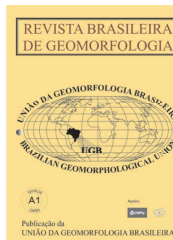


www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, nº 3 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i3.1639>



# PAISAGENS POLARES NÃO GLACIAIS (PROGLACIAL, PARAGLACIAL E PERIGLACIAL): REVISÃO DE CONCEITOS E CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA PEDOGEOMORFOLÓGICA BRASILEIRA

## NON-GLACIATED POLAR LANDSCAPE (PROGLACIAL, PARAGLACIAL AND PERIGLACIAL): REVIEW OF CONCEPTS AND CONTRIBUTIONS OF SOIL-GEOMORPHOLOGY BRAZILIAN RESEARCH

**Mariana de Resende Machado**

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP: 31.270-901. Brasil  
ORCID: 0000-0002-1180-6383  
E-mail: mmachadogeo@gmail.com

**Fábio Soares de Oliveira**

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais  
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP: 31.270-901. Brasil  
ORCID: 0000-0002-1450-7609  
E-mail: fabiosolos@gmail.com

**Carlos Ernesto G. R. Schaefer**

Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa  
R. Purdue, 392-486, Viçosa, Minas Gerais. CEP: 36.570-000. Brasil  
ORCID: 0000-0001-7060-1598  
E-mail: carlos.schaefer@gmail.com

**Marcio Rocha Francelino**

Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa  
R. Purdue, 392-486, Viçosa, Minas Gerais. CEP: 36.570-000. Brasil  
ORCID: 0000-0001-8837-1372  
E-mail: marcio.francelino@gmail.com

**Roberto Machado Michel**

Departamento de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Estadual de Santa Cruz  
Rodovia Jorge Amado, km 16, Ilhéus, Bahia. CEP: 45.662-900. Brasil  
ORCID: 0000-0001-5951-4610  
E-mail: roberto@michel.com

### Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):  
29/03/2019  
Aceito (Accepted):  
25/05/2019

### Resumo:

O trabalho teve como objetivo discutir com base na literatura a origem e evolução dos conceitos proglacial, paraglacial e periglacial, elucidando as formas e processos atuantes e as questões e críticas inerentes a cada um deles. Ao longo dos anos os três termos foram empregados de forma redundante e sobreposta, mesmo refletindo conjunturas ambientais distintas, com critérios diagnósticos diferentes. Ademais,

**Palavras-chave:**

Antártica; Paisagens Polares;  
Geleiras; Mudanças Climáticas.

**Keywords:**

Antarctica; Polar Landscapes;  
Glacier; Climate Change.

mesmo com a participação crescente de pesquisadores brasileiros em trabalhos na Antártica, as discussões epistemológicas acerca desses ambientes ainda constituem lacuna nas publicações nacionais. A paisagem proglacial corresponde à área pioneira em receber os produtos da glaciação e este se revela um ambiente prioritariamente deposicional. É um ambiente complexo totalmente ajustado aos processos fluviais, lacustres e marinhos que ocorrem imediatamente adjacente ao glaciar e consequentemente o domínio proglacial acompanha a movimentação da margem do

gelo. A paisagem paraglacial não é definida nem por processos nem pela localização, mas sim pela trajetória de reajustes da paisagem, adotando o critério tempo. Dessa forma, a paisagem paraglacial está em processo de transição, recuperando-se dos distúrbios da glaciação. Por fim, a paisagem periglacial é aquela com atuação de ciclos de congelamento e descongelamento (*frost action*) e congelamento sazonal do terreno, podendo possuir ou não *permafrost*.

**Abstract:**

The paper proposes a discussion about origin and evolution of proglacial, paraglacial and periglacial concepts. It aims to show differentiation of landforms, process, questions and also the critiques that are unique of each other. Over the years the three terms have been made redundant and employed in an overlapping manner, even that they are quite different concepts and are defined in quite different ways. Furthermore, in spite of the growing participation of Brazilian researchers in Antarctica the epistemological issues about these environments still remains as a gap in national publications. The proglacial landscape is pioneer in receiving the glaciated products and it is a primarily depositional environment. Such environments are totally adjusted to the regime of fluvial, marine and lacustrine processes that occur immediately adjacent to the glacier and consequently the proglacial domain follows the movement of the ice margin. The paraglacial landscape it is not defined by location or processes, but by trajectory from glacial to non-glacial environment. Thus, the diagnostic criteria is time, and the paraglacial environment is in recovering from the disturbance of glaciation. The periglacial realm is defined primarily by freeze-thaw cycles and deep seasonal freezing. The presence of permafrost is not required.

**1. Introdução**

Aproximadamente 35% da Terra está sujeita a temperaturas abaixo do ponto de congelamento da água. Geleiras, bancos de neve, mantos e calotas de gelo, mares, lagos e rios congelados, icebergs, *permafrosts* e gelo subsuperficial (cunhas de gelos), compõem a chamada criosfera (MARSHALL, 2012). A sua ocorrência espacial incorpora tanto zonas de alta latitude quanto ambientes altimontanos, nos quais as coberturas de gelo e neve ocorrem em domínio temperado a tropical e alguns de seus componentes podem variar sazonalmente em consequência das estações do ano.

Grande parte da criosfera encontra-se próximo ao ponto de fusão. Como as trocas com a hidrosfera dependem da mudança de estado físico da água, o tamanho e o comportamento da criosfera são altamente sensíveis às alterações climáticas e ambientais. A cobertura de neve e gelo em altas latitudes aumenta drasticamente o albedo e desempenha importante papel na reflexão de calor e energia ao redor do planeta. O aumento ou diminuição da cobertura de neve e gelo marinho altera o albedo e

modifica o balanço radioativo, resultando em retroalimentação positiva que amplifica as mudanças climáticas, tanto em direção ao aquecimento quanto ao resfriamento (MCCONNEELL, 2006).

As retrações e expansões de mantos de gelo têm sido reportadas como um fenômeno característico nos últimos 3 Ma (ANDERSON, 2013), sendo que a partir do Último Máximo Glacial, formas e materiais criados por processos glaciais que cobriam extensas áreas vêm sendo submetidos a climas não glaciais. Quando tais produtos têm sua gênese vinculada à porção basal dos glaciares, seu entendimento fica comprometido, já que raramente podem ser observados diretamente. Com a retração do gelo, a superfície exposta está sujeita à atuação de um novo conjunto de fatores, à medida que sistemas fluviais, de vertente e eólicos operam em direção ao reequilíbrio do então ambiente não glacial (BENN & EVANS, 2010).

As mudanças geomorfológicas associadas às paisagens em estado de adaptação para condições não glaciais operam em termos das formas, processos, materiais e do geossistema como um todo (BALLANTYNE, 2002). No

entendimento destes sistemas, proglacial, paraglacial e periglacial são conceitos que refletem conjunturas ambientais distintas, usando critérios diagnósticos diferentes, mas que têm sido empregados de forma redundante e sobreposta (SLAYMAKER, 2011). Essa abordagem confusa dos conceitos na literatura evidencia a necessidade de uma discussão sobre sua definição.

A complexidade dos sistemas proglaciais, paraglaciais e periglaciais é demonstrada pela preocupação de alguns autores em identificar e discutir suas especificidades e interações, como em Ballantyne (2002); André (2003); French (2007); Slaymaker (2009); Benn & Evans (2010) e Slaymaker (2011). Estes estudos esclarecem que reflexões que permeiam esses conceitos são necessárias por propiciar o avanço nas interpretações científicas, oportunizando escolhas metodológicas assertivas, que de fato trarão resultados fidedignos à realidade abordada.

À primeira vista, estas reflexões podem parecer estranhas no âmbito da pesquisa geomorfológica brasileira. No entanto, tal incursão é relevante diante do fato de que há mais de três décadas o Brasil possui presença científica atuante na Antártica, lidando diretamente com a realidade das áreas polares livres de gelo. Dentre as publicações geomorfológicas internacionais realizadas por autores brasileiros no período de 2011 a 2015, avaliadas por Salgado & Limoeiro (2017), a geomorfologia glacial foi o segundo tema mais abordado, com 18,6% de toda publicação nacional, perdendo apenas para evolução regional do relevo, com 25,5%. Dentre alguns estudos publicados na Revista Brasileira de Geomorfologia, o principal veículo de divulgação da pesquisa geomorfológica no país, estão Vieira *et al.* (2005); Rosa *et al.* (2006); Rosa *et al.* (2010); Vieira & Simões (2011); Rosa *et al.* (2013); Costa *et al.* (2017); Bonada *et al.* (2018); Cleiva *et al.* (2019). Dentre os principais focos destes estudos, está o estudo dos produtos e processos provenientes da retração de glaciares.

Assim, o objetivo central deste trabalho é apresentar com base na literatura a origem e evolução dos conceitos proglacial, paraglacial e periglacial, as formas e processos atuantes, e apontar algumas questões e críticas inerentes a cada um deles. Este estudo busca também traçar um cenário geral sobre como os resultados alcançados pela pesquisa das interações entre solos e relevos realizada por pesquisadores brasileiros na Antártica têm contribuído para o entendimento destes ambientes. Além disso, o artigo supre a lacuna de uma abordagem conceitual dos

termos em língua portuguesa, importante para a disseminação dos conhecimentos produzidos sobre os mesmos e para a formação de novos profissionais dedicados ao estudo da evolução das paisagens no âmbito da criosfera.

## **2. Proglacial – a paisagem às margens da geleira**

O termo proglacial traduz a expressão “em frente à geleira”. Isto é, a condição necessária para o estabelecimento de um ambiente proglacial é sua localização às margens de uma geleira ou manto de gelo (EMBLENTON-HAMANN, 2004). Portanto, o critério que define um ambiente desta natureza é, antes de tudo, a localização geográfica.

Trata-se da área que recebe diretamente os produtos da deglaciação, principalmente os sedimentos e fragmentos rochosos eliciados pela geleira (Figura 1). É um ambiente complexo, totalmente ajustado aos processos fluviais, lacustres e marinhos que ocorrem adjacentes ao glacial (SLAYMAKER, 2011). Por esse motivo, o domínio proglacial acompanha a movimentação da margem do gelo. Uma vez que a geleira recua, a zona de deposição proglacial acompanha essa dinâmica e materiais subglaciais são expostos ao intenso retrabalhamento erosivo. Por sua vez, o avanço da geleira promove a renovação da área de deposição proglacial com a destruição dos depósitos anteriores e a instalação do sistema proglacial defronte à geleira (EMBLENTON-HAMANN, 2004).

Os processos e padrões de deposição proglacial são influenciados pelo regime térmico dos mantos e calotas de gelo. Os canais de água de degelo são os principais agentes de transporte e deposição de sedimentos e, conforme a taxa de derretimento, irão atuar em diferentes intensidades. Isso promove alternâncias entre o domínio de processos glaciofluviais e gravitacionais, sendo localmente modificados pelas deformações glacioteclônicas e glacioisostáticas (BRENNAND, 2004).

O sistema proglacial inclui ambientes terrestres, canais, lagos e oceanos, com processos glaciomarinhos, glaciolacustres e glaciofluviais. Os depósitos incluem morainas, grandes leques aluviais, deltas, leques marinhos e espesso pacote sedimentar depositado em domínio marinho. Os canais proglaciais exibem padrão de fluxo distinto, caracteristicamente sazonal e prioritariamente diurno, podendo variar de fluxos moderados até os *jokuhlaupt*<sup>1</sup> (SLAYMAKER, 2011).

<sup>1</sup> Termo de origem islandesa e adotado pela terminologia glaciofluvial, significa literalmente corrida glacial e é utilizado para descrever qualquer liberação ampla e abrupta de água de um lago ou reservatório proglacial (TWEED & RUSSEL, 1999).

