

15º SIMPÓSIO NACIONAL DE  
**GEOMORFOLOGIA**

## APLICAÇÃO DO MODELO *LANDLAB* NA EVOLUÇÃO DO RELEVO DA CHAPADA DO ARARIPE, NORDESTE DO BRASIL

Bárbara Gabrielly Silva Barbosa <sup>1</sup>  
Danielle Gomes da Silva Listo <sup>2</sup>  
Carlos de Oliveira Bispo <sup>3</sup>

### RESUMO

Com base nos avanços tecnológicos da modelagem matemática, torna-se cada vez mais viável investigar a evolução geomorfológica de áreas complexas como é o caso da Chapada do Araripe. Inserida no contexto da Bacia Sedimentar do Araripe, localizada na região limítrofe entre os estados do Ceará, Pernambuco, Paraíba e Piauí, essa unidade destaca-se por uma configuração paisagística singular, caracterizada por escarpas acentuadas e formas de relevo associadas a uma longa e complexa história geológica. Este estudo tem como objetivo simular, em ambiente tridimensional, a evolução da escarpa oriental da Chapada do Araripe, utilizando o modelo LandLab. A metodologia incluiu a geração de mapas topográficos e geológicos com o auxílio do software *ArcGIS* e dados do Modelo Digital de Terreno (MDT) *Alos Palsar*. A simulação foi conduzida por meio das bibliotecas do LandLab, que foram exportadas pelo *software Spyder* em linguagem Python e permitiram incorporar variáveis como `imshow_grid`, `RasterModelGrid`, `LinearDifusser`, `FlowAccumulator`, `FastscapeEroder` e `LithologyGMI`, `LinearSegmentedColormap`, em consonância com os aspectos físicos e geológicos da região. O Grid da área foi representado em um plano cartesiano, estabelecido com  $x=200$  e  $y=150$ . Um aspecto crucial do código é que o grid se inicia a partir de um ponto Z, correspondente à elevação topográfica (`topographic_elevation`), o ponto Z referente ao código se inicia a partir do zero, com unidade de medida em metros. Na função “`grid.set_status_at_node_on_edges`” que configura as condições de bordas do grid, especificamente como os fluxos irão se comportar durante a simulação do modelo, ao qual foram retratadas as condições mais próximas da área de estudo. O grau de dureza do modelo foi caracterizado em uma escala de 0-10 do material considerado a partir dos padrões dispostos pela CPRM (2003) em seu mapeamento da chapada do Araripe. Em relação a classificação de denudação considerou como parâmetro de partida os estudos de Oliveira (2023) ao qual constatou em regiões de fluxo hídrico uma média denudacional de 13,4 m/Ma. Na taxa de soerguimento o código apresentado tem um intervalo de tempo de 100 milhões de anos, tal dado foi obtido de maneira secundária a partir de levantamento bibliográfico dos trabalhos de Morais Neto e Morais Neto *et al.* (2006 e 2009) ao qual discorre que a topografia da Chapada do Araripe se deu por meio de atividades de soerguimento, pós refreamento do Neocretáceo, ou seja, processo iniciado por volta de 100-90 Ma. Dessa forma, os resultados obtidos apresentaram correspondência com o mapa hipsométrico da área, indicando altitudes de até 900 metros na cimeira, e refletiram as variações de declividade associadas às transições litológicas. Dessa forma, o modelo demonstrou-se eficiente na representação da dinâmica evolutiva do relevo da Chapada do Araripe, contribuindo para o aprofundamento do conhecimento sobre sua história geomorfológica.

