



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 7, n° 1 (2021)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n1ID20692>



PROCESSOS GEOMORFOLÓGICOS E EVOLUÇÃO DA PAISAGEM NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Rafael Albuquerque Xavier

Prof. Dr. do Departamento de Geografia e do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Campina Grande-PB, Brasil.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1737-7547>

Email: xavier@ceduc.uepb.edu.br

Resumo

Os processos geomorfológicos são responsáveis por promoverem transformações na paisagem do semiárido. O intemperismo é responsável por decompor as rochas, formar novos materiais e alterar a superfície rochosa. No semiárido sobre rochas cristalinas, o intemperismo permite a formação de solos, como os Luvissoles e os Neossolos litólicos, principalmente nas áreas de rochas metamórficas, e nos afloramentos graníticos, produz um conjunto de feições específicas que são responsáveis pela sua evolução. A erosão dos solos é predominantemente por escoamento superficial, produzindo altas taxas nas encostas e assoreamento dos leitos fluviais. De modo geral, os processos erosivos e a remoção dos solos são mais rápidos que o intemperismo e a formação de novos materiais. Assim, durante o processo evolutivo resultarão delgados regolitos residuais, podendo muitas vezes expor o corpo rochoso. Essa condição foi caracterizada por Gilbert (1877) e foi denominada de “limites de intemperismo”.

Palavras-chave: intemperismo; erosão; semiárido.

GEOMORPHOLOGICAL PROCESSES AND LANDSCAPE EVOLUTION IN THE BRAZILIAN SEMIARID

Abstract

Geomorphological processes are responsible for promoting transformations in the semiarid landscape. Weathering is responsible for decomposing rocks, forming new materials and altering the rocky surface. In the semiarid region on crystalline rocks, weathering allows the formation of soils, such as Luvisols and litholic Neossols, mainly in the areas of metamorphic rocks, and in granitic outcrops, it produces a set of specific features that are responsible for their evolution. Soil erosion is predominantly due to runoff, producing high rates on the slopes and silting up of river beds. In general, erosion processes and soil removal are faster than weathering and the formation of new materials. Thus,

during the evolutionary process, small residual regoliths will result, often exposing the rocky body. This condition was characterized by Gilbert (1877) and was called "weathering limits".

Keywords: weathering; erosion; semiarid.

PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS Y EVOLUCIÓN DEL PAISAJE EN EL SEMIÁRIDO BRASILEÑO

Resumen

Los procesos geomorfológicos son responsables de promover transformaciones en el paisaje semiárido. La meteorización es responsable de descomponer las rocas, formar nuevos materiales y alterar la superficie rocosa. En las semiáridas en rocas cristalinas, la meteorización permite la formación de suelos, como Luvisoles y Neossolos litólicos, principalmente en las áreas de rocas metamórficas, y en afloramientos graníticos, produce un conjunto de características específicas que son responsables de su evolución. La erosión del suelo se debe principalmente a la escorrentía, que produce altas tasas en las laderas y la sedimentación de los lechos de los ríos. En general, los procesos de erosión y la eliminación del suelo son más rápidos que la intemperie y la formación de nuevos materiales. Por lo tanto, durante el proceso evolutivo, resultarán pequeños regolitos residuales, a menudo capaces de exponer el cuerpo rocoso. Esta condición se caracterizó por Gilbert (1877) y se denominó "límites de intemperismo".

Palabras-clave: meteorización; erosión; semiárido

1. INTRODUÇÃO

Sedimentos são materiais geomórficos, ou seja, são o produto da atuação dos processos geomorfológicos no ambiente. Processos geomorfológicos são uma sequência de ações, contínuas ou não, responsáveis pela origem e evolução das formas do relevo, variando no espaço e ao longo do tempo. Como exemplo de processos geomorfológicos, destacamos o intemperismo, a erosão, o transporte e a sedimentação de materiais.

Contudo, ressaltamos que os processos geomorfológicos não atuam isoladamente, ao contrário, estão interligados e alimentam-se dessa relação. Desta maneira, os processos de intemperismo

são influenciados pelos processos de erosão, aos quais estão diretamente associados à declividade das encostas, por exemplo. Essa relação de interdependência varia em magnitude sobre o espaço terrestre e num mesmo lugar ao longo do tempo.

As relações de interdependência dos processos geomorfológicos sempre foram objeto de interesse da Ciência Geomorfológica, principalmente, nos estudos que tratam sobre evolução de paisagem. Dentre os diversos estudos, o trabalho clássico de Grove Karl Gilbert (1877) é considerado pioneiro nos estudos sobre evolução do relevo, ao relacionar processos de intemperismo com os de erosão e transporte. Para Gilbert (1877), a plena evolução da superfície terrestre depende do balanço entre as taxas de intemperismo e de erosão. Assim, ele definiu os conceitos de “Limites de Intemperismo” e “Limites de Transporte”, como situações extremas dos processos geomorfológicos.

Em encostas de altas declividades, as taxas de transporte de materiais são superiores as de intemperismo, e o regolito tende a tornar-se pouco espesso, podendo até atingir a sua remoção completa, expondo a rocha sã. Nesse estágio, nas encostas íngremes e rochosas as interações água-rocha seriam diminutas, dificultando as reações químicas. A essa condição, Gilbert denominou de “Limite de Intemperismo”, que quando atingida instaura uma fase de relativa estabilidade da paisagem geomorfológica.

Por outro lado, áreas planas ou de declividade baixas teriam o comportamento exatamente oposto. A suavidade do relevo condicionaria baixa energia no sistema geomorfológico, favorecendo a infiltração das águas superficiais, elevando a taxa de intemperismo e, por conseguinte, a espessura do perfil. A insuficiência dos processos erosivos e de transporte é, neste caso, considerado uma condição extrema, e Gilbert chamou de “Limite de Transporte”. Essa condição também geraria uma fase de relativa estabilidade na evolução geomorfológica, pois o contínuo espessamento do perfil, em determinado momento, limitaria a chegada de umidade, oriunda da infiltração e percolação, até a frente de intemperismo.