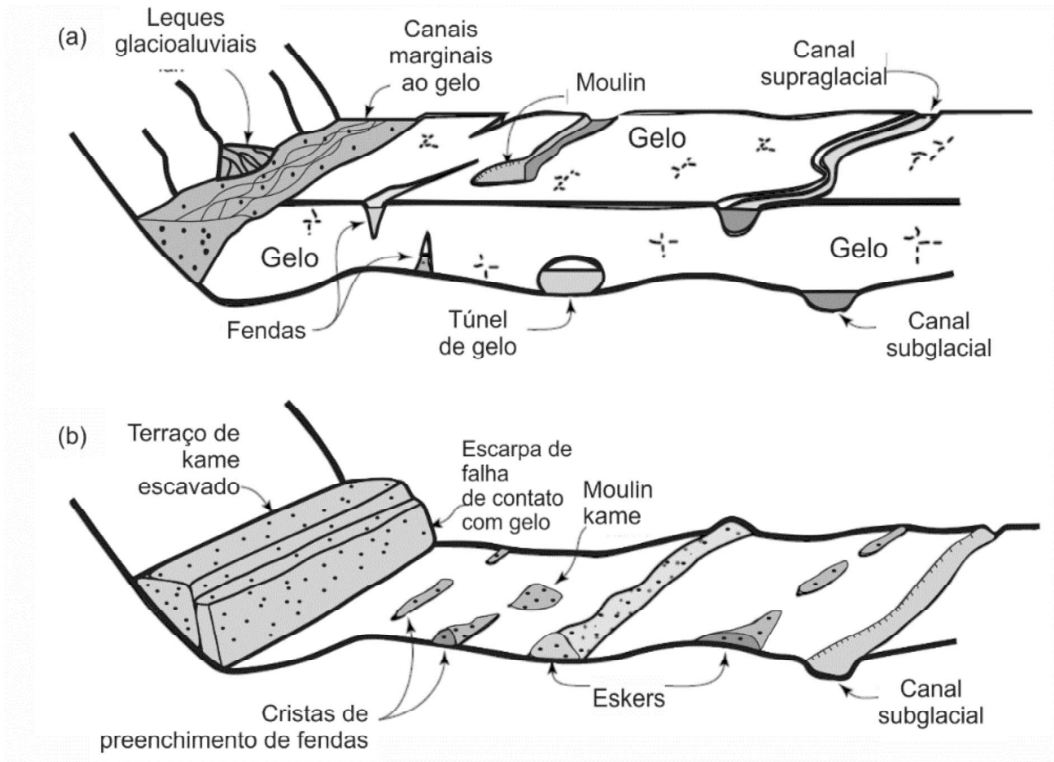


Figura 1 - Bloco diagrama do desenvolvimento das formas típicas de paisagem de contato com o gelo e ambiente proglacial.

Fonte: modificado de BRENNAND, 2004, p. 464. a) antes e em b) depois do derretimento do gelo remanescente. As formas começam a ser produzidas em a) ainda com a presença de gelo remanescente. Cristas de preenchimento de fenda são lineares, com até 10 m de altitude e estão dispostas em padrão que reflita a configuração radial ou transversal da fenda em relação ao glaciar. Os kames, palavra originada da língua escocesa antiga, são montes constituídos de areia, seixos e till, de formatos variados que foram depositados a partir de: i) moulin – palavra francesa para moinho, é uma espécie de poço circular que corta verticalmente um glaciar permitindo a entrada de água da superfície, pode ter 10 m de largura e alcançar a base do glaciar; ii) pequenos deltas ou leques depositados a margem do gelo; iii) terraços depositados por canais marginais ao gelo com padrão entrelaçados, sendo bancos de areia e seixos lineares e com deformações posteriores devido a glacioteclônica. Por fim, os eskers (palavra de origem irlandesa) são cristas estreitas e sinuosas ou uma série de cristas separadas, ocorrendo em variadas dimensões tanto isoladamente como em grupos formando padrões subparalelos não alinhados com o fluxo do gelo. Eles registram a localização de canais subglaciais ou de túneis de gelo.

Os sedimentos glaciofluviais se diferem daqueles de origem não glacial. As principais diferenças são: i) o sedimento é tipicamente de granulometria grossa (de matacão a areia), com forte carreamento das partículas mais finas (silte e areia) devido à alta velocidade do fluxo; ii) as litofácies dos grãos exibem baixo grau de seleção (grande faixa de granulometria de grãos grossos); iii) geralmente exibem mudanças bruscas nas litofácies devido a pronunciadas mudanças sazonais ou episódicas no regime de fluxo; iv) por estarem em contato com gelo frequentemente exibem estruturas indicativas de cisalhamento, falha e subsidência, características não só do movimento do glaciar, mas também do derretimento de gelo enterrado (BRENNAND, 2004).

O ambiente proglacial ganha projeção no contexto marinho a partir da extensão das margens das geleiras. A Antártica, por exemplo, apresenta na atualidade mais de 90% dos mantos de gelo terminando no mar (EMBLETON-HAMANN, 2004). As formas glacio-marinhas são geralmente consideradas a partir de dois contextos: i) o do fiorde, baías e enseadas, em que a sedimentação é influenciada pelas características da plataforma continental, maré, rios, vertentes e processos marinhos; e ii) em oceano mais profundo e aberto, em que a sedimentação é dominada pela plataforma de gelo, pelas banquisas, *icebergs* e processos marítimos abertos (SLAYMAKER, 2011).

### **3. Paraglacial – a trajetória instável de uma paisagem deglaciada**

O termo paraglacial é composto pelo prefixo grego *para* (ao lado de) seguido do termo em latim *glacies* (geleira), traduzindo a expressão “lado da geleira”. Pesquisadores alemães como Klebelsberg (1950)<sup>2</sup> e Eggers (1961)<sup>3</sup> utilizavam pioneiramente o termo para designar sedimentos depositados ao longo das margens laterais da geleira (ITURRIZAGA, 2008). Na década de 70 o termo foi mais amplamente difundido para a comunidade científica internacional, sendo, desde esse período, utilizado com significado semântico diferente (MERCIER, 2007).

Como concebido por Ryder (1971a,b), o termo paraglacial se refere a processos não glaciais que são diretamente condicionados pela glaciação, englobando tanto processos proglaciais quanto aqueles não glaciais (isostáticos, erosivos, fluviais, eólicos, entre outros) que ocorrem como resultantes da presença anterior de gelo. Church & Ryder (1972) propuseram adaptações ao termo incorporando o tempo como característica intrínseca, considerando paraglacial como o período durante o qual os processos paraglaciais ocorrem, ou seja, é transitório.

Ballantyne (2002) propõe refinamentos ao conceito, ainda que na sua definição ele mantenha diversos aspectos originais. A principal diferença está no fato do termo ser compreendido como algo que transpõe a mera descrição de processos, incorporando as formas e materiais resultantes, com ênfase no reajuste de paisagens pós-glaciais para condições não glaciais. A essência do conceito, neste caso, é que o terreno deglaciado está inicialmente em um estado instável e, portanto, vulnerável às modificações promovidas por agentes subaéreos (água em estado líquido ou sólido, força da gravidade, vento, radiação solar, colonização biológica, entre outros). Assim, Ballantyne (2002) adota a definição de paraglacial como sendo “processos superficiais não glaciais, sedimentos, sistemas e paisagens que são diretamente condicionados pela glaciação e deglaciação”.

Slaymaker (2011) assinala que ambientes paraglaciais não são definidos nem por processos nem pela localização, mas sim pela trajetória de reajustes da paisagem, o que o leva a adotar o critério tempo

como norteador. Dessa forma, a paisagem paraglacial está em processo de transição, recuperando-se dos distúrbios da glaciação. Tal trajetória é dependente da escala espacial. Enquanto subsistemas alcançaram estabilidade nas atuais condições não glaciais, o sistema como um todo pode ainda estar em estágio de transição (SLAYMAKER, 2009). É, neste contexto, um período de tempo reconhecido pelas altas taxas de sedimentação das vertentes para os sistemas fluviais, lacustres, marinhos e eólicos, retrabalhando sedimentos instáveis e inconsolidados de origem glaciogênica.

A principal crítica ao conceito paraglacial é a falta de uma delimitação da escala temporal de ocorrência dos processos (EYLES & KOCSIS, 1989; ANDRÉ, 2009). De fato, como demonstrado por Ballantyne (2002), o conceito concebido por Church & Ryder (1972) sinalizava um ajuste da paisagem às condições vigentes em não mais que alguns milhares de anos. Posteriormente, diversos estudos reiteram o desenvolvimento e então estabilização das condições paraglaciais em poucos milênios, séculos ou até mesmo décadas (MILLER *et al.*, 1993; BALLANTYNE, 1995; HARRISON & WINCHESTER, 1997; MATTHEWS *et al.*, 1998). Em certos contextos, no entanto, o período paraglacial demonstrou se prolongar após a última deglaciação para além do Holoceno (CHURCH & SLAYMAKER, 1989; ASHMORE, 1993; LAMOUREUX, 1999).

Em termos gerais, a questão central é a relação entre as escalas geográficas, espacial e temporal. O retrabalhamento paraglacial primário de sedimentos glaciogênicos nas formas de relevo individualizadas, como leques aluviais, cones de detritos e morainas, ocorre geralmente em escala temporal de  $10^1$  -  $10^3$  anos. Em escala regional, contudo, o fluxo de sedimentos paraglaciais nas principais bacias hidrográficas, ou ao longo da costa, por exemplo, é da ordem de  $10^4$  anos ou mais (ASHMORE, 1993; BALLANTYNE, 2002). Assim, a ideia de que as respostas da paisagem frente à deglaciação envolvem mudanças rápidas é assertiva apenas em determinadas escalas espaciais e contextos geomorfológicos. Em escalas mais abrangentes da paisagem, o alcance do equilíbrio e de taxas reconhecidas como normais de produção e transporte de sedimentos pode envolver tempo superior ao que é, inclusive, re-

<sup>2</sup> KLEBELSBERG, R. v., Das siltal bei matrei. Aus seiner jüngsten geologischen Vergangenheit. In: Beiträge zur Heimatkunde von Matrei am Brenner. Schlem-Schriften. Universitätsverlag Wagner, Innsbruck, v. 84, 1950, p. 76-86

<sup>3</sup> EGGERS, H. Moränenterrassen im Wallis: Morphologische Untersuchungen zu spätglazialen Formen und Verlagsanstalt, Graz. 586p, 1961.

conhecido como período interglacial (BALLANTYNE, 2002; SLAYMAKER, 2011; BALLANTYNE, 2013a).

Das distintas unidades de paisagem, o ambiente paraglacial engloba: i) vertentes rochosas (*rock slopes*); ii) vertentes envoltas por sedimentos (*drift-mantled slopes*); iii) planície em frente à geleira (*glacier forelands*); iv) sistema aluvial; v) sistema lacustre e vi) sistema costeiro (BALLANTYNE, 2002; SLAYMAKER, 2011). Todos os sistemas estão representados na Figura 2 e são apresentados a seguir.

A glaciação e deglaciação afetam a estabilidade

das encostas rochosas. A erosão glacial pode conduzir ao alongamento das vertentes, aumentando e reorientando as tensões que atuam sobre os afloramentos rochosos. Durante episódios glaciais, o peso do gelo aumenta as tensões. Nas deglaciações no entanto, ocorre a dilatação gradual da massa rochosa por liberação de estresse como parte resultante de deformação elástica. Tais mudanças podem propagar grande deslizamentos e avalanches, deformação gravitacional e recuperação do equilíbrio a partir de quedas esporádicas de blocos, resultando no acúmulo de depósitos de talus no sopé das vertentes (BALLANTYNE, 2002; BALLANTYNE, 2013a).

