

Geomorfologia de montanhas: estabilidade das encostas e movimentos de massa.

Antonio José Teixeira Guerra
Carlos Portela Senna
Joana Roizen Leal

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro
Departamento de Geografia - LAGESOLOS
(Laboratório de Geomorfologia Experimental e Erosão de Solos)
Ilha do Fundão - Cidade Universitária
CEP 21.940-590 - Rio de Janeiro - RJ
Fax: (021) 598-3280
lagesolo@igeo.ufrj.br

Abstract. The following paper concerns, in a theoretical approach, the geomorphology of mountain areas, and its contribution to the study of mass movement, in these environments. Furthermore, some examples are also outlined. The paper also regards mountain geocology, weathering, mass movements and slope stability.

Key words: Geological Hazards, Landslides, Mountain Geocology

INTRODUÇÃO

O trabalho que se segue procura trazer a contribuição da Universidade para um Simpósio como este, através da pesquisa básica, de caráter teórico. Para isso, são abordados tópicos como: geocologia das montanhas; intemperismo e movimentos de massa; formas das encostas e sua evolução; e finalmente, os riscos de deslizamento em áreas urbanas. Através dos tópicos listados acima, acreditamos estar dando uma contribuição de caráter teórico ao estudo dos processos geomorfológicos em regiões montanhosas.

Geocologia de Montanhas

Numa abordagem geocológica das montanhas deve-se evitar o tratamento isolado do clima, solos, relevo e vegetação, mas sim levar em conta suas interações. Segundo Troll (1972) Geocologia é a ciência das interações entre os organismos, ou biocenoses, e seus fatores ambientais, ou seja, a análise das interações entre os elementos bióticos e abióticos, tais como microclima, rochas, tipos de solo, quantidade e movimentação de águas, formas de relevo e biocenoses, como plantas, animais, microorganismos, etc (Gerrard, 1990). Nesse sentido, a geocologia tem um papel relevante no diagnóstico e prognóstico dos riscos de deslizamentos e de erosão de solos, em áreas

montanhosas, pois leva em conta a multiplicidade de fatores, que podem desencadear tais processos.

Uma das principais características dos sistemas ecológicos montanhosos é a sua instabilidade. Tais sistemas são muito dinâmicos, o que compromete sua estabilidade. Tal dinamismo resulta de uma série de fatores, tais como: atividade tectônica, flutuações climáticas, intemperismo, movimentos de massa, etc. Esse dinamismo é basicamente afetado pelo uso da terra, com cortes de taludes, construções de casas e ruas, desmatamento para uso agrícola, aproveitamento de madeira, etc.

Existe um forte relacionamento entre os sistemas geomorfológicos e ecológicos nas montanhas. Esses sistemas variam em três direções: com a altitude; com a direção norte-sul e com a direção leste-oeste (Guerrard, 1990). Por exemplo, em relação à variação com a altitude, nas zonas tropicais a seqüência típica é: floresta tropical de terras baixas, vegetação submontanhosa, montanhosa, subalpina, chegando até a vegetação rasteira da zona alpina. No caso brasileiro, apesar de não possuímos altitudes tão elevadas, em algumas montanhas existe um predomínio de vegetação rasteira, a partir de uma certa altitude. A ocupação dessas áreas envolve o desmatamento, acompanhado de obras de engenharia que, geralmente, rompem o equilíbrio ecológico que havia anteriormente, podendo causar uma série de impactos ambientais nas encostas,

que se repercutirão sobre os vales fluviais e sobre as terras mais baixas, através do assoreamento.

A geologia também possui um papel importante na paisagem das montanhas, juntamente com outros fatores como a topografia e os tipos de solos. Por exemplo, rochas metamórficas tendem a formar um relevo massivo, enquanto rochas sedimentares duras, como os conglomerados e os arenitos tendem a formar um relevo com cristas monoclinais. Já as rochas sedimentares mais moles, como os calcários, produzem uma topografia mais suave, com solos profundos (Gerrard, 1990).

Pode-se concluir que um estudo geoecológico das montanhas deve levar em conta a interdependência entre os processos e as formas que são típicos de ambientes montanhosos. Esses relacionamentos criam zonas que podem ser reconhecidas nas montanhas de qualquer parte do mundo.

