

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Gustavo Poltronieri

**ESPACIALIZAÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS PARA
ANÁLISE DO MEIO FÍSICO**

Porto Alegre
janeiro 2013

GUSTAVO POLTRONIERI

**ESPACIALIZAÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS PARA
ANÁLISE DO MEIO FÍSICO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Luiz Antônio Bressani
Coorientador: Fábio Bertuol

Porto Alegre
janeiro 2013

GUSTAVO POLTRONIERI

**ESPACIALIZAÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS PARA
ANÁLISE DO MEIO FÍSICO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, janeiro de 2013

Prof. Luiz Antônio Bressani
PhD pelo Imperial College/UK
Orientador

Fábio Bertuol
Mestre pela UFRGS
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Noberto Dani (UFRGS)
Dr. pela Universidade de Poitiers/FR

Marcelo Heidemann
Mestre pela UFRGS

Fábio Bertuol
Mestre pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Vilmar e Nelis,
e a minha irmã Luana, que sempre me apoiaram
e especialmente durante o período do meu
Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Luiz Antônio Bressani, orientador deste trabalho, pelo tempo dedicado e pelo aprendizado que sua orientação me proporcionou.

Agradeço ao meu coorientador, o Engenheiro Fábio Bertuol, por todo aprendizado e apoio tanto neste trabalho como ao longo do meu estágio na empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt pela dedicação e paciência ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos amigos e colegas pela compreensão, apoio e pelos momentos de descontração.

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional.

O sucesso nasce do querer, da determinação
e persistência em se chegar a um objetivo.

Mesmo não atingindo o alvo,
quem busca e vence obstáculos,
no mínimo fará coisas admiráveis.

José de Alencar

RESUMO

Este trabalho objetiva subsidiar o mapeamento das condições do meio físico (relevo, substrato rochoso e solo), que é ferramenta fundamental para o gerenciamento do uso e ocupação dos solos, através da interpretação de dados geotécnicos, tendo a geomorfologia como atributo básico de estudo. Em um primeiro momento são apresentados, resumidamente, os principais conceitos da cartografia e pesquisa geomorfológica. Tendo a vertente (talude) como elemento principal do estudo geomorfológico, foi pesquisado na literatura o embasamento teórico respectivo aos processos de formação, evolução e modificação dos relevos, sendo explicados os principais sistemas e teorias existentes e utilizados até hoje. Para fins de representatividade do comportamento dos processos de formação e elementos que compõem as vertentes, foram apresentados os níveis taxonômicos ou de classificação destas. Destaca-se que, conforme o nível de estudo requerido, escala adotada e o comportamento a ser avaliado, a estrutura de análise das vertentes varia em níveis de tratamento geomorfológicos e nos dados a serem interpretados. Na sequência do trabalho, devido ao desenvolvimento dos estudos de avaliação do meio físico, aplicados principalmente ao mapeamento geotécnico, foram apresentadas as metodologias consagradas, suas aplicações e limitações, bem como os atributos necessários para a análise e suas formas de obtenção. Um enfoque maior foi dado ao método de avaliação do terreno (*terrain evaluation*) proposto por Lollo (1995), uma vez que este busca o reconhecimento das associações espaciais do terreno considerando os aspectos geomorfológicos. Essa proposição leva a análise a ter um caráter preliminar, porém é mais rápida e de menores custos de mapeamento. Além disso, diferentemente da maioria das metodologias de mapeamento geotécnico que foram desenvolvidas para escalas pequenas, a metodologia de avaliação do terreno considera a possibilidade de utilização para escalas maiores, considerando o estudo das vertentes. A sistemática considerada, então, baseia-se na distinção de encostas em função das Variáveis Características das Vertentes associadas aos processos geomorfológicos geradores e modificadores. Acerca desta questão, foram feitas críticas e considerações que orientam a aplicação desta sistemática para as diferentes condições de relevo que possam ser encontradas, escalas e níveis de classificação a serem utilizados e possibilidades de aplicação em trabalhos posteriores para desenvolvimento e continuidade do presente trabalho.

Palavras-chave: Geomorfologia das Vertentes. Mapeamento Geotécnico. Técnica de Avaliação do Terreno. Variáveis Geométricas Características das Vertentes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa	15
Figura 2 – Representação esquemática das unidades taxonômicas	21
Figura 3 – Processo de desgaste do relevo de cima para baixo	22
Figura 4 – Dependência entre o grau de soerguimento, entalhamento e denudação da crosta	23
Figura 5 – Diferença entre (a) desgaste lateral ou recuo paralelo e (b) desgaste de cima para baixo	24
Figura 6 – Entulhamento de depressões pela desagregação mecânica (pediplanação)	25
Figura 7 – Equilíbrio dinâmico nos diferentes panoramas topográficos	26
Figura 8 – Níveis de abordagem geomorfológica	27
Figura 9 – Dinâmica processual em Geomorfologia	29
Figura 10 – Compartimentação topográfica e efeitos paleoclimáticos	30
Figura 11 – Processo de formação dos paleopavimentos múltiplos	32
Figura 12 – Sistema em uma vertente convexo-retilínea-côncava	34
Figura 13 – Diagrama da evolução histórica do estudo de <i>landforms</i>	45
Figura 14 – Níveis hierárquicos da avaliação das condições naturais	46
Figura 15 – Exemplo de fotointerpretação utilizada na avaliação do Sistema de terreno, diferenciando os Sistemas (a) e (b)	47
Figura 16 – (a) Modelo de perfil de vertente de Derrau e (b) Variáveis Características da Vertente	50
Figura 17 – Representação dos intervalos dominantes na evolução das vertentes	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Atributos para análise em mapeamento geotécnico	38
Quadro 2 – Aplicações e conceitos de <i>landforms</i> por diferentes autores	44
Quadro 3 – Exemplo de critérios para reconhecimento das Unidades de terreno	48
Quadro 4 – Descrição das Variáveis Características da Vertente	51
Quadro 5 – Relação entre a forma da vertente e os processos evolutivos	52
Quadro 6 – Relações entre Variáveis Características da Vertente e respectivos aspectos observados	55
Quadro 7 – Etapas da sistemática proposta para avaliação de padrões semelhantes de encostas	56

LISTA DE SIGLAS

SPT – Sondagem de Simples Reconhecimento (*Standart Penetration Test*)

SIG – Sistemas de Informações Geográficas

UGI – União Geográfica Internacional

AGG – Agrupamento Geológico-Geotécnico

ZERMOS – Zonas Expostas aos Riscos de Movimentações do Solo e do Subsolo

PUCE – *Pattern, Units, Components and Evaluation*

IAEG – *International Association of Engineering Geology*

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo

IG – Instituto Geológico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	13
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	13
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	13
2.2.1 Objetivo Principal	13
2.2.2 Objetivos secundários	13
2.3 PRESSUPOSTOS	14
2.4 DELIMITAÇÕES	14
2.5 LIMITAÇÕES	14
2.6 DELINEAMENTO	14
3 ESTUDOS GEOMORFOLÓGICOS	16
3.1 CARTOGRAFIA GEOMORFOLÓGICA	16
3.2 PESQUISA GEOMORFOLÓGICA	18
3.3 HISTÓRICO DOS PROCESSOS DE FORMAÇÃO DO RELEVO.....	22
3.3.1 Sistema de William M. Davis	22
3.3.2 Sistema de Walther Penck	23
3.3.3 Sistema de Lester C. King	24
3.3.4 Sistema de John T. Hack	25
3.4 NÍVEIS DE TRATAMENTO	26
3.4.1 Compartimentação topográfica	28
3.4.2 Estrutura superficial	30
3.4.3 Fisiologia da paisagem	33
4 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	36
4.1 ATRIBUTOS PARA ANÁLISE	37
4.2 PROPOSTAS METODOLÓGICAS	40
5 PROPOSIÇÃO DE SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DE PADRÕES SEMELHANTES DE ENCOSTAS	49
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A Engenharia Geotécnica enfrenta uma série de dificuldades no entendimento do comportamento do solo, uma vez que este apresenta uma grande variabilidade na sua constituição e distribuição ao longo do terreno. Os movimentos de massa, caracterizados, por exemplo, pelos escorregamentos, quedas e fluxos de material, são fenômenos relacionados com o comportamento dos solos. Denominados de desastres naturais geotécnicos quando estes movimentos de massa causam perdas econômicas, ambientais e humanas. Estes tem como agravante o crescimento populacional desordenado. Contudo, cabe citar que muitos movimentos de massa ocorrem em encostas naturais, que não sofreram intervenção humana.

Em virtude desta situação, é preciso adequar soluções de engenharia que venham prevenir tais acidentes. Dentre as soluções, as medidas estruturais, tais como a implantação de estruturas de contenção, sistemas de drenagem e até reurbanização em certas situações são as que envolvem custos mais elevados. Já as medidas não estruturais, que envolvem custos menores, são aquelas relacionadas ao planejamento e educação ambiental. Na questão do planejamento, o mapeamento das condições do meio físico é ferramenta fundamental que possibilita, através da interpretação de dados geotécnicos, delimitar regiões com diferentes características geológico-geotécnicas. Desta forma, o mapeamento serve como subsídio para o gerenciamento do uso e ocupação das áreas para os Planos Diretores Municipais e demais formas de planejamento de uso dos solos.

Neste contexto, o mapeamento geotécnico utiliza métodos que procuram enquadrar unidades territoriais homogêneas e orientar tecnicamente a ocupação destas unidades. Na tentativa de reduzir custos e agilizar o processo de caracterização do meio físico, o mapeamento geotécnico encontrou na geomorfologia uma ferramenta básica e bastante útil. Isso porque a formação, evolução e modificação do meio físico estão associadas aos processos geomorfológicos atuantes. Para tanto, é necessário interpretar os dados geotécnicos existentes para a área de estudo e, em função da geomorfologia do relevo, espacializar as informações para as áreas semelhantes adjacentes.

O trabalho aqui apresentado, conta com seis capítulos, incluindo esta introdução, apresentados a seguir. No capítulo 2 consta a metodologia sobre a qual foi desenvolvido o trabalho. Em

seguida, foi feito um estudo bibliográfico considerando dois assuntos em paralelo: os estudos geomorfológicos (conceitos, utilização cartográfica, classificações, histórico dos processos, etc.) e o mapeamento geotécnico (conceitos, atributos de análise, escalas de utilização, metodologias, etc.), correspondentes aos capítulos 3 e 4, respectivamente. No quinto capítulo foi descrita a sistemática de avaliação de encostas com padrões semelhantes, apartir dos estudos geomorfológicos e dos atributos do mapeamento geotécnico, incluindo-se uma análise crítica referente às condições de utilização. No capítulo 6 foram feitas considerações a respeito da possibilidade de utilização da sistemática proposta, bem como sugestões para continuidade e desenvolvimento do trabalho.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: frente aos métodos disponíveis de análise do meio físico (relevo, substrato rochoso e solo) e considerando estudos geomorfológicos, é possível espacializar dados geotécnicos para a avaliação de padrões semelhantes de encostas?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho consiste na verificação da possibilidade de avaliação de padrões semelhantes de encostas empregando-se estudos geomorfológicos na análise do meio físico.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) caracterização dos procedimentos de interpretação de áreas com características geomorfológicas semelhantes;
- b) descrição da metodologia de interpretação dos dados geotécnicos na análise de áreas geomorfológicamente semelhantes.

2.3 PRESSUPOSTOS

O trabalho tem por pressupostos:

- a) as encostas possuem formas e composições variadas, mas guardam relações geomorfológicas e geotopográficas semelhantes entre si;
- b) os dados geotécnicos são representativos das condições do terreno, logo são passíveis de extrapolação.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à análise dos processos geomorfológicos geradores e modeladores das encostas, aplicados ao mapeamento geotécnico.

2.5 LIMITAÇÕES

Os limitantes do trabalho são:

- a) dados geotécnicos derivados de,
 - sondagens de simples reconhecimento (SPT);
 - retroanálises;
 - observações de campo;
 - mapas base (geológico, pedológico e topográfico);
 - imagens aéreas ou de satélite;
- b) análise para mapeamento preliminar em escala de detalhamento (escalas maiores que 1:25.000).

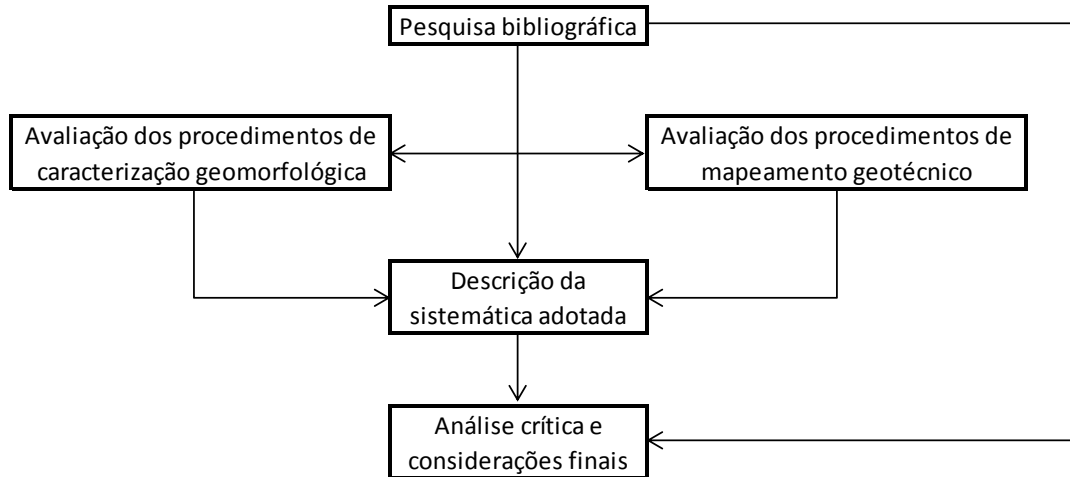
2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas discutidas a seguir, esquematicamente representadas na figura 1:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) avaliação dos procedimentos de caracterização geomorfológica;
- c) avaliação dos procedimentos de mapeamento geotécnico;
- d) descrição da sistemática adotada;

e) análise crítica e considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: elaborada pelo autor)

A pesquisa bibliográfica constitui a principal ferramenta para o desenvolvimento do trabalho. Trabalhou-se com a organização e o inter-relacionamento das informações que, no geral, encontram-se dispersas. Esta etapa foi realizada por todo período do trabalho, estando conectada a todas outras etapas.

