

Ritmos de deposição coluvial em encostas de maciços cristalinos e metamórficos no semiárido de Alagoas

Rhythms of Colluvial Deposition on Hillslopes of Crystalline and Metamorphic Massifs in the Semi-Arid Region of Alagoas

Adelaine Firmino da Silva¹ , Julio Cesar Paisani¹  & Flávia Jorge de Lima² 

¹Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Núcleo de Estudos PaleoAmbientais, Francisco Beltrão, Brasil. E-mail: adelaine_silva@outlook.com; Julio.Paisani@unioeste.br.

²Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus Sertão, Delmiro Gouveia, Brasil. E-mail:flavia.lima@delmiro.ufal.br

Resumo: O registro coluvial das encostas do semiárido alagoano revela sucessões de fácies finas e grossas, frequentemente associadas a fluxos gravitacionais de curta duração e à alternância entre períodos de estabilidade e de mobilização sedimentar. No entanto, poucos trabalhos abordam a ritmicidade de ciclos coluviais ao longo de diferentes setores de encostas e sua variação temporal com vista de reconhecer taxas de acumulação. Este estudo teve como objetivo caracterizar o ritmo de coluvionamento desde o final do Pleistoceno até o presente, por meio da análise integrada da estratigrafia, das espessuras faciológicas e das taxas aparentes de acumulação. Com base em perfis faciológicos e em idades obtidas por luminescência opticamente estimulada, foram identificados três ciclos cronofaciológicos (A, B e C), definidos por sucessões recorrentes de fácies finas e grossas, com limites cronológicos em torno de 7.331 e 4.486 anos AP. As fácies finas predominaram nos ciclos A e C, enquanto o Ciclo B registrou maior aporte de sedimentos grossos, o que reflete mudanças no regime de energia das encostas. As taxas aparentes de acumulação apresentaram decréscimo progressivo do presente para o passado, permitindo distinguir fases de alta, média e baixa eficiência deposicional. Os resultados indicam que o coluvionamento ocorreu de forma cíclica, alternando entre deposição difusa de baixa energia e eventos concentrados de maior magnitude. Conclui-se que os depósitos coluviais preservam ciclos rítmicos de acumulação e erosão, confirmando a hipótese proposta. Os resultados também evidenciam a evolução das encostas para condições progressivamente mais estáveis ao longo do Quaternário tardio, consolidando esses depósitos como registros-chave da dinâmica morfosedimentar regional.

Palavras-chave: colúvio; dinâmica de encosta; Semiárido do Brasil; taxa de acumulação, datação por luminescência.

Abstract: The colluvial record of hillslopes in the semi-arid region of Alagoas reveals successions of fine and coarse facies, commonly associated with short-duration gravitational flows and alternating periods of surface stability and sediment mobilization. However, few studies have addressed the rhythmicity of colluvial cycles across different hillslope sectors and their temporal variability with the aim of identifying accumulation rates. This study aimed to characterize the rhythm of colluvial deposition from the Late Pleistocene to the present through an integrated analysis of stratigraphy, facies thickness, and apparent accumulation rates. Based on facies profiles and optically stimulated luminescence (OSL) ages, three chronofacies cycles (A, B, and C) were identified, defined by recurring successions of fine and coarse facies, with chronological boundaries around 7,331 and 4,486 years BP. Fine facies predominate in cycles A and C, whereas cycle B records a greater contribution of coarse sediments, reflecting changes in the energy regime of hillslope processes. Apparent accumulation rates show a progressive decrease from the present toward the past, allowing the identification of phases of high, medium, and low depositional efficiency. The results indicate that colluvial deposition occurred cyclically, alternating between diffuse low-energy sedimentation and more concentrated events of greater magnitude. We conclude that the colluvial deposits preserve rhythmic cycles of accumulation and erosion, confirming the proposed hypothesis. The results also indicate the progressive evolution of hillslopes toward more stable conditions throughout the Late Quaternary, establishing these deposits as key records of regional morphosedimentary dynamics.

Keywords: colluvium; hillslope dynamics; semi-arid Northeast Brazil; accumulation rates; luminescence dating.

1. Introdução

Os depósitos coluviais constituem importantes registros da dinâmica geomorfológica de encostas, refletindo a alternância entre períodos de estabilidade superficial e fases de mobilização sedimentar controladas por variações climáticas e hidrossedimentares. Na região semiárida do nordeste brasileiro, tais depósitos assumem papel fundamental na reconstituição paleoambiental, pois preservam evidências de eventos de erosão, transporte e acumulação que respondem de forma sensível às oscilações de umidade e energia ao longo do tempo (Corrêa, 2001; Corrêa *et al.*, 2008; Gurgel *et al.*, 2013; Fonsêca *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2023; Ranulpho *et al.*, 2024). A estratigrafia desses materiais revela não apenas o caráter episódico do coluvionamento, mas também o ritmo com que os processos de encosta se repetem e se reorganizam frente às mudanças ambientais do Quaternário Tardio.

Estudos prévios sobre colúvios no semiárido de Alagoas têm descrito a ocorrência de sucessões de fácies finas e grossas, frequentemente associadas a fluxos gravitacionais de curta duração e à alternância entre condições úmidas e secas (Gois *et al.*, 2021; Silva, 2019; Melo, 2019; Melo *et al.*, 2014). No entanto, poucos trabalhos abordam a ritmicidade de ciclos coluviais ao longo de diferentes setores de encostas e sua variação temporal com vista a reconhecer taxas de acumulação. Essa lacuna limita a compreensão dos mecanismos que controlam a frequência e a intensidade dos episódios de acumulação coluvial e sua relação com pulsos climáticos.

Diante desse cenário, o presente estudo tem por objetivo caracterizar o ritmo de coluvionamento desde o final do Pleistoceno até o presente, com base na análise integrada

da estratigrafia, das espessuras faciológicas e das taxas aparentes de acumulação em setores de encosta de maciços cristalinos e metamórficos no oeste de Alagoas. Busca-se, assim, reconhecer padrões de deposição e compreender a dinâmica das encostas ao longo do Quaternário tardio. Parte-se da hipótese de que o registro coluvial preserva ciclos rítmicos de deposição, correspondentes a fases alternadas de maior e menor energia sedimentar, intercaladas por hiatos deposicionais decorrentes da ação da erosão. A abordagem adotada permite reconhecer variações espaciais e temporais dos processos de encosta, bem como discutir a atuação dos processos morfogenéticos ao longo do tempo.

2. Materiais e Métodos

2.1 Encostas amostrais

As encostas estudadas integram os maciços cristalino e metamórficos situados nos Municípios de Água Branca e Mata Grande, na zona oeste do estado de Alagoas (Fig. 1, a,b). Esses maciços são morfologias comuns do interior do nordeste e se destacam na paisagem enquanto colinas em meio a pediplanos (Bastos *et al.*, 2022; Claudino-Sales & Falcão Sobrinho, 2024). A região apresenta clima semiárido, com duas estações bem definidas, com período seco variando de 5 a 6 meses, e a precipitação concentrando-se de maio a julho. Cabe enfatizar que nas áreas próximas da cimeira do maciço de Água Branca, condição de umidade mais amena é encontrada decorrente do fator orográfico, em especial no setor a barlavento (Barros *et al.*, 2012).