Intemperismo e Movimento de Massa

Intemperismo

Intemperismo é o processo de alteração e desintegração de rochas e materiais de solos na superfície terrestre por ação de processos físicos, químicos e biológicos (Selby, 1989), possuindo quatro características muito importantes: diminui a resistência das rochas e aumenta a sua permeabilidade, proporcionando assim, melhores condições para a atuação dos processos erosivos; é o primeiro passo para a formação dos solos. Em algumas regiões, os processos de intemperismo, liberam em solução: alumina, sílica e óxido de ferro, que ao concentrarem-se formam camadas endurecidas sobre as rochas ou nas camadas dos solos, tornando-os mais resistentes à erosão; é responsável pela formação de diferentes tipos de formas de relevo.

Pode-se acrescentar ainda a importância dos processos intempéricos como um “mecanismo de gatilho” para a ocorrência de movimentos de massa, pois a ação do intemperismo sobre as rochas ou sobre os solos, faz com que estes se tornem fragilizados e mais suscetíveis à perda de resistência, estabilidade e, conseqüentemente, se tornem mais suscetíveis a movimentos de massa. Sendo assim, o intemperismo é também o primeiro passo para a ocorrência de um movimento de massa.

É importante salientar que todos os tipos de intemperismo atuam conjuntamente e *in situ*, não envolvendo diretamente processos de remoção de material.

Intemperismo físico

É o processo de desintegração que leva à formação de materiais não alterados quimicamente em relação à rocha original. Tais produtos de intemperismo compreendem desde a dimensão dos cristais que compõem a rocha à grandes blocos rochosos.

Liberação de stress

Talvez seja o processo mais importante do intemperismo físico, devido à sua capacidade de provocar a abertura de grandes fraturas nas rochas, permitindo melhor atuação de outros processos.

Quando uma rocha é produzida pela solidificação do magma, quando ela é metamorfoisada a grandes temperaturas e pressões, quando ela é soterrada a grandes profundidades ou quando sofre a ação de processos tectônicos, ela adquire uma quantidade considerável de *stress* armazenado e, quando esta pressão de confinamento é liberada, devido a processos tectônicos, glaciais ou erosivos, resulta no fraturamento da rocha, indo de pequenas fraturas (como esfoliação) até grandes diáclases.

Haloclastia

Resulta do crescimento de cristais de sais devido a cristalização, expansão termal ou hidratação destes sais. Tal crescimento de sais nos poros e fissuras das rochas resulta no exercício de uma pressão de confinamento que causa o fraturamento da rocha.

Termoclastia

Resulta da alternância de temperaturas das superfícies rochosas sobre a influência direta do aquecimento solar, o que provoca o fissuramento das rochas. Esse processo é menos significativo em montanhas tropicais onde a cobertura vegetal impede excessivas mudanças de temperatura.

Alternância seco/úmido

Tem sido sugerida como responsável pela desintegração rochosa devido a absorção de água nos poros e fissuras de solos e rochas, forçando as partículas a se afastarem e se agregarem com a alternância seco/úmido. Este processo é bem significativo em solos argilosos e em rochas que possuam grandes quantidades de argila em sua composição.

Intemperismo químico

É o processo de decomposição, ou seja, de alteração química dos minerais originais de uma rocha,

podendo originar novos materiais inteiramente diferentes dos materiais originais que compõem a rocha.

Este tipo de intemperismo está intimamente associado à presença de água no ambiente, pois este é o principal veículo natural que contém dissolvidos os elementos e compostos químicos, que reagem com os componentes minerais das rochas e dos solos. Além disso, a água, por si só, pode ocasionar intemperismo químico, através do processo de hidratação.

Solução

A água em uma rocha ou atuando nela, nunca é "pura", ou seja, contém íons que modificam seu pH. Estes íons são liberados na água pelas rochas e reagem com outros íons ou minerais formando novas combinações, como por exemplo:



Hidratação

É a adição de água em um mineral, seguida de absorção na estrutura cristalina de tais minerais. Óxidos de ferro, por exemplo, podem absorver água e tornarem-se hidróxidos como:

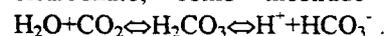


Hidrólise

É uma reação química entre um mineral e a água, que se dá entre íons H^+ ou H^- da água com íons do mineral. Na hidrólise a água é um reagente e não meramente um solvente.

