, a lama arenosa laminada se destaca, apresentando maiores espessuras proporcionais e o maior número de camadas em todos os perfis estratigráficos analisados. Por conseguinte, lama cascalhenta maciça e cascalho lamoso maciço são mais delgadas e com menor ocorrência, denotando papel secundário na deposição coluvial.

Em contraste, os fluxos de detritos (coesivo e/ou não coesivo) são originários de eventos hidrológicos de alta magnitude e baixa recorrência relativa em comparação ao escoamento superficial (Thomas, 1994), mas não geraram depósitos espessos nas encostas da área de estudo. Para as encostas estudadas, o escoamento superficial com comportamento dinâmico de fluxo de alta-densidade foi recorrente nos últimos 15.000 anos AP, acumulando cerca de 300 cm de sedimentos no Setor Distal, demonstrando elevado poder relativo de transporte e deposição de sedimentos.

A preservação da fácies lama arenosa laminada parece depender não apenas de áreas de acomodação favoráveis, mas, também, do comportamento dinâmico do escoamento superficial com alta densidade de sedimentos (fluxo de alta-densidade). Essa constatação diverge do entendimento tradicional, que interpreta o escoamento superficial como fluxo fluido de baixa densidade (baixa concentração de sedimentos), considerado de limitada contribuição para a sedimentação em encostas (Paisani et al., 2023a,b). Diante do exposto, fica evidente que, independentemente do setor da encosta coluvial, o escoamento superficial com comportamento dinâmico de fluxo de alta-densidade foi o principal processo hidrológico responsável pela formação dos depósitos de colúvio na área de estudo ao longo dos últimos 15.000 anos AP.

5. Conclusões

Os depósitos de colúvio dos Setores Proximal, Mediano e Distal das encostas dos Maciços cristalinos estudados exibem sucessões semelhantes de fácies: lama arenosa laminada (laminação horizontal), lama cascalhenta maciça e cascalho lamoso maciço. Apesar dessa semelhança, diferenças na espessura e recorrência evidenciam a fácies lama arenosa laminada como dominante em todos os setores, enquanto lama cascalhenta maciça e cascalho lamoso maciço assumem papel secundário na sedimentação coluvial.

A análise microsedimentológica dos sedimentos de lama arenosa foi decisiva para demonstrar que o aspecto homogêneo observado em campo é, na realidade, aparente como previamente inferido. Além disso, essa análise revelou que: a) as laminações resultam de fluxos de alta-densidade-rasos, gerados por escoamento superficial com elevada carga de sedimentos desde a área fonte, descartando a transformação progressiva de movimento de massa em fluxo de lama comumente esperada para o ambientes de encosta; b) microestrutura galáxia constitui um marcador sedimentológico útil para reconhecer tanto a turbulência interna dos fluxos quanto a posição do depósito na encosta, especialmente em contextos de áreas dissecadas ou com morfologia de rampa remodelada.

Independentemente do setor de encosta, o escoamento superficial com comportamento dinâmico de fluxo de alta-densidade foi o processo hidrológico preponderante na formação dos depósitos de colúvio na área de estudo ao longo dos últimos 15.000 anos AP. A microsedimentologia, enquanto extensão escalar da sedimentologia convencional, mostrou-se uma ferramenta de alto potencial para reconhecer fluxos responsáveis pela formação de depósitos (end-member) em encostas colúvias e elucidar os mecanismos associados à sua dinâmica deposicional.

Apêndice 1 – Glossário Microsedimentológico

Matriz densa: resulta da completa desintegração da estrutura pedológica original devido à liquefação da micromassa pedológica (PAISANI et al., 2023a).

Matriz granular: composta por fração grossa dominada por pedosedimentos do tipo agregados de solo (PAISANI et al., 2023a).

Pedosedimentos: feições relictuais de solo que mantêm relativa estabilidade estrutural e não foram completamente desintegradas durante a liquefação da micromassa pedológica (PAISANI et al., 2023a).

Microestrutura galáxia: também denominada *turbate*, *rotate*, *rotation* e *microcircle*; definida como alinhamento circular ou elipsoidal da fração grossa (mineral ou pedosedimentos) com ou sem um *core stone* (PAISANI et al., 2023a,b; PAISANI; MANICA, 2025).

Microestrutura cometa: disposição arqueada da fração grossa (PAISANI et al., 2023a)

Microestrutura bandeamento: teores modestos de areia em relação a matriz lamosa cujo grãos estão alinhados.

Microestrutura empilhamento de grãos: teores modestos de areia em relação a matriz lamosa cujos grãos estão em contato pontual e/ou concavo-convexo e/ou longitudinal.

Microestrutura randômica: refere-se à ausência de alinhamento dos grãos da fração grossa.