Na etapa de avaliação dos procedimentos de caracterização geomorfológica foi feito um estudo de caracterização, classificação, representação e compreensão dos processos de formação, evolução e modificação dos relevos. Em paralelo a esta etapa, na avaliação dos procedimentos de mapeamento geotécnico, foram feitos estudos a respeito das metodologias de mapeamento geotécnico, escalas de utilização e dos atributos necessários à análise e suas formas de obtenção.

Elencando as etapas anteriormente descritas, mantendo-se o embasamento teórico através da pesquisa bibliográfica, foi descrita a sistemática proposta para avaliação de encostas com padrões semelhantes. Por fim, e ainda conectado à etapa anterior, foram feitas análises críticas e considerações a respeito da possibilidade de utilização da sistemática adotada.

3 ESTUDOS GEOMORFOLÓGICOS

Este capítulo compreende os estudos para entendimento da formação, evolução e modificação dos relevos, a partir de bases geomorfológicas. São apresentados os principais conceitos, processos de evolução, níveis de classificação e representação e utilização cartográfica.

3.1 CARTOGRAFIA GEOMORFOLÓGICA

Antes de abordar questões relativas à pesquisa geomorfológica especificamente, é importante que se entenda qual é a relação entre o conhecimento em geomorfologia e sua aplicação na cartografia. Essa relação fica evidenciada quando o assunto em questão refere-se ao entendimento do comportamento dos taludes ou vertentes. Nesse sentido, o mapeamento das condições do meio físico, representados principalmente pelos mapas geotécnicos, entra como ferramenta fundamental para o controle e gerenciamento do uso do solo. No entanto, para a elaboração desses mapas necessita-se de embasamento geomorfológico, já que, para se delimitar áreas com características semelhantes ou homogêneas, precisa-se entender o processo de formação e composição dos relevos. Sendo assim, o mapeamento geomorfológico é etapa básica para o mapeamento geotécnico e, conseqüentemente, para o mapeamento das condições do meio físico.

Ainda, a respeito do mapeamento geomorfológico, Souza (2004) considera este parte essencial no mapeamento geotécnico, afirmando que sua realização pode ser feita rapidamente e a baixo custo, sendo decisivo para o planejamento de investigações geotécnicas. Salienta que a análise geomorfológica não se limita apenas à descrição topográfica, podendo ser incluídas relações entre condições superficiais e situação geológica, origem e desenvolvimento dos elementos geomorfológicos, influência da hidrologia e processos geodinâmicos, entre outras relações importantes para a previsão de ameaças.

Argento (1995) considera a utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) indispensável na elaboração de mapeamentos geomorfológicos, pois esta ferramenta

proporciona o entrecruzamento de mapas temáticos¹ de diferentes categorias. Dessa forma, viabiliza-se a visualização de áreas que apresentam potencialidade ou fragilidade ambiental. No âmbito da fragilidade ambiental, destacam-se as áreas com instabilidade de taludes, erodibilidade, riscos de movimentos, entre outros fatores causadores de desastres. O mapeamento geomorfológico deve estar baseado na ordenação dos fenômenos mapeados seguindo-se uma taxonomia aferida conforme a escala cartográfica em que se insere o estudo. No que diz respeito a elaboração de mapas geomorfológicos utilizando-se de ferramentas SIG, Rehbein e Fujimoto (2006, p. 165-166) afirmam:

É importante, no entanto, ter entendimento de que as modernas tecnologias disponíveis para a elaboração de mapeamentos temáticos, por si só, não asseguram produtos eficientes, tendo em vista que elas servem de apoio, sobretudo, para melhorar a precisão dos mapas. Uma significativa base conceitual em Geomorfologia, uma adequada escolha de escalas cartográficas e, ainda, uma eficiente interpretação visual das formas de relevo e de seus respectivos processos geradores, são alicerces fundamentais na elaboração de um mapeamento geomorfológico de qualidade.

Argento (1995) justifica a dificuldade de uma padronização para elaboração de mapas temáticos em bases geomorfológicas, uma vez que não há predefinições quanto à escala a ser adotada nem uma taxonomia referente à escala. Nesse sentido, salienta a importância em se ordenar legendas conforme a perspectiva de estudo, atrelando informações às suas representações de forma coerente. Seguindo essa linha de raciocínio, o autor sugere a seguinte divisão:

- a) as macroescalas, que podem atingir 1:100.000, caracterizam-se pela representação dos domínios morfoestruturais e atendem um nível regional de estudo. Nessa escala, devido ao baixo grau de resolução no nível cartográfico e taxonômico, é inviável a utilização de mapas temáticos para planejamento urbano. São exemplos de características geológicas integradas às macroescalas as grandes cadeias dobradas, estruturas falhadas, maciços intrusivos, grandes derrames efusivos, etc.;
- b) as mesoescalas cobrem até 1:30.000 e enfatizam a geomorfogênese, levando em conta as interações entre solo, clima e vegetação. Os processos geradores e as semelhanças das formas são explicados por fatores paleoclimáticos² ou àqueles referentes ao comportamento da drenagem, condicionantes litológicos ou tectônicos atuais ou subatuais, associados à natureza do domínio. Estão inseridos em um nível de estudo municipal;

¹ Mapas com informações sobre temas específicos e definidos.

² Referente ao clima de um período pré-histórico cujas características principais podem ser reconstituídas.

- c) as microescalas, que partem de 1:25.000 e podem atingir escalas maiores, a nível de detalhamento, tratam da formação superficial e a morfodinâmica associada. Priorizam as interrelações entre componentes do terreno, dentre elas a amplitude do relevo, inclinação das encostas, condições pedológicas, uso do solo, vegetação, litologia do substrato rochoso, etc.

Para a elaboração de mapas de detalhe, em escala grande, Casseti (2005) apresenta as recomendações da Sub-Comissão de Cartas Geomorfológicas da União Geográfica Internacional (UGI). Os dados morfométricos correspondem às medidas por levantamento das formas como: os terraços, escarpas erosivas, declividade de vertentes, rede hidrográfica, entre outros. Os dados morfográficos são resultados do processo evolutivo por agradiação³ das formas (depósitos aluviais em planícies, concentração de colúvios pedogeneizados, pedimentos⁴ detríticos enterrados) ou degradação⁵ das formas (erosão diferencial, escarpas de falha ou erosiva, ravinas e boçorocas). Há uma estreita relação entre os aspectos morfográficos e a respectiva gênese de formação.

3.2 PESQUISA GEOMORFOLÓGICA

Sobre a pesquisa geomorfológica Silva (1995, p. 394-395) descreve:

Uma das mais importantes funções da pesquisa geomorfológica é a de gerar informações relevantes para o planejamento territorial. Em princípio, toda informação oriunda de uma investigação científica tem importância intrínseca, pois representa uma adição de conhecimentos organizados. Visto pelo ângulo operacional, no entanto, o problema se reveste de alguns aspectos que merecem destaque. O primeiro desses aspectos refere-se ao uso de tipos de classificação (taxonomia), a ser adequadamente considerado quanto à escala e à resolução da investigação. [...] Essa adequação, obviamente, também deve ser feita quanto aos objetivos da pesquisa geomorfológica em causa. Um segundo aspecto traz de volta a primeira afirmação deste parágrafo, qualificando-a melhor para planejamento territorial (e para muitas outras aplicações, certamente). Julga-se indispensável que definições identificadoras das entidades geomorfológicas considerem:

- a) os elementos de forma e composição que, fisicamente, as identificam;
- b) os processos geomorfológicos tidos como geradores e modificadores dessas entidades.

³ Processo que leva a construção de uma superfície devido a fenômenos deposicionais.

⁴ Referente a formações sedimentares.

⁵ Processo de desgaste das rochas ou solos por agentes atmosféricos, variações de temperatura, chuvas, etc.

Para se desenvolver uma pesquisa geomorfológica, Casseti (2005) enfoca a necessidade de se ter claro o conceito de processos geomorfológicos. Para tal finalidade, apresenta os processos classificados em três tipos:

- a) morfoclimáticos: são aqueles que possuem duração e uma abrangência espacial (zonal e de domínios regionais) suficientes para que certas formações possam ser caracterizadas, apresentando correspondência entre forma e clima;
- b) morfogenéticos: correlacionam o intemperismo à forma, e estão diretamente ligados ao tempo do processo. Como exemplos, os extensos aplainamentos, reafeiçoamento de formas, as rampas de pedimentação, etc. São processos que, por insuficiência de tempo, podem não ter marcas significativamente expressivas de sua formação nos relevos;
- c) morfodinâmicos: restringem-se ao intemperismo atual, devido às intervenções antropogênicas que são consideradas aceleradores dos processos. Também, os agentes naturais, como as chuvas excessivas e as intensas variações climáticas regionais, restringem os processos morfodinâmicos a uma análise mais recente.

Assim, considerando os limites impostos para a compreensão das especificidades de cada fenômeno, para tempos muito distantes de formação geomorfológica, mais dificultada fica a compreensão da dinâmica do processo (CASSETI, 2005).

No que diz respeito ao planejamento e uso do solo, Christofolletti (1995) identifica a importância do conhecimento e entendimento da magnitude e incidência espacial dos processos geomorfológicos que atuam nas vertentes. Afirma a necessidade de distinção das unidades das paisagens através da investigação e mapeamento das encostas em toda sua extensão, conectando as características topográficas à morfodinâmica e morfogenética associadas.

Outro ponto importante na pesquisa geomorfológica refere-se à categorização ou classificação das formas de relevo quanto ao tamanho, gênese e idade. Ross (1992), propõe seis níveis de táxons ou classificação para a representação geomorfológica, que são apresentados na figura 2 e descritos a seguir:

- a) o primeiro táxon representa as Unidades Morfoestruturais derivadas dos processos geotectônicos e grandes arranjos estruturais, e que correspondem a uma maior extensão superficial. São exemplos os escudos antigos, dobramentos arqueanos, depósitos de bacias sedimentares, entre outros identificáveis em escalas médias (1:250.000);
- b) o segundo táxon está contido no primeiro e é representado pelas Unidades Morfoesculturais. Refere-se a uma compartimentação regional gerada pelas

ações climáticas passadas, não sendo controlada pelas condições geológicas. Os planaltos, serras, depressões e planícies são exemplos dessas unidades;

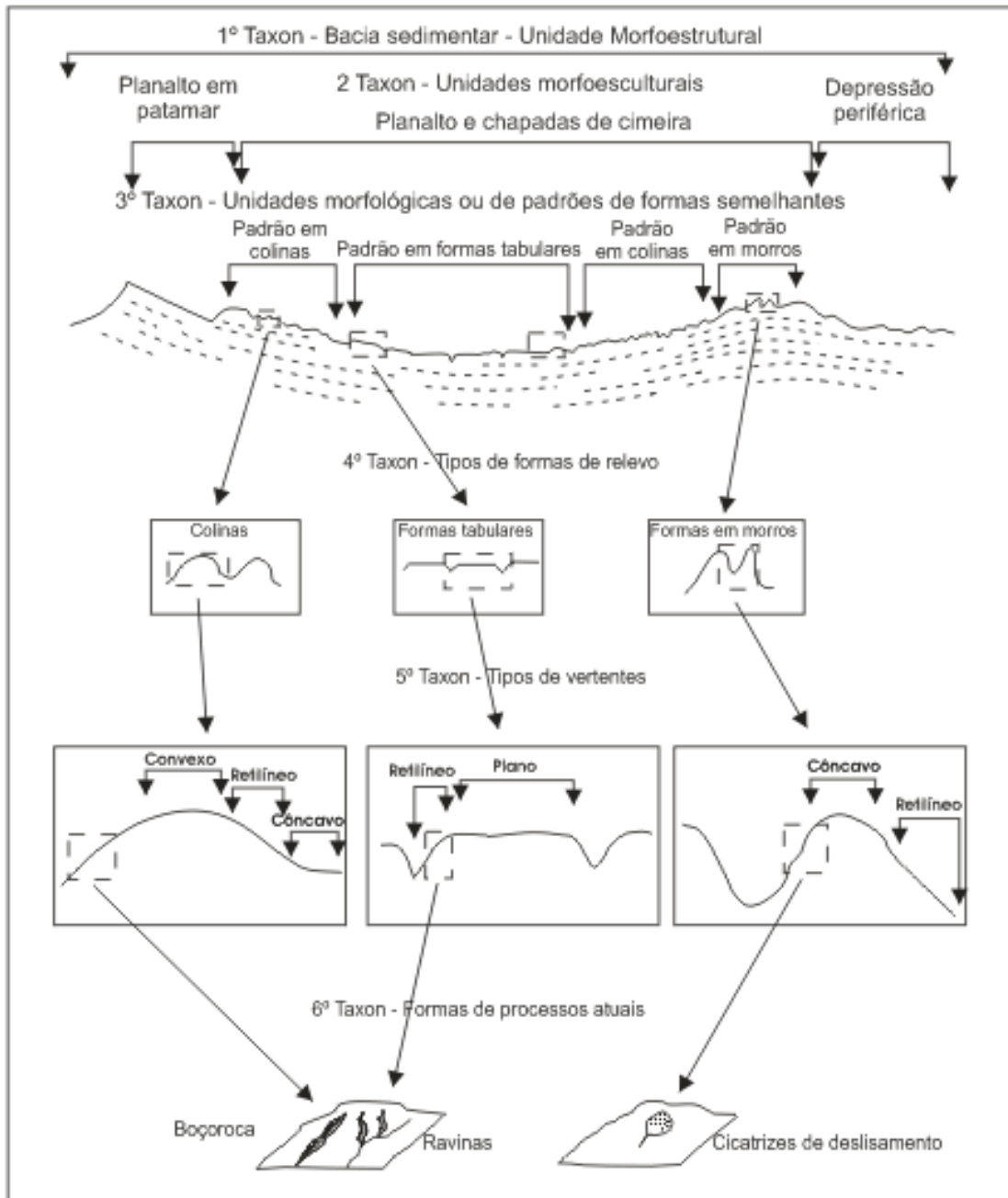
- c) o terceiro táxon representa as Unidades Morfológicas, contidas nas unidades Morfoesculturais, também denominadas de padrões de formas semelhantes. Composta por compartimentos de uma mesma unidade, são influenciadas principalmente por processos morfoclimáticos atuais específicos, com participação da estratigrafia das camadas. As subdivisões dos planaltos, depressões, chapadas e outras Unidades Morfoesculturais são exemplos das unidades contidas neste táxon;
- d) o quarto táxon corresponde aos Modelados ou formas individualizadas dos padrões semelhantes do terceiro táxon. São classificados em modelados de acumulação, aplainamento, dissecação⁶ e dissolução⁷. Como exemplos estão as planícies e terraços fluviais e marinhos, as colinas, morros e cristas. A apresentação de cada modelado é feita através de sua gênese e funcionalidade;
- e) o quinto táxon trata das vertentes de cada setor tipológico, apresentando características geométricas, genéticas e dinâmicas particulares para cada vertente. Só podem ser representadas em escalas grandes (maiores que 1:25.000), pois o grau de detalhamento para essas observações restringe a estas escalas;
- f) o sexto táxon reduz ainda mais a escala de observação pois trata das pequenas formas desenvolvidas pela interferência de fatores atuais, como os processos erosivos e acumulativos e a ação direta ou indireta do homem. São exemplos as ravinas, voçorocas, corridas, assoreamentos, etc.