Carbonatação

Ocorre porque o íon bicarbonato (HCO_3^-) está quase sempre presente em soluções aquosas naturais, como os rios. O íon bicarbonato é derivado da fixação de dióxido de carbono (CO_2) pelas raízes das plantas, através da fotossíntese e da respiração e ainda da degradação bacteriana de detritos de vegetais mortos. O dióxido de carbono ao ser dissolvido produz bicarbonato, como mostrado na reação abaixo:



Oxidação

É um processo de combinação com oxigênio e resulta em um incremento de valência positiva ou em um decréscimo de valência negativa, onde Cu^+ é oxidado para Cu^{2+} e S^- é oxidado para S . Um importante processo de oxidação é a alteração do ferro de óxido ferroso para óxido férrico: $4\text{FeO} + \text{O}_2 \Rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3$.

Minerais máficos como anfibólios, biotita, olivinas e piroxenios estão sujeitos à oxidação.

Redução

É o processo oposto ao da oxidação e geralmente ocorre em ambientes anaeróbios, ou seja, na ausência de oxigênio livre.

Movimentos de massa

Os movimentos de massa são diferenciados segundo seu tipo, velocidade do movimento, idade do movimento, grau de atividade, localização geográfica, clima a qual a região está inserida, causas do movimento, mecanismos envolvidos, morfologia do material depositado e propriedades geotécnicas.

Segundo Hansen (1984), os movimentos de massa dividem-se basicamente em quatro classificações gerais: *creep*; *falls*; *slides*; *flows*.

Creep

É basicamente definido pela sua velocidade, que é devido à lenta natureza do movimento, podendo existir três tipos de *creep*: sazonal; contínuo; progressivo.

O *creep* sazonal é o movimento com a profundidade do solo, afetada pela mudança da estação do ano, no que diz respeito à umidade do solo e sua temperatura; *creep* contínuo é quando o ponto de pressão excede a resistência do material; *creep* progressivo quando é associado com o alcance da encosta no ponto de cisalhamento de outros movimentos de massa. O *creep* é normalmente separado das demais categorias devido à sua grande área de ocorrência, a lenta forma do movimento e o fato de que o *creep* sazonal é dependente primeiramente da mudança da força da gravidade (Hansen, 1984).

Falls

É classificado de uma forma mais geral como sendo um movimento abrupto de queda livre de material advindo do topo da encosta (semelhante à escarpa). O material é normalmente definido como movimento em bloco (Hansen, 1984), além de ser um movimento extremamente rápido, que pode ser dividido em: queda livre; movimento por desprendimento (saltos, arrancos) e rolamento de fragmentos de rocha ou solo.

Segundo uma nomenclatura volumétrica sugerida por Whalley (1974) pode-se classificar as quedas como sendo: *falls* ($< 10\text{m}^3$); *boulder falls* ($10 - 100\text{m}^3$); *blockfall* ($> 100\text{m}^3$); *cliff fall* ($10^4 - 10^6\text{m}^3$); *bergsturz* ($> 10^6\text{m}^3$).

Para que ocorra o *fall* é necessário que o ângulo de inclinação da encosta rochosa tenha em torno de 50° da vertical.

Para que haja o *rockfall* é necessário que além da inclinação da encosta, a escarpa íngreme tenha algum segmento vertical com um comprimento de aproximadamente 100m de encosta e que possuam bordas, que vão intervir no movimento, uma vez que é através dessas bordas que o material, que foi perdido da escarpa, às vezes fica detido temporariamente, embora quedas advindas dessa posição reflita a desintegração da escarpa (Hansen, 1984). O *rockfall* é provavelmente o movimento de massa mais frequentemente observado em áreas montanhosas (Luckman, 1976).

A água e o gelo influenciam a resistência dos solos e das rochas, além de contribuir no comportamento dos solos no que diz respeito à sua plasticidade.

O clima influencia através da pressão da água dentro da encosta como, por exemplo, o gelo que chega a penetrar de 10 à 20m dentro da rocha nos invernos mais rigorosos, na Europa, enquanto no verão há o processo inverso, o de descongelamento. Com a sucessão desses processos (congelamento e descongelamento), a camada de água que foi congelada, no interior da encosta e que sofre o processo de descongelamento, será rebaixada, causando uma ação eminentemente forte da pressão de infiltração agindo na direção da face da escarpa, reduzindo assim a resistência nas juntas (Selby, 1982).