Desta maneira, a existência de perfis de intemperismo muito rasos ou muito espessos não resultaria em boas condições para uma acentuada evolução do relevo. De acordo com Gilbert, existiria uma espessura “ideal” de mantos de intemperismo, onde essa resultaria do equilíbrio entre as taxas de transporte e as taxas de intemperismo. A partir daí, elucidou alguns princípios como: as taxas de avanço do intemperismo são iguais as taxas de rebaixamento do relevo, ou seja, proporcionais; intemperismo e rebaixamento do relevo são uniformes no espaço; a taxa de erosão é proporcional ao ângulo da encosta, condicionando o poder erosivo à declividade. E, em última análise, o rebaixamento seria mais efetivo em condições em que ambas as superfícies topográfica e rochosa degradassem a taxas similares, mantendo sempre uma espessura de regolito relativamente constante.

Ao longo dos séculos XX e XXI, diversos trabalhos puderam confirmar parcial ou totalmente as ideias gilbertianas. Destacamos Ahnert (1987), que elaborou um modelo matemático de simulação, onde concluiu que a taxa de intemperismo químico do substrato é menor em rochas expostas do que as que têm um regolito de espessura moderada, para uma mesma litologia. Onde as primeiras são denudadas mais lentamente, formando *inselbergs* causados pela diferenciação espacial dos processos exogenéticos.

Stallard (1988), aplicou os conceitos de “Limites de Transporte” e “Limites de Intemperismo” para estudos de evolução do relevo governado por movimentos de massa.

Segundo Phillips (2005), existe uma estreita ligação positiva entre denudação e intemperismo, pois as taxas de intemperismo são mais rápidas com uma fina cobertura regolítica ou com a rocha exposta; na ausência da remoção do regolito a taxa de intemperismo será reduzida para o mínimo. A ocorrência da denudação regular manterá a frente de intemperismo próximo ou na superfície, favorecendo o intemperismo.

De fato, o entendimento da dinâmica e da relação entre os processos geomorfológicos parece ser condição primordial para a compreensão da evolução geomorfológica atual e pretérita de uma determinada região. Baseado neste percurso teórico apresentado, o presente trabalho objetiva discutir acerca dos processos geomorfológicos atuantes no semiárido brasileiro, em especial sobre os ambientes cristalinos, utilizando o Estado da Paraíba como recorte amostral, particularmente a Região Cariri e o Parque Estadual da Pedra da Boca (PEPB) (Figura 1). Por conseguinte, serão feitos apontamentos sobre a dinâmica evolutiva da paisagem geomorfológica no semiárido sobre rochas cristalinas.

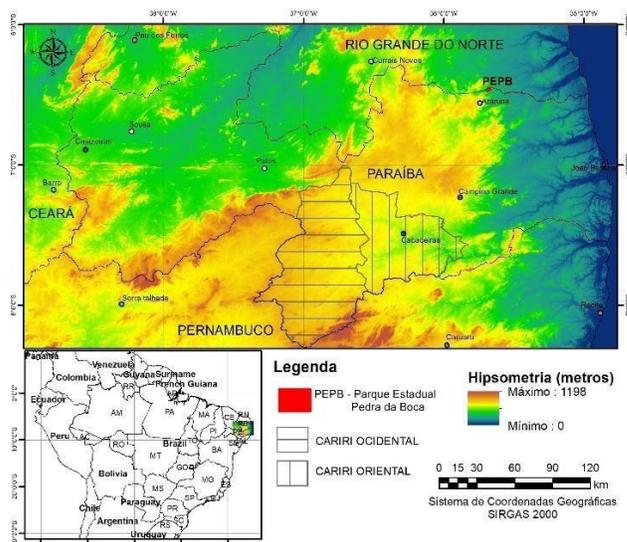


Figura 1 - Recorte amostral do Estado da Paraíba, com destaque para o Cariri Paraibano e o Parque Estadual da Pedra da Boca, no município de Araruna.

2. PROCESSOS GEOMORFOLÓGICOS DOMINANTES NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Os processos geomorfológicos que atuam sobre uma paisagem atual são governados, mas não exclusivamente, pelas condições e características hidro-climáticas vigentes. De modo geral, intemperismo, erosão, transporte e sedimentação dependem do tipo e intensidade de energia e matéria que entram no sistema geomorfológico. O padrão térmico e de umidade condicionam os processos de intemperismo. O regime de chuvas influencia no potencial erosivo de uma área, além do próprio regime fluvial.

Por outro lado, os fatores litoestruturais do relevo oferecem diferentes resistências aos processos geomorfológicos. Variações litológicas implicam em mudanças mineralógicas, de arranjos, texturas, etc. que responderão de modo diferente frente aos processos de intemperismo, por exemplo. Estruturas geológicas como falhas e fraturas, funcionam como descontinuidades hidrológicas.

2.1. Processos de intemperismo

Os processos de intemperismo são responsáveis pela transformação da topografia rochosa, gerando materiais alterados e, posteriormente, atuando sobre estes. De modo genérico, considera-se que os processos de intemperismo no semiárido são menos agressivos que em ambientes tropicais úmidos. A precipitação anual média entre 300 e 800 mm, associada a temperaturas e evapotranspiração elevadas, produzem a condição de *déficit* hídrico em quase todos os meses do ano.

Regionalmente, as áreas sobre rochas cristalinas no semiárido se enquadram na zona de intemperismo de bissialitização, que é caracterizada por processos de lixiviação fraco e produzem argilominerais do tipo 2:1, como as montmorilonitas, esmectitas, vermiculitas, ilitas, etc.. Localmente, a variação entre rochas cristalinas produz diferentes resistências aos processos de intemperismo. Via de regra, as rochas metamórficas (principalmente os xistos e gnaisses) são menos resistentes que as rochas plutônicas e, por isso, permitem o rebaixamento do relevo de modo mais efetivo, caracterizando áreas de colinas amplas suaves e superfícies aplainadas. Nessas áreas, como produto dos processos de intemperismo e pedogenéticos, ocorrem os Luvissolos Crômicos, que são solos ricos em argila de alta atividade e possuem fertilidade natural de média a alta (Figura 2).