Foram selecionadas três encostas com afloramentos de sedimentos coluviais distribuídos em diferentes setores topográficos: distal (sopé da encosta), mediano (terço médio) e proximal (próximo ao topo). Em razão da ausência de registros coluviais completos em uma única encosta, as áreas amostrais localizam-se em localidades distintas, denominadas Baixa do Galo (Setor Distal), Preguiçoso (Setor Mediano) e Batuque (Setor Proximal) (Fig. 1b). Originalmente, essas encostas apresentavam morfologia retilínea (rampa); contudo, a incisão da drenagem moderna promoveu seu reafeiçoamento parcial, resultando em perfis retilíneo-convexos a retilíneo-côncavos, com extensão média de 432 m e inclinação média de 12° (Fig. 1c). O registro sedimentar aflora em cortes de estrada

(Fig.

1d).

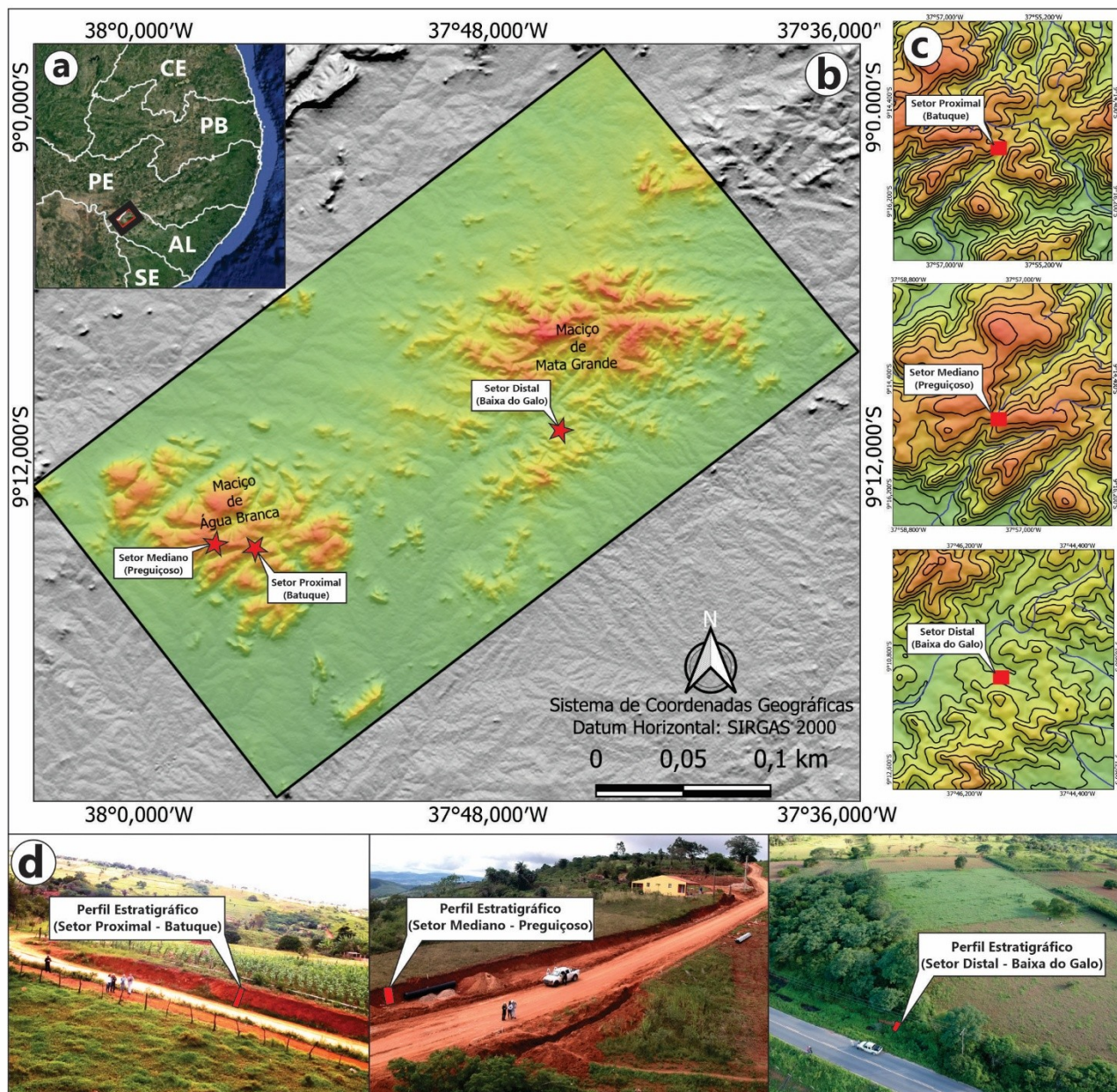


Figura 1. Localização das encostas estudadas. (A) Imagem do Google Earth mostrando os estados de Sergipe (SE), Alagoas (AL), Pernambuco (PE) e Ceará (CE). (B) Modelo Digital de Terreno com hipsometria representada por cores e curvas de nível (linhas pretas). (C) Imagens obtidas por drone das encostas, destacando os locais dos perfis estratigráficos.

Figure 1. Location of the studied slopes. (A) Google Earth image showing the states of Sergipe (SE), Alagoas (AL), Pernambuco (PE), and Ceará (CE). (B) Digital Terrain Model with color-coded hypsometry and contour lines (black). (C) Images acquired using a remotely piloted aircraft system (RPAS) highlighting the stratigraphic profile locations.

2.2 Procedimentos

2.2.1 Descrição dos registros estratigráficos

Os registros estratigráficos das encostas analisadas foram previamente descritos e datados por luminescência opticamente estimulada (LOE) por Silva (2025). Para os fins deste trabalho, as seções colunares e os perfis faciográficos foram compilados, resultando

em uma síntese descritiva e interpretativa das fácies, fundamentada em critérios litológicos e sedimentológicos, incluindo espessura das camadas, natureza dos contatos, textura, cor, fábrica sedimentar, tendências granulométricas e análise microsedimentológica. A codificação faciológica e as interpretações deposicionais seguiram adaptações dos critérios propostos por Ghibaudo (1992) para depósitos gravitacionais. Com base nos perfis faciológicos e em idades interpoladas (item 2.2.3), foram identificados ciclos de acumulação de sedimentos. Os limites das cronologias das fácies desses ciclos foram calculados mediante a média do intervalo cronológico interpolado entre topo e base da fácies representativa do início e do final de cada ciclo (item 2.2.3).

2.2.2 Espessuras proporcionais das fácies dos depósitos por ciclos de acumulação

A espessura das fácies constitui um parâmetro importante para a compreensão do ritmo de coluvionamento ao longo do tempo. Para estimar a contribuição relativa de cada fácies sedimentar nos diferentes ciclos de acumulação, foram calculadas as espessuras proporcionais em relação ao depósito coluvial, considerando os setores morfológicos da encosta (distal, mediano e proximal). A espessura total do depósito em cada setor foi obtida pelo somatório das espessuras de todas as fácies identificadas, independentemente do ciclo de sedimentação ao qual pertencem. A espessura proporcional (P) de cada fácies dentro do depósito do setor foi, então, determinada pela razão entre a espessura da fácies (E_f), em um determinado ciclo e setor, e a espessura total do depósito (E_t) do respectivo setor, sendo o resultado expresso em percentagem:

$$P = (E_f / E_t) \times 100$$

Na sequência foi realizada a integração entre setores para cada ciclo de sedimentação, somando-se as espessuras absolutas das fácies em todos os setores. Essa etapa permitiu determinar a espessura total por fácies em cada ciclo, a partir da qual foram calculadas as proporções internas de cada ciclo. Dessa forma, obtiveram-se dois níveis de análise: (a) as proporções internas de cada depósito do respectivo setor, mostrando a contribuição relativa das fácies e ciclos dentro de cada setor; e (b) as proporções integradas por ciclo, que refletem a representatividade de cada fácies no conjunto dos setores para cada ciclo de acumulação.