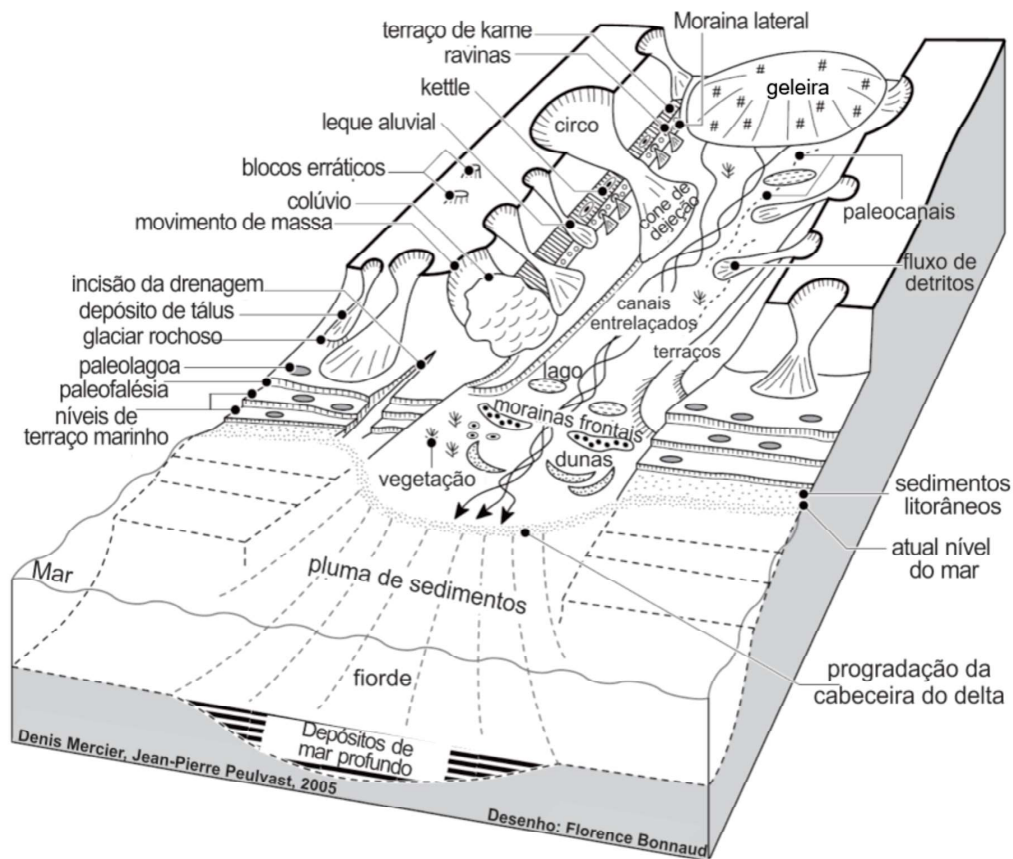


Figura 2 - Bloco diagrama das formas típicas da paisagem paraglacial.

Fonte: modificado de Mercier, 2007, p. 347. Bloco diagrama representativo das formas típicas de uma paisagem paraglacial. As diversas feições erosivas demonstram as altas taxas de denudação característica desses ambientes. Estão representadas: i) os sistemas da planície de frente à geleira (*glacier foreland*), com a formação de dunas por ação eólica, os movimentos de massa preenchendo a planície, morainas frontais e laterais (formas deposicionais formadas pela movimentação da geleira), sistemas glaciolacustres e fluviais com o típico padrão entrelaçado dos canais de água de degelo; ii) o sistema de vertente, com a presença de blocos erráticos<sup>4</sup> (blocos de rocha transportados e depositados pela geleira), diversos circos glaciais (depressão em anfiteatro formada nas cabeceiras do vale glacial pela ação erosiva da geleira) e cones de dejeção (ou leques aluviais) correlatos, ravinhas, movimentos de massa diversos, geleira de rocha (*rock glacier* – forma deposicional de gelo e detritos) e kettle (pequena depressão formada pelo derretimento de bloco isolado de gelo, frequentemente preenchida por água); iii) sistema costeiro, com a característica presença de diversos níveis de terraços marinhos (com soerguimento isostático pós-glacial), paleofalésias e recebendo todos os sedimentos retrabalhados pelos demais sistemas.

<sup>4</sup>Os erráticos também podem ocorrer pela ação do gelo flutuante, transportados de outras áreas, distantes das quais se encontram na atualidade.



O recuo das geleiras frequentemente expõe encostas mais baixas cobertas por espessos depósitos glaciogênicos, muitas vezes constituídos por morainas frontais e/ou laterais empilhadas. A declividade, a falta de cobertura vegetal e os sedimentos inconsolidados tornam essas encostas extremamente susceptíveis a erosão por fluxos de detritos, avalanches, incisões de sulcos por canais tributários intermitentes e erosão laminar. Em questão de poucas décadas ou séculos tais processos retrabalham totalmente as encostas, formando profundas ravinas ou voçorocas (FORTIER *et al.*, 2007), cones de detritos e leques no sopé da vertente (ITURRIZAGA, 2008; BALLANTYNE, 2013a).

Apesar da maioria das pesquisas focarem em processos associados à vertente, a retração da geleira expõe extensas planícies susceptíveis às modificações por movimentos de massa, ciclos de congelamento e descongelamento, ação eólica e fluvial (BALLANTYNE, 2002). Matthews *et al.* (1998) identificam que a superfície exposta começa a se ajustar logo após a retração. Os sedimentos se consolidam, a drenagem normaliza a saturação da superfície, os ângulos das vertentes decaem e a cobertura vegetal começa a se estabelecer. Nessas planícies, as principais consequências das modificações paraglaciais são transformações no relevo e mudanças sedimentológicas da superfície. Ademais, o período em que essa paisagem está exposta às condições paraglaciais é curto, ligado o ritmo de retração, normalmente limitando-se a poucas décadas (BALLANTYNE, 2002).

Cones de detritos, leques aluviais e vales preenchidos são as formas mais comumente difundidas como indicativas do retrabalhamento paraglacial de sedimentos glaciogênicos. Muito além de simples formas deposicionais, eles funcionam como fontes de sedimentos para transporte fluvial, até mesmo após o fim do retrabalhamento paraglacial das vertentes (BALLANTYNE, 2013a). Os depósitos glaciolacustres também são facilmente acessíveis à atuação fluvial, uma vez que possuem granulometria mais fina e são facilmente carregados em suspensão durante eventos de cheias. Ballantyne (2002) considera que esses depósitos são tão extensos a ponto de corresponder, em termos volumétricos, ao elemento mais importante da transferência de sedimentos paraglaciais durante o Holoceno. O destino de toda a carga de sedimentos glaciogênicos retrabalhados por processos paraglaciais é o sistema costeiro, podendo contribuir para progradação de deltas ou

preenchimento de bacias na plataforma continental ou além da borda da plataforma (BALLANTYNE, 2013a).

Face ao exposto, as paisagens paraglaciais são vulneráveis às mudanças rápidas e dinâmicas da superfície como resultado da energia cinética das altas taxas de sedimentos e água produzidas durante a fusão glacial, sendo moldada a partir da resposta aos fluxos de sedimentos e água de degelo. Embora água e sedimentos se combinem na geração de diversos processos geomórficos, eles exibem comportamentos dinâmicos diferentes, como tempo de liberação, características inerentes ao fluxo, extensão espacial e formas de relevo associadas, como exemplificado na Tabela 1 (KNIGHT & HARRISON, 2018).

Conforme Knight & Harrison (2018), o ambiente paraglacial parece evoluir como sistema *stop-start*, ou seja, uma paisagem cujas propriedades e comportamento dinâmico evoluem episodicamente através de escalas espaço-temporais diversas. Por não apresentarem uma evolução determinística e contínua, os sistemas paraglaciais podem ser reconhecidos pela transitoriedade. Fundamentado na noção de sistema transitório e no comportamento dos dois principais elementos do paraglacial (Tabela 1), os autores propuseram um modelo de disponibilidade de água de degelo e sedimentos, que em conjunto também dizem respeito à trajetória evolutiva de uma paisagem paraglacial.

De maneira sintética, a água de degelo é o primeiro elemento a reagir às novas condições, estando diretamente ligada ao aumento da temperatura. Os sedimentos, por sua vez, não são finitos em volume como a água, por poderem ser capturados, retrabalhados e posteriormente liberados ao sistema (KNIGHT & HARRISON, 2018). Assim, um aumento temporário na produção de sedimentos é sobreposto a uma diminuição exponencial no estoque de longo prazo. Tal aumento pode ser desencadeado por diversos processos, como tempestades, erosão de novas reservas de sedimentos (como os *drumlins* ou *kames*), mudanças no nível de base por tectônica e até mesmo por atividade antrópica (BALLANTYNE, 2002). Por fim, é importante assinalar que nem todos os elementos presentes na paisagem paraglacial (Figura 2) são ativos ao mesmo tempo, isto é, não demonstram a mesma magnitude ou taxa de atuação e não deixam assinaturas geomórficas ou sedimentares equivalentes (FEUILLET *et al.*, 2014).

**Tabela 1: As principais características de água de degelo e sedimentos em áreas deglaciadas.**

Fluxo	Propriedades	Comportamento dinâmico
Água de degelo	Liberada pelo derretimento do gelo controlado pela temperatura	Topograficamente controlada
	Volume finito associado às fontes de gelo Pode incluir tanto neve quanto gelo derretido e se misturar com outras fontes de água do entorno (chuva, lagos proglaciais, rios)	Potencial perda por evaporação e infiltração Liberação descontrolada por fluxos de <i>Jökulhlaup</i> (normalmente por rompimento de lago)
Sedimentos	Podem ser liberados no <i>front</i> do glaciário (por fontes subglaciais ou supraglaciais) ou por processos de vertente (processos erosivos ou de massa)	Podem conter variadas porcentagens de água ou gelo
	Ampla variedade em tamanhos, variando desde argila até matacões	Movimento comumente episódico e não contínuo
	Acumulam-se em formas distintas de relevo, em áreas específicas e definidas Podem ter longo tempo de permanência na paisagem	Podem ser facilmente captados à montante por obstáculos

Fonte: modificado de Knight & Harrison, 2018, p. 2.

As paisagens paraglaciais não tendem ao estado de equilíbrio, e apesar de serem fortemente ligadas ao tempo, não são por ele determinadas, não evoluindo de forma sequencial ou ordenada (KNIGHT & HARRISON, 2018). O sistema paraglacial e suas formas não elucidam apenas o legado da glaciação e deglaciação, mas também mudanças ambientais complexas e incompletamente compreendidas que moldam a taxa e a natureza de sedimentos desde a retração e derretimento do gelo glacial. Nas décadas seguintes a sua primeira definição, o entendimento científico de sistemas paraglaciais individuais teve consideráveis avanços. Contudo, a interação entre esses sistemas ao longo do tempo implica em questões sobre a evolução pós-glacial das paisagens cujas interpretações ainda necessitam ser exploradas (BALLANTYNE, 2002).

#### 4. Periglacial – produtos da interação entre os processos azonais e da ação do gelo

Com pouco mais de um século desde sua primeira utilização, o termo periglacial evoluiu e se transformou concomitante aos estudos geocientíficos em regiões

frias. O geólogo e pedólogo polonês Walery Lozinski cunhou o termo em 1909<sup>5</sup>, buscando descrever a ação do gelo (*frost action*) em produzir extensos campos recobertos por blocos angulosos de rocha (conhecidos atualmente como *felsenmeers*, *blockfields* ou *blockstreams*) na região das Montanhas Carpathian, hoje pertencentes à Romênia (WORSLEY, 2004). Um ano depois, no XI Congresso Internacional de Geologia em Estocolmo, o mesmo autor introduziu o conceito da zona periglacial, que deveria ter existido na Europa durante o Pleistoceno (FRENCH, 2000). French (2000) alega a influência do geólogo sueco J. G. Andersson<sup>6</sup> nas propostas de Lozinski, por meio de seu trabalho na Ilha Urso, no Atlântico Norte. Andersson foi o primeiro a incorporar o termo solifluxão na literatura científica.