O homem interfere na estabilidade das encostas. Em uma escala maior esse fator será de pequena importância se comparado com os fatores geológicos, mas localmente esse será um fator de grande importância. Sua interferência se dá através do suporte lateral da encosta, como no caso de pedreiras ou através de escavações de canais, rodovias e estradas de ferro (Selby, 1982).

Slides

Esse termo é normalmente reservado para movimentos de material ao longo de uma camada superficial de cisalhamento (Hansen, 1984).

É o tipo de material e/ou o tipo da superfície de cisalhamento que dá a idéia principal para a subdivisão desse grupo (Hansen, 1984), que ocorre da seguinte forma: *rockslides*; *mudslides*; *landslides*; *flowslides* (com presença de água).

O processo rotacional do *slide* se dá quando o movimento tem tamanha força que causa a rotação

momentânea do material em relação ao ponto de centro de gravidade da matéria rotacionada (Hansen, 1984). O que vai facilitar esse movimento rotacional de matéria e o plano de ruptura que frequentemente é côncavo, resultando assim no movimento rotacional, que é chamado *slump* (Selby, 1982).

O processo translacional ocorre quando o movimento se der ao longo de uma superfície mais ou menos plana, ou levemente ondulada, sobre a qual o solo sofre uma grande deformação em suas estruturas (ou melhor, quando se observa a perda destas). O movimento é frequentemente controlado estruturalmente pela superfície fragilizada, como também pelas falhas, juntas, planos de cisalhamentos e variações da resistência ao cisalhamento, entre camadas de depósitos sobrepostas, ou pelo contato entre a rocha matriz e os detritos (Hansen, 1984).

Flows

O comportamento do material movimentado é como o de uma massa viscosa, por onde o movimento inter-granular predomina acima da camada superficial dos movimentos (Hansen, 1984).

A diferença básica entre *flows* e os demais movimentos de massa é a existência de grandes quantidades de água no material transportado, passando a ter uma textura mais viscosa como a das lamas. Pode ser classificado como: *debris flows*, *earth flows* e *mudflows* (Selby, 1982), segundo o tipo de material envolvido.

Segundo Selby (1982), os principais fatores contribuintes para a ocorrência de *flows* são: a remoldagem dos solos durante processos de *slide*; a presença de argilas saturadas de água em áreas de precipitação elevada e a presença de solos que se saturam facilmente em áreas onde a precipitação é baixa.

Formas das Encostas e sua Evolução

As montanhas são caracterizadas por uma grande variedade de tipos de encostas, geralmente com topografia íngreme, dominadas por paredes rochosas, de mais de 60° e encostas íngremes entre 35° e 60° de declividade. Alguns fundos de vales chatos e platôs elevados podem também ocorrer (Gerrard, 1990).

As formas de encostas específicas nas montanhas podem estar relacionadas à atuação de processos específicos. French (1976), por exemplo, demonstrou a importância dos processos periglaciais nas montanhas alpinas, produzindo uma face livre,

próximo ao topo, com um depósito de tálus, em direção ao sopé, e a presença de um manto de detritos, recobrendo a encosta como um todo. Isso ocorre em outras áreas do globo terrestre também.

Embora exista uma variedade de formas de encostas nas montanhas, há um grande número de elementos comuns, em muitas delas. É comum diferenciar encostas com limitação de intemperismo e com limitação de transporte. As encostas com limitação de intemperismo ocorrem onde a produção de material pelo intemperismo não consegue manter o mesmo ritmo da taxa de remoção de materiais, enquanto as encostas com transporte limitado são aquelas onde o transporte de sedimentos é insuficiente para remover todo o material produzido pelo intemperismo (Gerrard, 1990). Essas encostas são afetadas por movimentos de massa e processos erosivos em superfície e subsuperfície (Guerra, 1995).