Figura 2 - Luvissolo Crômico localizado no perímetro urbano do município de Camalaú, Paraíba. Fonte: Autor, 2017.

Nas áreas de rochas graníticas são comuns ocorrências de relevos residuais (CORRÊA *et. al.*, 2010), como os campos de

inselbergues e os lajedos (MAIA e NASCIMENTO, 2018). Os solos mais comuns, derivados do intemperismo das rochas granitóides no nordeste semiárido, são os Neossolos Litólicos e Regolíticos. Os Neossolos, de modo geral, apresentam pouca diferenciação entre os horizontes, textura arenosa a média e são ricos em minerais primários de fácil intemperização (Figura 3).



Figura 3 - Neossolo Regolítico na zona rural do município de São Domingos do Cariri, Paraíba. Fonte: Autor, 2019.

Nos afloramentos rochosos graníticos, como os inselbergues e os lajedos, a formação de solo é limitada e os processos de intemperismo mudam para atuar diretamente sobre as rochas, dando origem a um conjunto peculiar de formas típicas de ambientes graníticos. Segundo Maia *et al.* (2015), os campos de inselbergues surgem e se destacam nas depressões sertanejas, sustentados pelas intrusões graníticas que foram exumadas pela erosão diferencial. Os lajedos são grandes áreas de superfície rochosa, em sua maioria granítica, cujas amplitudes altimétricas raramente ultrapassam 100 metros (SOUZA e XAVIER, 2017), e de maneira geral assumem forma dômica assimétrica do tipo *whaleback* (dorso de baleia) (LAGES *et al.*, 2013) (Figura 4).

Uma vez expostos na superfície esses afloramentos rochosos estão submetidos às intempéries climáticas e vão sofrer alterações que darão origem a formas particulares dos relevos graníticos. Dentre as mais comuns destacam-se os *tafoni* e as *gnammas* (*weather pit*). *Tafoni* são cavidades formadas nas rochas e possuem gênese complexa e diversificada. Duas grandes correntes explicativas, não excludentes, abordam a gênese dos *tafoni*. A primeira reside no desenvolvimento do intemperismo diferencial em descontinuidades lito-estruturais e a segunda estaria relacionada ao crescimento de cristais a partir de soluções salinas no contato com a rocha (haloclastia). Essas cavidades podem ter tamanhos variados, desde unidades a centenas de metros e ocorrer em afloramentos de diferentes dimensões.



Figura 4 - Lajedo de Pai Mateus, Cabaceiras, Paraíba. Fonte: Autor, 2017.

Segundo Maia e Nascimento (2018), existem diversas formas de *tafoni* e destacam o *tafone* basal (Figura 5), o *tafone* de parede (Figura 6), *honeycombs* e alvéolos. A existência de fraturas, veios, diques e enclaves de xenólitos favorecem o intemperismo dos materiais menos resistentes, condicionando a localização e formato inicial da abertura das cavidades.

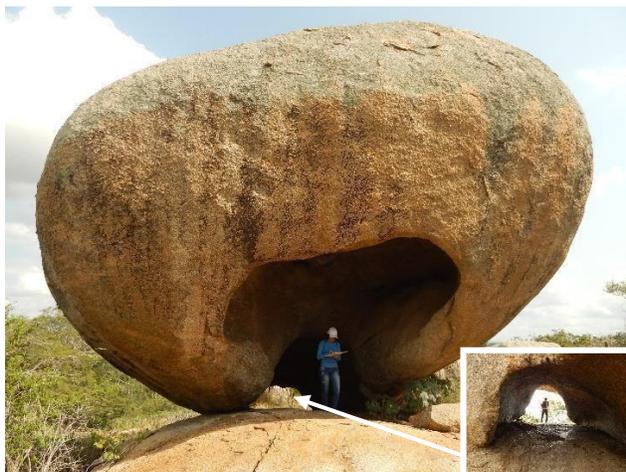


Figura 5 - Tafone basal em boulder granítico na área do Plutão Bravo, Fazenda Salambaia, Cabaceiras, Paraíba. Fonte: Autor, 2019.

Os *honeycombs* (ou alvéolos) são *tafoni* de menor dimensão, geralmente desenvolvidos dentro de um *tafone* de maior tamanho (Figura 7). Localizam-se no teto interior do *tafone* maior, promovendo sua evolução de baixo para cima, a partir do crescimento e coalescência das pequenas cavidades, transformando-se em uma cavidade maior.

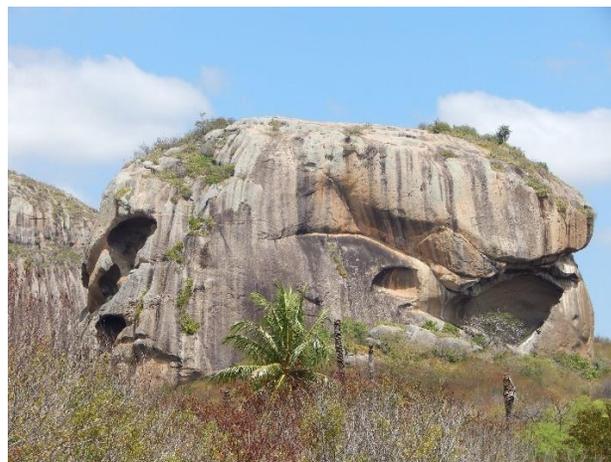


Figura 6 - Pedra da Caveira no Parque Estadual da Pedra da Boca, Araruna, Paraíba. Exemplos de tafoni de parede ou lateral. Fonte: Autor, 2019.