**Palavras-chave:** Geomorfologia estrutural, Evolução geomorfológica, Modelagem matemática

---

<sup>1</sup>Doutoranda do Curso de Geografia da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, docente na rede estadual de Pernambuco - SEEPE, [barbosgbarbara@gmail.com](mailto:barbosgbarbara@gmail.com);

<sup>2</sup>Professora orientadora: Doutora em Geografia, docente do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco - PPGEO/UFPE, [danielle.listo@ufpe.br](mailto:danielle.listo@ufpe.br);

<sup>3</sup>Doutor em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, docente adjunto da Universidade Federal de Sergipe (UFS) no departamento de Geografia de Itabaiana-DGEI, [carlos.bispo@ufpe.br](mailto:carlos.bispo@ufpe.br)



## INTRODUÇÃO

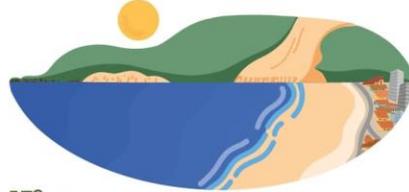
O progresso da ciência e tecnologia transformou a Geomorfologia, que antes se baseava em métodos dedutivos, em uma área capaz de gerar resultados mais quantitativos e precisos, decorrentes da integração entre Geologia e a Geocronologia (Oliveira e Salgado, 2013). Com os avanços tecnológicos na evolução do relevo, a modelagem matemática agora permite simular relevos, incorporando fatores que influenciam e controlam a evolução da paisagem, como variações litológicas, processos tectônicos, erosivos e isostáticos. Essa abordagem possibilita a utilização de modelos conceituais para a origem e evolução da área estudada.

Nessa perspectiva, o modelo matemático *LandLab* é baseado em um pacote *Python* de domínio aberto que permite a construção de qualquer modelo numérico, a depender da aplicabilidade das equações (Barnhart, *et al.*, 2020; Hobbey, *et al.*, 2017). Desenvolvido para incorporar e combinar diferentes processos de forma flexível, o *software* atende às necessidades do usuário e identifica as variáveis mais relevantes para entender um determinado processo (Tucker, *et al.* 2001). Hutton *et al.* (2018) descrevem o *LandLab* como uma coleção modular de componentes de modelo interconectados, organizados em uma rede de nós e links.

Em relação a área de aplicabilidade do modelo, a Chapada do Araripe apresenta-se como um relevo de extrema importância para o sul do Ceará, Nordeste brasileiro (Figura 01). A sua formação permeia as reativações das atividades tectônicas no período do Cretáceo Superior (Souza, 1988). Desde o seu período de formação, houveram modificações em sua morfologia acrescidos pela climas passados e ações erosivas. Atualmente, em seu pico altímetro mais elevado, a região apresenta 955 metros.

Quanto à formação e evolução do relevo, a bacia do Araripe surge após a reativação tectônica e o *rifteamento* do *Gondwana* no Mesozóico. As tensões geradas por estes eventos reativaram as zonas de cisalhamento no Nordeste brasileiro, causando a abertura de depressões nos domínios continentais, dando origem às Bacias interioranas (Brito Neves *et al.*, 2000). Dessa forma, Fambrini *et al.* (2020) destacam que a Bacia do Araripe é cronoestratigraficamente correlata às demais bacias *riftes* marginais e interiores situados no Nordeste do Brasil.