Casseti (2005) complementa a possibilidade de se estender o nível taxonômico proposto por Ross (1992) além do sexto táxon, tratando, então, das microestruturas da superfície. Ressalta que a avaliação em escalas distintas para um mesmo setor geomorfológico pode levar a um entendimento contraditório, se excluídas as participações morfogenéticas no estudo das unidades morfoestruturais, por exemplo. Evidencia, assim, a importância de se tratar de todos componentes geradores das formas em conjunto, sem a consideração de que um seja supérfluo.

⁶ Modelados esculpidos pelo entalhamento ou corte do relevo.

⁷ Modelados esculpidos pela corrosão do relevo devido a ação química da água.

Figura 2 – Representação esquemática das unidades taxonômicas



(fonte: ROSS, 1992, p. 22)

Visto a necessidade de se ter clara a origem dos processos de formação das vertentes, bem como a forma de caracterização dos elementos que as compõem, a seguir são apresentados o histórico das evoluções e os níveis de tratamento do relevo. Este último dá suporte para a interpretação da estrutura e elementos de uma vertente.

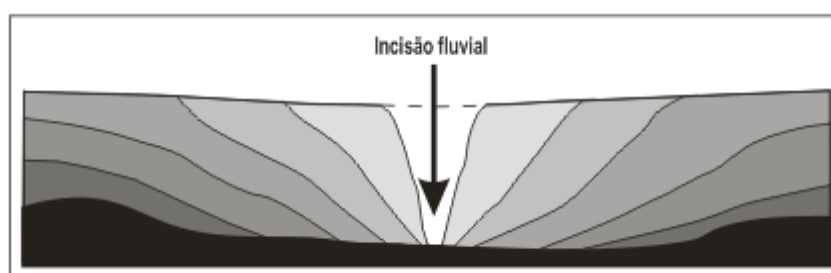
3.3 HISTÓRICO DOS PROCESSOS DE FORMAÇÃO DO RELEVO

O processo histórico ou evolução do pensamento geomorfológico está embasado em teorias ou sistemas que contribuíram para a compreensão da evolução do relevo. Os fundamentos de cada sistema são apresentados a seguir, conforme descreve Caseti (2005).

3.3.1 Sistema de William M. Davis

O sistema de Davis sugere que o gradiente de soerguimento em relação ao nível da base geral é suficientemente grande para produzir forte entalhamento dos talvegues pelo sistema fluvial, dando origem a *canyons*, que caracterizam o estado de juventude. Levando em consideração a ideia de que os rios não poderiam erodir abaixo do nível de base, Davis completou seu conceito utilizando a ideia de equilíbrio ou balanço entre a erosão e deposição. Com o rebaixamento dos interflúvios, ocasionado pela denudação, inicia-se o estado de maturidade e o fim da juventude, desaparecendo a componente de incisão vertical que provém do sistema fluvial. Este processo de desgaste do relevo de cima para baixo, denominado de *wearing down*, necessita admitir a continuidade da estabilidade tectônica e dos processos de erosão conforme figura 3 (CASSETI, 2005).

Figura 3 – Processo de desgaste do relevo de cima para baixo



(fonte: CASSETI, 2005, p. [11])

A senilidade seria o estágio final da evolução considerada por Davis, quando se atingiria a horizontalização topográfica. Este estágio é representado por extensos peneplanos⁸, por vezes interrompidos por formas residuais de maior resistência litológica, em que a meandração representa a senilidade do sistema fluvial. A partir de então, Davis demonstra a sequência do

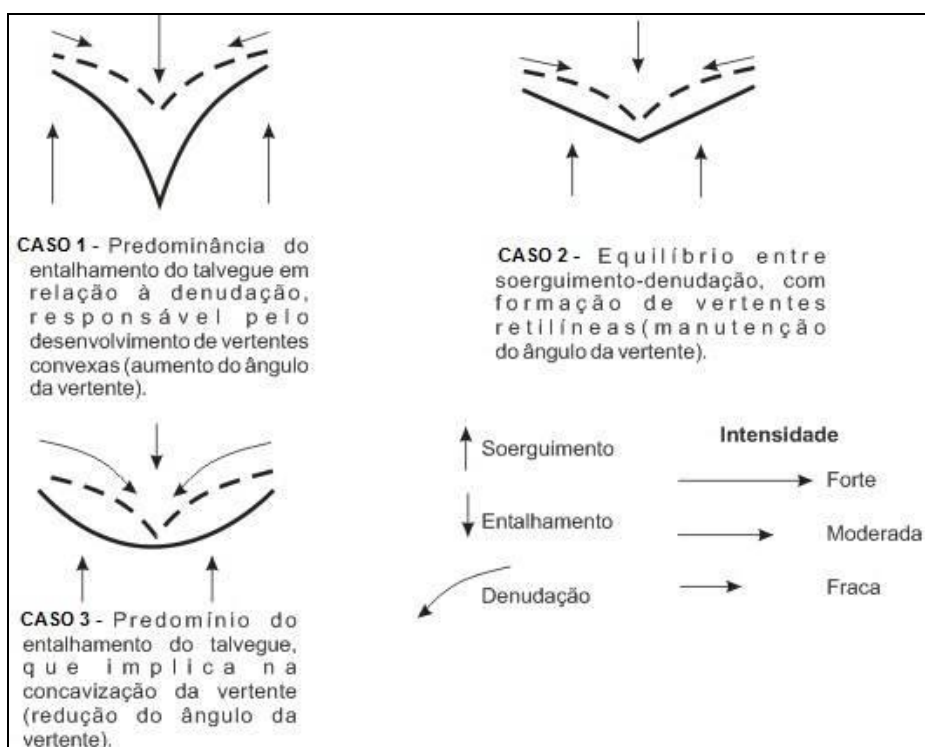
⁸ Superfícies aplainadas pela erosão.

processo evolutivo da morfologia, afirmando que ocorreria um novo soerguimento do relevo, dando origem a fase de rejuvenescimento. No entanto, a formulação proposta por Davis é muito contestada, pois é excessivamente idealista ao considerar um ciclo generalista e limitar temporalmente a ação geodinâmica no estágio de equilíbrio hidrológico (CASSETI, 2005).

3.3.2 Sistema de Walther Penck

Em sua teoria, Penck afirma que a emersão ou soerguimento e a denudação⁹ acontecem ao mesmo tempo, com intensidade diferenciada pela ação da tectônica, criticando o sistema proposto por Davis. Procurou demonstrar que, em função do comportamento da crosta, haveriam diferentes intensidades de manifestações com relação ao entalhamento do talvegue e efeitos de denudação. Na figura 4, é apresentada a ideia de Penck, que relaciona a dependência entre o grau de soerguimento da crosta e o valor de incisão, o que dá origem a diferentes declividades vinculadas à intensidade de erosão (CASSETI, 2005).

Figura 4 – Dependência entre o grau de soerguimento, entalhamento e denudação da crosta

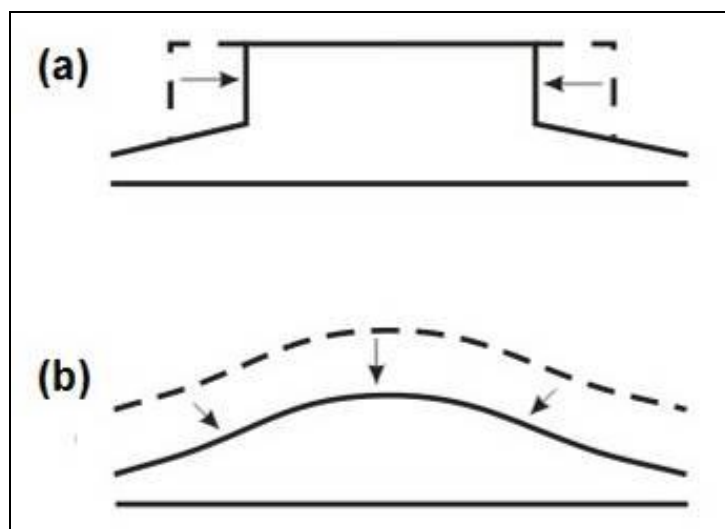


(fonte: CASSETI, 2005, p. [15])

⁹ Remoção da superfície de uma região condicionada a efeitos erosivos.

O modelo proposto por Penck é aceito como a base para entendimento da evolução morfológica. Na figura 5, é apresentada a relação entre os modelos de Penck (*wearing back*, desgaste lateral da vertente ou recuo paralelo da vertente) e de Davis (*wearing down* ou desgaste de cima para baixo) (CASSETI, 2005).

Figura 5 – Diferença entre (a) desgaste lateral ou recuo paralelo e (b) desgaste de cima para baixo



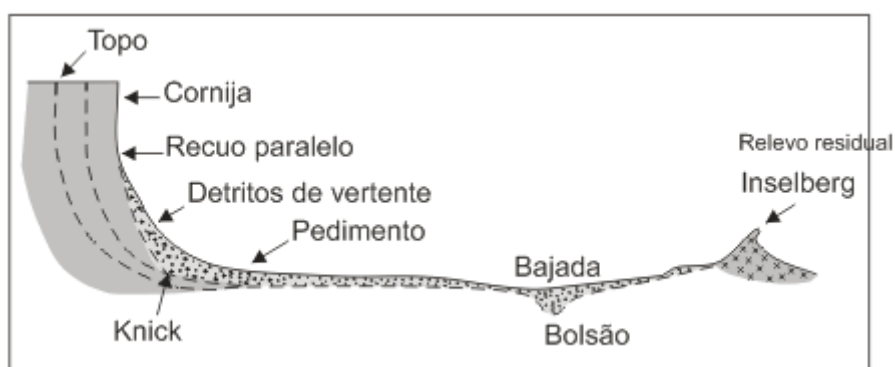
(fonte: CASSETI, 2005, p. [16])

3.3.3 Sistema de Lester C. King

O sistema apresentado por King e Pugh restabelece o conceito de estabilidade tectônica de Davis, porém, admitindo uma compensação isostática. Considera o recuo paralelo das vertentes, proposto por Penck, como forma de evolução morfológica. Em suma, King e Pugh admitem em seu sistema que ocorre rápido soerguimento da crosta com demorada estabilidade tectônica. O processo consiste no recuo a partir do nível de base (oceano) e posterior entalhamento das depressões pelos materiais erodidos no recuo, dando origem aos pedimentos. Em virtude desse processo, que ocorre por um longo período de estabilidade tectônica, há formação de extensos pediplanos, assim como os peneplanos chamados por Davis, com formas residuais denominadas *inselbergs*. A diferenciação entre peneplanos e pediplanos está, então, associada à forma de desenvolvimento do relevo, ou por desgaste de cima para baixo, ou por recuo paralelo das vertentes (CASSETI, 2005).

Mesmo que a teoria de pediplanação tenha sido desenvolvida para clima úmido, supõe-se que a horizontalização topográfica possa estar associada a climas secos também. Dessa forma, é necessário considerar a desagregação mecânica como maior fator responsável pelo recuo das vertentes, sendo que os detritos resultantes provocariam o entulhamento dos níveis de base, elevando-os. O entulhamento estaria associado a processos torrenciais que mascaram as irregularidades topográficas, formando a morfologia dos pediplanos conforme figura 6 (CASSETI, 2005).