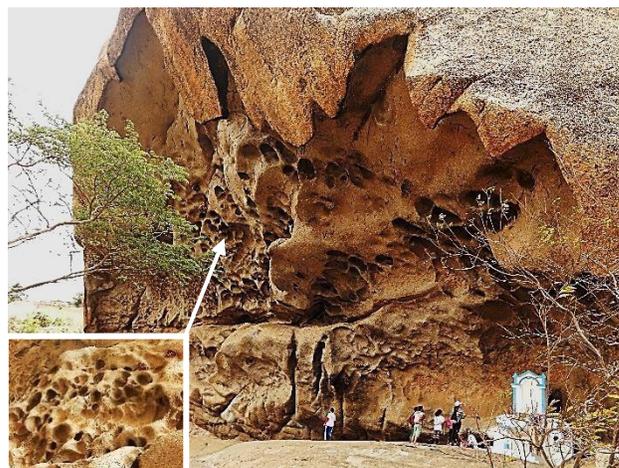


Figura 7 - Honeycombs desenvolvidos no interior do tafone da Pedra do Letreiro (ou da Santa) no Parque Estadual da Pedra da Boca, Araruna, Paraíba. Fonte: Autor, 2019.

O Segundo tipo de feição comum, resultante do intemperismo diferencial em rochas graníticas são as *gnammas*, também conhecidas na literatura internacional como *weathering pits* e *pias*, se configuram como bacias rochosas originadas pelo intemperismo químico. De acordo com Bigarella *et al.* (1994), no semiárido brasileiro as *gnammas* são depressões ou bacias naturais desenvolvidas nos afloramentos rochosos (geralmente graníticos), devido a ação intempérica da água sobre determinadas diaclases, potencializada pela ação biológica, particularmente dos vegetais inferiores. Sua ocorrência mais comum é em superfícies rochosas horizontais suaves (Figura 8A), de baixa declividade e, quando ocorrem em superfícies de maior declividade tornam-se *armchair hollow* (poltronas de braço) (Figura 8B), por terem um lado rebaixado que permite a saída de água (TWIDALE, 1982).



Figura 8 - Diferentes tipos de gnammas. A) Gnamma típica, fechada em superfície horizontal suave, Lajedo do Bravo, Boa Vista-PB; B) Gnamma do tipo “poltrona de braço” (armchair hollow) no alto da Pedra do Lagarto, Serra de São Bento-RN. Fonte: Autor, 2019.

Outras feições comuns na paisagem geomorfológica granítica do semiárido são os blocos de rochas com variados graus de arredondamento. Boulders ou matações, como também são chamados, possuem processos de formação mais complexos e tempo mais longo. São resultantes do processo de diaclasamento por alívio de pressão do batólito aflorante, que gera um sistema de fraturas perpendiculares, onde os processos de intemperismo atuam de modo diferencial para individualizar os blocos. Esses blocos, inicialmente apresentam formatos retangulares variados, com lados (faces) ortogonais entre si. Posteriormente, com o desenvolvimento do manto de intemperismo sob clima úmido, os blocos imersos no saprolito sofrem processo de esfoliação esferoidal e arredondamento. Dependendo da duração temporal sob clima úmido e intemperismo químico intenso, o arredondamento pode atingir vários níveis de blocos empilhados em sub-superfície. Com a mudança para um clima semiárido, os processos denudacionais generalizados promovem a remoção por erosão superficial do regolito, rebaixando a superfície e exumando os boulders. Em muitos casos, os processos erosivos

são tão intensos que removem o regolito por completo expondo a superfície rochosa (lajedo). Os blocos arredondados quando exumados sobre o lajedo rolam e se espalham até se acomodarem (Figura 4). Paralelamente, os blocos retangulares que estavam a profundidades maiores, e a frente de intemperismo não teve tempo suficiente para atingir e arredondar, permanecem empilhados mesmo após exumados, formando feições como *tors* e *castle koppies* (Figura 9).



Figura 9 - Feições de blocos retangulares empilhados. A e B) Tors no entorno do inselbergue da Serra da Engabelada, Congo-PB. C) Castle Koppie da Saca de Iã, Cabaceiras-PB. Fonte: Autor, 2018.

2.2. Processos de erosão

Os processos erosivos atuantes no semiárido brasileiro também devem ser analisados em diferentes domínios geológicos, pois se os processos de intemperismo e formação do regolito são distintos em ambientes cristalinos e sedimentares, os de erosão também são. Assim como foi analisado anteriormente para os processos de intemperismo, os processos de erosão serão apresentados para os ambientes das rochas metamórficas e plutônicas.

As extensas superfícies aplainadas e de colinas amplas suaves, sobre rochas metamórficas indiscriminadas, com a presença de Luvisolos Crômicos, Neossolos Litólicos e Regolíticos, vegetação de caatinga arbustiva, dominam a paisagem semiárida. A insuficiência hídrica subterrânea faz com que o sistema geomorfológico opere, predominantemente, por fluxos hídricos superficiais. Em situações específicas locais, podem ser observados fluxos hídricos sub-superficiais e formação de voçorocamento.

O regime de chuvas concentradas associado à baixa densidade de cobertura vegetal favorecem a geração de escoamento superficial do tipo hortoniano, em referência a Horton (1933). Segundo Coelho Netto (1998), o escoamento superficial é formado com o excedente de precipitação em relação à capacidade de infiltração do solo. Assim, os processos erosivos derivados do escoamento superficial estão relacionados a forma do escoamento, podendo este ser de fluxo difuso ou concentrado e linear.

O escoamento superficial difuso ocorre sobre a encosta de modo a lava-la como um todo, não ocorrendo nenhum tipo de concentração significativa. Esse tipo de escoamento produz a erosão do tipo laminar ou em lençol. A erosão laminar é a remoção generalizada de partículas superficiais do solo pelo fluxo difuso ao longo de toda encosta. Como não há concentração de fluxos a energia é mais baixa e a erosão laminar se dá principalmente nos sedimentos mais finos até a areia. Como consequência desse processo, a depender da disponibilidade de materiais mais grosseiros, forma-se o pavimento detrítico, que é o acúmulo de cascalho e calhaus na superfície do solo (Figura 10c). De acordo com Guerra (1998) a erosão por salpicamento ao destruir os agregados do solo coloca muitas partículas em suspensão, o que torna a erosão em lençol mais efetiva (Figura 10a e b).