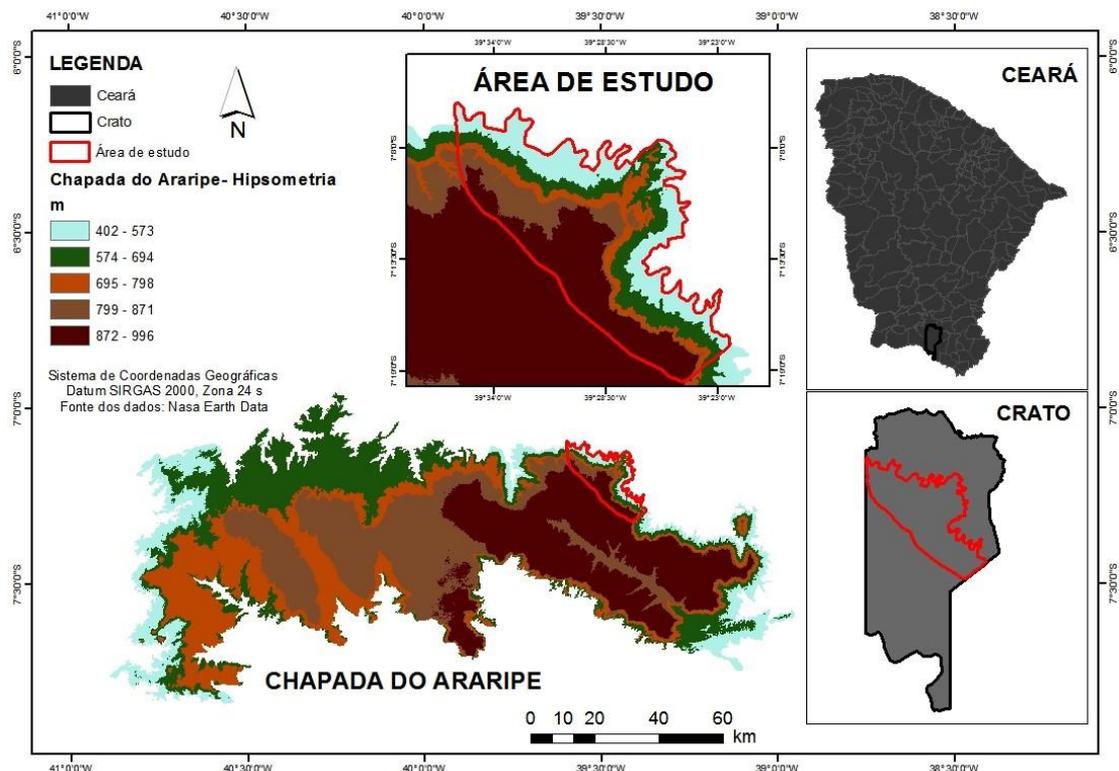
Desse modo, considerando a relevância da elucidação da evolução morfotectônica e morfoestrutural para a compreensão da história geomorfológica da Chapada do Araripe,



## 15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

assim como a carência de estudos na região, justificam-se a coleta e análise dos dados de pesquisa devido à grande importância geográfica desta área. Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho é representar em 3D a evolução da escarpa na face leste da Chapada do Araripe, utilizando o modelo *LandLab*, e comparar os resultados com parâmetros geológico e topográficos (declividade e hipsometria).

**Figura 01-** Localização da área de estudo, sendo a região da Chapada do Araripe que se encontra nos limites municipais do Crato-CE.



Fonte: Base de dados: *Nasa Earth Data*. Autores (2024).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Geração dos mapas topográficos e geológico

Os mapeamentos topográficos desempenham uma importante função na compreensão da evolução do relevo. Na atual pesquisa, os mapas foram utilizados como validação para a simulação realizada, considerando a similaridade entre o resultado do modelo 3D e a atual topografia da região. Desse modo, para a delimitação e elaboração dos materiais de hipsometria e declividade, foi utilizado o *software* ArcGis versão 10.5 nas dependências do Laboratório.

A base de dados utilizada foi o Modelo Digital do Terreno-MDT *Alos Palsar*, com resolução de 12,5m e escala de 1:50.00, disponível gratuitamente. O mapa hipsométrico

foi classificado de acordo com as altitudes, máximas e mínimas, do terreno. Para o mapa de declividade, adotou-se o parâmetro de ocupação e segurança de encostas proposto pela Lei Lehmann (Lei Federal n.6.766/79), que divide a declividade em três classes:  $0^{\circ}$ - $9,6^{\circ}$ ;  $9,6^{\circ}$ - $16,7^{\circ}$  e  $16,8^{\circ}$ >. O mapa geológico foi adquirido por meio de dados secundários obtidos no Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2003).