Figura 6 – Entulhamento de depressões pela desagregação mecânica (pediplanação)



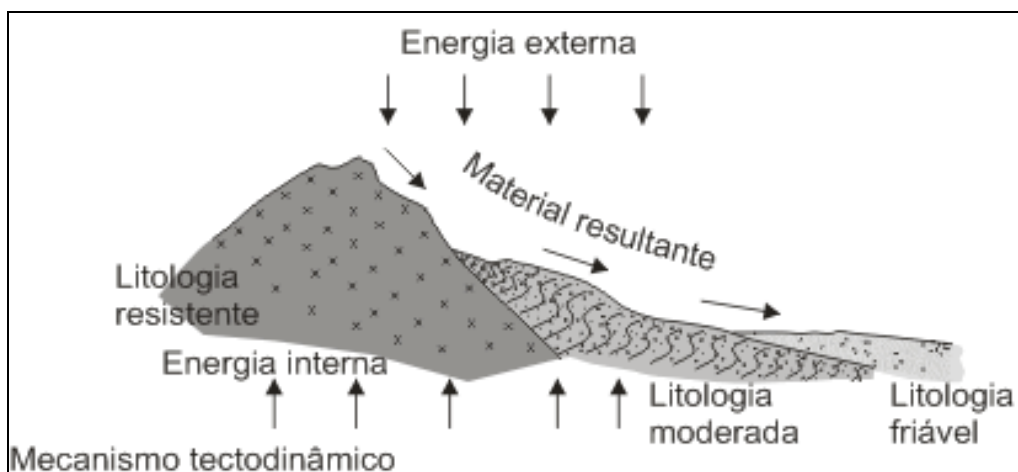
(fonte: CASSETI, 2005, p. [17])

3.3.4 Sistema de John T. Hack

O princípio básico da teoria proposta por Hack, é que o relevo está em constante troca de energia e matéria com outros sistemas terrestres, ou seja, há uma competição entre a resistência dos materiais da crosta e as forças de denudação. Hack demonstra que a morfologia não tende a um aplainamento, pois depende das modificações impostas, como forças tectodinâmicas ou mecanismos morfoclimáticos, sendo que a estrutura geológica (litologia) tem força mais incisiva que os mecanismos de intemperização, conforme figura 7 (CASSETI, 2005).

Hack argumenta que após o sistema atingir o equilíbrio dinâmico, as marcas das fases anteriores desaparecem. Este equilíbrio pode ser mantido desde que haja acompanhamento dos efeitos denudacionais com as condições de instabilidade tectônica (CASSETI, 2005).

Figura 7 – Equilíbrio dinâmico nos diferentes panoramas topográficos

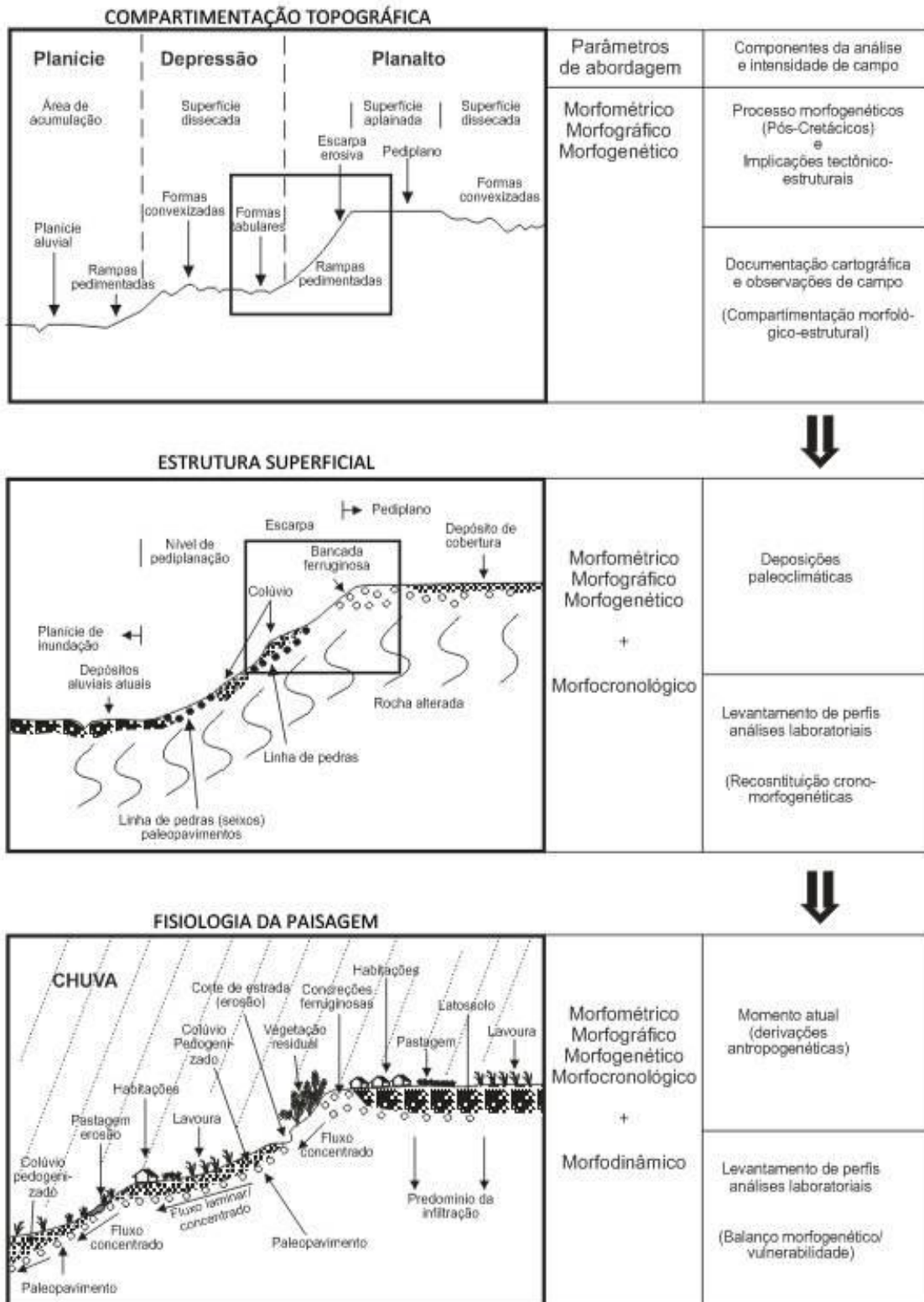


(fonte: CASSETI, 2005, p. [18])

3.4 NÍVEIS DE TRATAMENTO

Procurando difundir o conceito a que está filiado e buscando minimizar as controvérsias existentes entre os pesquisadores, Ab'Sáber (1969) ordena a pesquisa geomorfológica em três diferentes níveis de tratamento: compartimentação topográfica, estrutura superficial e fisiologia da paisagem (figura 8). Devido à representatividade que estes níveis têm na pesquisa geomorfológica, estruturando e dando suporte para o entendimento dos processos de formação dos relevos, esses são descritos individualmente a seguir.

Figura 8 – Níveis de abordagem geomorfológica



(fonte: CASSETI, 2005, p. [21])

3.4.1 Compartimentação topográfica

Segundo Ab'Sáber (1969), na compartimentação topográfica são feitas observações sobre as formas do relevo que apresentam características específicas individuais. As formas estão associadas aos domínios morfoclimáticos em que ocorrem as interações entre as forças internas, comandadas pela estrutura e tectônica, e as forças externas, associadas principalmente ao clima. Neste jogo de forças contrárias, aparecem os efeitos das fases secas e úmidas, que alteram a condição topográfica das vertentes. O desenvolvimento de superfícies horizontais ou tabulares, denominadas de pediplanos, ocorre em climas secos (devido a morfogênese mecânica responsável pela desagregação das rochas e pelo recuo paralelo das vertentes) e o entalhamento das redes de drenagem (pela morfogênese química), em climas úmidos. As forças de soerguimento ocorrem em ambos, sendo, na fase seca, responsável pelos degraus, e na fase úmida, pela dissecação do relevo. Em outras palavras, os climas úmidos, pela incisão de talvegues, tendem a destruir superfícies horizontalizadas em climas secos e vice-versa. É indispensável, portanto, considerar as mudanças climáticas no tempo geológico e a sua intensidade de ocorrência para uma compreensão ideal do processo morfológico envolvido, sem desconsiderar a natureza estrutural do fenômeno.

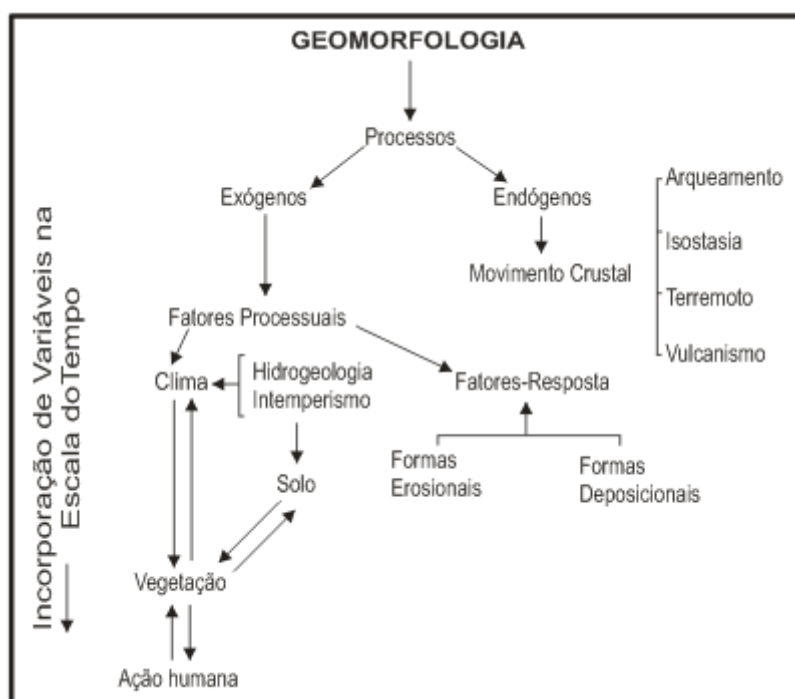
Cassetti (2005) complementa com a ideia de que é imprescindível fundamentar-se nas relações taxonômicas, propostas por Ross (1992), ao tratar da compartimentação topográfica como primeiro nível de abordagem. Através do referenciamento espaço-temporal, são definidas as variáveis necessárias para a compreensão das formas semelhantes. Desta forma, ajusta-se uma escala de estudo para o nível taxonômico abordado. Por exemplo, quando se trata de grandes escalas (maiores que 1:25.000), aborda-se o quinto táxon, tendo a vertente como elemento representativo. Porém, além das características geométricas, morfométricas e o grau de dissecação associado à densidade da vertente, é necessária a integralização do comportamento da estrutura superficial e elementos da fisiologia da paisagem para se ter um entendimento completo no estudo geomorfológico.

No que diz respeito às componentes da compartimentação topográfica, Cassetti (2005) afirma que é preciso entender que, ao analisar o relevo atual, os fatores internos, comandados pelas atividades tectônicas, ficam em segundo plano, pois sua interferência é minimizada pela escala de tempo geológico, salvo os vulcanismos e abalos sísmicos. Já os fatores processuais externos, comandados principalmente pelo clima e as formas erosionais e deposicionais, são

os que têm maior significância no estudo do relevo atual considerando-se o nível de compartimentação topográfica (figura 9).

A geomorfogênese, que é a relação entre o jogo de ações contrárias atuantes no relevo, desenvolve formas semelhantes que podem ser mantidas ou apagadas conforme o domínio subsequente. A evolução dessas formas em contínuo processo de transformação, guarda evidências que caracterizam as compartimentações morfológicas, a exemplo dos depósitos correlativos e níveis de erosão (CASSETI, 2005).

Figura 9 – Dinâmica processual em Geomorfologia

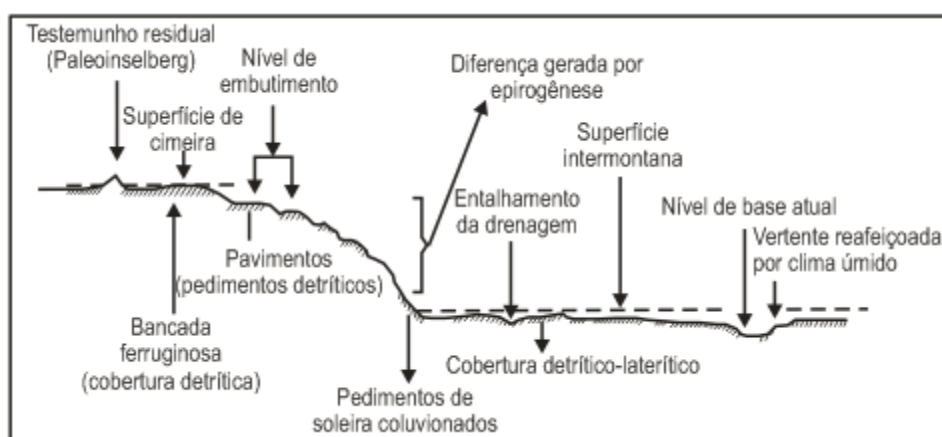


(fonte: CASSETI, 2005, p. [38])

Utilizando o conceito de pediplanação, Caseti (2005) explica a formação dos depósitos ou formas residuais, representativos do nível de compartimentação topográfica. A parte mais elevada da vertente, ao erodir, sofre alívio de tensões e cria depósitos nas áreas mais baixas, que são rebaixados com o tempo. Esse processo refere-se à acomodação isostática. Em climas secos, ocorrem formações de degraus topográficos ou sequências de depósitos correlativos embutidos no testemunho de montante, constituídos pelos pedimentos detríticos, ou seja, material desagregado. Associado a este processo, a epirogênese positiva (movimento ascensional do continente em relação ao nível do mar) juntamente com a incisão da drenagem,

gera diferença topográfica entre o aplainamento de cimeira e o intermontano (figura 10). Dessa forma, a erosão remontante ou regressiva é reativada e intensificada, iniciando-se na foz em direção à cabeceira, alargando o rio. Em contraposição, a erosão progressiva, que ocorre em epirogênese¹⁰ negativa, colmata ou sedimenta o nível de base afogado pelo mar, devido ao acúmulo de material.