Após a inserção por Lozinski, o termo periglacial foi fortemente aceito pela comunidade geocientífica da Europa e utilizado nos anos seguintes por causa da exploração e observação das paisagens sub-árticas e também por causa das expedições antárticas no século XIX e XX. A consolidação da geomorfologia periglacial oportunizou o desenvolvimento da geomorfologia cli-

<sup>5</sup> LOZINSKI, W. von, Über die mechanische Verwitterung der Sandsteine im gemäßigten Klima. Bulletin International de l'Académie des Sciences de Cracovie class des Sciences Mathématique et Naturalles, v. 1, p. 1-25, 1909.

<sup>6</sup> ANDERSSON, J. G. Solifluction: a component of subaerial denudation. Journal of Geology, v. 14, p. 91-112, 1906.



mática, primeiramente preocupada com reconstituições paleogeográficas quaternárias, como observado por French (2007) nos trabalhos de Büdel, Peltier, Cailleux e Tricart. Nas últimas três décadas, tanto as regiões polares quanto as altimontanas têm ganhado mais notoriedade nas pesquisas periglaciais e no século XXI têm prevalecido discussões concentradas no comportamento das formas e processos periglaciais frente às conjecturas das mudanças climáticas globais (ANDRÉ, 2009).

Mesmo após os avanços e aperfeiçoamentos, existem inconsistências na literatura sobre os critérios que designam um ambiente periglacial (WORSLEY, 2004). O primeiro deles enfatiza a atuação intensa e frequente de ciclos de congelamento e descongelamento e congelamento sazonal do terreno, podendo possuir ou não *permafrost* (FRENCH, 2007; SLAYMAKER, 2011). A partir desse critério processos periglaciais abrangeriam cerca de 35% da superfície terrestre. O segundo critério estipula a obrigatoriedade da presença do *permafrost*, o que limita para menos de 20% sua área de ocorrência global, tendo em vista a necessidade de clima mais severo para o estabelecimento do *permafrost* (WORSLEY, 2004).

Classificado como uma condição térmica da subsuperfície, o *permafrost* consiste na permanência da temperatura abaixo de 0°C por um período de no mínimo 2 anos (PERMAFROST SUBCOMMITTEE, 1998), podendo se desenvolver rico em gelo ou seco em solos ou rochas. É relevante repensar a adoção do *permafrost* como critério único para classificar um ambiente periglacial, sobretudo nos estudos pedológicos e geomorfológicos. Ele limita o objeto científico destes saberes, uma vez que não só os processos, formas e materiais correlatos a ele constituem e influenciam a paisagem propícia para sua ocorrência (FRENCH & THORN, 2006).

Ao considerar o domínio periglacial, considera-se, neste estudo, que o melhor caminho é a adoção do primeiro critério apresentado, cuja definição se preocupa mais com processos e formas. Assim, os locais propícios à dinâmica periglacial incluem desertos e semidesertos polares livres de gelo do Ártico e da Antártica, a zona da tundra e a parte norte da floresta boreal, áreas sub-árticas e sub-antárticas de natureza marítima ou continental, incluindo o extremo sul da América do Sul, além das áreas de elevadas altitudes com baixas temperaturas entre a linha de neve e a linha de árvore, como o platô tibetano e a Cordilheira dos Andes em áreas de média a baixa latitude (FRENCH, 2018). Não se observa,

nestes termos, uma correlação espacial entre áreas de intenso congelamento e áreas com *permafrost*. French (2007) defende que ilhas sub-antárticas e sub-árticas experimentam frequentes oscilações entre estados de congelamento e descongelamento sem a presença de *permafrost*. Ademais, extensas áreas de *permafrost* relictuais persistem nas florestas boreais da Sibéria e América do Norte para além do domínio climático de ocorrência do *frost action*.

Os processos que distinguem os ambientes periglaciais dos demais estão relacionados às propriedades físicas da água. A primeira é o aumento de 9% em seu volume quando da mudança do estado líquido para sólido, ou a redução em mesma grandeza quando ocorre o contrário (WORSLEY, 2004). O resultado imediato no solo é o aumento de volume, comumente conhecido como *frost heave*, além de ter implicações na movimentação e seleção dos grãos pelo gelo (*frost jacking* e *frost sorting*) e o erguimento e expulsão de grãos grossos, podendo conduzir à formação de solos com padrão (FRENCH, 2007). No solo, todos esses processos estão associados ao crescimento de gelo em formas de lentes nos poros (*segregation ice*), e como resultados secundários destacam-se as fissuras térmicas e feições de dessecação (VAN VLIET-LANOE, 1985). São intensificados quando existem duas frentes de congelamento, uma agindo de cima para baixo influenciada pela temperatura do ar e outra de baixo para cima ligada ao *permafrost*.

É importante destacar que os solos, em função da sua variabilidade, apresentam distintos comportamentos em relação ao congelamento. Os principais fatores atuantes neste caso, e que justificam essas diferenças, é a maneira como varia a condutividade de calor e a umidade nos solos. Além desses, tem de ser levado em consideração a quantidade de sais e outros elementos químicos dissolvidos na solução aquosa passível de congelamento e na natureza mineralógica e granulométrica das partículas que o compõe, que influenciam na capacidade de adsorção (VAN VLIET-LANOE, 1985; FRENCH, 2007). A dinâmica do congelamento é controlada pela textura e pelas condições locais de drenagem, especificamente a capacidade de reter e adsorver água pela capilaridade. A capilaridade é maior quando as partículas possuem menor granulometria, e durante o congelamento do solo, a formação de gelo resulta no confinamento de água em poros cada vez menores (VAN VLIET-LANOE, 1985; VAN VLIET-LANOE, 2004).

As formas mais singulares do domínio periglacial estão associadas ao *permafrost*, e incluem solos com padrão, pingos, cunhas de gelo, palsas e feições de termocarste (Figura 3). As áreas com intensa atividade de congelamento e descongelamento, por sua vez, apresentam extensas coberturas de fragmentos de rocha de variados tamanhos, angulosos e demasiadamente quebrados, formando os *felsenmeer* (no inglês

*blockfields*, campos de blocos) ou encostas de detritos. O *frost action* desintegra as rochas por processos criogênicos mecânicos (ou crioclastia), e soergue, expulsa (ou crioturbação) e seleciona as partículas mais grossas, elaborando tanto estruturas e horizontes subsuperficiais com características macro e micromorfológicas bem marcadas, quanto formas superficiais específicas em padrões (SLAYMAKER, 2011).

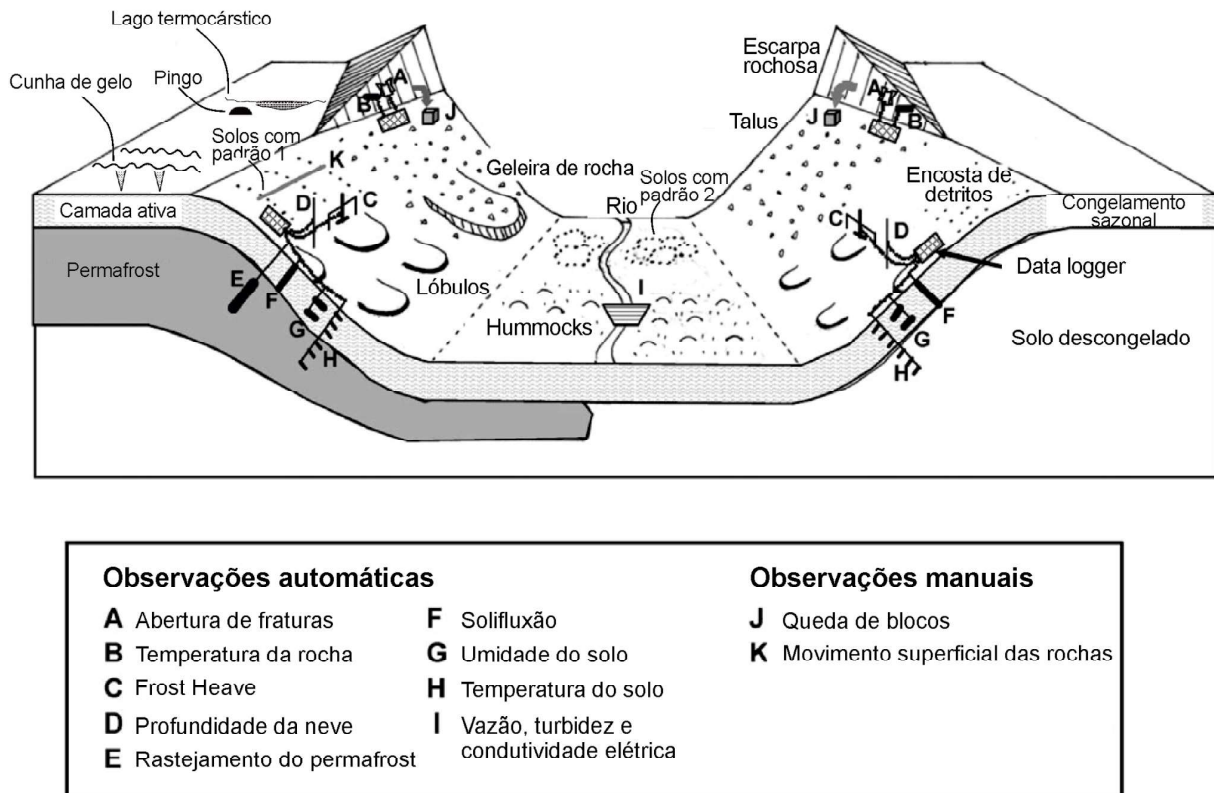


Figura 3 - Bloco diagrama das formas típicas da paisagem periglacial e proposta de monitoramento dos processos.

Fonte: modificado de Matsuoka, 2006, p. 22. Todas as letras representam propostas de monitoramento contínuo das formas e processos periglaciais para aprimorar a compreensão da gênese e dinâmica dessas paisagens. Entre as feições típicas desses ambientes destacam-se os lóbulos de solifluxão; a geleira de rocha formado por descongelamento e rastejo de permafrost (*permafrost creep*); o lago termocárstico derivado de descongelamento de permafrost e posterior abatimento da superfície; solos com padrões 1, do tipo em faixa e seguindo o declive da vertente; e solos com padrão 2, do tipo circular; os hummocks, que são solos com padrão definidos por micro-relevo; pingos, que são montes ou colinas com permafrost perene, formados pelo crescimento de um corpo de gelo em subsuperfície; e as cunhas de gelo, uma das formas mais comuns em área de permafrost contínuo, e se formam a partir da quebra por contração térmica do permafrost, e a expressão superficial é um sulco linear devido ao assentamento diferencial da camada ativa imediatamente acima da cunha de gelo.

O termo “solos com padrão” (*patterned ground*) descreve a superfície que exibe padrão regular ou irregular de organização das partículas, normalmente em formas de círculos, polígonos, redes irregulares ou faixas. Padrões semelhantes a degraus, lobulados ou em guirlandas também são formas reconhecidas. A maioria

dos estudos (WASHBURN, 1956; RAY *et al.*, 1983; KRANTZ, 1990; MATTHEWS *et al.*, 1998; KESSLER & WERNER, 2003) admite a distinção entre os solos com padrão com formas bem definidas elaboradas pela alternância de partículas finas e grossas, e padrões definidos por micro-relevo, alternando montículos com

pequenas depressões, ou pequenas cristas e sulcos. Ainda existem os solos com padrões que alternam terreno vegetado com terreno descoberto. Conforme Ballantyne (2013b), a presença de *permafrost* não é obrigatória na formação de todos os tipos de solos com padrão, ainda que existam relações muito próximas entre eles.

O ambiente periglacial apresenta pouca efetividade em disponibilizar os sedimentos para o transporte fluvial, o que demarca uma de suas principais características, qual seja, o desenvolvimento do regolito *in situ*. Consequentemente, as formas periglaciais podem ser espacialmente restritas na paisagem e com preservação limitada ao longo do tempo geológico. Como exceções, a literatura apresenta alguns depósitos estratificados de sedimentos crioclastados comuns no noroeste da Europa e de algumas superfícies crioplanadas, relacionadas a um fenômeno muito questionado (THORN & HALL, 2002) e pouco compreendido (SLAYMAKER, 2011).