### Geração do Modelo 3D

As construções das linhas de código seguem uma lógica para a funcionalidade do modelo, é necessário primeiramente acessar a biblioteca do *LandLab* (*RasterModelGrid*, *LinearDifusser*, *FlowAccumulator*, *FastScapeEroder* e *LithologyGMI*) para posteriormente fazer o *plot* dos dados, de forma contrária, o modelo não terá o sucesso esperado. A ferramenta *Spyder* onde foram gerados os resultados, tem um sistema bastante amigável, tanto para a navegação, quanto para o direcionamento dos possíveis erros.

A taxa de soerguimento (*uplift\_rate1*), conforme implementada no código do *Landlab*, foi aplicada de maneira abrangente a toda a área de estudo, com o intuito de ser congruente com as investigações relacionadas à reconstrução da história da formação da Chapada do Araripe. Os estudos revisados, especialmente os de Camacho e Souza (2017), ressaltam a ocorrência do evento de soerguimento, expresso pela instrução específica: "U[*np.where(grid.x\_of\_node >= 0)*] [0]] = *uplift\_rate1*". Desse modo, o coeficiente U é um array que representa a taxa de soerguimento em cada nó, sendo aplicada a nós com  $\times \geq 0$ . A Figura 02 apresenta as linhas de códigos da taxa de soerguimentos aplicadas a área de estudo.

**Figura 02** – As linhas de códigos *LandLab* referentes a taxa de soerguimento.

```
36
37     uplift_rate1 = 0.8e-5
38
39     U = np.zeros(grid.number_of_nodes)
40     U[np.where(grid.x_of_node >= 0)][0]] = uplift_rate1
41
```

Fonte: Autores (2023).

As taxas de erosão foram classificadas em cinco pontos (Figura 03), considerando os aspectos físicos, grau de dureza, especificamente a geologia de cada área da região estudada. Esse processo de classificação, considerou como parâmetro de partida os estudos de Oliveira (2023) ao qual constatou em regiões de fluxo hídrico uma média



denudacional de 13,4 m/Ma. A média apresentada foi ajustada de acordo com as fisionomias expostas nos mapas morfométricos. A validação das taxas de erosão ocorre a medida que o modelo final se aproxima da morfologia atual da escarpa.

**Figura 03** - Taxas de erosão classificadas em cada área da Face Leste da Chapada do Araripe.

```
89
90
91
92 # Inicialização e configuração do componente LithologyBMI
93 lith = LithologyBMI()
94 lith.HB = HB
95
96 k_sp1 = 1.357e-8
97 k_sp2 = 1.22e-8
98 k_sp3 = 0.6e-7
99 k_sp4 = 0.55e-7
100 k_sp5 = 0.65e-7
101
102 ktest = np.zeros(grid.number_of_nodes)
103
104
```

Fonte: Autores (2023).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando os aspectos topográficos de hipsometria e declividade, os resultados foram analisados comparativamente com os dados do modelo 3D. Dessa forma, ao examinar a face Leste da Chapada do Araripe, observou-se que a análise da Frequência de Distribuição (FD) das classes altimétricas revela uma distribuição equilibrada das altitudes, sem grandes discrepâncias entre a cimeira e outras áreas. Isso fica evidente ao compararmos a classe de menor altitude, variando de 657 a 780 metros (16,5%), com a de maior altitude, de 891 a 955 metros (25,1%). A pequena diferença entre essas classes indica uma distribuição homogênea das altitudes na região estudada (Figura 4A).

A análise da declividade mostra que a classe de menor inclinação ( $0^{\circ}$ - $9,6^{\circ}$ ) possui a maior frequência (74,5%), seguida pela classe intermediária ( $9,61^{\circ}$ - $16,7^{\circ}$ ) com 17,3%, e a classe mais alta ( $>16,8^{\circ}$ ) com apenas 8,2% (Figura 4B). Segundo Crepani *et al.* (2001), a maior declividade aumenta a energia cinética da água, acelerando o transporte e a erosão. Portanto, as áreas mais inclinadas estão mais suscetíveis à erosão, o que deve ser considerado em modelos de previsão futuros.