Figura 10 - Processos erosivos superficiais em lençol. A) Erosão por salpicamento. B) Erosão por salpicamento associada à erosão em lençol e rebaixamento da superfície no município de Gurjão-PB (Fotos A e B: Inocêncio Oliveira Borges Neto, 2019). C) Formação do pavimento detrítico em encosta na zona rural de São Domingos do Cariri, Paraíba.

Raramente as encostas no semiárido apresentam apenas erosão em lençol. É comum, em determinado ponto da encosta, ocorrer a acumulação de fluxos e formação do escoamento superficial concentrado. O fluxo concentrado permite o aumento da energia e, conseqüentemente, a formação de feições erosivas lineares, como os sulcos e as ravinas. Os sulcos erosivos são as formas iniciais da erosão linear, são feições lineares efêmeras de poucos centímetros de profundidade, sendo facilmente obliteradas após um novo evento chuvoso. As ravinas são também formas erosivas lineares, contudo mais estáveis e com bordas bem definidas, tendem a aumentar em profundidade e largura após novos eventos chuvosos (Figura 11). Segundo Morgan (1986) *apud* Guerra (1998) a maior parte dos sistemas de ravinas são descontínuos, ou seja, não possuem nenhuma conexão com a rede de drenagem fluvial.



Figura 11 - Sistema de ravinas desenvolvido sobre Luvisol crômico em Cabaceiras-PB. Fonte: Autor, 2019.

Os processos erosivos superficiais na forma laminar (lençol), sulcos e ravinas, constituem-se no principal mecanismo erosivo no semiárido brasileiro de geologia cristalina. Nesses ambientes o voçorocamento não é um processo comum, contudo em condições particulares são observadas voçorocas conectadas a rede de drenagem fluvial efêmera ou intermitente. Essa dificuldade de ocorrência de voçorocas reside no fato de a mesma ser governada por fluxos sub-superficiais, que não são frequentes no semiárido cristalino.

Com a ausência de lençol freático subterrâneo e suas flutuações nas encostas, os fluxos sub-superficiais que ocorrem no semiárido cristalino são de chuva e, portanto, efêmeros. Em condições específicas do relevo, dos solos e da cobertura vegetal, podem ocorrer volumes significativos de infiltração de água da chuva no solo. Esse volume de água no solo pode escoar lateralmente em sub-superfície em direção ao fundo do vale, geralmente no contato entre horizontes com forte contraste textural (arenoso e argiloso por exemplo) ou no contato solo-rocha.

A exfiltração dos fluxos hídricos sub-superficiais na base da encosta pode causar erosão no solo. Dois processos se relacionam a erosão causada por fluxos sub-superficiais: a erosão por vazamento (*seepage erosion*) e a erosão em túnel (*piping*). A

seepage erosion ocorre quando a água de retorno a superfície atinge uma descarga crítica suficiente para deslocar a partícula do meio poroso (DUNNE, 1980 e COELHO NETTO, 1998). A erosão em túnel forma-se pelo transporte de partículas do solo, tanto por processos físicos quanto químicos, ao longo de rotas preferenciais, dando origem a dutos (túneis) dentro do regolito.

Esses mecanismos são responsáveis pelo início e avanço regressivo das voçorocas, pois com o crescimento dos túneis ocorre a instabilização dos materiais e o colapso do teto, formando o canal inciso (Figura 12 a e b). De modo secundário, ocorrem movimentos de massa recuando as paredes do canal e a ação do escoamento superficial que lava e transporta os sedimentos depositados no fundo (COELHO NETTO *et al.*, 1988; COELHO NETTO, 1999; COELHO NETTO, 2003; AUGUSTIN e ARANHA, 2006).



Figura 12 - Processos erosivos sub-superficiais e voçorocamento. A) Túnel erosivo; B) Voçoroca no município de São Domingos do Cariri-PB. Fonte: Autor, (a) 2017, (b) 2020.

Do ponto de vista evolutivo, em relação a taxa de avanço do voçorocamento em ambiente semiárido cristalino, acredita-se que seja menor que as de ambiente úmido, uma vez que os fluxos sub-superficiais são condicionados pelas chuvas, e as mesmas são irregulares no tempo e no espaço. Adicionalmente, é necessário que haja umidade antecedente, pois do contrário, toda água infiltrada será armazenada no solo e parte começará a ser consumida pela vegetação, não gerando, assim, fluxo hídrico sub-superficial lateral.

3. EVOLUÇÃO DA PAISAGEM GEOMORFOLÓGICA SEMIÁRIDA

Para discutir sobre a evolução da paisagem geomorfológica do semiárido, em áreas de rochas cristalinas, consideramos necessário fazer um balanço entre os processos de intemperismo e de erosão que, em última análise, também pode ser a relação pedogênese-morfogênese.

Lima (2008) realizou o mais amplo e completo estudo sobre os processos de intemperismo na porção oriental do nordeste brasileiro. Segundo a autora os perfis de intemperismo da Província Borborema Oriental estão predominantemente sob regime erosional, ocupando 85% da área estudada. Esses perfis de intemperismo são caracterizados na superfície por apresentarem zona mosqueada, saprólito, saprocha ou a própria rocha fresca. Esse aspecto indica que os processos erosivos atuantes são efetivos o suficiente para “decapitem” os perfis de intemperismo, deixando-os truncados e incompletos.

De modo geral, os processos de erosão no semiárido são preponderantes sobre os processos de intemperismo na evolução da paisagem dos ambientes de rochas cristalinas. Desse balanço resultam paisagens denudacionais marcadas por encostas suaves e de baixa amplitude altimétrica, com regolitos residuais raramente superiores a 1 metro de profundidade, presença de Luvissoles Crômicos e Neossolos (litólicos e regolíticos) e superfície coberta por cascalhos até matações. Em muitos casos ocorre a formação de pavimento detrítico (Figura 10), quando a superfície é completamente coberta por esses materiais de granulometria grosseira, sendo as maiores compostas por quartzo.