A ausência de formas de relevo de expressão regional não desvaloriza a importância das condições periglaciais. Considerando a própria natureza da pesquisa morfogenética, que se debruça sobre a evolução da paisagem a partir de processos que muitas vezes não são lineares e da existência de muitos controles e limiares, é importante que os processos periglaciais sejam discutidos em termos do retrabalhamento geomorfológico, mesmo que não permaneçam registrados no tempo profundo (BERTHLING & ETSSELMÜLLER, 2011).

Áreas periglaciais são paisagens que possuem sua história evolutiva compreendida como controlada primeiramente por eficientes mecanismos de congelamento e descongelamento. Crioplaneação, nivação, crioclastia e processos correlatos são sistematicamente enfatizados. A eles sempre foi dado o crédito para a formação de conjuntos de formas e depósitos variados, como vertentes de Richter (*Richter slopes*, vertentes retilíneas conhecidas pelo aporte de sedimentos ser constante com a remoção), criopedimentos, *felsenmeers* e as geleiras rochosas. Concomitantemente, processos universais e não exclusivos às regiões frias, também denominados de processos e agentes sazonais, como intemperismo bioquímico e processos derivados da ação pluvial, eólica, fluvial e marinha foram subestimados (ANDRÉ, 2003).

A percepção do intemperismo em regiões polares ou periglaciais seguia três tendências: i) o intemperismo

é dominado por processos mecânicos, ii) os processos mecânicos predominantes eram provenientes do *frost action*, iii) o intemperismo químico não tinha papel relevante devido às baixas temperaturas (HALL *et al.*, 2002).

Em primeiro lugar, sempre houve uma aceitação pouco crítica do intemperismo mecânico (derivado do *frost action*) e da rápida modificação da paisagem resultante de sua atuação (FRENCH, 2007). O *frost action* era investigado sem levar em consideração o controle litológico e estrutural das rochas, que apresentam diferentes susceptibilidades à crioclastia (ANDRÉ, 2003). A porosidade, as fraturas e demais linhas de fraqueza são propriedades que tornam carbonatos e dolomitos mais vulneráveis em relação às rochas cristalinas, como granitos e gnaisses. Comprovado laboratorialmente por André (1993) em 1120 ciclos de congelamento e descongelamento a  $-5^{\circ}\text{C}$ , rochas sedimentares produziram 35 vezes mais detritos que as rochas cristalinas, das quais várias amostras permaneceram intactas até o final do experimento.

Em segundo lugar, o tempo sempre foi um fator negligenciado. Pope *et al.* (1995) criticaram minuciosamente o modelo de Strakhov<sup>7</sup>, proposto em 1967<sup>7</sup>, que interpreta de forma reducionista a distribuição mundial das profundidades dos mantos de intemperismo de acordo com as zonas bioclimáticas. Segundo os autores, os mantos regolíticos tropicais estão expostos às ações intempéricas há muito mais tempo que os solos das regiões que passaram por glaciações quaternárias. Nessas últimas, os solos são muito mais jovens devido ao rejuvenescimento por episódios glaciais. Ollier (1988) assegura que o necessário para o aprofundamento do manto intempérico é água percolando os substratos em profundidade e durante um longo tempo.

Em terceiro lugar, as conjunturas locais, até mesmo em escala nanométrica, são relevantes, especialmente em ambientes muito extremos em que a temperatura e a umidade durante o ano variam muito de um local para outro. Tais condições excepcionais permitem que os esforços microscópicos se sobressaíam como responsáveis por reações em escalas maiores. Nesse sentido, defende-se um intemperismo movido não só por *frost action*, mas por reações térmicas (HALL, 1999), químicas e biológicas (ETIENE, 2002). Nas últimas décadas estudos em

<sup>7</sup> STRAKHOV, R. Principles of lithogenesis. Oliver & Boyd, Edinburgh, 1967, 1453p.

ambientes glaciais e periglaciais têm constatado o forte potencial ao intemperismo químico à despeito da suposta inibição devido as baixas temperaturas (SOUZA *et al.*, 2012; LOPES *et al.*, 2017), e considerado o papel crucial de agentes biológicos na produção de ácidos orgânicos e inorgânicos (SUN & FRIEDMANN, 1999, ETIENE, 2002; NAYLOR & CARTER, 2002).

Sobre o papel negligenciado da atividade biológica nos ambientes periglaciais, a colonização de biofilmes, líquens, bactérias e fungos produzem transformações intempéricas mais lentas, mas duradoura no tempo geológico e com ampla distribuição, inclusive em rochas pouco susceptíveis à crioclastia (ANDRÉ, 2003). A eficiência dos processos biológicos na taxa de intemperismo é dependente das condições ambientais locais. Em regiões submetidas a condições ambientais extremas ou de condições ecológicas específicas, a contribuição biológica é superior, já que a atuação de outros processos é de alguma forma limitada – pela falta de água em estado líquido durante todo o ano, por exemplo (VILES, 1995).

Além da microfauna, as áreas livres de gelo da Antártica Marítima recebem ainda nidificação em grande escala da avifauna, cujos excrementos (guanós) são depositados sobre substratos diversos (rochas, sedimentos e solos). A interação de tais excrementos com o substrato estimula uma série de processos geoquímicos, que tem como produto a alteração e neoformação mineralógica, a constituição de feições nas rochas, o desencadeamento de processos pedogenéticos e o *input* de diversos elementos químicos ao ambiente (TATUR, 1989). O *input* de fósforo, nitrogênio e cálcio, e em taxas menores, de magnésio, potássio e sódio pelo guano representa uma das principais fontes destes elementos no solo, em especial em ambientes polares (KARKANAS & GOLDBERG, 2010). Os processos desencadeados pela ornitogênese geralmente estão associados à área da nidificação da avifauna e às áreas mais próximas e passíveis de receber os excrementos, seja por depósito direto, percolação da solução lixiviada do excremento ou mesmo erosão de partículas. A fosfatização tem sido amplamente estudada e defendida como processo de formação de solo por autores como Tatur & Myrcha (1984); Myrcha *et al.* (1985); Tatur & Barczuk (1985); Tatur (1989); Myrcha & Tatur (1991); Schaefer *et al.* (2004); Michel *et al.* (2006); Simas *et al.* (2007); Pereira

*et al.* (2013), Machado *et al.* (2017); Daher *et al.* (2019).

Explorar todos os processos e fatores potencialmente envolvidos na esculturação da paisagem periglacial não desvaloriza o *frost action* e o *permafrost*. Naturalmente, existe a tendência de concentrar a atenção naqueles agentes singulares e únicos a um determinado ambiente em detrimento daqueles azonais (WORSLEY, 2004). Porém, o que se defende é o comportamento distinto dos processos azonais frente ao ambiente periglacial, sendo de certa forma condicionados pelas temperaturas baixas e pelo gelo subsuperficial, provocando interações importantes entre ambos conjuntos de processos que conseqüentemente resultaram na paisagem periglacial (BERTHLING & ETSSELMÜLLER, 2011).

## 5. Interação dos três conceitos no espaço e no tempo

Embora possam ser erroneamente compreendidos como conflitantes, as relações e interações entre os três conceitos é evidente. Na verdade, a maioria das paisagens livres de gelo possui impresso o legado de condições glaciais pretéritas, ou até mesmo de condições não glaciais (de climas temperados ou mesmo tropicais) (FRENCH, 2007). A Figura 4 propõe um modelo temporal que relaciona ao longo do tempo a paisagem glacial, paraglacial e periglacial, em condições de mudanças climáticas e energéticas.

É comum nas regiões próximas às geleiras a coexistência numa mesma paisagem de vertentes que retrabalham sedimentos glaciogênicos, com taxas de denudação elevadas, lagos e canais proglaciais e extensas planícies com formação de solos com padrão e sujeita a ciclos de congelamento e descongelamento. Nesse sentido, enquadrar o ambiente em apenas um dos três conceitos é tarefa árdua e demanda clareza do objeto pesquisado e da escala espacial empregada. De modo generalista, ambientes proglaciais e periglaciais dizem mais sobre condições locais, enquanto o paraglacial transita entre o local e o regional. Como apontado por Slaymaker (2011), o vale de Ekalugad no Canadá é um exemplo claro de ambientes não só em recente estágio de transição após o fim da glaciação, o que o define como essencialmente paraglacial, mas também proglacial e periglacial. Tal constatação não torna de forma alguma os três termos redundantes, apenas traduz diferentes aspectos da paisagem.

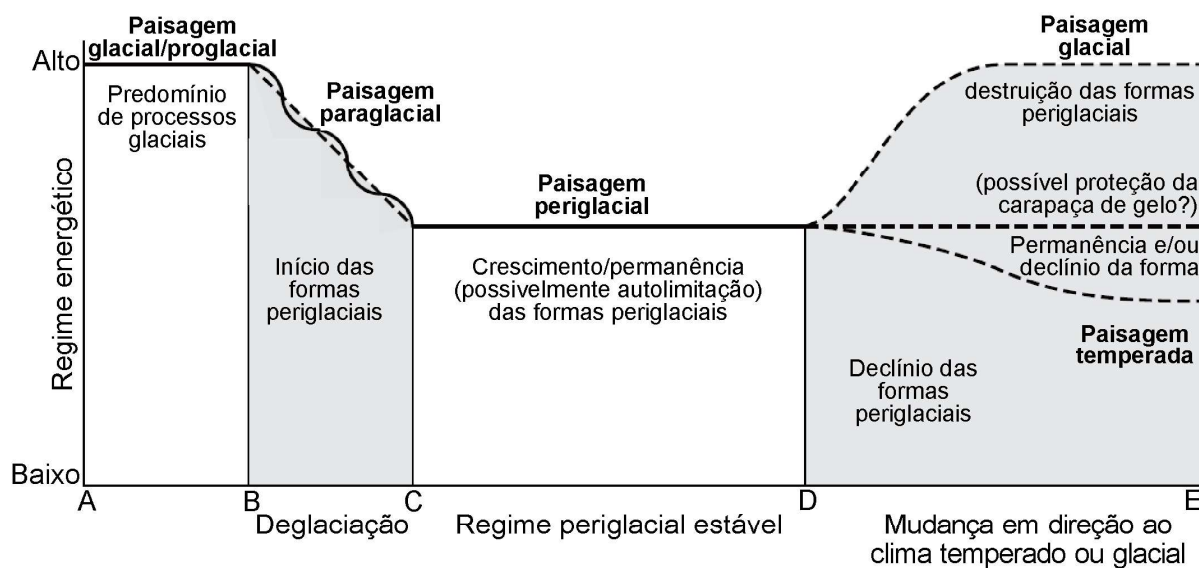


Figura 4 - Modelo conceitual da evolução da paisagem glacial, paraglacial e periglacial em relação às mudanças climáticas ao longo do tempo.

Fonte: modificado de Slaymaker, 2011, p. 89. Modelo conceitual de evolução da paisagem glacial, paraglacial e periglacial ao longo do tempo em relação às mudanças climáticas. A paisagem glacial é caracterizada por alto regime energético e o proglacial se instala às margens da geleira. Com a deglaciação e recuo das geleiras a superfície é exposta ao retrabalhamento paraglacial, e tem início o frost action e processos azonais. Com o esgotamento do estoque de sedimentos de origem glacial, a paisagem tende a uma maior estabilidade e estabelecimento de condição periglacial mais efetiva. O destino dessa paisagem depende das condições climáticas futuras, tendendo a destruição das formas pelo avanço da geleira ou pelo estabelecimento de um clima temperado.