Os aspectos geológicos têm uma influência direta na morfologia da região. Observam-se quatro formações distintas: Formação Exu, Formação Santana, Formação Missão Velha e Intrusão Granítica. Essas formações apresentam diferentes distribuições na área de estudo, variando entre o topo e o sopé da encosta. As FD são: Formação Exu com 41,7%, Formação Santana com 32,9%, Formação Missão Velha com 15,3% e Intrusão Granítica com 10,1% (Figura 4C3).



A Formação Exu é composta por arenitos grossos e conglomeráticos (Assine, 1992). Teles (1995) aponta que a deposição ocorreu em clima quente e úmido, com erosão nas bordas do relevo, provavelmente devido aos movimentos tectônicos. Os sedimentos fluviais foram depositados em condições eustáticas positivas, indicando um soerguimento epirogênico desde o Albiano médio/superior. Esse processo alterou a paleodrenagem continental, direcionando-a para o Oeste, em direção à Bacia do Parnaíba, conectando-a à Formação Itapecuru (Assine, 2007).

A Formação Santana é composta por três membros (Crato, Ipubi e Romualdo) associados a primeira fase pós *rifte* durante o meso-cretáceo (aptiana/albiana) (Chagas, 2006). O membro Crato é composto por depósitos lacustres predominantemente carbonáticos, incluindo arenitos, siltitos e folhelhos que separam as camadas. Apresenta uma rica associação fossilífera em calcários laminados e folhetos, indicando um ambiente lacustre sem formas marinhas. O segmento mostra um ciclo transgressivo-regressivo incompleto no topo (Assine, 1992 e 2007; Neumann e Cabrera, 1999).

O Membro Ipubi é crucial para entender a evolução do relevo, pois revela que não é exclusivamente continental, mas sim um lago salino com características tanto continentais quanto marinhas. A presença de evaporitos indica que sua formação ocorreu em ambientes áridos a semiáridos, sujeitos a flutuações no nível do mar (Assine 1992 e 2007). O membro Romualdo confirma a ocorrência de uma inclusão marinha na área durante o cretáceo, evidenciado pela concentração de fósseis. São encontrados sequências de folhelhos, arenitos e carbonatos, que exibem estruturas sedimentares indicativas de retrabalhamento por ondas (Assine, 1992 e 2007; Neumann e Cabrera, 1999).