2.2.3 Determinação da Taxa Aparente de Acumulação de Fácies

Após identificar as fácies sedimentares nos depósitos dos setores Distal, Mediano e Proximal, buscou-se determinar quais dessas fácies contribuíram com maior volume de sedimento ao longo do tempo. Determinar o ritmo implica em estabelecer taxas de acumulação de sedimentos, o que se torna desafiador, pois o registro sedimentar do ambiente de encosta é marcado por discontinuidades laterais, erosão e hiatos deposicionais, o que torna inviável determinar ritmo de deposição de sedimento bruto sem considerar esses fatores (van der Meij *et al.*, 2019). Diante dessa limitação do ambiente, é possível, enquanto elemento de comparação estabelecer o ritmo líquido de ganho de espessura preservada no registro estratigráfico, aqui designada de taxa aparente de acumulação das fácies ($R_{\text{aparente-fácies}}$).

A R_{aparente} é útil como elemento de síntese dos fenômenos deposicionais em um mesmo contexto sedimentar, permitindo observar tendências de acumulação das fácies ao

longo do tempo. Assim, ela foi empregada para comparar a sedimentação das fácies identificadas nos três setores de encosta e inferir quais delas contribuíram com maior volume de sedimento. Considerou-se que os efeitos de erosão e não deposição atuam de forma semelhante entre e dentro das fácies analisadas, e que o retrabalhamento e a compactação são desprezíveis, cujo último, presumivelmente ínfimo, dado o bom estado de preservação das estruturas laminadas em sedimentos lama arenosos presentes em todos os perfis estratigráficos em variadas profundidades (Silva, 2025).

A R_{aparente} foi calculada individualmente para cada fácies, a partir da razão entre a espessura da sucessão sedimentar de interesse, representada pela diferença de profundidade entre dois níveis no perfil estratigráfico ($\Delta z = z_2 - z_1$), e o intervalo de tempo correspondente ($\Delta t = t_2 - t_1$), conforme a equação:

$$R_{\text{aparente}} = \frac{\Delta z}{\Delta t} (\text{mm/ano})$$

Os níveis de controle correspondem a dois pontos datados no perfil estratigráfico ou a um ponto datado e à superfície atual (considerada de tempo zero). Assim, a taxa aparente de acumulação por fácies ($R_{\text{aparente-fácies}}$) foi obtida pela diferença de espessura e de tempo entre dois níveis datados ou entre um nível datado e a superfície. O intervalo temporal dos níveis datados se baseou em idades de LOE compiladas de Silva (2025).

A idade de cada fácies ($a_2 - a_1$) foi estimada por interpolação linear entre os controles estratigráficos datados. Para cada profundidade situada entre dois pontos de controle d_1 , a_1 e d_2 , a_2 , calculou-se um peso (w) proporcional à distância relativa da profundidade em relação aos controles, permitindo estimar a idade $a(d)$ segundo:

$$a(d) = a_1 + w \cdot (a_2 - a_1), \text{ com } w = \frac{d - d_1}{d_2 - d_1}$$

A incerteza associada à idade interpolada (σ_a) foi obtida considerando a propagação das incertezas dos controles superior e inferior (σ_1 e σ_2), pela expressão:

$$\sigma_a = \sqrt{(1 - w)^2 \sigma_1^2 + w^2 \sigma_2^2}$$

Com as idades interpoladas, o intervalo de tempo (Δt) correspondente à espessura de cada fácies foi determinado pela diferença entre as idades do topo e da base do intervalo, e sua incerteza estimada como:

$$\sigma_{\Delta t} = \sqrt{\sigma_{\text{top}}^2 + \sigma_{\text{bot}}^2}$$

Por fim, a $R_{\text{aparente-fácies}}$ foi obtida pela razão entre a espessura do depósito (h , em mm) e o intervalo de tempo correspondente (em anos):

$$R_{\text{aparente-fácies}} = \frac{h}{\Delta t}$$

A incerteza associada (σ^R) foi considerada apenas em função do intervalo temporal, conforme:

$$\sigma_{R_{\text{aparente-fácies}}} = R_{\text{aparente-fácies}} \cdot \frac{\sigma_{\Delta t}}{\Delta t}$$

Nas circunstâncias em que os pontos datados não coincidiam com o limite basal da fácies, considerou-se apenas a espessura entre topo da fácies e o ponto de datação.

3. Resultados

3.1 Estratigrafia

A espessura dos depósitos de colúvio varia entre os setores, com o valor máximo registrado no setor Distal (3 m) e o mínimo no setor Mediano (0,10 m) (Figura 2). Os três setores têm em comum a ocorrência de três tipos básicos de fácies: lama arenosa laminada (laminação horizontal) (SMd), lama cascalhenta maciça (GMm) e cascalho lamoso maciço (MGm), cujas características e interpretações se encontram sumarizada na Quadro 1. A sucessão dessas fácies nos registros estratigráficos evidenciam três ciclos faciográficos: Ciclo A, composto pela sucessão SMd/GMm/SMd; Ciclo B, pela sucessão SMd/MGm/SMd; e o Ciclo C, cuja sucessão repete o padrão do Ciclo A (SMd/GMm/SMd). A sucessão do Ciclo A ocorre no setor Proximal, enquanto as sucessões dos Ciclos B e C estão preservadas no setor Mediano.

A correlação dos ciclos entre os setores mostra-se limitada pela incompletude dos registros estratigráficos, marcada pela ausência de fácies diagnósticas como GMm e MGm. Essa limitação foi superada pela cronologia das sucessões, que possibilita a cronocorrelação entre as fácies dos diferentes setores. Diante disso, identificam-se registros parciais dos Ciclos B e C nos setores Distal e Proximal (Figura 2). Os limites cronológicos dos ciclos situam-se em torno de 7.331 anos AP (faixa de incerteza entre 6.955 e 7.707 anos AP) para a transição A/B e 4.486 anos AP (faixa de incerteza entre 4.166 e 4.810 anos AP) para a transição B/C. Os depósitos coluviais analisados apresentam ampla variação temporal na ocorrência das fácies, estendendo-se do presente (superfície lítica) até cerca de 15.070 anos AP no Setor Proximal, o que indica que o registro estratigráfico abrange todo o Holoceno e alcança o final do Pleistoceno.