Figura 10 – Compartimentação topográfica e efeitos paleoclimáticos



(fonte: CASSETI, 2005, p. [44])

3.4.2 Estrutura superficial

Como segundo nível, Ab'Sáber (1969) trata da estrutura superficial das paisagens, considerando toda compartimentação topográfica observada. Neste ponto, inicia-se um entendimento cronológico da dinâmica evolutiva dos processos paleoclimáticos e morfoclimáticos, dando suporte à interpretação de características específicas de diferentes tipos de depósitos, das feições antigas como as superfícies de aplainamento e os relevos residuais e, também, das formas recentes do relevo (vertentes, pedimentos, terraços, etc.).

Exemplos de depósitos correlativos¹¹ podem ser interpretados em regiões intertropicais nas quais desenvolveu-se um clima semiárido que provocou o recuo paralelo das vertentes. Também, em climas úmidos das regiões intertropicais, ocorrem depósitos aluviais e

¹⁰ Conjunto de processos que resultam no movimento da crosta terrestre, no sentido ascendente ou descendente.

¹¹ Depósitos constituídos por materiais gerados em condições climáticas específicas, associados a determinados processos morfogenéticos. Principal elemento de estudo da estrutura superficial.

coluvionamento de soleiras devido à organização da drenagem e intemperismo químico das rochas. Através do entendimento das propriedades físico-químicas da estrutura superficial, correspondentes aos processos morfogenéticos atuantes, entende-se melhor a vulnerabilidade do terreno (AB'SÁBER, 1969).

Como parte complementar deste estudo, Caseti (2005) denomina de depósito de cobertura a estrutura superficial, pois é composta por detritos transportados de diferentes formas em determinadas condições climáticas. Estes depósitos podem servir como portadores de informações cronológicas quando constituídos, por exemplo, de carbono. Também, através dos processos de movimentos de massa e atividades erosivas, oferecem subsídios para o estudo da vulnerabilidade do relevo. Portanto, para se estudar os depósitos correlativos, são necessárias observações de campo utilizando-se de ferramentas como tradagens, abertura de trincheiras, cortes de estrada, etc.

Para Caseti (2005), o intemperismo, que consiste na ação do clima, temperatura, umidade e pressão sobre as rochas, é fator preponderante na caracterização da estrutura superficial. Assim, descreve a classificação do intemperismo proposta pela literatura:

- a) químico: decomposição ou quebra dos minerais que compõem as rochas. Os principais fatores que influenciam são composição mineralógica e química, estrutura da rocha, temperatura, clima, permeabilidade e quantidade de água presente. Os tipos mais comuns de intemperismo químico são a dissolução, hidratação, hidrólise, carbonatação e oxidação;
- b) físico ou mecânico: corresponde a processos de desintegração ou desagregação da rocha, sem que haja necessariamente a presença de água. Os principais tipos são a abrasão, descompressão, expansão e contração térmica, degelo e a cristalização de sais;
- c) biológico: ação mecânica ou química de animais e vegetais sobre as rochas. Contribui expressivamente para o processo de pedogenização.

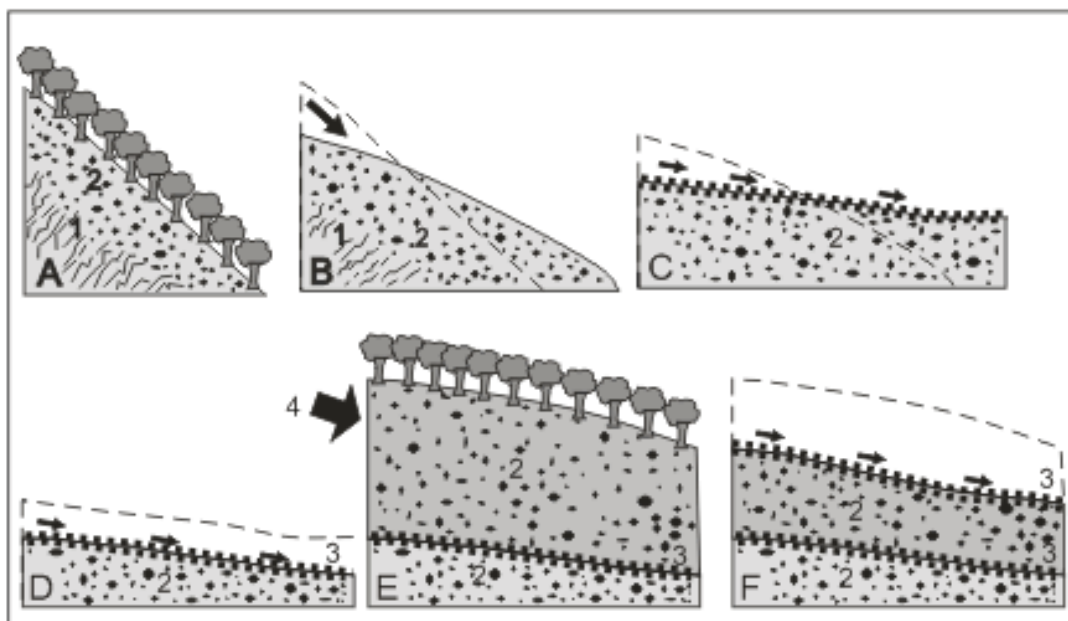
A caracterização do pedimento está vinculada à disposição hierárquica dos detritos ou paleopavimentos, iniciando no sopé da vertente até as áreas mais baixas. Essa distribuição pode ser explicada através do processo de coluvionamento, que consiste na decomposição das rochas pelo intemperismo químico nos períodos de chuva, inumando os detritos produzidos em outras condições anteriores (CASSETI, 2005).

Na figura 11, Bigarella et al. (1994) apresentam e descrevem a sequência de formação dos paleopavimentos múltiplos. Destacam que após a formação do segundo nível, ocorrem outras

subsequentes deposições de colúvio. A separação entre os níveis normalmente fica mais evidenciada quando o material detrítico superior é mais grosseiro. Atentam, também, que na condição de inexistência de um manto eluvial de transição entre o colúvio e a rocha sã, este contato abrupto tem caráter importante na instabilidade das vertentes.

O perfil A da figura 11 corresponde a vertente coberta de vegetação florestal na condição de clima úmido, no qual o manto de intemperismo abrange o elúvio 2. O perfil B representa a transição climática para o seco ou semiárido, com eliminação da cobertura florestal, expondo o solo à erosão devido, principalmente, ao escoamento superficial laminar que retira o material fino. Após a retirada do material fino, permanece um depósito residual de material grosseiro, como demonstrado no perfil C. Esse processo de remoção pelo escoamento superficial continua (perfil D), podendo, subsequentemente, ocorrer mudança climática para o úmido, com retorno ao intemperismo químico das rochas e desenvolvimento de novo manto de alteração. Com os movimentos de massa provindos de área topograficamente mais elevada, à montante (representada pelo número 4), a linha 3 (material grosseiro) do perfil E é recoberta por um novo colúvio. Já no perfil F, com transição climática para o seco, repete-se o processo de remoção de finos e acúmulo de cascalho residual (BIGARELLA et al., 1994).

Figura 11 – Processo de formação dos paleopavimentos múltiplos



(fonte: BIGARELLA et al., 1994, p. 425)

Para um melhor entendimento da estrutura superficial, Bigarella et al. (1994) citam os principais componentes na formação de depósitos correlativos:

- a) depósito de cobertura: típicos de regiões tropicais úmidas, atingem todos os níveis do relevo, acompanhando suas irregularidades. Tem origem coluvial ou elúvio-coluvial;
- b) planície de inundação meândricas: depósitos aluviais formados pelo processo de meandração, por exemplo, em enchentes;
- c) paleopavimentos: característicos de climas secos, são compostos por depósitos subsuperficiais formados pelo transporte torrencial;
- d) baixos terraços: depósitos de fundos de vale relacionados às condições hidrodinâmicas e morfogenéticas dos rios;
- e) pedimentos detríticos: detritos resultantes do processo de recuo paralelo das vertentes, em climas secos, determinado pela morfogênese mecânica;
- f) superfícies de aplainamento ou de erosão: resultado de erosões prolongadas em condições tectônicas e climáticas estáveis, criando superfícies mais ou menos planas.

3.4.3 Fisiologia da paisagem

Ab'Sáber (1969) aborda a fisiologia da paisagem associada aos fatores morfoclimáticos e pedogênicos atuais. As principais transformações do relevo estão ligadas aos impactos pluvioerosivos que ocorrem devido à exposição do solo pela retirada da cobertura vegetal, alterando o volume de infiltrações e escoamento superficial ou subsuperficial. Os desequilíbrios e impactos, intensificados pela ação do homem, geram alterações na funcionalidade da paisagem que responde na forma de movimentos de massa, boçorocamento, assoreamentos, entre outros, associados à dinâmica climática e hidrodinâmica afetada. Neste nível, exige-se observações mais precisas e demoradas, pois as variações da fisiologia são menos perceptíveis.

Tratando-se da dinâmica processual que ocorre nas vertentes, Casseti (2005) apresenta o conceito biorresistásico que é fundamentado na relação morfogênese-pedogênese. A pedogênese está associada à intemperização com formação de material a ser transportado, sendo a infiltração o componente vertical causador. A morfogênese está relacionada ao processo denudacional, ou seja, o transporte e acumulação do material intemperizado.

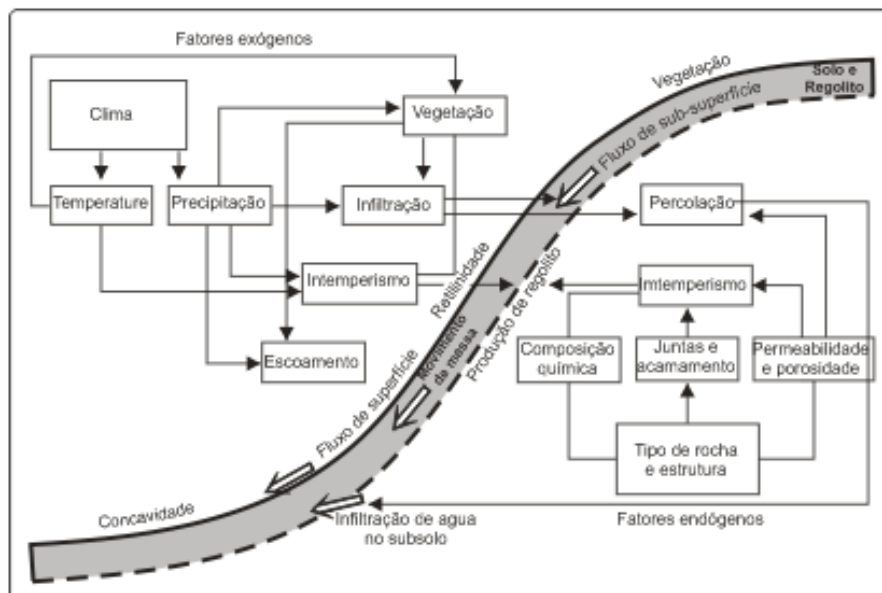
Para se desenvolver um estudo da fisiologia da paisagem, Casseti (2005) afirma que é necessário, além do conhecimento sobre compartimentação topográfica e estrutura superficial,

um enfoque maior nos elementos do clima (intensidade e frequência), no uso do solo e nas condições de cobertura vegetal. Na figura 12, Casseti (2005, p. [136]) apresenta um esquema elaborado por Clark e Small que mostra as relações processuais em uma vertente (talude), considerando sua forma, descrevendo:

Os processos em uma vertente se individualizam pelos fatores exógenos e endógenos. Os exógenos são comandados pelo clima, os endógenos pela estrutura geológica e tectônica. Como agentes de intemperização destacam-se a temperatura e a precipitação, que em função do comportamento da interface, como a vegetação, proporcionam maior escoamento (fluxo de subsuperfície, movimento de massa e fluxo por terra) ou infiltração, com consequentes efeitos no comportamento da vertente. A ação processual também depende dos fatores endógenos, que reagem em função da composição química, do grau de permeabilidade, e consequente intemperização, com produção do regolito.

Observa-se que a interação entre os fatores exógenos e endógenos consiste num jogo entre ações e resistência sobre a vertente. Nessa condição, a água é o principal agente ativador dos processos geomórficos como os movimentos de massa e erosões por escoamento superficial e subsuperficial (CASSETI, 2005).

Figura 12 – Sistema em uma vertente convexo-retilínea-côncava



(fonte: CLARK; SMALL¹², 1982 apud CASSETI, 2005, p. [136])

¹² CLARK, M.; SMALL, J. **Slopes and weathering**. New York: Cambridge University Press, 1982.

Correlacionando os dados necessários para compor uma carta geomorfológica à análise geomorfológica por níveis de tratamento proposto por Ab'Sáber (1969), Caseti (2005) comenta:

As informações morfométricas e morfográficas são valorizadas na compartimentação do relevo. As morfométricas referem-se às dimensões métricas do relevo, enquanto as morfográficas, às próprias formas existentes, transcritas segundo representações apropriadas. As informações de natureza cronológica são obtidas por meio de formas específicas (terraços, níveis de pedimentação, dentre outras) e principalmente pelo estudo da estrutura superficial. Os elementos morfogenéticos referem-se tanto aos reflexos dos processos morfodinâmicos atuais, enfocados pela fisiologia da paisagem, como pretéritos, responsáveis pela elaboração do modelado e respectivos depósitos correlativos [...].