Para a realização de uma pesquisa que verse sobre a diversidade de processos envolvidos na evolução da paisagem de regiões polares livres de gelo é necessário adotar uma perspectiva científica mais ampla por meio da abordagem multiescalar. André (2003) propõe que tal abordagem seja: i) espacial, a partir da interação dos variados componentes da paisagem, desde a dinâmica fluvial e de vertentes até os atributos e organizações micrométricas dos materiais; ii) temporal, levando em consideração a história da paisagem, desde as formas e materiais herdados de tempos pretéritos até os resultados da dinâmica atual. A aproximação da história da paisagem permite colocar os processos em andamento em uma sucessão ou combinação que opera em conjunto. Essa abordagem oportuniza uma discussão mais acurada e crítica, evitando redundâncias ou interpretações equivocadas.

## 6. As contribuições da pesquisa brasileira na Antártica na interface solo-vegetação-relevo

De maneira atuante, pesquisadores brasileiros têm se dedicado ao estudo dos solos e ecossistemas terrestres da Antártica desde o ano de 2002. Inicialmente, como

reporta Pereira *et al.* (2014), as pesquisas se iniciaram no âmbito do Projeto Criossolos, que em 2007 passou a constituir o Núcleo Terrantar, sediado na Universidade Federal de Viçosa. Este Núcleo compreende um dos grupos vinculados ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) da Criosfera, que juntamente com outros projetos integram o Programa Antártico Brasileiro, ou PROANTAR, que envolve diversas instituições nacionais, como CNPq, Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia, Ministério da Defesa, Universidades, entre outras.

Diversos eixos temáticos orientam as investigações conduzidas pelo Terrantar na Antártica, com destaque para i) o levantamento, caracterização, formação e classificação dos solos; ii) a relação solo-paisagem; iii) a existência, distribuição e comportamento do *permafrost*; iv) o estudo detalhado da dinâmica da matéria orgânica, v) a relação clima/variabilidade climática e comportamento físico dos solos; vi) as interações solo-planta e as relações ecológicas estabelecidas e vii) o papel da fauna no desenvolvimento dos solos e paisagens. Especificamente os temas i, ii, vi e vii trouxeram importantes contribuições para a compreensão dos processos, formas e materiais nos ambientes pro,

para e periglaciais. Essas pesquisas foram conduzidas no Arquipélago das Shetlands do Sul, Península Antártica e Antártica Continental, totalizando mais de 20 áreas investigadas até o momento.

Os resultados encontrados por essas pesquisas têm comprovado que a região da Península Antártica e o Arquipélago das Shetlands do Sul apresentam maiores temperaturas e precipitação em comparação com outras partes da Antártica (Vieira *et al.*, 2010; Chaves *et al.*, 2017), propiciando estabelecimento mais eficiente de processos pedogenéticos e a consequente consolidação de sistemas periglaciais (Francelino *et al.*, 2011; Moura *et al.*, 2012). Os principais processos de formação de solo atuantes na região incluem a translocação de argilas, o tiomorfismo, podzolização e a fosfatização (Simas *et al.*, 2007; Simas *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2013; Michel *et al.*, 2014; Lopes *et al.*, 2017; Daher *et al.*, 2019). A diversidade pedológica está relacionada principalmente à diversidade do material de origem, colonização biológica atual e pretérita, e ocorrência e distribuição do *permafrost* (Simas *et al.* 2008; Moura *et al.* 2012).

Como consequência da complexidade pedogeomorfológica em ambientes periglaciais, os sistemas modernos de classificação de solos são insuficientes para a devida separação dos perfis na região (Michel *et al.*, 2006; Simas *et al.*, 2007, 2008; Souza *et al.*, 2014), agrupando *pedons* que apresentam contrastes marcantes, ora desconsiderando a influência da fauna, como nos solos ornitogênicos, ora ignorando os fenômenos relacionados ao terreno, como os solos com padrões. As principais classes de solo incluem Arenosolos/Neossolos, Criosolos/Gelissolos, Leptossolos, Gleissolos e Cambissolos, todos apresentando propriedades gélidas (Simas *et al.*, 2015).

Os principais processos geomorfológicos atuantes na Antártica Marítima e Peninsular incluem a solifluxão, nivação, crioturbação, crioclastia, ablação e erosão. Processos paraglaciais ocorrem em áreas livres de gelo expostas recentemente, independente da presença de gelo, relacionados principalmente a processos erosivos (erosão e a ablação). A paisagem na região da Antártica Peninsular e Marítima se desenvolve em penínsulas e pontas, pequenas ilhas cercadas por gelo e mar. Desta forma, um gradiente de ambientes se desenvolve a partir da geleira. Autores como Francelino *et al.* (2011), Moura *et al.* (2012) e Michel *et al.* (2014) fizeram estudos abordando a relação dinâmica e mútua entre pedogênese

e superfícies geomórficas. Esses autores concluíram que as feições periglaciais são comuns a partir de 50 m acima do nível do mar, devido a presença de *permafrost* contínuo, especificamente àqueles em que há a presença de solos com padrões. Abaixo de 20 m as feições são muito raras, estando mais relacionadas a processos nivais e gravitacionais. Feições associadas à solifluxão estão concentradas em rampas de declividade média (maior que 11°), enquanto a crioturbação é comum em plataformas e depósitos glaciais, favorecida por texturas mais finas e maior retenção de água no perfil. Ambas são mais intensas em maiores altitudes. As feições relacionadas a processos nivais são comuns em fundos de vale planos (vales em forma de “U”), plataformas e rampas suaves. Planícies aluviais são comuns, cercadas por rampas mais íngremes nas proximidades dos glaciares, frequentemente preenchidas pelos sedimentos recentes.

A relação entre a pedodiversidade e a paisagem é estreita, principalmente devido a dinâmica e recente exposição do material de origem. Os Criosolos são caracterizados pela presença de *permafrost* até 1 m de profundidade ou 2 m quando feições gélidas (orientação vertical de cascalhos, horizontes enterrados, solos com padrões) estão presentes; ocorrem em ambientes diversos, notadamente morainas, geoformas relacionadas a crioturbação e gelifluxão e plataformas marinhas soerguidas, apresentando estrutura bem desenvolvida (Francelino *et al.* 2011). Uma interessante contribuição dos autores Michel *et al.* (2012) nas pesquisas sobre a camada ativa de *permafrost* constatou o primeiro caso de solos com padrão de congelamento por duas frentes laterais (*two-sided freezing*) na Antártica, sendo um padrão bastante comum no Ártico.

A exposição recente e o constante retrabalhamento do material de origem favorece a formação de Leptossolos (rasos e/ou pedregosos), sendo mais comuns em plataformas soerguidas e intimamente relacionados ao relevo residual, com estrutura incipiente. Os Gleissolos se encontram próximos aos canais de degelo, sendo comum a gleização de horizontes subsuperficiais em Criosolos devido ao impedimento de drenagem causado pela presença de *permafrost*. Os Neossolos (frequentemente arênicos) ocorrem em baixas altitudes, principalmente nos terraços marinhos, vertentes suaves, e depósitos (tills e planícies aluviais), mostram pouco ou nenhum desenvolvimento de estrutura, pequena diferenciação de horizontes, crioturbação ausente e nenhum de horizonte diagnóstico. Os Cambissolos são



caracterizados por uma textura mais fina e estrutura moderada, não apresentam *permafrost* ou crioturbação, ocorrem em baixas altitudes, em plataformas marinhas, feições erosivas ou depósitos (Francelino et al, 2011; Simas *et al.*, 2015).

Diante da extensa publicação brasileira e em consonância com a literatura internacional recente, propõe-se neste trabalho algumas modificações no modelo conceitual de evolução da paisagem glacial, paraglacial e periglacial proposta por Slaymaker (2011) apresentada na Figura 4.

A primeira mudança diz respeito a avaliação da taxa energética ao longo do tempo nos três sistemas. O autor generaliza o termo regime energético como equivalente à taxa erosiva, em detrimento de demais processos que também demandam consumo energético. Pensando em uma percepção mais abrangente e complexa dessas paisagens, a Figura 5 incluí ao modelo as taxas de pedogênese, de emissão de CO<sub>2</sub>, de colonização biológica e de produção de carbono orgânico, além da modificação do termo regime energético para taxa de erosão.

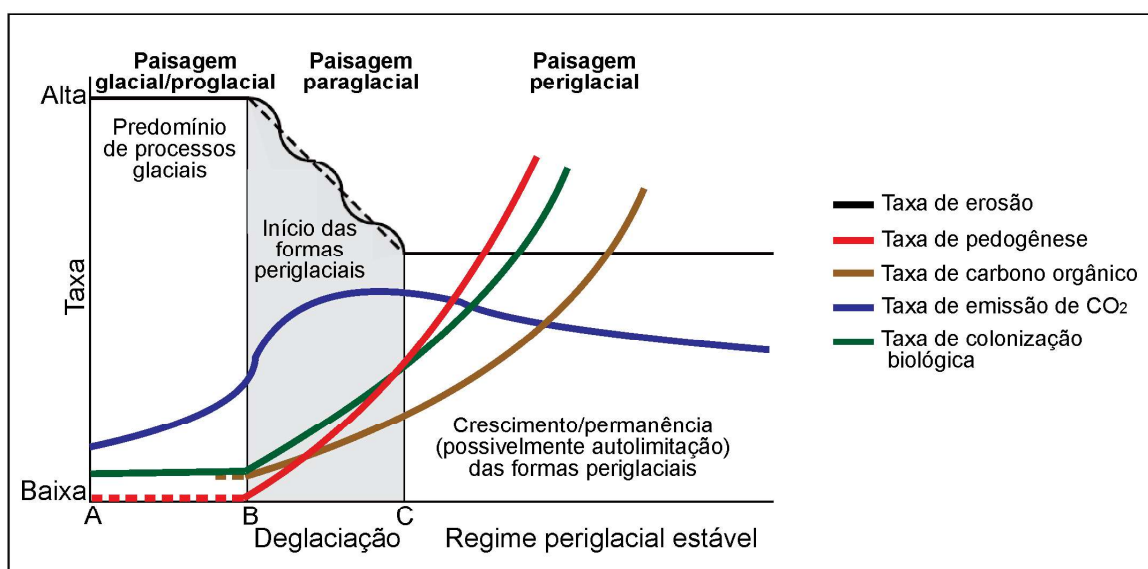


Figura 5 – Proposta de novo Modelo conceitual da evolução da paisagem glacial, paraglacial e periglacial em relação às mudanças climáticas ao longo do tempo.

Fonte: modificado de Slaymaker, 2011, p. 89. Modelo conceitual de evolução da paisagem glacial, paraglacial e periglacial ao longo do tempo em relação às mudanças climáticas. A paisagem glacial é caracterizada por altas taxas erosivas, colonização microbiológica baixa e emissões eventuais de CO<sub>2</sub> durante derretimento. O proglacial se instala às margens da geleira. Com a deglaciação e recuo das geleiras a superfície é exposta ao retrabalhamento paraglacial, e tem início o frost action e processos azonais. As taxas de emissão de CO<sub>2</sub> aumentam principalmente com o derretimento do gelo remanescente e a instabilidade do material superficial. Com o esgotamento do estoque de sedimentos de origem glacial, a paisagem tende a uma maior estabilidade e estabelecimento de condição periglacial mais efetiva, com aumento da pedogênese, da colonização biológica e consequente aumento na produção de carbono orgânico. A manutenção do sistema periglacial tende a diminuir e estabilizar as taxas de emissão de CO<sub>2</sub> nos *permafrost* e nos terrenos congelados sazonalmente.