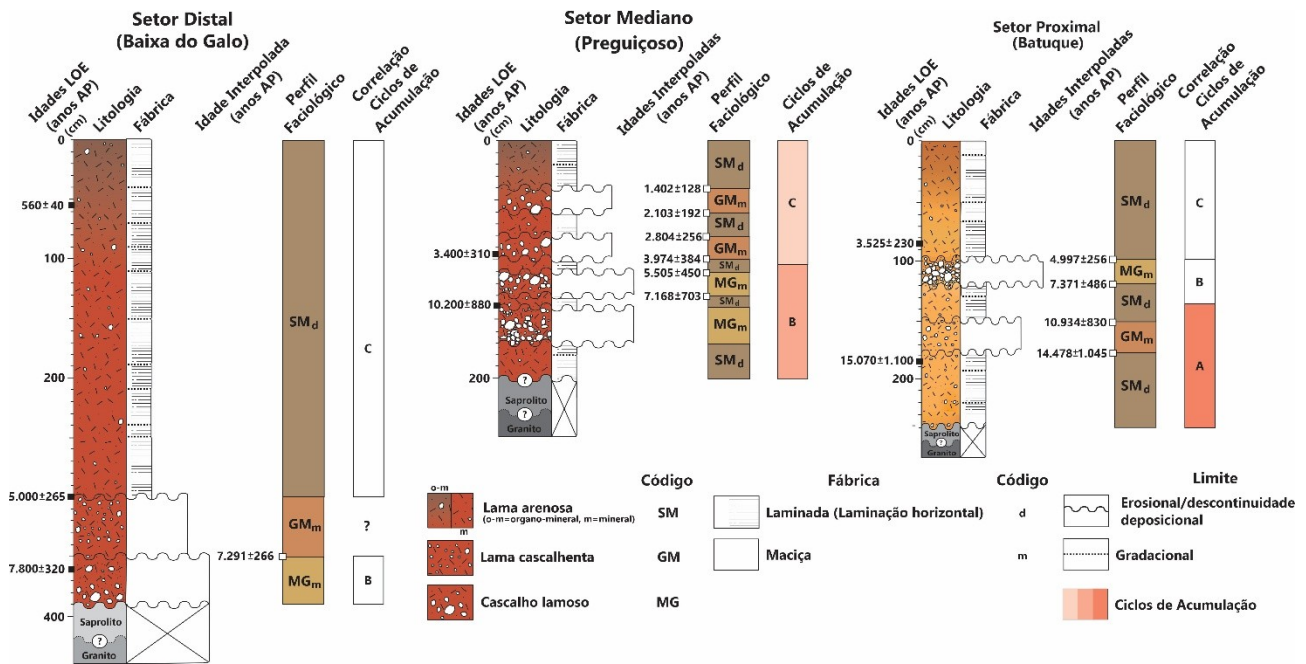


Figura 2. Estratigrafia dos setores distal, mediano e proximal, mostrando litologia, fácies sedimentares, idades LOE e correlação dos ciclos de acumulação.

Figure 2. Stratigraphy of the distal, median, and proximal sectors, showing lithology, sedimentary facies, OSL ages, and the correlation of accumulation cycles.

Quadro 1. Descrição de fácies.

Box 1. Description of sedimentary facies.

Fácies	Código	Descrição	Fábrica	Interpretação
Lama arenosa	SM _d	Fração lama (argila e silte) > 50% em relação a soma das frações grossas; matriz coesa a granular constituída de diferentes teores de hematita, goethita e matéria orgânica; cor 5YR 5/8 (vermelha amarelada), 5YR 5/2 (cinza avermelhada), 5YR 4/2 (cinza avermelhado escuro) e 5YR 3/3 (bruna avermelhada escura); localmente tendência de mais arenosa no limite inferior; com subfácies individualizadas diante das diferentes tendências de argila, silte e fração grossa	Laminada (laminação horizontal)	Fluxos de alta-densidades-rasos originados do escoamento superficial
Lama cascalhenta maciça	GM _m	Matriz > 50% vol.; fração grossa oligomítica (migmatito, granito e subordinadamente quartzo e feldspato), com percentual variável e distribuída de forma aleatória; matriz coesa constituída de diferentes teores de hematita, goethita e matéria orgânica; cor 5YR 5/2 (cinza avermelhada), 5YR 6/4 (bruna avermelhada clara) e 5YR 5/7 (bruna escura)	Maciça	Fluxo de detritos coesivo
Cascalho lamoso maciço	MG _m	Oligomítico (migmatito, granito e subordinadamente quartzo e feldspato), clastos suportados e matriz suportada concomitantes; matriz < 50% volume com percentuais de fração grossa e fina variáveis; fração fina constituída de diferentes teores de hematita, goethita e matéria orgânica; cor 5YR 5/8 (vermelha amarelada), 5YR 6/2 (cinza rosado) e 7.5 YR 5/8 (bruna escura)	Maciça	Fluxo não-coesivo ou do retrabalhamento de depósito coesivo pré-existente

– não determinado

3.2 Espessuras das fácies dos depósitos de colúvio

A espessura proporcional das fácies em cada ciclo mostra variações por setor da encosta (Figura 3a). No setor distal, o depósito é amplamente dominado por fácies SMd, responsável por cerca de 88% da espessura total, concentrada no Ciclo C, enquanto a fácies MGm, remanescente do Ciclo B, representa apenas 12%. No setor Mediano a fácies SMd continua predominando no Ciclo C com 33%, ao passo que no Ciclo B observa-se um equilíbrio maior entre as proporções de espessura das fácies SMd (23%) e MGm (25%), com sutil predomínio da última. O setor Proximal à fácies SMd segue a tendência verificada no setor Distal, de domínio da maior proporção de espessura no Ciclo C (42%). Igualmente ao setor Mediano, o Ciclo B expressa equilíbrio nas proporções de espessuras das fácies SMd (6%) e MGm (8%), com predomínio da última. No Ciclo A predomina a proporcionalidade de espessura da fácies SMd (31%) enquanto a fácies GMm ocorre subordinadamente com 13%. Essas variações de espessura proporcional mostra os seguintes padrões: 1) domínio da fácies SMd no Ciclo C; 2) domínio da fácies MGm no Ciclo B; 3) predomínio da fácies SMd e subordinação da fácies GMm no Ciclo A e 4) as fácies grossas (GMm e MGm) mostraram-se relativamente estáveis em termos de espessura entre os setores Distal e Proximal, indicando que a compactação teve papel secundário no controle da espessura, como esperado.

Esses padrões se tornam marcantes quando se soma as espessuras absolutas dos três setores para cada ciclo (Figura 3b). O Ciclo C apresenta predominância quase exclusiva de SMd (92%), enquanto o Ciclo B, em contraste, é dominado por MGm (65%) e o Ciclo A combina SMd (71%) e GMm (29%), porém com predomínio da primeira fácies. Enfim, o conjunto das proporções de espessura, mostram que a sucessão dos ciclos registra variações rítmicas entre estágios de energia dos processos de encosta, controlando a proporção entre fácies finas e grossas e modulando o empilhamento vertical dos depósitos de encosta. Os ciclos C e A refletem fases de acumulação predominantemente fina, enquanto o ciclo B marca um episódio de maior energia, associado a aporte mais expressivo de material grosso.

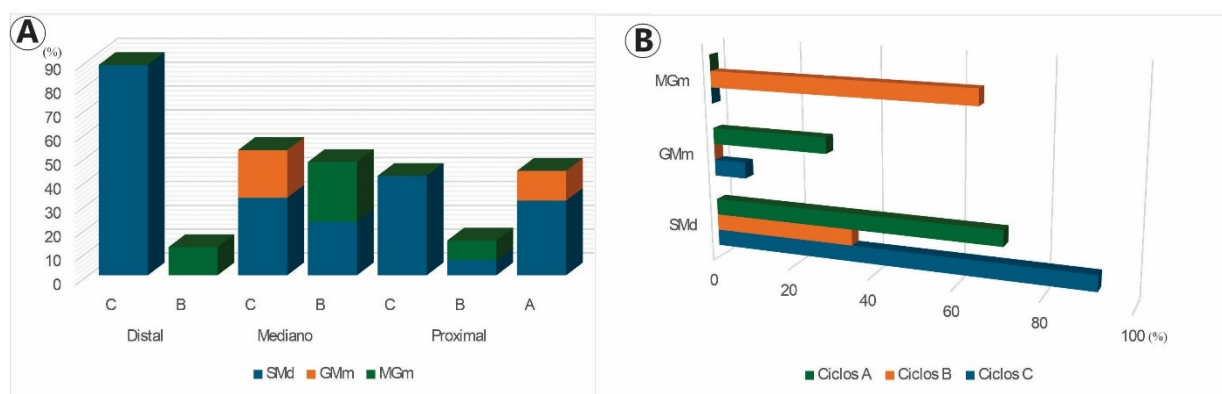


Figura 3. Proporção (%) das espessuras das fácies em cada ciclo de acumulação. (A) Distribuição para os setores distal, mediano e proximal da encosta; (B) distribuição considerando a soma das espessuras por ciclo de acumulação.