Caseti (2005) expõe também as atividades necessárias para a análise geomorfológica, focando o envolvimento do pesquisador como fator principal. Referente à compartimentação topográfica, os trabalhos se resumem à avaliação de cartas de base, fotografias aéreas ou imagens de satélite, ou seja, atividades de escritório. Neste caso, as observações de campo servem como ferramenta comprobatória. Tratando-se da análise da estrutura superficial, é imprescindível a observação de campo, bem como a utilização de recursos que auxiliem na sua descrição, tais como, a abertura de trincheiras, coleta de materiais e, se necessário, posterior análise laboratorial. Para estudo da fisiologia da paisagem exige-se um controle de campo mais intenso e sistemático, incluindo, neste caso, o uso de equipamentos mais sofisticados.

4 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

Define-se mapeamento geotécnico, segundo Zuquette (1993), como um processo de levantamento, avaliação e análise de atributos de origem geológica, hidrogeológica, hidrológica e outros que constituem o meio físico que se pretende mapear (relevo, substrato rochoso e solo). O autor limita, em sua descrição, a realização destes mapas apenas para escalas menores que 1:10.000.

De acordo com Dias (1995), a principal finalidade de um mapa geotécnico é: apresentar e delimitar as regiões do terreno cujo comportamento do solo frente ao uso e ocupação possuam características geotécnicas semelhantes entre si, ou seja, regiões territoriais homogêneas. Essas regiões homogêneas recebem o nome de Unidades Geotécnicas.

Conforme Pejon e Zuquette (1995), os procedimentos para elaboração de um mapa geotécnico variam de acordo com a escala utilizada, sendo este aspecto de grande relevância. Ressaltam que o uso de ferramentas como os documentos e detalhamentos gráficos, tabelas resumos e memoriais descritivos, auxiliam na representação e comunicação entre os elaboradores dos mapas e os usuários finais. Ainda, estes autores salientam que mapas geotécnicos na escala 1:100.000 são considerados transitores entre escalas grandes e pequenas, sendo seu uso indispensável para um mapeamento completo, mesmo que a escala de utilização não seja esta.

Por definir a finalidade do mapa e o grau de representatividade dos elementos mapeados, a escala de utilização deve ser cuidadosamente escolhida. Nesse sentido, Lollo (1995) classifica as escalas em três níveis, conforme suas finalidades:

- a) regional multifinalidade: destinada à representação das unidades do relevo no âmbito de um planejamento regional;
- b) regional específica: limita a demarcação das áreas em função dos materiais inconsolidados (solo ou alteração de rocha) cuja aplicação visa a implantação de obras, planejamento agrícola, análise de riscos e outros;
- c) local: uso restringido à análise de risco de estabilidade dos terrenos, verificando cada material em função do seu uso.

Inerentes à escolha da escala estão os atributos necessários ao estudo. Estes variam de acordo com o objetivo do trabalho, sua aplicabilidade e disponibilidade de recursos para obtenção.

No capítulo seguinte são apresentados os principais atributos para análise em mapeamento geotécnico e suas formas de obtenção.

4.1 ATRIBUTOS PARA ANÁLISE

Tendo-se a escala definida, a disponibilidade dos dados passa a ser o fator mais importante para a elaboração de um mapa geotécnico mais preciso. Mio e Gandolfi (1995) explicam que, conforme a disponibilidade dos dados, tanto para escalas grandes como pequenas, deve-se recorrer a uma avaliação qualitativa do terreno (solos e rochas), possibilitando a utilização de atributos de fácil obtenção. Ainda, tratando-se da relação escala e atributo a se analisar, os autores demonstram que quanto maior a escala utilizada, maior será a precisão do mapa geotécnico. Isso porque quanto menor a área estudada, maior pode ser o número de ensaios realizados que irão representar as condições locais.

Pejon e Zuquette (1995), utilizando o método das matrizes de Varnez, selecionaram os atributos mais importantes no estudo do meio físico para mapeamento geotécnico e montaram uma matriz de atributos, a partir da qual foi feita uma análise da relação entre os atributos, verificando aqueles que apresentavam relação com mais de 50% dos demais. Constataram que estes atributos são fundamentais para qualquer trabalho de mapeamento geotécnico, indiferente da escala utilizada, devendo ser necessariamente levantados e analisados (quadro 1). Ressaltam que para a realização de mapas com finalidade específica, outras matrizes podem ser elaboradas, incluindo atributos específicos ao trabalho.

Quadro 1 – Atributos para análise em mapeamento geotécnico

Campo de conhecimento	Tipo/Aspecto	Grupo de atributos	Atributos
Águas	superficiais		<i>*escoamento</i> <i>*infiltração</i> áreas de acúmulo de água características físico-químicas livres
	subterrâneas		aquíferos confinados áreas de recarga profundidade/espessura (poços, senilidade) características físico-químicas
Geomorfologia	morfometria		altitudes declividade e sentido <i>*comprimento das encostas</i>
	morfografia	unidades básicas	<i>*bacias de inundação</i> <i>*formas das encostas (landforms)</i>
Geologia	substrato rochoso	materiais	<i>*tipo rochoso</i> <i>*litologia</i> mineralogia densidade resistência permeabilidade estruturas distribuição profundidade <i>*grau de intemperismo</i> <i>*alterabilidade</i> potencial para material de construção
		processos	erosão deposição sismicidade subsidência
	materiais consolidados	gerais	<i>*origem, textura</i> <i>*distribuição</i> permeabilidade índice de vazios mineralogia erodibilidade fertilidade potencial de corrosividade
específicos		expansibilidade <i>*variação em profundidade</i> características químicas capacidade campo e murchamento <i>*processos de intemperismo e pedológicos</i> resistência/suporte massas específicas dos sólidos e aparente seca potencial para aterros	
Clima			<i>*pluviosidade</i> temperatura evapotranspiração intensidades pluviométricas

*Atributos em itálico apresentam relação com mais que 50% dos demais.

(fonte: adaptado de PEJON; ZUQUETTE, 1995, p. 25-26)

Trentin e Robaina (2005) descrevem os atributos fundamentais segundo uma análise Geoambiental. No **campo da geologia**, o substrato rochoso, associado às condições climáticas, é atributo básico para a definição do modelado do relevo, suas condições de drenagem e material inconsolidado gerado da decomposição e desagregação das rochas. A respeito destes atributos geológicos, duas observações importantes devem ser feitas. A primeira, referente ao substrato rochoso, é que num mapeamento geotécnico não devem ser observadas Formações ou Grupos geológicos, e sim deve-se registrar litologias através da identificação, definição e distinção de rochas, bem como os principais lineamentos estruturais existentes. A segunda observação, que diz respeito aos materiais inconsolidados, sua textura, origem, distribuição, profundidade e processos associados, é que este atributo têm maior importância na definição de tipos e utilização de solos, não sendo tão precisos para espacializar dados. Isso porque a alteração da rocha pode ter origens diversas, dificultando o entendimento no âmbito espacial. Já os dados morfométricos e morfográficos, referentes ao **campo da geomorfologia** e aplicados à análise das vertentes (taludes), determinam as formas de relevo. Através da altimetria é possível distinguir áreas mais propícias à dissecação (maior altitude) ou acumulação (menor altitude). O comprimento da vertente tem relação direta com o escoamento e infiltração da água sendo que, para maiores comprimentos, maior será o tempo de atuação da água na vertente, aumentando os processos erosivos superficiais e subterrâneos. Nesse sentido, a declividade está ligada aos movimentos de massa e erosão. Outro aspecto a se observar, referente ao **campo das águas**, é o sistema hidrográfico (densidade de drenagem, fator forma, magnitude e padrões de drenagem) que influencia no desgaste e transporte de material. No **estudo do clima** os principais fatores a serem analisados são as condições de temperatura e precipitação. A climatologia determina a velocidade do intemperismo, a intensidade dos processos atuantes na superfície terrestre e a distribuição espacial das condições impostas por ela.

Para realizar o mapeamento geotécnico, é necessário obter as informações derivadas dos atributos fundamentais através de utilização de ferramentas de estudo. Para isso, Andrade (2005) apresenta as principais ferramentas utilizadas para obtenção destes atributos, descrevendo-as a seguir:

- a) **fotointerpretação**: técnica que consiste em analisar imagens aéreas classificando o terreno em unidades distintas. São avaliados elementos como tonalidade e cor, textura e formas da superfície, redes de drenagem, sombras e sítios topográficos. O refinamento das informações obtidas com a

fotointerpretação é feito com subsequentes trabalhos de campo, análise de perfis geotécnicos e ensaios de campo e laboratoriais;

- b) **mapas base:** na impossibilidade da realização da fotointerpretação, o autor sugere a utilização de mapas base (geológicos e pedológicos) como ferramenta de avaliação preliminar do terreno. Esses mapas devem sofrer adequações em função do nível de informações neles contidas em relação ao trabalho que se pretende realizar. Nos mapas geológicos, por exemplo, podem ser feitos Agrupamentos Geológico-Geotécnicos (AGG) conforme a visão do profissional sobre as características petrográficas. Já os mapas pedológicos, que muitas vezes carecem de informações devido à dificuldade de se mapear algumas áreas (principalmente áreas urbanas), podem ser complementados com dados provindos de ensaios, imagens aéreas, trabalhos de campo e mapas topográficos e geomorfológicos;
- c) **ensaios SPT:** são ensaios úteis para a montagem de perfis geotécnicos representativos dos materiais inconsolidados. Fornecem informações como espessura dos materiais, descrição táctil visual dos solos e sua resistência à penetração, muitas vezes associada ao grau de alterabilidade da rocha. Porém, é importante ter-se conhecimento das variações litológicas do local em que o ensaio foi realizado, pois solos com características táctis visuais semelhantes nem sempre pertencem à mesma formação geológica;
- d) **análises e ensaios laboratoriais:** visam o conhecimento do comportamento geomecânico e hidráulico dos solos, sendo mais úteis para condições específicas de uso de solo, ou seja, não apresentam grande importância no mapeamento geotécnico geral;
- e) **trabalhos de campo:** permitem checar resultados obtidos com os trabalhos de escritório (análise de mapas base, fotografias aéreas, perfis geotécnicos, etc.), confirmando limites e, conseqüentemente, aumentando a precisão do mapeamento. Dessa forma fica possível realizar uma atividade posterior de generalização por interpolação ou extrapolação dos dados.

Pode-se ainda acrescentar a técnica de **retroanálise** que consiste na análise da estabilidade de taludes rompidos a fim de se determinar os parâmetros dos materiais, as condições de carregamento e as características geométricas que provocaram a ruptura. Também o uso de **métodos geofísicos** de investigação do subsolo são ferramentas recentes que podem fornecer informações dos tipos de materiais e as formas que as encostas possuem, possibilitando sua espacialização e conseqüentemente, a avaliação de padrões semelhantes de encostas.

4.2 PROPOSTAS METODOLÓGICAS

Os estrangeiros, principalmente europeus, foram os pioneiros no estudo e desenvolvimento das metodologias de mapeamento geotécnico, servindo de base para a posterior criação e

desenvolvimento de metodologias no Brasil. Dentre outras, as principais metodologias estrangeiras consagradas são:

- a) Espanhola (1967);
- b) Francesa (1972);
- c) ZERMOS (1973);
- d) PUCE (1975);
- e) IAEG (1976).

Destas citadas acima, a metodologia PUCE (*Pattern, Units, Components and Evaluation*) (1975), criada com o objetivo de racionalizar e unificar os procedimentos de investigação geotécnica a fim de fornecer informações para o planejamento da ocupação do meio físico, é a mais condizente com os estudos deste trabalho. Segundo Franco et al. (2010), a metodologia trata da divisão da área de estudo em classes hierarquizadas (províncias, padrão de terreno, unidade e componentes de terreno) avaliando-se características geológico-geomorfológicas, geotécnicas e do uso do solo, sendo considerada a mais completa para análise do meio físico.

Trentin e Robaina (2005) destacam que a metodologia Suíça é baseada principalmente no sistema PUCE e segue o princípio de que terrenos que se desenvolveram sobre os efeitos de um mesmo grupo de eventos e condições climáticas similares, tendem a apresentar características e comportamentos geotécnicos semelhantes. Este raciocínio é análogo à descrição dos estudos geomorfológicos no capítulo 3 deste trabalho.

Atualmente no Brasil, os trabalhos de mapeamento geotécnico são desenvolvidos em núcleos de pesquisa em geotecnia ou geologia de engenharia, como nas universidades e institutos (IPT, IG, etc.). A Metodologia de Zuquette (1987), desenvolvida na Escola de Engenharia de São Carlos/USP, foi criada a partir da experiência adquirida no exterior, adaptando às condições do nosso meio físico. A seguir é apresentado um procedimento global do processo de mapeamento, baseado na definição ou escolha de atributos do meio físico, conforme quadro 1, função da finalidade do trabalho. A escolha dos atributos é uma tarefa complexa que define a eficiência do mapeamento. A primeira fase do mapeamento consiste na elaboração de um mapa preliminar de unidades homogêneas. Para tanto, utilizam-se de mapas topográficos, geomorfológicos, fotografias aéreas e imagens de satélite. Em seguida, este mapa pode ser complementado com informações de sondagens, levantamentos de campo e análises laboratoriais, sendo que, nesta condição, o custo passa a ser mais elevado. As classes

de documento geradas com a utilização desta metodologia são os mapas básicos fundamentais, mapas básicos opcionais, mapas auxiliares e cartas derivadas ou interpretativas. A utilização de banco de dados, através de uma plataforma SIG, é ferramenta imprescindível na elaboração de mapas mais complexos utilizando esta metodologia.