Segundo Gerrard (1990) existem vários tipos de encostas. Uma delas é a encosta rochosa, que domina a maioria das montanhas elevadas. As quedas de blocos e deslizamentos de rocha são comuns nessas encostas. Dessa forma, a evolução desse tipo de encosta é determinada pela resistência das rochas ao cisalhamento. Um outro tipo, segundo Gerrard (1990), é a encosta em equilíbrio. Essas possuem uma condição de equilíbrio entre a declividade e a massa rochosa. Elas não são controladas por processos tectônicos, estruturais, erosivos e deposicionais. Esse tipo de encosta necessita, geralmente, de um período de 10.000 anos ou mais, para que esse ajuste ocorra. Um outro tipo de encosta, em áreas montanhosas, é a face livre, próximo ao topo, acompanhada de um depósito de tálus, próximo ao sopé. As taxas de acumulação refletem um controle climático local, em combinação com a natureza da rocha que compõe a face livre da encosta. A periodicidade e a frequência das quedas de blocos são controladas por uma grande variedade de fatores. A existência de água suficiente para gerar *runoff*, a queda de detritos de rochas, os fluxos de lama e fluxos superficiais, podem formar um depósito de tálus bastante complexo. Tais encostas possuem, geralmente, inclinações entre 30° e 60°.

Existem ainda encostas com mantos de solos residuais, com declividade entre 20° e 35°. Elas são as chamadas meia encostas, onde existe uma gradação entre as camadas de colúvio e o sopé da encosta. Podem possuir as faces livres, mas em muitas áreas montanhosas tropicais e subtropicais elas dominam a paisagem, sem as faces livres. Tais encostas parecem ter evoluído a partir do intemperismo *in situ* das rochas, ou pela transformação da encosta em solos arenosos. Os processos geomorfológicos mais comuns, no desenvolvimento desse tipo de encosta parecem ser os

deslizamentos de terra, que são acentuados quando são ocupadas sem planejamento prévio, ou sem a execução de obras de engenharia que possam conter tais processos.

Riscos de Deslizamentos em Áreas Urbanas

Em princípio, qualquer montanha possui algum tipo de risco de sofrer deslizamento. O maior ou menor grau vai depender de uma série de fatores, como declividade, natureza da rocha, existência de fraturas, juntas, lineações, contato solo-rocha, tipo de solo, cobertura vegetal, distribuição sazonal das chuvas, ocupação antrópica, etc. Esses riscos ocorrem tanto em áreas urbanas, como em áreas rurais. A diferença é que nas áreas rurais, devido a ocupação ser mais esparsa e existirem menos construções, os danos materiais e humanos, quando ocorre algum tipo de movimento de massa, são menores. Já nas áreas urbanas, devido à maior ocupação populacional, os descalçamentos das encostas são maiores, através dos cortes de taludes, construção de casas, ruas, rodovias, ferrovias, rede de esgoto, etc. Tudo isso, quando não se leva em conta os riscos de deslizamentos, ou quando as obras de contenção de encostas não são bem feitas, tende a causar danos irreversíveis para a população e para o meio ambiente. Daí a necessidade de se elaborar cartas de riscos, antes de se ocupar uma determinada área montanhosa. Com isso, podem ser minimizados os riscos de degradação ambiental e, conseqüentemente, a população poderá ter uma melhor qualidade de vida. Isso, infelizmente, ainda é feito com muita raridade, nos países tropicais, justamente aqueles, onde o regime de chuvas concentradas no verão, tende a causar efeitos catastróficos, em especial nas encostas ocupadas de forma desordenada.

BIBLIOGRAFIA

- FRENCH, H.M. (1976) - The periglacial environment. Longman, Nova York. 228pp.
- GERRARD, J. (1990) - Mountain environments: an examination of the physical geography of mountains. Belhaven Press, Londres. 317pp.
- GUERRA, A.J.T. (1995) - Processos erosivos nas encostas. In: Geomorfologia - uma atualização de bases e conceitos. Orgs. A.J.T. Guerra e S.B. Cunha, 2ª edição, Ed. Bertrand, 149-209.
- HANSEN, A. (1984) - Landslide hazard analysis. In: Brunsten, D. and Prior, D. (eds.) Slope instability. John Wiley & Sons. Chichester. pp.523-892.

SELBY, M.J. (1982) - Hillslope materials and processes. Oxford University Press. Oxford. 264pp.

SELBY, M.J. (1984) - Earth's changing surface: a introduction to geomorphology. Clarendon Press. Oxford. 607 pp.

TROLL, C. (1972) - Geceology and world-wide differentiation of high-mountain ecosystems. In: Geocology of the high mountain regions of Eurasia. Org. C.Troll, Wiesbaden. 1-16pp.