Figure 3. Percentage distribution of facies thickness within each accumulation cycle. (A) Distribution across the distal, median, and proximal hillslope sectors; (B) distribution based on the total thickness of each accumulation cycle.

3.3 Taxas Aparentes de Acumulação de Fácies

A taxa aparente de acumulação por fácies ($R_{\text{aparente-fácies}}$) variou entre $0,033 \pm 0,012$ (SMd – Setor Mediano) e $0,982 \pm 0,070$ (SMd – Setor Distal) (Tab.1). Fácies com espessuras ≤ 10 cm apresentaram propagação do erro elevada, em alguns casos excedendo o valor da taxa, principalmente quando os pontos datados não coincidiam com o limite basal da fácies, fazendo com que a taxa refletisse apenas o topo da sedimentação. Esses valores discrepantes foram desconsiderados. De forma geral, observa-se: a) redução da taxa com a profundidade apenas no setor Distal (Tab. 1); b) recorrência de fácies com valores idênticos de taxa, especialmente no setor Proximal (Tab. 1); c) variação significativa da taxa dentro de um mesmo ciclo de acumulação, sem padrão nítido entre os ciclos B e A (Figura 4a); d) as taxas médias por fácies por ciclo C, B e A, conforme os setores, seguem a mesma tendência observada na proporcionalidade das espessuras (Figura 4a). Enfim, a recorrência de fácies com valores idênticos de taxa reflete diretamente a razão constante entre a espessura e o intervalo temporal compartilhados, resultando na mesma taxa aparente.

Tabela 1. Taxa aparente de acumulação por fácies ($R_{\text{aparente-fácies}}$).

Table 1. Apparent accumulation rate by facies ($R_{\text{apparent-facies}}$).

Fácies	Espessura (cm)	Idade (anos AP)		Δt	$R_{\text{aparente-fácies}}$ (mm/ano)
		Topo	Base		
Setor Distal					
SMd	55	0	560±40	560±40	0,982±0,070
SMd	245	560±40	5.000±265	4.440±268	0,552±0,033
GMm	50	5.000±265	7.291±266	2.291±375	0,218±0,036
MGm	10	7.291±266	7.800±320	509±416	0,196±0,161
Setor Mediano					
SMd	40	0	1.402±128	1.402±128	0,285±0,026
GMm	20	1.402±128	2.103±192	701±231	0,285±0,094
SMd	20	2.103±192	2.804±256	701±320	0,285±0,130
GMm	20	2.804±256	3.974±384	1.170±462	0,171±0,067
SMd	10	3.974±384	5.505±450	1.531±592	0,065±0,025
MGm	20	5.505±450	7.168±703	1.663±835	0,120±0,060
SMd	10	7.168±703	10.200±880	3.032±1.126	0,033±0,012
Setor Proximal					
SMd	100	0	4.997±256	4.997±256	0,200±0,010
MGm	20	4.997±256	7.371±486	2.374±549	0,084±0,019
SMd	30	7.371±486	10.934±830	3.563±962	0,084±0,023
GMm	30	10.934±830	14.478±1045	3.544±1.335	0,085±0,032
SMd	05	14.478±1045	15.070±1100	592±1517	0,084±0,216

A correlação entre $R_{\text{aparente-fácies}}$ de todos os setores e o tempo geológico revela decréscimo logarítmico das taxas do presente para o passado, permitindo identificar três tendências principais: 1) alta taxa ($> 0,25$ mm/ano) do presente até 4.486 anos AP (faixa de incerteza 4.166-4.810 anos AP); 2) média taxa (0,15 a 0,25 mm/ano) de 4.486 a 7.331 anos AP (incerteza 6.955-7.707 anos AP); e 3) baixa taxa ($< 0,15$ mm/ano) para tempo > 7.331 anos AP até o final do Pleistoceno (Figura 5). Percebe-se que a fácies MGm concentra-se na classe de baixa taxa, enquanto as fácies com matriz lamosa (SMd e GMm) ocorrem nas classes de baixa e média taxa, com SMd predominando nas altas taxas. A fácies SMd no setor Distal apresenta taxas excepcionais, com valores de 0,982 e 0,563 mm/ano aos 560 e 4.911 anos, respectivamente, superiores aos valores de fácies similares

no mesmo intervalo temporal (< 5.000 anos). As fácies grossas (GMm e MGm) mostraram relativa estabilidade nas taxas nos setores Distal e Proximal. Observa-se ainda uma correspondência cronológica relativamente simétrica entre os limites das classes de taxa alta e média e os ciclos C e B, enquanto a transição entre as classes média e baixa apresenta assimetria em relação aos limites cronológicos dos ciclos B e A (Figura 5).

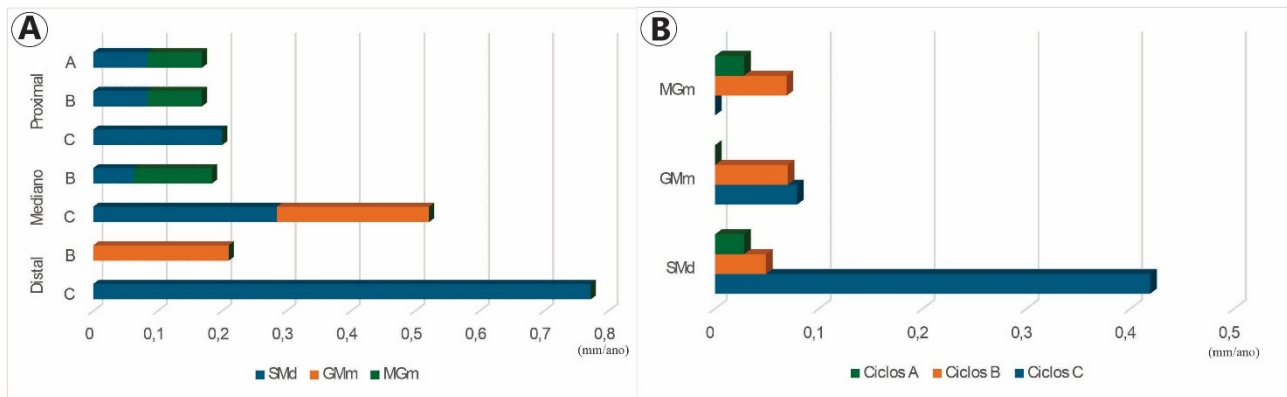


Figura 4. Médias das taxas aparentes de acumulação (mm/ano) por fácies para os ciclos C, B e A. (A) Valores para os setores distal, mediano e proximal da encosta; (B) média geral considerando o conjunto das encostas analisadas.

Figure 4. Mean apparent accumulation rates (mm/yr) by facies for cycles C, B, and A. (A) Values for the distal, median, and proximal hillslope sectors; (B) overall mean considering all analyzed hillslopes.