Franco et al. (2010) mencionam outra metodologia brasileira, a do IPT, destinada à elaboração de cartas geotécnicas para identificação de problemas ambientais decorrentes da interação entre o meio físico geológico e a ocupação da área. Ainda, considera a criação de cartas dirigidas para a prevenção e alternativas de solução para os problemas ambientais identificados. As escalas de utilização variam de 1:25.000 a 1:5.000, sendo raramente quantificados os parâmetros geológico-geotécnicos.

Ainda, a metodologia desenvolvida por Dias (1995), na Escola de Engenharia da UFRGS, emprega a sobreposição de mapas pedológicos e geológicos, com trabalhos de campo complementares, para estimativa de unidades homogêneas no âmbito geotécnico. A representação das unidades é feita por simbologia utilizando-se letras que representam a geologia e os horizontes de solos. A descrição dos perfis típicos das unidades, suas características e comportamento geomecânico, serve como memorial descritivo do mapa, facilitando o usuário na estimativa do tipo de material encontrado em cada unidade. Esta metodologia, por utilizar a sobreposição de mapas existentes, geralmente é aplicada para escalas pequenas, devido à disponibilidade dos mapas e suas resoluções.

A proposta de Lollo (1995) para caracterização do meio físico utiliza-se da homogeneidade das formas do terreno (*landforms*) associadas aos materiais presentes. O método, denominado avaliação do terreno (*terrain evaluation*), busca o reconhecimento das associações espaciais do terreno tendo como base os processos geomorfológicos, caracterizando unidades com mesma condição de evolução e composição. Desta forma, a metodologia agiliza e reduz os custos de mapeamento geotécnico.

Conforme Lollo (1995), o desenvolvimento da técnica de avaliação do terreno se deu principalmente no exterior, em países de clima temperado, como critério preliminar de mapeamento geotécnico. Nestes locais as características dos processos de morfogênese e pedogênese diferem daquelas impostas em regiões de clima tropical, sendo portanto necessária cautela acerca da eficácia do método para esta condição. Nesse sentido, tem sido desenvolvidos trabalhos no estudo e aprofundamento dos conhecimentos, a fim de adequar a

metodologia às condições diversas da sua criação. No Brasil, cujo clima tropical é predominante, espera-se que a identificação dos *landforms* seja dificultada devido à suavização das formas e o espessamento do manto de alteração, ocasionado pela ação mais intensa deste clima. Muitas vezes essa condição leva à não correspondência entre os materiais inconsolidados e o substrato rochoso, impossibilitando a delimitação de unidades homogêneas apenas com o uso de fotointerpretação e trabalhos de campo. Além disto, a questão da escala pode ser fator responsável por essa não correspondência.

No entanto, Lollo (1995) demonstra que a aplicação do conceito de avaliação do terreno (reconhecimento, interpretação e análise dos *landforms* representativos da atuação dos processos geomorfológicos sobre os materiais da superfície) têm sido utilizado para diferentes condições de mapeamento ou zoneamento do meio físico, cada qual integrando características peculiares ao trabalho. No quadro 2 estão apresentados os autores e a conceituação de *landforms* por eles definidas.

Quadro 2 – Aplicações e conceitos de *landforms* por diferentes autores

ASPECTOS DE ABORDAGEM	AUTORES	CONCEITO DE <i>LANDFORMS</i>
Caráter fisiográfico	Howard e Spock (1940)	Qualquer elemento da paisagem caracterizado por uma expressão distinta da superfície ou da estrutura interna, ou ambas, e suficientemente evidente para ser incluído numa descrição fisiográfica.
	Belcher (1946)	Elementos do meio físico que possuem composição definida, assim como as variações das características visuais e físicas, tais como: forma topográfica, modelo de drenagem e morfologia.
	Garner (1974)	Uma forma discreta desenvolvida sobre uma área da litosfera.
	Cooke e Doornkamp (1978)	Unidades homogêneas que podem apresentar uma variação interna muito pequena em suas propriedades geomorfológicas, sendo, porém, cada uma delas diferente das unidades vizinhas.
	Monkhouse e Small (1978)	Contorno, forma e natureza de uma feição específica da superfície da Terra.
	Krieg e Reger (1986)	Elemento da paisagem que possui composição e variação de propriedades visuais e físicas definidas como forma topográfica, padrão de drenagem e morfologia de canais, que ocorre em todos os locais onde o <i>landform</i> ocorra.
Aspectos genéticos	Mitchell (1948)	Forma fisiográfica considerada em relação à sua origem, causa ou história.
	Ruhe (1969)	Feição do terreno produzida por um conjunto particular de processos.
	Way (1973)	Feições do terreno, formadas por processos naturais, que apresentam uma composição e tamanho definível de características físicas e visuais, que ocorram em qualquer local que a feição esteja.
	Bates e Jackson (1980)	Qualquer contorno ou feição física reconhecível da superfície da Terra que possua uma forma característica e que seja produzida por causas naturais.
Função dos materiais (solos e rochas)	Wolf (1983)	Porção do terreno com forma topográfica, origem geológica, rochas e solos específicos.
	Fookes e Vaughan (1986)	Produto de interações extremamente complexas entre a resistência dos materiais presentes na Terra de um lado e as forças tectonicamente e climaticamente derivadas de outro.
Função da estrutura geológica	Hunt (1974)	Uma forma física do terreno que reflete a estrutura geológica e os processos geomorfológicos que a tenham esculpido.
	Geodfrey e Cleaves (1991)	Parte da paisagem que geralmente pode ser visualizada em termos de sua integridade e reflete a litologia, a geologia estrutural e os processos geomórficos que a tenham produzido.

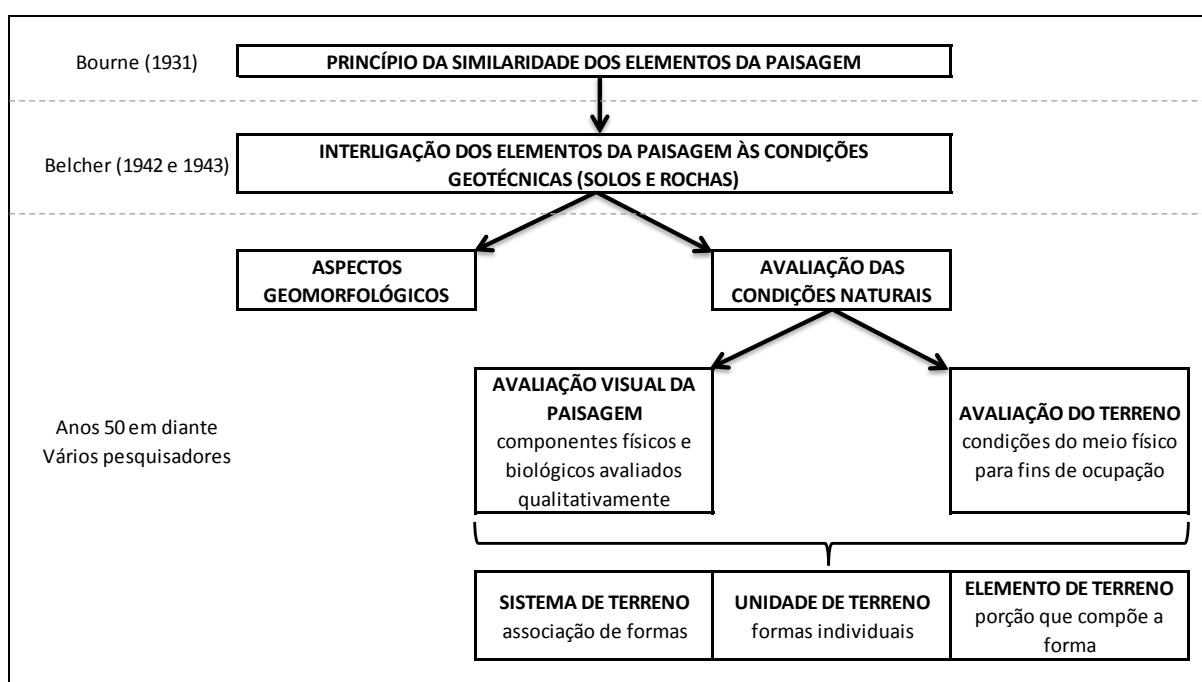
(fonte: elaborado pelo autor)

Devido às diversas definições de *landforms* existentes, Lollo (1995) explica que é necessário adotar uma conceituação clara que facilite o entendimento das bases do zoneamento a ser efetuado. Em sua tese, propôs um conceito operacional de fácil aplicação, denominando *landforms* como uma porção do terreno que originou-se dos processos naturais e é diferenciada das demais pela forma e posição topográfica, pela frequência dos canais, inclinação das vertentes ou amplitude do relevo. Foi definida a partir das seguintes proposições:

- a) descrição tipicamente fisiográfica de *landforms* (reconhecimento da forma, sem análises ou interpretações);
- b) não distinguir formas erosivas e deposicionais (etapa relevante na análise de resultados);
- c) não considerar os materiais como critério de distinção de formas (estes devem ser consequência da aplicação da metodologia);
- d) não incluir a influência da estrutura geológica.

No contexto histórico da evolução do estudo dos *landforms*, Lollo (1995) apresenta as correntes de raciocínio que surgiram a partir do desenvolvimento da técnica, conforme esquema da figura 13.

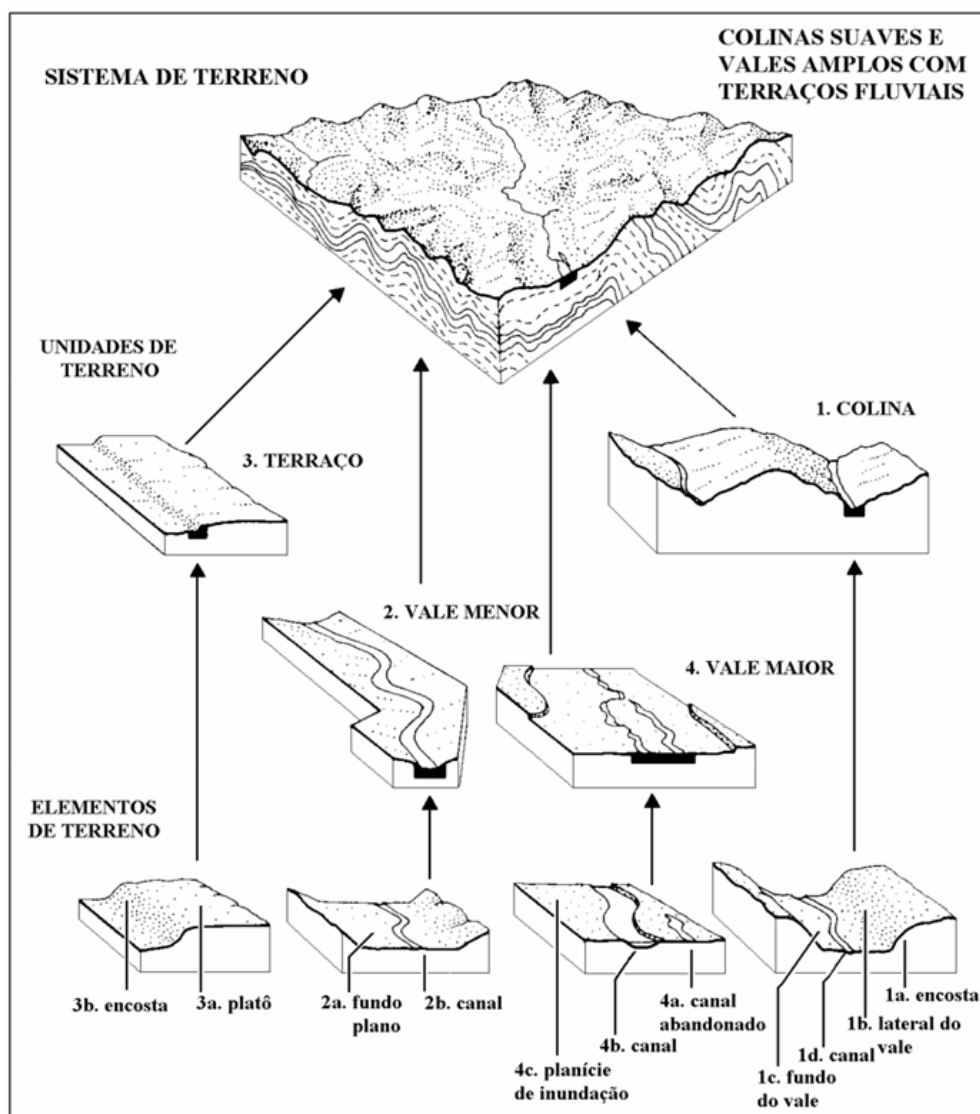
Figura 13 – Diagrama da evolução histórica do estudo de *landforms*



(fonte: elaborada pelo autor)

Os níveis hierárquicos apresentados por Lollo (1995) condicionam a escala, tipos de materiais e forma de aplicação da técnica no mapeamento (figura 14). Porém, independentemente do nível adotado para estudo, os procedimentos técnicos operacionais constituem-se na avaliação de aspectos fisionômicos da rugosidade topográfica e os padrões de dissecação do relevo. Conforme a proposição de Ross (1992), apresentada no item 3.2, distingue-se em qual compartimentação encontra-se o trabalho, através da categorização do tamanho, idade, gênese e forma das vertentes.