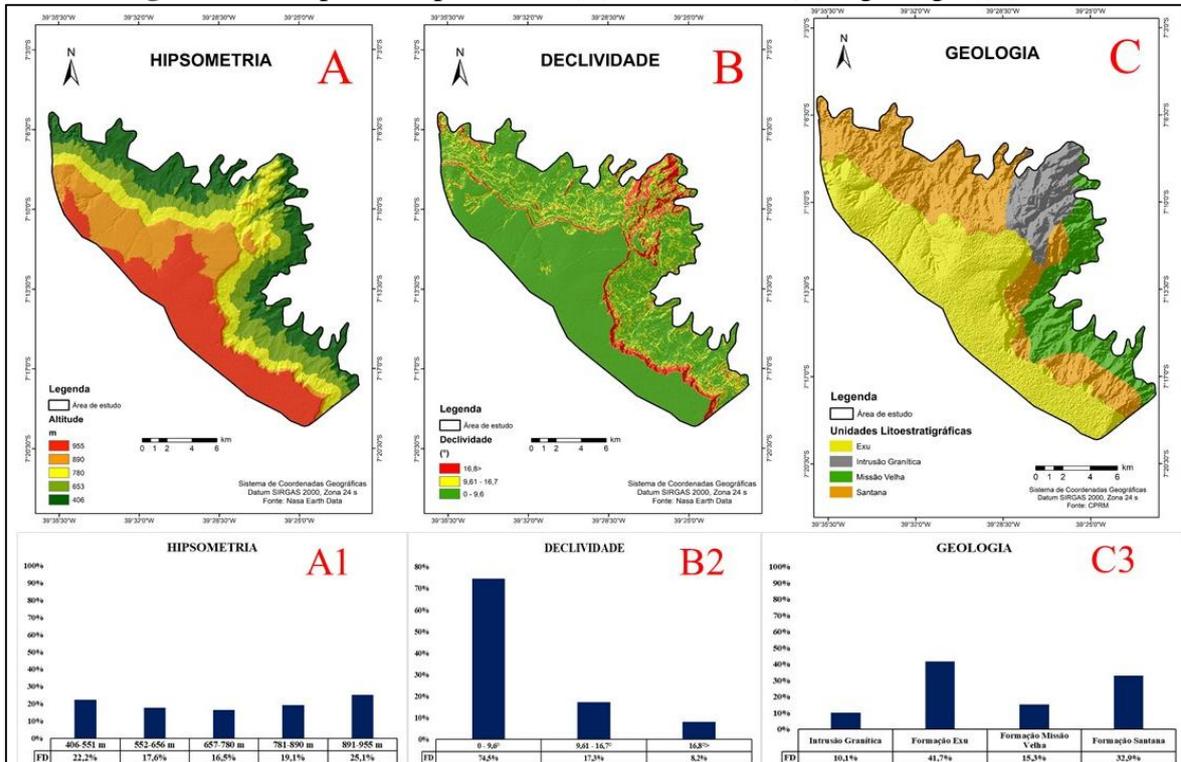
A Formação Missão Velha (Jurássica) caracteriza-se por arenitos grossos mal selecionados de formação fluvial com composições de siltitos, calcários e folhelhos (Assine, 1992 e 2007; Neumann e Cabrera, 1999). Tal formação geológica é composta por arenitos facilmente desagregáveis e argilosos, com granulações predominantemente médias ou finas, e ocasionalmente apresentam características conglomeráticas.

A intrusão granítica (na área central) possui idade pré-cambriana (CPRM, 2014). Esse tipo de formação, na porção setentrional do Nordeste Brasileiro são remetidos a zonas de cisalhamentos do período brasileiro. Tais corpos funcionaram como condutos que circularam grandes volumes de fluidos e de granitos orogênicos, resultado da intrusão em regiões extensionais relacionados às estruturas tectônicas locais e regionais (Almeida e Ulbrich, 2003; Trindade *et al.*, 2008; Neves, 2012).



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE  
**GEOMORFOLOGIA**

Figura 04 - Mapas de hipsometria (A), declividade (B) e geologia (C).



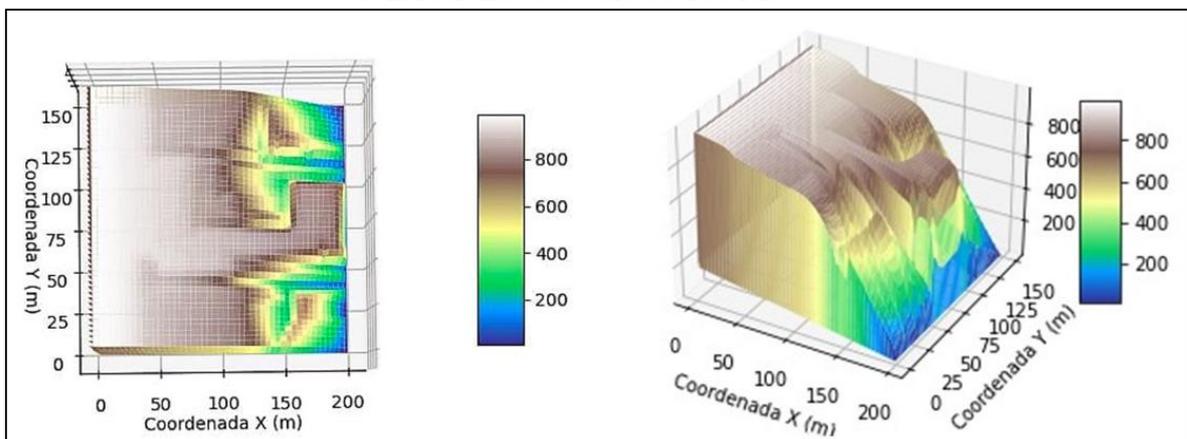
Fonte: Autores (2023).