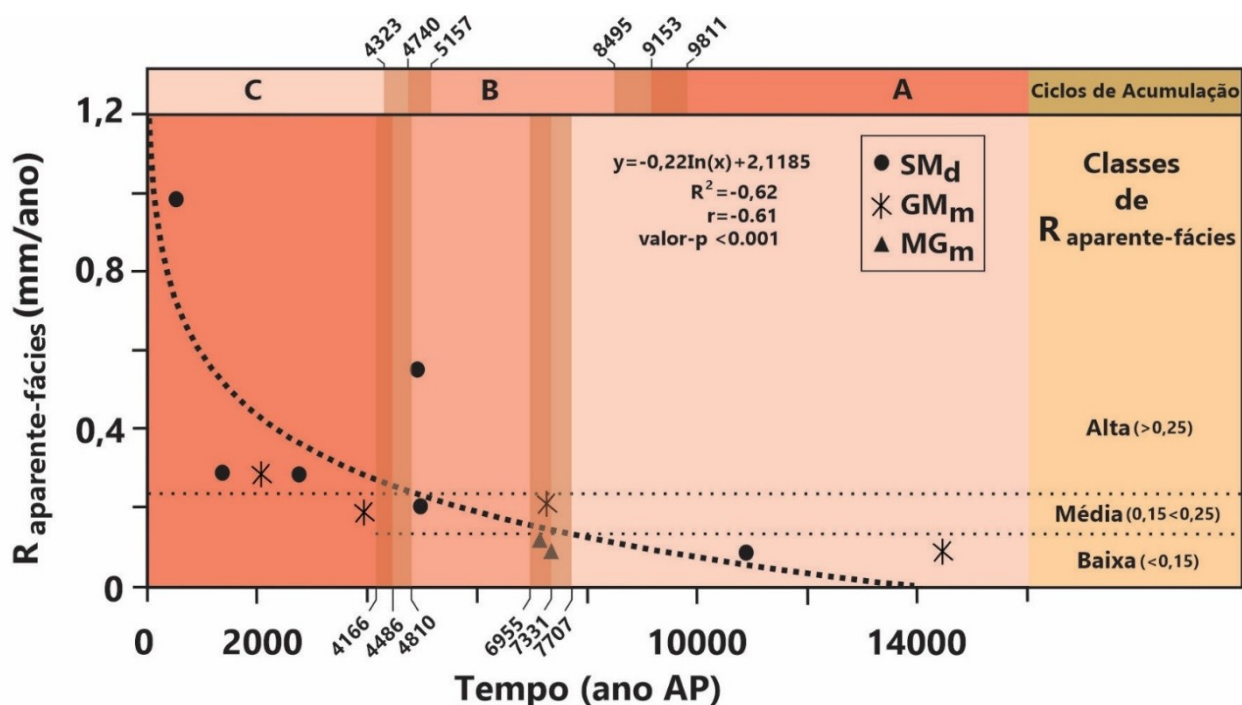


Figura 5. Correlação entre a taxa aparente de acumulação por fácies (R aparente-fácies) e a idade média estimada para cada tipo de fácies. O gráfico indica os intervalos de classes de R aparente-fácies (baixa, média e alta) e o diagrama dos ciclos de acumulação de sedimentos (Ciclos C, B e A).

Figure 5. Correlation between the apparent facies-specific accumulation rate ($R_{\text{aparente-fácies}}$) and the mean age estimated for each facies type. The diagram also indicates the $R_{\text{aparente-fácies}}$ classes (low, medium, and high) and the accumulation cycles (cycles C, B, and A).

4. Discussão

Os padrões estratigráficos observados neste estudo são coerentes com interpretações regionais que reconhecem os depósitos coluviais como registros importantes da dinâmica geomorfológica das encostas do semiárido do Nordeste brasileiro, frequentemente associados à alternância entre fases de mobilização e estabilidade ao longo do Quaternário tardio (Corrêa, 2001; Corrêa *et al.*, 2008; Gurgel *et al.*, 2013; Fonsêca *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2023; Ranulpho *et al.*, 2024). Entretanto, ao integrar a análise estratigráfica com estimativas de taxas aparentes de acumulação por fácies, os resultados deste estudo permitem avançar na caracterização do ritmo de coluvionamento, oferecendo uma perspectiva quantitativa ainda pouco explorada em pesquisas sobre depósitos coluviais do semiárido brasileiro.

O registro estratigráfico das encostas revela três ciclos cronofaciológicos (A, B e C), representados por sucessões SMd/GMm/SMd (Ciclos A e C) e SMd/MGm/SMd (Ciclo B), cujas idades mensuradas abrangem o intervalo do final do Pleistoceno até o presente. Esses padrões deposicionais indicam a recorrência de processos de coluvionamento modulados por variações morfodinâmicas que controlaram tanto a geração quanto a preservação de sedimentos nas encostas. A disposição cíclica das fácies sugere fases distintas de organização do sistema de encosta diante de mudanças no regime deposicional e na eficiência acumulativa. Enquanto o Ciclo A encontra-se restrito ao setor proximal, os ciclos B e C apresentam registros mais completos, especialmente no setor mediano.

As variações faciológicas identificadas expressam mudanças no regime de energia e na frequência dos eventos deposicionais. A fácies SMd representa fluxos rasos de alta densidade associados a sedimentação difusa de baixa energia relativa e elevada recorrência, vinculada ao escoamento superficial. Em contraste, as fácies GMm e MGm correspondem a episódios de maior energia e menor frequência, relacionados à mobilização de volumes sedimentares mais expressivos. A alternância entre essas fácies traduz oscilações no regime de energia das encostas, nas quais fases de coluvionamento difuso são interrompidas por pulsos episódicos de maior magnitude.

A eficiência acumulativa das encostas variou significativamente entre os ciclos, refletindo mudanças na capacidade do sistema de reter e preservar o material depositado. O Ciclo A apresenta baixa eficiência acumulativa e registros restritos ao setor proximal, sugerindo predominância de processos erosivos e limitada preservação sedimentar ao longo da encosta. O Ciclo B marca uma reorganização do regime deposicional, caracterizada pelo aumento do aporte de sedimentos grossos e pela maior recorrência de eventos de maior energia, possivelmente associados a episódios de pluviosidade concentrada. Já o Ciclo C representa a fase de maior eficiência acumulativa, marcada pela predominância de deposição difusa e pela preservação mais expressiva de sedimentos finos, especialmente no setor distal.

A interpretação dos episódios de pluviosidade concentrada associados ao Ciclo B encontra respaldo indireto em diversos registros paleoambientais do Nordeste semiárido. Estudos palinológicos, espeleotemáticos, marinhos e multiproxies indicam alternância entre fases relativamente mais úmidas e períodos de retomada da semiaridez ao longo do Quaternário tardio, refletindo mudanças na dinâmica hidroclimática regional (Oliveira *et al.*, 1999; Behling *et al.*, 2000; Cruz *et al.*, 2009; Novello *et al.*, 2019; Utida *et al.*, 2023). Em especial, os intervalos atribuídos aos ciclos B e C mostram correspondência geral com estudos geomorfológicos e sedimentares que registram reorganização hidrossedimentar, remobilização de encostas e tendência de estabilização relativa das paisagens semiáridas durante o Holoceno Médio e Superior (Corrêa, 2001; Gurgel *et al.*, 2013; Lira *et al.*, 2026).

Esse cenário reforça a interpretação de que os ciclos de coluvionamento identificados nas encostas estudadas refletem respostas locais a oscilações paleohidrológicas regionais, possivelmente associadas a variações na disponibilidade hídrica, sazonalidade das chuvas e dinâmica do escoamento superficial, moduladas por controles orográficos dos maciços cristalinos e metamórficos.

Os valores de taxa aparente de acumulação obtidos neste estudo (0,033–0,982 mm/ano) situam-se na faixa inferior das taxas reportadas para ambientes de encosta e sistemas sedimentares associados em outras regiões do mundo. Para o Holoceno, valores típicos situam-se entre cerca de 0,01 e 2,81 mm/ano (Prosser, 1994; Moir *et al.*, 2000; Smolska, 2007; Notebaert *et al.*, 2014). Em função das características geomórficas e do regime climático, essas taxas podem atingir magnitudes mais elevadas (2 a 31 mm/ano), como indicado por estudos realizados em diferentes contextos geográficos (Curry *et al.*, 2006; Grenfell *et al.*, 2020; Boardman *et al.*, 2017; Vanwalleghem *et al.*, 2005). Dessa forma, as taxas estimadas para as encostas do semiárido alagoano mostram-se comparáveis às observadas em ambientes de encosta e sistemas sedimentares associados em outras regiões, ainda que expressem particularidades relacionadas à dinâmica hidrossedimentar característica das paisagens semiáridas.