Microestrutura fração fina: orientação preferencial da fração fina evidenciada pela birrefringência de agrupamento.

Apêndice 2 – Estimativa da profundidade média dos fluxos de alta-densidade geradores de fácies lama arenosa laminada

Premissas

- a) Laminação com limite superior ondulado-paralelo-contínuo e ondulado-não-paralelo-contínuo indicam baixa ação erosiva dos fluxos subsequentes.
- b) Laminações com limite superior ondulado-não-paralelo-descontínuo podem refletir cavalgamento do corpo e da calda do fluxo em decorrência da desaceleração da cabeça, resultando na formação de laminações compostas.
- c) Laminações com matriz densa e matriz granular compartilham gênese associada a fluxos de alta-densidade.
- d) O efeito de compactação em depósitos de colúvio quaternários pode ser sindeposicional ou pós-deposicional: o primeiro é identificado pela presença de estruturas de escape de fluídos, e o segundo pelo empacotamento fechado em laminações de matriz granular.
- e) A espessura do fluxo original (H_f) é um múltiplo da espessura preservada da laminação (H_L), desconsiderando-se inicialmente o efeito da compactação.
- f) A profundidade média do fluxo original ($H_{f-média}$) pode ser estimada a partir da espessura média das laminações individuais ou compostas ($H_{L-média}$), mediante a determinação de um fator de proporcionalidade (k), conforme Equação 1.
- g) Considerando um efeito médio de compactação de 10% para laminações de matriz densa e 20% para matriz granular, adota-se um valor médio de 15%.
- h) Integrando o fator de compactação na equação de estimativa da profundidade média do fluxo, obtém-se a Equação 2, onde $C=0,15$ representa o coeficiente de compactação médio.

$$H_{f-média} = k \cdot H_{L-média} \quad (Eq.1)$$

$$H_{f-média} = (k \cdot H_{L-média}) / 1 - C \quad (Eq.2)$$

Base Empírica

A estimativa da profundidade média de fluxos de alta densidade fundamenta-se nos resultados experimental de Paisani et al., (2023b), que apresenta ampla aplicabilidade por atenderem às premissas 'a', 'b' e 'f'. Esse experimento inclui casos de laminações geradas por fluxos individuais (R1), laminações compostas (R2-R4) e laminações de gênese mista (R5-R6, R7-R10) (Tabela 1). Os parâmetros estatísticos derivados dos valores individuais de k encontra-se na tabela 2. A incerteza associada à estimativa de $H_{f-média}$ foi calculada com base no erro padrão médio (SE) dos valores de K .

Tabela 1 – Dados experimentais e parâmetros para estimativa da profundidade média dos fluxos.

Código do Ensaio	Concentração Volumétrica do Fluxo (%)	H_f (mm)	$H_{L-média}$ (mm)	k
R1	14,66	16	1,4	11,4
R2	16,37	5	2,4	2,1
R3	21,59	20	1,9	10,5
R4	16,11	20	3,3	6,1
R5-R6	19,19; 18,99	5	2,6	1,9
R7-R10	17,81; 18,02; 16,38; 25,36	10	2,8	3,6

Fonte: Paisani et al. (2023b).

Tabela 2 – Parâmetros Estatísticos dos valores individuais de k .

Parâmetro	Valor
n	6

$k_{\text{média}}$	5,93
s	4,18
SE	1,70

n : número de observações

$k_{\text{média}}$: média de k

s : desvio padrão amostral

SE: erro padrão da media

Fonte: Autores (2026).

Agradecimentos

Ao CNPq (Proc. 302976/2021-3; 405037/2023-6) pelo fomento à pesquisa e a CAPES pela concessão de Bolsa de Doutorado no país.