Os processos erosivos superficiais, tanto laminar quanto sulcos e ravinas, dominam nessas paisagens, promovendo altas taxas de remoção de solos nas encostas e o conseqüente assoreamento dos leitos fluviais, que ficam muitas vezes totalmente cobertos por sedimentos arenosos (Figura 13). Sobre a atuação dos processos geomorfológicos no clima semiárido, Bigarella *et al.* (1965), destacaram que mudanças climáticas partindo de um clima mais úmido para um mais seco ocorre a retração florestal, dando entrada a uma cobertura vegetal menos densa, como cerrado ou caatinga. Com o regime de chuvas concentradas, os rios passam a ser intermitentes e com alta variabilidade de vazão. Essas características aumentam a erosão do manto de alteração das encostas, principalmente causado por escoamento superficial e movimentos de massa. É uma fase de aceleração da evolução das encostas. O regolito removido é transportado através do nível de base local e, provavelmente tenha entulhado fundos de vale, promovendo sua agradação, resultando assim em obstrução parcial dos pontos de estrangulamento da drenagem (BIGARELLA *et al.*, 1965, pag. 96-97)

As taxas de erosão são elevadas, e o expressivo aumento do desmatamento da caatinga nas últimas décadas têm intensificado ainda mais esse processo. Estudando Luvissoles em áreas desmatadas no semiárido paraibano, Albuquerque *et al.*, (2001) encontraram taxa de erosão anual de $58,5 \text{ t/ha}^{-1}$. Xavier *et al.* (2016a), estudando parcelas hidro-erosivas em Neossolos Regolíticos, em um ano seco e com chuvas totais de 278 mm nos 6 primeiros meses do ano, encontraram taxa de erosão de $11,4 \text{ t/ha}^{-1}$.



Figura 13 - Rio Taperoá em São João do Cariri-PB. Intenso processo de assoreamento do leito. Fonte: autor, 2019.

A rede de drenagem é em geral efêmera e apenas os rios principais são intermitentes. Os rios respondem rapidamente às chuvas fortes, devido o predomínio do escoamento superficial nas encostas, o que produz hidrogramas de vazão com “picos” de cheias em curto espaço de tempo (XAVIER, *et al.*, 2012). Quando ocorrem vazões significativas, a carga de sedimentos em suspensão é elevada, levando ao assoreamento acelerado dos inúmeros açúdes.

A evolução da rede de drenagem é fortemente controlada pelas estruturas geológicas. O controle lito-estrutural da rede de drenagem regional do nordeste brasileiro foi apontado por Bezerra *et al.* (2001) e Maia e Bezerra (2011). Segundo Xavier *et al.* (2016b), na bacia do Rio Paraíba, os principais lineamentos estruturais seguem as orientações preferenciais NE-SW e E-W e controlam a orientação da rede de drenagem e de diversos conjuntos de serras. Para Maia e Bezerra (2014), as maiores bacias como as dos rios Acaraú, Jaguaribe, Apodi-Mossoró e Piranhas-Açu drenam sobre a influência das falhas NE-SW e seus vales constituem a expressão geomorfológica da reativação cenozoica das zonas de cisalhamento pré-cambrianas.

As rochas graníticas são mais resistentes ao intemperismo que as metamórficas, como os gnaisses e xistos (BIGARELLA *et al.*, 1994; MENEZES *et al.*, 2011). Segundo Maia e Nascimento (2018) as rochas graníticas expostas na superfície, associadas aos plútons, perfazem aproximadamente 15% da área do Nordeste setentrional. Segundo Corrêa *et al.* (2010), as intrusões graníticas no Planalto da Borborema são expostas pela denudação de antigas áreas orogênicas, e formam relevos residuais elevados e isolados, sobre a superfície geral do planalto, geralmente desenvolvida em

rochas xistosas ou gnáissicas de complexos metamórficos arqueanos. Esses relevos residuais graníticos são os inselbergues e lajedos.

Nessas feições residuais, o granito exposto não permite tempo suficiente de contato com a água para ocorrência dos processos de intemperismo químico de forma agressiva. Por outro lado, a formação imediata do escoamento superficial após as chuvas sobre esses afloramentos, transporta qualquer partícula desagregada pelo intemperismo, não permitindo, assim, o desenvolvimento do perfil de intemperismo. Essa condição está de acordo com a teoria do “limite de intemperismo”, proposto por Gilbert (1877).

Desta maneira, os inselbergues e lajedos apresentam-se em relativa estabilidade morfodinâmica no atual clima semiárido, tendo como processos mais dinâmicos o intemperismo químico nas *gnammas* (Figura 8), o desenvolvimento das caneluras (Figura 14), e os movimentos de massa por rolamento de blocos (Figura 15). Há uma íntima relação entre o crescimento, coalescência e abertura de *gnammas* e a iniciação das caneluras.

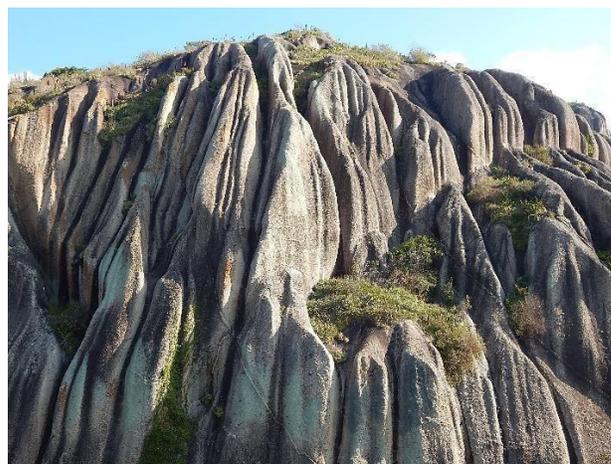


Figura 14 - Sistema de caneluras em inselbergue localizado no Parque Estadual da Pedra da Boca, Araruna-PB. Fonte: Autor, 2019.