Situando as fácies e os ciclos na linha do tempo geológica, observa-se que as maiores taxas aparentes de acumulação e as maiores espessuras relativas concentram-se nas fácies SMD, especialmente nos últimos 4.740 anos (faixa de incerteza entre 4166 e 4810 anos AP), indicando o predomínio de coluvionamento difuso e contínuo associado a fluxos rasos de alta densidade e baixa energia. Parte da tendência de diminuição das taxas aparentes de acumulação em direção ao passado também pode refletir a incompletude do registro sedimentar preservado nas encostas. Em registros estratigráficos, taxas médias de sedimentação tendem a diminuir à medida que aumenta a escala temporal considerada, uma vez que intervalos mais longos incorporam hiatos deposicionais e episódios erosivos no registro geológico, fenômeno conhecido como efeito Sadler (Sadler, 1981). Nesse contexto, a R_{aparente} não distingue deposição efetiva de hiatos, erosões ou retrabalhamentos, incorporando tanto incertezas laboratoriais associadas à mensuração do sinal de luminescência e da dose rate, quanto incertezas inerentes ao ambiente deposicional, como branqueamento incompleto dos grãos ou mistura de populações sedimentares com diferentes histórias de exposição à luz.

No entanto, considerando o conjunto das evidências estratigráficas e das taxas aparentes de acumulação, os resultados indicam que, a partir da transição Holoceno Médio/Superior até o presente, predominou um cenário de menor ação erosiva e maior capacidade de retenção sedimentar nas encostas, particularmente no setor distal. A maior preservação da fácies SMD nesse período — material particularmente suscetível à erosão — reforça a interpretação de que o sistema de encosta se tornou progressivamente mais eficiente na acumulação e menos propenso à remoção superficial.

No período compreendido entre aproximadamente 4.740 e 7.331 anos AP (faixa de incerteza entre 6.955 e 7.707 anos AP), observa-se um aumento progressivo do aporte de sedimentos finos associado à reorganização da eficiência acumulativa das encostas. Esse intervalo é marcado por uma inflexão no regime deposicional, com maior recorrência de eventos de maior energia representados pela fácies MGm, provavelmente associados a episódios de pluviosidade concentrada. Já o intervalo entre cerca de 7.331 e 15.000 anos AP caracteriza-se por maior eficiência erosiva do escoamento superficial de baixa densidade. Nesse período, os eventos de alta energia, representados pela fácies MGm, ocorrem de forma mais restrita, enquanto predominam aportes sedimentares associados a

fluxos rasos de alta densidade e baixa energia, semelhantes aos registrados no período mais recente, porém distribuídos em intervalos temporais mais prolongados.

De forma geral, a correspondência entre as classes de taxa aparente de acumulação e os ciclos de sucessão de fácies indica respostas diferenciadas do sistema de encosta às mudanças nos processos de erosão e deposição ao longo do tempo. A relativa simetria entre as classes de taxa alta e média e os ciclos C e B, bem como a assimetria entre as classes média e baixa e os ciclos B e A, sugerem que as variações no regime de energia e na eficiência acumulativa das encostas desempenharam papel fundamental na organização do registro coluvial ao longo do Quaternário tardio. Apesar dos resultados obtidos, algumas limitações devem ser consideradas, especialmente a incompletude lateral dos registros coluviais e a dependência de interpolações cronológicas entre níveis datados. Estudos futuros integrando maior densidade de datações LOE, análises microsedimentológica e comparação com geoarquivos paleoclimáticos independentes poderão ampliar a resolução temporal das interpretações e refinar os modelos de evolução morfosedimentar das encostas semiáridas.

5. Conclusão

A análise integrada da estratigrafia, das espessuras faciológicas e das taxas aparentes de acumulação permitiu reconhecer três ciclos cronofaciológicos associados a mudanças no regime de energia dos processos de encosta desde o final do Pleistoceno. Em conjunto, esses padrões indicam que, ao longo do Holoceno, as encostas evoluíram para condições progressivamente mais estáveis e favoráveis à retenção de sedimentos, refletindo a resposta integrada do sistema a mudanças ambientais regionais. Os resultados confirmam a hipótese central deste trabalho de que o registro coluvial preserva ciclos rítmicos de deposição modulados por alternâncias no regime de energia sedimentar e por hiatos erosivos. Dessa forma, os depósitos coluviais analisados configuram-se como importantes geoarquivos para a reconstrução da evolução morfodinâmica recente das paisagens semiáridas do Nordeste brasileiro, fornecendo base para futuras investigações paleoambientais e geomorfológicas, bem como para estudos aplicados à compreensão da instabilidade de vertentes.

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

Contribuições dos Autores: Concepção, J.C.P. e F.J.L.; metodologia, J.C.P.; software, A.F.S.; validação, J.C.P. e F.J.L.; análise formal, A.F.S.; J.C.P.; F.J.L.; pesquisa, A.F.S.; recursos, F.J.L.; J.C.P.; preparação de dados, A.F.S.; escrita do artigo, A.F.S.; J.C.P.; F.J.L.; revisão, J.C.P.; F.J.L.; A.F.S.; supervisão, J.C.P.; F.J.L.; aquisição de financiamento, F.J.L.; J.C.P. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Declaração de Uso de Inteligência Artificial: Em conformidade com a Portaria nº 2.664/2026 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, declara-se que a ferramenta de Inteligência Artificial Generativa (ChatGPT, OpenAI) foi utilizada como apoio à redação científica e à organização formal de expressões matemáticas apresentadas no manuscrito, incluindo a padronização de equações, a notação e a clareza expositiva. A concepção do estudo, a definição das variáveis, a estrutura metodológica, a obtenção e o tratamento dos dados, a interpretação dos resultados e a elaboração das conclusões são de inteira responsabilidade dos autores. Todo o conteúdo produzido com apoio da ferramenta foi criticamente revisado e validado pelos autores, que assumem integral responsabilidade pela originalidade, consistência, integridade e veracidade do manuscrito.