Na Antártica Marítima os três sistemas abordados estão inseridos em mesmo contexto, interagindo e coexistindo espacialmente. Em circunstâncias de transição paraglacial, a pedogênese e a colonização biológica se sobressaem como possibilitadores do estabelecimento periglacial. Como sugerido por Buscot (2005), após a retração de uma geleira a superfície exposta dispõe de capacidade reduzida de suportar biota complexa e

abundante. Durante os primeiros estágios, microorganismos como algas, bactérias e associações com fungos em biofilmes de líquens representam os colonizadores pioneiros. Em substratos não consolidados, tal colonização microbiológica, como as crostas criptogâmicas, promoverá estabilidade ao material além de reações intempéricas que envolvem transformações geoquímicas. A estabilidade em conjunto com a transformação



da matriz sólida em partículas cada vez menores e com elevada superfície reativa, desenvolve a comunidade biológica, e propicia processos pedogenéticos efetivos. Pedogênese e microorganismos em conjunto produzem e transformam a matéria orgânica em processos de mineralização e humificação, elevando os teores de carbono orgânico. A mesma interpretação pode ser feita para as áreas colonizadas por aves, cuja interação entre guano e substrato é capaz de produzir os solos mais desenvolvidos e, muitas vezes, capazes de sustentar uma cobertura vegetal de maior porte.

Quanto mais afastado da geleira, mais os processos de remoção dão lugar ao retrabalhamento do material exposto. A atividade biológica se intensifica, primeiramente na forma de filmes bacterianos em pequenos lagos ou poças (cianobactérias), criando condições para o estabelecimento da flora. A estabilidade do material é chave para a atividade biológica mais intensa. Os constantes ciclos de congelamento e descongelamento resultam em intenso intemperismo físico, enquanto a disponibilidade de água líquida juntamente com maior atividade biológica da fauna e flora incrementam o intemperismo químico, o conteúdo de carbono e a neoformação de minerais na fração argila (Michel *et al.*, 2006; Simas *et al.*, 2006). O soerguimento glacio-isostático, comum na região, afeta esta separação tornando a paisagem mais complexa. À medida que a geleira retrai, todo o conjunto soergue, intensificando os processos de remoção dos sedimentos recém disponibilizados, acelerando a transição pró-glacial/paraglacial/periglacial. Assim, os três conceitos coexistem nas áreas livres de gelo da Antártica como um contínuo que evolui no sentido de uma maior diversidade geomorfológica, pedológica e biológica.

### Considerações finais

Mesmo que sistemas proglaciais, paraglaciais e periglaciais se diferenciem em essência já na premissa diagnóstica, os três podem ocorrer concomitante em uma mesma paisagem. O primeiro tem como diagnóstico o critério locacional, o segundo temporal e o terceiro por processos e formas. Ao analisar a natureza dos processos atuantes em cada um, é plausível distinguir que os dois primeiros lidam essencialmente com transporte de sedimentos enquanto o último tem foco no intemperismo e processos de gênese, retrabalhamento e evolução do regolito. Todos os três possuem formas resultantes

características e de fato em diversas situações sobrepostas, em especial nas áreas polares com proximidade às geleiras. Encontrar formas e processos provenientes dos três sistemas abordados, portanto, não deveria ser inesperado, tendo em vista que de forma alguma seus critérios diagnósticos, seus processos e materiais resultantes são excludentes entre si ou exclusivos de cada um. Este cenário tem sido uma realidade revelada na paisagem Antártica através dos estudos pedológicos e geomorfológicos empreendidos por equipes brasileiras, com especial contribuição ao entendimento de que a atividade biológica, e por que não, a vida, exerce um papel fundamental na transformação da paisagem não glacial. Os estudos não só reiteram a complexidades dessas paisagens como também sinalizam a importância da continuidade dos investimentos nacionais em pesquisas no continente gelado.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Nucleo Terrantar, sediado na UFV, pela condução das pesquisas sobre solos e ecossistemas terrestres da Antártica, ao CNPq, Fapemig e Proantar pelo apoio financeiro, à Marinha do Brasil pelo apoio logístico e à Capes pela concessão de bolsas de pesquisa.

### Referências Bibliográficas

- ANDERSON, D. E.; DOUDIE, A. S.; PARKER, A. G. **Global environments through the Quaternary – exploring environmental change**. United Kingdom: Oxford, Second Edition, 2013, 406p.
- ANDRÉ, M.F. **Les versants du Spitsberg (approche géographique des paysages polaires)**. Press universitaires de Nancy, Nancy, 1993, 361p.
- ANDRÉ, M-F. Do periglacial landscapes evolve under periglacial conditions? **Geomorphology**, v. 52, p. 149-164, 2003.
- ANDRÉ, M-F. (2009) From climatic to global change geomorphology: contemporary shifts in periglacial geomorphology. In: KNIGHT, J.; HARRISON, S. (Eds) **Periglacial and Paraglacial Processes and Environments**, Geological Society of London, Special Publication: p. 5-28.
- ASHMORE, P. Contemporary erosion of the Canadian landscape. **Progress in Physical Geography**, v. 17, p. 190-204, 1993.
- BALLANTYNE, C. K. Paraglacial debris cone formation on

- recently deglaciated terrain. **The Holocene**, v. 5, p. 25-33, 1995.
- BALLANTYNE, C. K. Paraglacial geomorphology. **Quaternary Science Reviews**, v. 21, p. 1935-2017, 2002.
- BALLANTYNE, C. K. (2013a) Paraglacial geomorphology. In: ELLIAS, S. A.; MOCK, C. J. (Eds.) **Encyclopedia of Quaternary Science**. Elsevier, 2 ed., p. 553-565.
- BALLANTYNE, C. K. (2013b) Patterned ground. In: ELLIAS, S. A.; MOCK, C. J. (Eds.) **Encyclopedia of Quaternary Science**. Elsevier, 2 ed., p. 452-463.
- BENN, D. I.; EVANS, J. A. **Glaciers and Glaciation**, London: Arnold, 2 ed., 2010, 802 p.
- BERTHLING, I.; ETZELMÜLLER, B. The concept of cryo-conditioning in landscape evolution. **Quaternary Research**, v. 25, p. 378-384, 2011.
- BONADA, B.; ROSA, K. K.; ANDRADE, A. M. Caracterização geomorfológica das áreas livres de gelo em resposta da tendência de retração da Geleira Polar Club, Península Potter, Ilha Rei George, Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 1, p. 149-167, 2018.
- BRENNAND, T. A. (2004). Glacifluvial. In: GOUDIE, A. S. (Ed.) **Encyclopedia of geomorphology**. London: Routledge, v. 1, p. 459-465.
- BUSCOT, F. (2005). What are soil? In: BUSCOT, F.; VARMA, A. (Ed.) **Microorganisms in soils: roles in genesis and functions**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, v. 3, p. 3-17.
- CHAVES, D. A.; LYRA, G. B.; FRANCELINO, M. R.; SILVA, L. D. B.; THOMAZINI, A.; SCHAEFER, C. E. G. R. Active layer and permafrost thermal regime in a patterned ground soil in Maritime Antarctica and relationship with climate variability models. **Science of the Total Environment**, v. 112, p. 1-14, 2017.
- CHURCH, M.; RYDER, J. M. Paraglacial sedimentation: a consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. **Geological Society of American Bulletin**, v. 83, p. 3059-3072, 1972.
- CHURCH, M.; SLAYMAKER, O. Desequilibrium of Holocene sediment yield in glaciated British Columbia. **Nature**, v. 337, p. 452-454. 1989.
- CLEIVA, P.; ROSA, K. K.; VIEIRA, R. Caracterização geomorfológica das áreas livres de gelo na margem leste do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica Marítima. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 2, p. 411-426, 2019.
- COSTA, V. C. S.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Geomorphology and sedimentology of Union Glacier area, Ellsworth Mountains, Occidental Antarctica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 3, p. 579-594, 2017.
- DAHER, M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; THOMAZINI, A.; LIMA NETO, E.; SOUZA, C. D.; LOPES, D. V. Ornithogenic soils on basalts from maritime Antarctica. **Catena**, v. 173, p. 367-374, 2019.
- EMBLENTON-HAMANN, C. (2004). Proglacial landforms. In: GOUDIE, A. S. (Ed.) **Encyclopedia of geomorphology**. London: Routledge, v. 2, p. 810-813.
- ETIENNE, S. The role of biological weathering in periglacial áreas: a study of weathering rinds in South Iceland. **Geomorphology**, v. 47, p. 75-86, 2002.
- EYLES, N.; KOCSIS, S. Reply to M. Church and J. M. Ryder's discussion of "Sedimentology and clast fabrics of subaerial debris flow facies in a glacially influenced aluvial fan". **Sedimentary Geology**, v. 59, p. 15-28, 1989.
- FEUILLET, T.; COQUIN, J.; MERCIER, D.; COSSART, E.; DECAULNE, A.; JÓNSSON, H. P.; SÆMUNDSSON, Þ. Focusing on the spatial non-stationarity of landslide predisposing factors in northern Iceland: Do paraglacial factors vary over space? **Progress in Physical Geography**, v. 38, p. 354-377, 2014.
- FORTIER, D.; ALLARD, M.; SHUR, Y. Observation of rapid drainage system development by thermal erosion of ice wedges on Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 18, p. 229-243, 2007.
- FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; FILHO, E. I. F.; SOUZA, J. J. L. L.; COSTA, L. M. Geomorphology and soils distribution under paraglacial conditions in an ice-free area of Admiralty Bay, King George Island, Antarctic. **Catena**, v. 85, p. 194-204. 2011.
- FRENCH, H. M. Does Lozinski's periglacial realm exist today? A discussion relevant to modern usage of the term 'periglacial'. **Permafrost and periglacial processes**. v. 11, p. 35-42, 2000.
- FRENCH, H. M. **The periglacial environment**. John Wiley & Sons, 3 ed., 2007, 458 p.
- FRENCH, H. M. **The periglacial environment**. John Wiley & Sons, 4 ed., 2018, 515 p.
- FRENCH, H. M.; THORN, C. E. The changing nature of periglacial geomorphology. **Géomorphologie: reliefs, processus, environnement**, v. 12, n. 3, p. 165-174, 2006.