A modelagem matemática utilizando o *LandLab* aplicada ao setor leste da Chapada do Araripe (Figura 05) mostrou que a altitude do relevo corresponde ao mapa hipsométrico, considerando alguns ajustes em futuras simulações. A declividade apresentada no mapeamento foi bastante consistente, especialmente nas transições entre as formações geológicas Exu, Missão Velha e Santana. As feições, como a intrusão granítica e os maciços residuais e cristas, são claramente visíveis e foram consideradas na simulação. Diferentes taxas de erosão foram aplicadas a materiais mais suscetíveis ao processo erosivo, o que permitiu observar sua influência na evolução do relevo ao longo de 100 milhões de anos, período em que se formaram as características atuais da paisagem. As relações topográficas e geológicas servem como validação para o material apresentado na modelagem do *LandLab*.

Vale destacar que os canais demonstraram uma configuração bem definida em termos de espaço, refletindo uma taxa de erosão que impulsiona o desenvolvimento contínuo do relevo. Embora as condições paleoclimáticas da região não tenham sido diretamente simuladas neste estudo, os ajustes na média da taxa de erosão que foram citados anteriormente, foram cruciais para a simulação da evolução em diferentes níveis de formação de cursos d'água e morfologia.

Autores como Ab'Saber (1974) e Christofolletti (1977 e 1980) ressaltam a influência do clima semiárido como uma característica distintiva na evolução do relevo. No entanto, é importante observar que a região experimentou sazonalidade climática durante a deposição dos materiais na bacia sedimentar, incluindo a Chapada. Ribeiro *et al.* (2010) salientam que os processos de intemperismo presentes em climas úmidos também ocorrem em áreas semiáridas, mas em uma velocidade intempérica reduzida. Assim, na simulação, onde foram empregados valores médios, essa sazonalidade manifestou-se no resultado final, mesmo que sua extensão específica não tenha sido explicitamente incorporada.

**Figura 05** - Simulação 3D da evolução do relevo da face leste da Chapada do Araripe, considerando a escala de 100 Ma.



Fonte: Autores (2023).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados da modelagem matemática com o *LandLab*, pode-se afirmar que estes são satisfatórios em relação à geomorfologia atual da Chapada, apesar de todos os modelos simplificarem processos complexos. As altitudes de 900 metros representadas no modelo, especialmente na cimeira da Chapada, estão em conformidade com os parâmetros do mapa hipsométrico da região. A declividade apresentada no modelo foi consistente com as disposições cartográficas, considerando as transições litológicas da área. O mapa geológico foi fundamental para identificar a fragilidade das feições, ajustando os dados apresentados por Oliveira (2023) com base em estudos anteriores. Tendo em vista os aspectos evolutivos e o aperfeiçoamento dos estudos de modelagem, simulações futuras necessitam de ajustes em relação ao sopé e à extensão da Escarpa Rochosa.



## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de pesquisa do primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

AB'SABER, A. N. O domínio morfoclimático semi-árido das caatingas brasileiras. **Geomorfologia**, n. 43, 1974.

ALMEIDA, A. R.; ULBRICH, H. G. J. O Batólito Granítico Quixeramobim-Ce - Aspectos estruturais internos e mecanismo de alojamento crustal. **Revista de Geologia UFC**, v. 16, p. 81-98, 2003.

ASSINE, M. L. Análise estratigráfica da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, Curitiba, v. 22, n. 3, p. 289-300, 1992.