Referências

- Barros, A.H.C.; Varejão-Silva, M.A.; Tabosa, J.N. 2012. *Aptidão Climática do Estado de Alagoas para Culturas Agrícolas*. 104f. (Relatório Técnico). Embrapa Solos: Recife.
- Bastos, F.H.; Lima, D.L.S.; Cordeiro, A.M.N.; Maia, R.P. 2022. Relevos graníticos do Nordeste brasileiro: uma proposta taxonômica. In: Carvalho Junior, O.A.; Gomes, M.CV.; Guimarães, R. F.; Gomes, R.A.T. (Ed.). *Revisões de Literatura Geomorfológica Brasileira*. União de Geomorfologia Brasileira, p. 737-762.
- Behling, H.; Arz, H.W.; Pätzold, J.; Wefer, G. 2000. Late Quaternary vegetational and climatic dynamics in northeastern Brazil: Inferences from marine core GeoB 3104-1. *Quaternary Science Reviews*, 19: 981-994. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00046-3](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00046-3)
- Boardman, J.; Foster, I.D.L.; Rowntree, K.M.; Favis-Mortlock, D.T.; Mol, L.; Suicha, H.; Gaynor, D. 2017. Long-term studies of land degradation in the Sneeuberg uplands, Eastern Karoo, South Africa: A synthesis. *Geomorphology*, 285: 106-120. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.024>
- Claudino-Sales, C.; Falcão Sobrinho, J. 2024. *Geomorphology of the Northeast Region of Brazil*. The Latin American Studies Book Series. Springer. 292p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-58874-7>
- Corrêa, A. C. B. 2001. *Dinâmica geomorfológica dos compartimentos elevados do Planalto da Borborema, Nordeste do Brasil*, 386p. Tese Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista de Rio Claro, SP.
- Corrêa, A.C.B.; Silva, D.G.; Melo, J.S. 2008. Utilização dos depósitos de encostas dos brejos pernambucanos como marcadores paleoclimáticos do Quaternário tardio no semiárido nordestino. *Mercator*, 7(14): 99-125.
- Curry, A.M.; Cleasby, V.; Zukowskyj, P. 2006. Paraglacial response of steep, sediment-mantled slopes to post-“Little Ice Age” glacier recession in the central Swiss Alps. *Journal of Quaternary Science*, 21: 211-225. <https://doi.org/10.1002/jqs.954>
- Cruz, F.W.; Vuille, M.; Burns, S.J.; Wang, X.; Cheng, H.; Werner, M.; Edwards, R.L.; Karmann, I.; Auler, A.S.; Nguyen, H. 2009. Orbitally driven east–west antiphasing of South American precipitation. *Nature Geoscience*, 2: 210-214. <https://doi.org/10.1038/ngeo444>
- Fonsêca, D.N.; Corrêa, A.C.B.; Tavares, B.A.C.; Lira, D.R.; Barros, A.C.M.; Mützenber, D.S. 2020. Coupling of tectonic factors and precipitation variability as a driver of Late Quaternary aggradation in Northeast Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(14): 3525-3539. <https://doi.org/10.1002/esp.4982>
- Gois, L.S.S.; Corrêa, A.C.B.; Falcão, N.A.M.; Monteiro, K.A. 2021. 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*, 7: 1-12. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n01id22137>
- Grenfell, S.E.; Mamphoka, M.F.; Grenfell, M.C.; Job, N. 2020. Evaluating the potential for natural ecosystem recovery in cut-and-fill wetlands: Case study of Pietersielieskloof palmiet wetland, South Africa. *Wetlands Ecology and Management*, 28: 863-882. <https://doi.org/10.1007/s11273-020-09756-7>
- Gurgel, S.P.P.; Bezerra, F.H.R.; Corrêa, A.C.B.; Marques, F.O.; Maia, R.P. 2013. Cenozoic uplift and erosion of structural landforms in NE Brazil. *Geomorphology*, 186: 68-84. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.023>
- Ghibaudo. 1992. Subaqueous sediment gravity flow deposits: Practical criteria for their field description and classification. *Sedimentology*, 39(3): 423-454. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1992.tb02126.x>
- Lima, F.J.; Corrêa, A.C.B.; Lima, G.G.; Marçal, M.S.; Paisani, J.C.; Pontelli, M.E. 2023. Late Quaternary geomorphological evolutionary dynamics of the Araripe sedimentary plateau, Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 124: 104244. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104244>
- Lira, D.R.; Corrêa, A.C.B.; Fonseca, D.N.; Santos, J.D.C.; Tavares, B.A.C.; Alves, K.M.A. 2026. Fluvial–aeolian interactions in northeastern South America: Implications for provenance and paleoenvironmental interpretations. *Catena*, 265: 109857. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2026.109857>
- Melo, R.F.T. 2019. Evolução geomorfológica em bases paleoclimáticas do maciço estrutural de Água Branca – AL. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco.
- Melo, R.F.T.; Ramos, D.A.M.C.; Silva, D.G.; Corrêa, A.C.B. 2014. Aplicação da micromorfologia de solos como ferramenta para a reconstrução paleoambiental na Serra de Água Branca–AL. *Revista Geonorte*, 10: 26-31.

- Moir, W.H.; Ludwig, J.A.; Scholes, R.T. 2000. Soil erosion and vegetation in grasslands of the Peloncillo Mountains, New Mexico. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1055-1067. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431055x>
- Notebaert, B.; Berger, J.-F.; Brochier, J.L. 2014. Characterization and quantification of Holocene colluvial and alluvial sediments in the Valdaine Region (southern France). *The Holocene*, 24(10): 1320-1335. <https://doi.org/10.1177/0959683614540946>
- Novello, V.F.; Cruz, F.W.; McGlue, M.M.; Wong, C.I.; Ward, B.M.; Vuille, M.; Santos, R.A.; Jaqueto, P.; Pessenda, L.C.R.; Atorre, T.; Ribeiro, L.M.A.L.; Karmann, I.; Barreto, E.S.; Cheng, H.; Edwards, R.L.; Paula, M.S.; Scholz, D. 2019. Vegetation and environmental changes in tropical South America from the last glacial to the Holocene documented by multiple cave sediment proxies. *Earth and Planetary Science Letters*, 524: 115717. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115717>
- Oliveira, P.E.; Barreto, A.M.F.; Suguio, K. 1999. Late Pleistocene–Holocene climatic and vegetational history of the Brazilian caatinga: The fossil dunes of the middle São Francisco River. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 152: 319-337. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00061-9)
- Prosser, I.P. 1994. Holocene valley aggradation and gully erosion in headwater catchments, south-eastern highlands of Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19: 465-480. <https://doi.org/10.1002/esp.3290190507>
- Ranulpho, R.; Corrêa, A.C.B.; Lima, F.J.; Paisani, J.C. 2024. Quaternary geomorphological dynamics of colluvial deposits from silicophytoliths and soil micromorphology, Araripe Plateau, Northeast Brazil. *Quaternary International*, 697: 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2024.06.010>
- Sadler, P.M. 1981. Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections. *Journal of Geology*, 89: 569-584. <https://doi.org/10.1086/628623>
- Silva, A.F. 2025. *Dinâmica dos processos de coluvionamento no semiárido de Alagoas – Maciços de Água Branca e Mata Grande*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Francisco Beltrão.
- Silva, M.L.G. 2019. *Evolução da Paisagem Geomorfológica no Semiárido Alagoano a Partir do Estudo dos Modelados de Acumulação e Denudação do Município de Água Branca*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco.
- Smolska, E. 2007. Development of gullies and sediment fans in last-glacial areas: The example of the Suwałki Lakeland (NE Poland). *Catena*, 71: 122-131. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.10.009>
- Utida, G.; Cruz, F.W.; Vuille, M.; Ampuero, A.; Novello, V.F.; Maksic, J.; Sampaio, G.; Cheng, H.; Zhang, H.; Andrade, F.R.D.; Edwards, R.L. 2023. Spatiotemporal Intertropical Convergence Zone dynamics during the last 3 millennia in northeastern Brazil. *Climate of the Past*, 19: 1975-1992. <https://doi.org/10.5194/cp-19-1975-2023>
- van der Meij, W.M.; Reimann, T.; Vornehm, V.K.; Temme, A.J.A.M.; Wallinga, J.; van Beek, R.; Sommer, M. 2019. Reconstructing rates and patterns of colluvial soil redistribution in agrarian (hummocky) landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44: 2408-2422. <https://doi.org/10.1002/esp.4671>
- Vanwalleghem, T.; Bork, H.R.; Poesen, J.; Schmidtchen, G.; Dotterweich, M.; Nachtergaele, J.; Bork, H.; Deckers, J.; Brüschen, B.; Bungeneers, J.; De Bie, M. 2005. Rapid development and infilling of a buried gully under cropland, central Belgium. *Catena*, 63(2–3): 221-243. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.005>