A densidade de fraturas e a quantidade e variedade de veios e enclaves xenólitos podem transformar os inselbergues em áreas de forte instabilidade morfodinâmica. Nesses casos são comuns a grande quantidade de blocos produzidos pelo intemperismo nessas zonas de fraqueza. Como são relevos de grande amplitude e muitas vezes escarpados, os processos erosivos gravitacionais são comuns, através de movimentos de massa do tipo “queda de blocos”. De acordo com Maia *et al.* (2018) esse tipo de movimento de massa tende a se concentrar nos fundos de vale, criando uma morfologia caótica, por isso são também conhecidos como caos de blocos. Ainda segundo os autores, esse fenômeno apresenta perigos e riscos ao seu entorno, por possuírem forte instabilidade morfodinâmica nessas encostas.



Figura 15 - Caos de blocos nas encostas da Serra da Engabelada, Congo-PB. Fonte: Autor, 2017.

Os processos geomorfológicos são fenômenos naturais, contudo as atividades humanas podem potencializar a magnitude das ocorrências ou mesmo induzir novas manifestações no espaço.

Dentre as consequências antrópicas a que mais interfere nos processos geomorfológicos diretamente, principalmente em escala local, é a mudança de uso e cobertura do solo. Dados do Ministério do Meio Ambiente (2012) apontam para um desmatamento de 45,6% do Bioma da Caatinga em 2009, com uma taxa média de perda vegetal entre 2002 e 2008 de 2.352 km².

De acordo com Seabra *et al.* (2014a e 2015), as transformações no uso e cobertura do solo na bacia do Rio Taperoá (5.700 km²), no semiárido paraibano, resultaram em uma perda de 44,7% da vegetação de caatinga de 1990 a 2009, com uma taxa de desmatamento de 63,7 km² por ano. Em contrapartida houve um aumento da área agropastoril de 41,4%, sendo a pecuária, principalmente de caprinos, a mais importante atividade econômica na zona rural.

Entretanto, a expansão das atividades humanas é limitada pelo relevo, onde de modo geral, as serras e patamares estruturais do relevo, devido a grande amplitude altimétrica e altas declividades, funcionam como um obstáculo para o avanço da agropecuária. Seabra *et al.* (2014b) mostraram que as serras com topos ondulados e as com topos suaves possuem 73,5% e 48,5%, respectivamente, de suas áreas cobertas por caatinga, na bacia do rio Taperoá. Por outro lado, as unidades de superfície suavemente ondulada e superfície aplainada apresentaram apenas 26,5% e 21% de suas áreas cobertas por caatinga, respectivamente.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os processos geomorfológicos que operam na paisagem do semiárido brasileiro cristalino apresentam grande complexidade de fatores e sofrem forte influência dos condicionantes lito-estruturais. Os processos de intemperismo são responsáveis por produzirem regolitos residuais raramente superiores a 1 metro de espessura nas superfícies dissecadas. Nos inselbergues e lajedos graníticos o intemperismo é responsável pela sua lenta evolução, resultante na geração de feições particulares desses ambientes.

Os processos erosivos dominantes são os superficiais, caracterizados pela erosão difusa em lençol e concentrada linear na forma de sulcos e ravinas. De maneira geral, as taxas de erosão são superiores as taxas de intemperismo, ou seja, o rebaixamento da superfície topográfica é mais rápido que o da superfície rochosa. Essa condição leva a existência de mantos de intemperismo pouco profundos e, muitas vezes, até a sua ausência, com a exposição da superfície rochosa. Essa condição Gilbert (1877) chamou de “limites de intemperismo” e essa superfície rochosa exposta, que foi modelada por processos de intemperismo químico, é denominada de *etched surface*, de acordo com a teoria da Etchplanação de Büdel (1982).

Toda a discussão apresentada é uma leitura de síntese da paisagem geomorfológica desenvolvida sobre embasamento cristalino no semiárido paraibano.

5. REFERÊNCIAS

- AHNERT, F.. Process-response models of denudation at different spatial scales. *Catena* Supplement. 10, 1987, 31-50.
- ALBUQUERQUE, A. W., LOMBARDI NETO, F. & SRINIVASAN, V. S. Efeito do desmatamento da caatinga sobre as perdas de solo e água de um luvissole em Sumé (PB). *R. Bras. Ci. Solo*, 25:121-128, 2001.
- AUGUSTIN, C.H.R.R.; ARANHA, P.R. Piping em área de voçorocamento, noroeste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. Ano 7, nº 1 (2006) 09-18.
- BEZERRA, F. H. R.; AMARO, V. E.; VITAFINZI, C.; SAADI, A. Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. v14: 61-75, 2001.
- BIGARELA, J.J.; MOUSINHO, M.R. & SILVA, J. X. 1965. Considerações a respeito da evolução das vertentes. *Bol. Paranaense de Geografia*, 16/17, 85-116.
- BIGARELLA, J. J. et al. *Estrutura e Origem das Paisagens tropicais e Subtropicais*. Florianópolis: Editora da UFSC, Volume 1. 1994, 426p.
- BÜDEL, J. *Climatic geomorphologie*. Tradução de L. Fischer e D. Busche. New Jersey: Princenton University Press, 1982.
- COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: Guerra, A.J.T. e Cunha, S.B. da (orgs.) *Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998, 93-148.
- COELHO NETTO, A. L. Catastrophic landscape evolution in a humid region (SE Brasil): inheritances from tectonic, climatic and land use induced changes. *Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, Bologna, Itália. III (3):21-48, 1999.
- COELHO NETTO, A. L.. Evolução de cabeceiras de drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural.