- HALL, K. The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions. **Geomorphology**, v. 31, p. 47-63, 1999.
- HALL, K.; THORN, C. E.; MATSUOKA, N.; PRICK, A. Weathering in cold regions: some thoughts and perspectives. **Progress in physical geography**, v. 26, n. 4, p. 577-603, 2002.
- HARRISON, S.; WINCHESTER, V. Age and nature of paraglacial debris cones along margins of San Rafael glacier, Chilean Patagonia. **The Holocene**, v. 7, p. 481-487, 1997.
- ITURRIZAGA, L. Paraglacial landforms assemblages in the Hindukush and Karakoram Mountains. **Geomorphology**, v. 95, p. 27-47, 2008.
- KARKANAS, P.; GOLDBER, P. (2010) Phosphatic features. In: STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. **Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths**. Elsevier, p.521-541.
- KESSLER, M. A.; WERNER, B. T. Self-organization of sorted patterned ground. **Science**, v. 299, p. 380-383, 2003.
- KNIGHT, J.; HARRISON, S. Transience in cascading paraglacial systems. **Land Degradation & Development**, v. special issue article, p.1-11, 2018.
- KRANTZ, W. B. Self-organization manifest as patterned ground in recurrently frozen soils. **Earth Science Reviews**, v. 29, p. 117-130, 1990.
- LAMOUREUX, S. F. Catchment and lake controls over the formation of varves in monomictic Nicolay Lake, Cornwall Island, Nunavut. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 36, p. 1533-1546, 1999.
- LOPES, D. V.; SOUZA, J. J. L. L.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R. Solos e evolução da paisagem em ambiente periglacial na Península Barton, Antártica Marítima. **Revista do Departamento de Geografia**, v. especial SBGFA: 259-267, 2017.
- MACHADO, M. R.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; ALMEIDA, E. P. C. Endemismo pedológico e os solos da Ilha da Trindade – Atlântico Sul, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. especial SBGFA: 238-248, 2017.
- MARSHALL, S. J. **The cryosphere**. Princeton University Press: New Jersey, 2012, 288 p.
- MATSUOKA, N. Monitoring periglacial processes: towards construction of a global network. **Geomorphology**, v. 80, p. 20-31, 2006.
- MATTHEWS, J. A.; SHAKESBY, R. A.; BERRISFORD, M. S.; McEWEN, L. J. Periglacial patterned ground in the Styggedalsbreen glacier foreland, Jotunheimen, Southern Norway: micro-topographical, paraglacial and geochronological controls. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 9, p. 147-166, 1998.
- MCCONNELL, J. R. (2006) Role and importance of cryospheric processes in climate system. In: ANDERSON, M. G.; MCDONNELL, J. J. (Eds.) **Encyclopedia of hydrological sciences**. doi:10.1002/0470848944.hsa208.
- MERCIER, D. (2007). Le paraglaciaire, évolution d'un concept. In: ANDRÉ, M-F.; ETIENNE, S.; LAGEAT, Y.; LE COEUR, C.; MERCIER, D. (Eds) **Du continent au bassin versant – théories et pratiques en géographie physique (Hommage au Professeur Alain Godard)**. Presses Universitaires Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, Collection 'Nature & Sociétés', v. 4, p. 341-353.
- MICHEL, R. F. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; DIAS, L. E.; SIMAS, F. N. B.; BENITES V. M.; MENDONÇA E. S. Ornithogenic Gelisols (Cryosols) from Maritime Antarctica: Pedogenesis, Vegetation, and Carbon Studies. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 1370-1376, 2006.
- MICHEL, R. F. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; POELKING, E. L.; SIMAS, F. N. B.; FERNANDES FILHO, E. I.; BOCKHEIM, J. G. Active layer temperature in two Cryosols from King George Island, Maritime Antarctica. **Geomorphology**, v. 155-156, p. 12-19, 2012.
- MICHEL, R. F. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; SIMAS, F. N. B.; HAUS, N. W.; SERRANO, E.; BOCKHEIM, J. Soils and landforms from Fildes Peninsula and Ardley Island, Maritime Antarctica. **Geomorphology**, v. 225, p. 76-86, 2014.
- MILLER, D. C.; BIRKELAND, P. W.; RODBELL, D. T. Evidence for Holocene stability of steep slopes, northern Peruvian Andes, based on soils and radiocarbon dates. **Catena**, v. 20, p. 1-12, 1993.
- MOURA, P. A.; FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R. Distribution and characterization of soils and landform relationship in Byers Peninsula, Livingston Island, Maritime Antarctica. **Geomorphology**, v. 155-156, p. 45-54, 2012.
- MYRCHA, A., PIETR, S.J., TATUR, A. (1985). The role of Pygoscelid penguin rookeries in nutrient cycles at Admiralty Bay, King George Island. In: SIEGFRIED, W.R., CONDY, P.R., LAWS, R.M. (Eds.), **Antarctic nutrient cycles and food webs**. Springer-Verlag, Berlin, p. 156-163.
- MYRCHA, A., TATUR, A. Ecological role of the current and abandoned penguin rookeries in the land environment of the

- maritime Antarctic. **Polish Polar Research**, v. 12, 1:3-24, 1991.
- NAYLON, L. A.; VILES, H. A.; CARTER, N. E. A. Biogeomorphology revisited: looking towards the future. **Geomorphology**, v. 47, p. 3-14, 2002.
- OLLIER, C. D. Deep weathering, groundwater and climate. **Geografiska Annaler**, v. 70<sup>a</sup>, p. 285-290, 1988.
- PEREIRA, T. T. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; ALMEIDA, C. C.; ALMEIDA, I. C. C. Micromorphological and microchemical indicators of pedogenesis in ornithogenic cryosols (gelisols) of Hope Bay, Antarctic Peninsula. **Geoderma**, 193-194, 311-322, 2013.
- PEREIRA, T. T. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; RODRIGUES, R. A.; PINHEIRO, L. S. Pedologia brasileira na Antártica: a pesquisa de solos afetados por permafrost no cenário do aquecimento global. **Revista Geográfica Acadêmica**. v. 8, p. 18-28, 2014.
- PERMAFROST SUBCOMMITTEE. Glossary of permafrost and related ground-ice terms. **National Research Council Canada Technical Memorandum**. n. 142, 1988, 156p.
- POPE, G. A.; DORN, R. I.; DIXON, J. C. A new conceptual model for understanding geographical variations in weathering. **Annals of Association of American Geographers**. v. 85, n. 1, p. 38-64, 1995.
- RAY, R. J.; KRANTZ, W. B.; CAINE, T. N.; GUNN, R. D. A model for sorted patterned-ground regularity. **Journal of Glaciology**, v. 29, n. 102, p. 317-337, 1983.
- ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Dinâmica glacial e características sedimentares resultantes na zona proglacial da Gelerira Ecology – Baía do Almirantado, Ilha Rei George – Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 2, p. 51-60, 2006.
- ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; ACUNA, F. F.; SIMÕES, J. C. Geomorfologia e sedimentologia glacial aplicadas na reconstrução da evolução do ambiente de deglaciação da Geleira Wanda, Ilha Rei George, Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 1, p. 39-48, 2010.
- ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; MENDES Jr., C. W.; SOUZA Jr., E.; SIMÕES, J. C. Compilation of geomorphological map for reconstructing the deglaciation of ice-free áreas in the Martel Inlet, King George Island, Antarctica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 2, p. 181-187, 2013.
- RYDER, J. M. The stratigraphy and morphology of paraglacial alluvial fans in South-central British Columbia. **Canadian Journal Earth Science**, v. 8, p. 279-298, 1971a.
- RYDER, J. M. Some aspects of the morphometry of paraglacial alluvial fans in south-central British Columbia. **Canadian Journal of Earth Science**, v. 8, p. 1252-1264, 1972b.
- ALBUQUERQUE-FILHO, M. R., MICHEL, R. F. M., SCHAEFER, C. E. G. R., SIMAS, F. N. B., VIANA, J. H. M., TATUR, A. (2004) Fosfatização: processo de formação de solos na Baía do Almirantado e implicações ambientais. In: SCHAEFER, C. E. G. R., FRANCELINO, R., SIMAS, F. N. B., ALBUQUERQUE FILHO, R. (eds.), **Ecosystemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima, Baía do Almirantado, Ilha Rei George**. NEPUT e Departamento de Solos, Viçosa, p. 47-59.
- LIMOEIRO, B. F., SALGADO, A. A. R. Geomorfologia brasileira: panorama geral da produção nacional de alto impacto no quinquênio entre 2011-2015. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 1, p. 225-236, 2017.
- SLAYMAKER, O. (2009) Proglacial, periglacial or paraglacial? In: KNIGHT, J. HARRISON, S. (Eds.) **Periglacial and Paraglacial Processes and Environments special publication**. The Geological Society of London, p. 71-84.
- SLAYMAKER, O. Criteria to distinguish between periglacial, proglacial and paraglacial environments. **Quaestiones Geographicae**, v. 30, n. 1, p. 85-94, 2011.
- SIMAS, F. B. B.; CHAEFER, C. E. G. R.; MELO, V. F.; GUERRA, M. B. B.; SAUNDERS, M.; GILKES, R. J. Clay-sized minerals in permafrost-affected soils (Cryosols) from King George Island, Antarctica. **Clays and Clay Mineralogy**, v. 54, p. 721-736, 2006.
- SIMAS, F. N. B., SCHAEFER, C. E. G. R., MELO, V. F., ALBUQUERQUE-FILHO, M. R., MICHEL, R. F. M., PEREIRA, V. V., GOMES, M. R. M., COSTA, L. M. Ornithogenic cryosols from Maritime Antarctica: phosphatization as a soil forming process. **Geoderma**, 138: 191-203, 2007.
- SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; ALBUQUERQUE-FILHO, M. R., FRANCELINO, M. R.; FERNANDES-FILHO, E. I.; COSTA, L. M. Genesis, properties and classification of Cryosols from Admiralty Bay, Maritime Antarctica. **Geoderma**, v. 144, p. 116-122, 2008.
- SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MICHEL, R. F. M.; FRANCELINO, M. R.; BOCKHEIM, J. G. (2015). Soils of the South Orkney and South Shetland Island, Antarctica In: BOCKHEIM, J. G. (ed.). **The soils of Antarctica**, World Soils Book Series. p. 227-273.
- SOUZA, J. J. L. L.; SCHAEFER, C. E. G. R.; ABRAHÃO, W. A. P. ; MELLO, J. W. V.; SIMAS, F. N. B.; SILVA,

- J.; FRANCELINO, M. R.. Hydrogeochemistry of sulfate-affected landscapes in Keller Peninsula, Maritime Antarctica. **Geomorphology**, 155-156: 55-61, 2012.
- SOUZA, K. K. D.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; SPINOLA, D. N.; DAHER, M. Soil formation in Seymour Island, Weddell Sea, Antarctica. **Geomorphology**, v. 225, p. 87-99, 2014.
- SUN, H. J.; FRIEDMANN, E. I. Growth on geological time scales in the Antarctic cryptoendolithic microbial Community. **Geomicrobiology Journal**, v. 16, p. 193-202, 1999.
- TATUR, A. Ornithogenic soils of the Maritime Antarctic. **Polish Polar Research** v. 4, p. 481-532, 1989.
- TATUR, A., BARCZUK, A. (1985). Ornithogenic phosphates on King George Island, Maritime Antarctic. In: SIEGFRIED, W.R., CONDY, P.R., LAWS, R.M. (Eds.), **Antarctic nutrient cycles and food webs**. Springer-Verlag, Berlin, p. 163-169.
- TATUR A., MYRCHA A. Ornithogenic soils on King George Island (maritime Antarctic zone). **Polish Polar Research**, v. 5, p. 31-60, 1984.
- THORN, C. E.; HALL, K. Nivation and cryoplanation: the case for scrutiny and integration. **Progress in physical geography**, v. 26, n. 4, p. 533-550, 2002.
- TWEED, F. S.; RUSSELL, A. J. Controls on the formation and sudden drainage of glacier-impounded lakes: implications for jökulhlaup characteristics. **Progress in Physical Geography** v. 23, p. 79-110, 1999.
- VAN VLIET-LANOE, B. (1985). Frost effects in soils. In: BOARDMAN, J. (ed.) **Soils and Quaternary Landscape Evolution**. Wiley Publishers, London, p. 117-158.
- VAN VLIET-LANOE, B. (2004) Properties and processes of cryosols: introduction. In: KIMBLE, J. M. (Ed.). **Cryosols – permafrost affected soils**. Springer, p. 341-346.
- VIEIRA, G.; BOCKHEIM, J.; GUGLIELMIN, M.; BALKS, M.; ABRAMOV, A. A.; BOELHOUWERS, J.; CANNONE, N.; GANZERT, L.; GILICHINSKY, D.; GORYACHKIN, S.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; MEIKLEJOHN, I.; RAFFI, R.; RAMOS, M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SERRANO, E.; SIMAS, F.; SLETTEN, R.; WAGNER, D. Thermal state of permafrost and active-layer monitoring in the Antarctic: advances during the International Polar Year 2007-2008. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 21, p. 182-197, 2010.
- VIEIRA, R.; ROSSATO, M. S.; AQUINO, F. E.; SIMÕES, J. C. Feições morfológicas associadas ao ambiente de deglaciação da Geleira Ecology, Ilha Rei George, Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, n. 2, p. 51-64, 2005.
- VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Geomorfologia glacial dos Montes Patriot e Montes Independence, Montanha Ellsworth, manto de gelo da Antártica Ocidental. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 1, p. 45-58, 2011.
- VILES, H. Ecological perspectives on rock surface weathering: towards a conceptual model. **Geomorphology** v. 13, p. 21-35, 1995.
- WASHBURN, A. L. Classification of patterned ground and review of suggested origins. **Bulletin of the Geological Society of America**. v. 67, p. 823-866, 1956.
- WORSLEY, P. Periglacial geomorphology. In: GOUDIE, A. S. (Ed.) **Encyclopedia of geomorphology**. London: Routledge, v. 2, 2004, p. 772-776.