ASSINE, M. L. Bacia do Araripe. **Boletim de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 371-389, mai/nov. 2007.

BARNHART, K. R. et al. Short communication: Landlab v2.0: a software package for Earth surface dynamics. **Earth Surf. Dynam.**, v. 8, p. 379-397, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/esurf-8-379-2020>. Acesso em: 05 de setembro de 2022.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 10 de abril de 2012. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/>> Acesso em: 19 jun. 2024.

BRITO NEVES, B. et al. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. In: CORDANI, V. G. et al (Ed.). Tectonic evolution of South America. Rio de Janeiro, p. 151-182, 2000.

CAMACHO, C. R.; SOUZA, F. R. F. R. O. O arcabouço estrutural da Bacia Sedimentar do Araripe, Província Borborema, baseado em dados aeromagnetométricos. **Geol. USP, Sér.cient.**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 114-161, setembro 2017.

CHRISTOFOLETTI, A. A mecânica do transporte fluvial. **Geomorfologia**, n. 51, São Paulo, 1977. p. 1-41.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 188 p.

CREPANI, E., et al. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. **INPE**: São José dos Campos, 124 p, 2001.

FAMBRINI, G.L. et al. Estratigrafia da Bacia do Araripe: estado da arte, revisão crítica e resultados novos. **Revista do Instituto de Geociências – USP**. São Paulo, v. 20, n. 4, p.16-22, dezembro 2020.



HOBLEY, D. E. J. et al. Creative computing with Landlab: an open-source toolkit for building, coupling, and exploring two-dimensional numerical models of Earth-surface dynamics. **Earth Surf. Dynam.**, v. 5, p. 21-46, 2017.

HUTTON, E. et al. Landlab/landlab, 2018. Disponível em: doi:10.5281/zenodo.1451936. Acesso em: 11 de setembro de 2022.

NEUMANN, V. H. de M. L.; CABRERA, L. Uma Nueva Proposta Estratigráfica para La Tectonos ecuencia Post-Rifte de la Cuenca de Araripe, Noreste de Brasil. **In:** Bol. 5º Simpósio Sobre o Cretáceo do Brasil e 1º Simpósio Sobre El Cretácico de América Del Sur, n. 5 1999, Serra Negra, v. único. Anais... São Paulo, 1999, p. 279-285.

NEVES, S.P. Granitos Orogênicos: da geração dos magmas à intrusão e deformação. **Synergia**, Rio de Janeiro, 2012.

OLIVEIRA, C. K. R.; SALGADO, A. A. R. Geomorfologia brasileira: panorama geral da produção nacional de alto impacto no quinquênio entre 2006-2010. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 1, p. 117-123, 2013.

OLIVEIRA, J. G. Taxas de Denudação e Evolução do Relevo em Ambiente Semiárido. 2023. **Tese** (Doutorado em Geografia) - Curso de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

RIBEIRO, S. C. et al. Geomorfologia de áreas semiáridas: Uma contribuição ao estudo dos sertões nordestinos. **Revista de Geografia, Recife: UFPE – DCG/NAPA**, v. 27, n. 1, jan/mar. 2010.

SOUZA, M.I.M. Contribuição ao Estudo das Unidades Morfoestruturais do Estado do Ceará. **Revista de Geologia da UFC n° 1**, p: 73-91. Fortaleza, 1988.

TRINDADE, I.V. et al. Comportamento de elementos químicos em rochas mineralizadas em ouro na Faixa Seridó, Província Borborema. **Revista Brasileira de Geociências**, 38(2), 303–318, 2008.

TUCKER, G. et al. The Channel-Hillslope Integrated Landscape Development Model (CHILD). **In:** HARMON, R.S.; DOE, W.W. (eds). **Landscape Erosion and Evolution Modeling**. Boston, MA: Springer, 2001. doi:10.1007/978-1-4615-0575-4\_12.