Declaração de Uso de Inteligência Artificial

Declara-se que ferramenta de Inteligência Artificial Generativa (ChatGPT, OpenAI) foi utilizada neste trabalho exclusivamente na etapa de revisão da redação original, com o objetivo de aprimorar a fluidez textual. Nenhuma ferramenta de IA foi empregada na concepção do estudo, análise de dados, interpretação dos resultados ou elaboração dos argumentos científicos. Todo o conteúdo foi analisado criticamente e validado pelos autores, que assumem integralmente a responsabilidade pela originalidade e veracidade do texto final, em conformidade com a Portaria nº 2664/2026 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- Bigarella, J. J.; Mousinho, M. R.; Silva, J. X. Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil. *Boletim Paranaense de Geografia*, v. 16/17, p. 117-151, 1965.
- Campbell, C. V. Lamina, laminaset, bed and bedset. *Sedimentology*, n. 8, p. 7-36, 1967.
- Claudino-Sales, C.; Falcão Sobrinho, J. *Geomorphology of the Northeast Region of Brazil*. The Latin American Studies Book Series. Springer, 2024. 292p.
- CPRM. Mapa Geológico da Província Borborema. Projeto Geologia e Potencial Mineral da Província Borborema. Rio de Recife:CPRM, 2021. Escala 1:1.000.000.
- Corrêa, A.C.B. *Dinâmica geomorfológica dos compartimentos elevados do Planalto da Borborema. Nordeste do Brasil*. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 2001.
- Fitzpatrick, E. A. *The micromorphology of soils: a manual for the preparation and description of thin sections of soils*. Aberdeen, Soil Science, 1980. 380 p.
- Fonsêca, D. N; Corrêa, A. C. B; Lira, D. R.; Tavares, B. A. C. Chemical, physical and mineralogical attributes as markers in the identification of depositional events in the Eastern Northeast of Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 104, p. 102805, 2020.
- Gois, L. S. S; Corrêa, A. C. B; Falcão, N. A. M; Monteiro, K. A. Caracterização sedimentológica dos colúvios do Maciço de Mata Grande - AL: uma comparação entre Brejos de Altitude do Nordeste do Brasil. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 7, p. 01-12, 2021.
- Ghibaudo, G. Subaqueous sediment gravity flow deposits: practical criteria for their field description and classification. *Sedimentology*, n. 39, p. 423–454, 1992.

-
- Lima, F. J.; Paisani, J. C.; Corrêa, A. C. B.; Pontelli, M. E. Micromorfologia de colúvios em sequências pedoestratigráfica e litoestratigráfica: o caso das Superfícies de Palmas/Água Doce (Sul) e Planalto Sedimentar do Araripe (Nordeste do Brasil). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 18, p. 329-348, 2017.
- Lima, F. J.; Corrêa, A. C. B.; Lima, G. G.; Marçal, M. S.; Paisani, J. C.; Pontelli, M. E. Late quaternary geomorphological evolutionary dynamics of the Araripe sedimentary plateau, northeast of Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 1, 104244, 2023.
- Lowe, D.R. Sedimentary gravity flows: their classification and some problems of application to natural flows and deposits. In: DOYLE, L.J.; PILKEY, O.H. (Ed.). *Geology of Continental Slopes*. vol. 27. Tulsa:SEPM (Spec. Publ.), 1979. p. 75–82.
- Middleton, G.V.; Hampton, M. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition. In: MIDDLETON, G.V., BOUMA, A. (Ed.). *Turbidites and deep water sedimentation*. Los Angeles, SEPM (Pacific Section) Short Course 1, Anaheim, Lecture Notes, 1973. p. 1–38.
- Nemec, W.; Kazanci, N. Quaternary colluvium in west-central Anatolia: sedimentary facies and palaeoclimatic significance. *Sedimentology*, n. 46, 139-170, 1999.
- Paisani, J. C.; Manica, R. Constituent and microstructure concentration indexes for microsedimentological analysis in thin sections. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 26, p. 1-10, 2025.
- Paisani, J.C., Pereira, J.S., Sordi, M.V.; Manica, R. Pleistocene-Holocene colluvial facies from the Volcanic Plateau of the Paraná Sedimentary Basin (Rio Grande do Sul, Brazil) – sedimentation processes and paleoenvironmental implications. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 126, 104344, 2023a.
- Paisani, J.C., Manica, R., Santos, M.C.P., Rodrigues, R.A.R. Modern soil aggregates–colluvium generated by overland flow – stratigraphy and physical experiments. *Sedimentology*, 70, 2150–2174, 2023b.
- Postma, G., Nemec, W.; Kleinspehn, K.L. Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. *Sedimentary Geology*, 58, 47–61, 1988.
- Silva, A.F. *Dinâmica dos processos de coluvionamento no semiárido de Alagoas – Maciços de Água Branca e Mata Grande*. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Francisco Beltrão-PR, 2025.
- Silva, A. F.; Paisani, J. C.; Lima, F. J.; Corrêa, A. C. B. Mapeamento Macrogeomorfológico dos Maciços de Água Branca e Mata Grande e rebordo do Planalto Sedimentar do Jatobá – Faixa Leste do Semiárido do Nordeste, no prelo.
- Silva, M. L. G.; Corrêa, A. C. B.; Lima, F. J. Reconstrução Paleoambiental do Maciço de Água Branca, Semiárido de Alagoas, a Partir da Análise dos Sedimentos de Encosta. *Geosul*, v. 36, p. 454-478, 2021.
- Sumner, E.; Talling, P.J.; Amy, L.A. Deposits of flow transitional between turbidity current and debris flow. *Geology*, 37, 991-994, 2009.
- Thomas, M. *Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes*. Wiley, Hoboken, 460p.
- Wentworth, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, n. 30, 377-392, 1922.