- Revista Brasileira de Geomorfologia*, Ano 4, N. 2, 2003, 118-167.
- COELHO NETTO, A.L.; FERNANDES, N.F. AND DEUS, C.E. Gullying in the southeastern Brazilian Plateau, Bananal, S.P. in: *Sediment Budgets*, Edited by M.R. Bordas e D.E. Walling; IAHS Publ. no.174:35-42, 1988.
- CORREA, A.C.de B., TAVARES, B. de A. C., MONTEIRO, K. de A., CAVALCANTI, L. C. de S. e LIRA, D. R. de. Megageomorfologia e morfoestrutura do planalto da Borborema. *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo, 31 (1/2), 35-52, 2010.
- DUNNE, T. Formation and controls of channel networks. *Prog. Phys. Geogr.* 4,211-239, 1980.
- GILBERT, G. K. Report on the geology of Henry mountains. *U.S. Geog. & Geol. Survey of the Rocky Mountain Region*. Department of the Interior. Washington. 151p., 1877.
- GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: *Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos*, Guerra e Cunha (orgs.). Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1998, 149-209p.
- HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, 14, 446-460, 1933.
- LAGES, G. de A.; MARINHO, M. de S.; NASCIMENTO, M. A. L. do; MEDEIROS, V. C. de; DANTAS, E. L. & FIALHO, D. Mar de Bolas do Lajedo do Pai Mateus, Cabaceiras, PB: Campo de matações graníticas gigantes e registros rupestres de civilização pré-colombiana. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Souza, C.R.G.; Fernandes, A.C.S.; Berbert-Born, M.; Sallun filho, W.; Queiroz, E.T.; (Edit.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, 2013.
- LIMA, M. da G. *História do intemperismo na Província Borborema Oriental, Nordeste do Brasil: implicações paleoclimáticas e tectônicas*. Programa de Pós Graduação em Geodinâmica e Geofísica, UFRN, Tese de doutorado, 461f, 2008.
- MAIA, R. P. e BEZERRA, F.H.R. Neotectônica, geomorfologia e sistemas fluviais: Uma análise preliminar do contexto nordestino. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, V. 12, n. 13, p. 37-46, 2011.
- MAIA, R. P. & BEZERRA, F. H. R. Condicionamento Estrutural do Relevo no Nordeste Setentrional Brasileiro. *Mercator*, Fortaleza, v. 13, n. 1, p. 133-147, jan./abr. 2014.
- MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M.A.L.; BEZERRA, F. H. R.; CASTRO, H.S.; MEIRELES, A.J.A.; ROTHIS, L.M. Geomorfologia do campo de inselbergues de Quixadá – NE do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Vol.2, n.16, , 2015.
- MAIA, R. P.; BASTOS, F. DE H.; NASCIMENTO, M. A. L.; LIMA, D. L. DE S.; CORDEIRO, A. M. N. *Paisagens graníticas do Nordeste Brasileiro*. Fortaleza: Edições UFC, 2018.
- MAIA, R. P. & NASCIMENTO, M. A. L. do. Relevos graníticos do Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia* (Online), São Paulo, v.19, n.2, (Abr-Jun) p.373-389, 2018.
- MENEZES, A. A.; COSTA, L. M. da; MOREAU, A. M. S. dos S.; MOREAU, M. S. Interrelações entre a profundidade do solo e o substrato geológico na região centro-leste de Minas Gerais. *Rev. Ceres*, Viçosa, v. 58, n.6, p. 794-801, nov/dez, 2011.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. *Monitoramento por satélite do desmatamento no Bioma da Caatinga*. Núcleo do Bioma Caatinga, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Governo Federal, 2012. Disponível em https://www.mma.gov.br/estruturas/203/arquivos/cartilha_monitoramento_caatinga_203.pdf acesso em 28 de abril de 2020.
- MORGAN, R. P. C. *Soil erosion and conservation*. England, Longman Group, 298p, 1986.
- PHILLIPS, J. D.. Weathering instability and landscape evolution. *Geomorphology* 67, 2005, 255-272.
- SEABRA, V. S., XAVIER, R. A.; DAMASCENO, J.; DORNELLAS, P. C. (a) Mapeamento do Uso e Cobertura do Solo da Bacia do Rio Taperoá: Região Semiárida do Estado da Paraíba. *Revista Caminhos de Geografia*, Uberlândia. V.15, n.50, p. 127-137. ISSN 1678-6343. 2014.
- SEABRA, V. da S.; XAVIER, R. A.; DAMASCENO, J. & DORNELLAS, P. da C. (b) Distribuição dos remanescentes de caatinga por unidades geomorfológicas da bacia do rio Taperoá- PB. *Anais do Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto - GEONORDESTE 2014* Aracaju, Brasil, 18- 21 novembro 2014, 289- 293.
- SEABRA, V. S., XAVIER, R. A.; DAMASCENO, J.; DORNELLAS, P. C. Análise das mudanças de uso e cobertura da terra na bacia do rio Taperoá-PB entre os anos de 1990 e 2009. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, João Pessoa-PB, INPE, Brasil, 2015.
- SOUZA, N. R. L. de & XAVIER, R. A. A importância dos lajedos na paisagem geomorfológica do Cariri paraibano. *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, Campinas, Unicamp, 2017.
- STALLARD, R. F.. Weathering and erosion in the humid tropics. In: *Physical and chemical weathering in geochemical cycles*. Editores: Lerman, A. E Meybeck, M. NATO ASI Series. Kluwer Academic Publishers, 1988, 225-246pp.

TWIDALE, C. R. *Granite Landforms*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co., 1982. 372p.

XAVIER, R. A., DORNELLAS, P. C., MACIEL, J. S. CÍCERO DO BÚ, J. Caracterização do regime fluvial da bacia hidrográfica do Rio Paraíba-PB. *Revista Tamoios*, São Gonçalo (RJ), ano 08, n. 2, p. 15-28, jul/dez. 2012.

XAVIER, R. A.; SANTOS, I. M. DOS; DAMASCENO, J.; DORNELLAS, P. C.; BORGES NETO, I. DE O. (a) Processos erosivos superficiais no município de Juazeirinho, Região Semiárida da Paraíba. *REGNE*, Vol. 2, Nº Especial, 2016.

XAVIER, R. A.; SEABRA, V. S.; DAMASCENO, J. & DORNELLAS, P. C. da. (b) Mapeamento geomorfológico da bacia do Rio Paraíba (PB) utilizando classificação baseada em objetos. *ACTA Geográfica*, Boa Vista, v.10, n.23, mai./ago. de 2016. p.139- 152.

6. AGRADECIMENTOS

O autor agradece o convite feito pela coordenação geral do evento, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba – FAPESQ e a CAPES.

Recebido em: 05/05/2020

Aceito para publicação em: 14/05/2021