Figura 14 – Níveis hierárquicos da avaliação das condições naturais

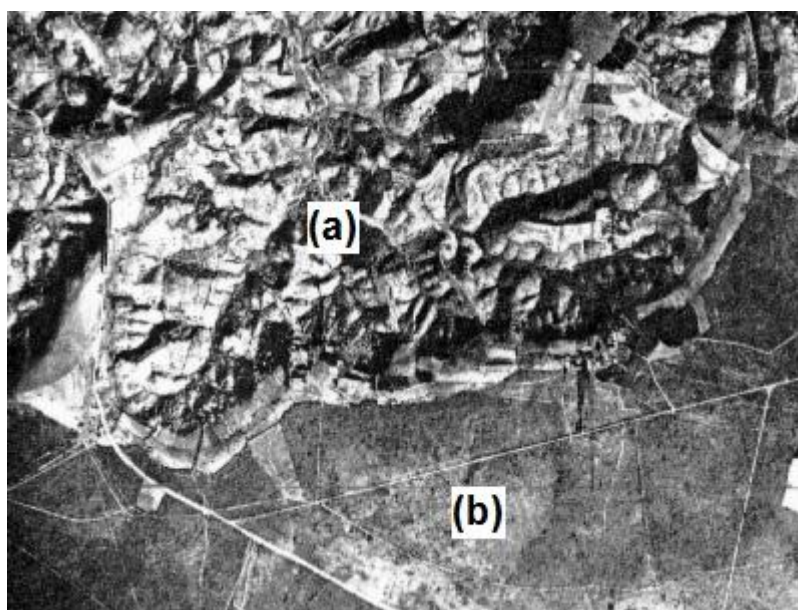


(fonte: LOLLO, 1995, p. 12)

Conforme Lollo (1995), o Sistema de terreno é o maior entre os níveis hierárquicos. Definido como a associação de formas de relevo que tenham condições similares em função do conjunto dos processos de evolução e do seu tempo de duração. Baseia-se no reconhecimento das grandes expressões geomorfológicas utilizando-se o sistema de fotointerpretação como ferramenta operacional (figura 15). A uniformidade dos *landforms* na avaliação do Sistema de terreno deve ser relativa ao substrato rochoso. A análise de estereopares¹³ de fotos aéreas e utilização de mapas topográficos em escala compatível com as fotografias aéreas, servem como verificadores das áreas espacialmente delimitadas, possibilitando a passagem para a fase de generalização. A fase de generalização é dividida em dois tipos de ação:

- a) conceitual: seleciona-se as feições a serem apresentadas omitindo-se as irrelevantes. Classificam-se as informações de acordo com a sua importância e combinam-se as feições conforme a classificação adotada;
- b) gráfica: representa-se graficamente os elementos dando ênfase, simplificando e combinando feições e omitindo os de menor importância.

Figura 15 – Exemplo de fotointerpretação utilizada na avaliação do Sistema de terreno, diferenciando os Sistemas (a) e (b)



(fonte: LOLLO, 1995, p. 58)

Lollo (1995) descreve a Unidade de terreno como uma forma individual do Sistema de terreno, distinguível das demais por apresentar um sub-conjunto de processos associados às diferentes características em termos de materiais inconsolidados. A identificação das

¹³ Equipamento utilizado para tirar fotos aéreas observadas em terceira dimensão.

Unidades de terreno constitui-se na delimitação dos padrões de forma, avaliando as características topográficas, amplitude do relevo, inclinação das vertentes e organização da drenagem com base na geomorfologia. A identificação e descrição das formas são feitas utilizando-se critérios de reconhecimento (quadro 3), mas não considera limites numéricos.

Quadro 3 – Exemplo de critérios para reconhecimento das Unidades de terreno

Unidade	Crítérios de Reconhecimento
Escarpa	vertentes retilíneas com altas declividades (>20%), amplitude de relevo maior que 100m.
Colina	vertentes convexas ou côncavas, topos ondulados a aplainados, declividades moderadas a baixas (<10% na maioria dos casos), amplitude de relevo menor que 100m.
Vale	vertentes convexas ou côncavas, declividades variadas (desde muito baixas até altas), amplitude de relevo variada.
Morrote	vertentes predominantemente convexas, topos arredondados a angulosos, declividades moderadas a altas (>10%), amplitude de relevo menor que 100m.
Morro	vertentes convexas a retilíneas, topos ondulados a pontiagudos, declividades altas (>20%), amplitude de relevo maior que 100m.

(fonte: LOLLO, 1995, p. 62)

O Elemento de terreno, segundo Lollo (1995), é uma subdivisão da Unidade de terreno. Conceituado como parte de uma forma individual do relevo, distingue-se pela inclinação ou forma da vertente, posição ou forma topográfica e variações laterais dos perfis de materiais inconsolidados. O processo de avaliação neste nível é o mesmo utilizado para a Unidade de terreno, porém com maior detalhamento e destinado a soluções de problemas específicos. O levantamento de Elementos do terreno exige uma amostragem mais densa, com maior número de ensaios, incluindo a abordagem paramétrica (medida das formas do terreno).

Em sua tese, Lollo (1995) não trabalhou com este nível de abordagem, apenas apresentou diretrizes para sua utilização. Porém, Lollo e Gandolfi (1991) trabalharam com dados paramétricos para mapeamento preliminar de *landforms*. Este trabalho serviu como base para a descrição da sistemática de espacialização de dados geotécnicos na avaliação de encostas com padrões de composição e forma semelhantes.

5 PROPOSIÇÃO DE SISTEMÁTICA PARA AVALIAÇÃO DE PADRÕES SEMELHANTES DE ENCOSTAS

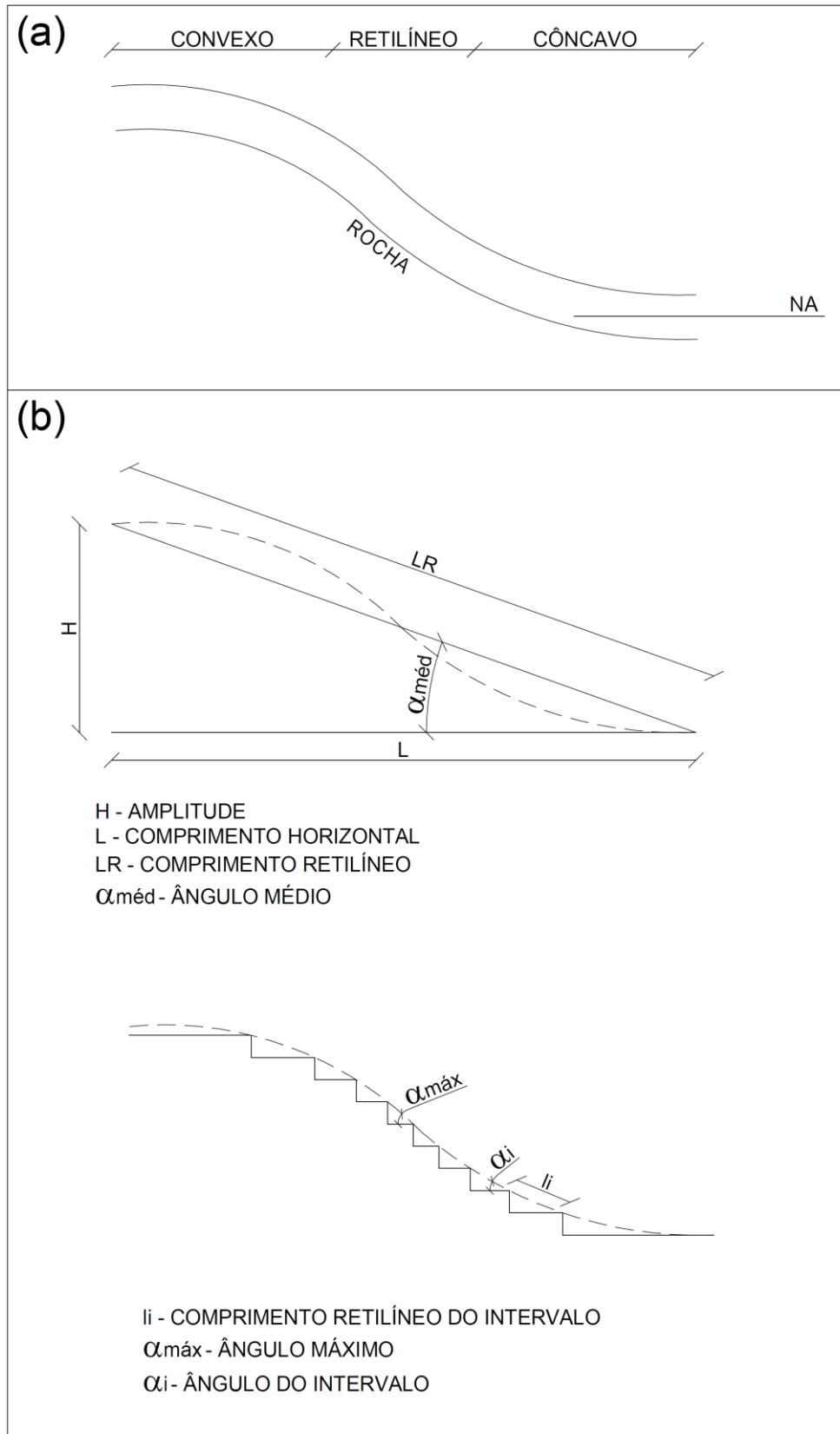
Visto que a maior parte das propostas metodológicas de avaliação do meio físico exige um nível de informações que demandam recursos disponíveis apenas em órgãos estaduais e algumas universidades, Lollo e Gandolfi (1991) propuseram a utilização de variáveis geométricas das vertentes. A consideração da utilização destas variáveis geométricas está inserida na proposição feita por Lollo (1995) quanto à aplicação do nível hierárquico Elemento de terreno, conforme descrito no capítulo anterior. Com um caráter preliminar, a caracterização do meio físico utilizando estas variáveis, denominadas pelos autores de Variáveis Características da Vertente, teria como objetivos orientar os trabalhos de campo, diminuir custos para obtenção de informações preliminares, orientar a escolha de locais para amostragem e possibilitar um pré-zoneamento de áreas. Dentre as diversas variáveis que poderiam ser consideradas, foram selecionadas as mais representativas da vertente e que fossem de fácil obtenção através de mapas topográficos, sem a necessidade de trabalhos de campo. Para representação das variáveis considerou-se o modelo de perfil de vertente proposto por Derrau, conforme apresentado na figura 16 e quadro 4.

Ainda, Lollo e Gandolfi (1991, p. 145) relacionaram a forma da vertente aos processos evolutivos, afirmando:

A possibilidade de caracterização das vertentes através de variáveis que descrevam sua geometria apresenta a grande vantagem de fornecer indicações bastante seguras dos processos dominantes em sua evolução e, conseqüentemente, das características dos materiais inconsolidados (solos e sedimentos) neles presentes.

Para essa análise, segundo Lollo e Gandolfi (1991), necessita-se definir qual o intervalo dominante na evolução da vertente (convexo, retilíneo ou côncavo), conforme figura 17. O domínio de um intervalo sobre os demais está associado às condições diferenciadas de processos evolutivos, do material gerado e forma de transporte e deposição ao longo do perfil da vertente (quadro 5).

Figura 16 – (a) Modelo de perfil de vertente de Derrau e
(b) Variáveis Características da Vertente



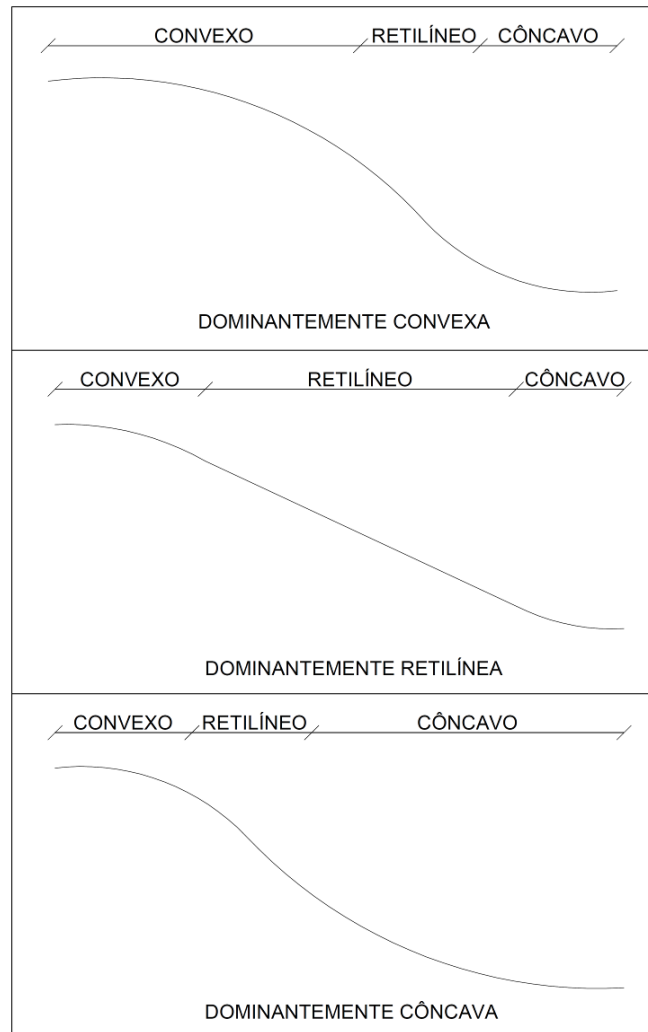
(fonte: adaptado de LOLLO; GANDOLFI, 1991, p. 143-144)

Quadro 4 – Descrição das Variáveis Características da Vertente

VARIÁVEIS CARACTERÍSTICAS DA VERTENTE	DESCRIÇÃO
Variáveis medidas no perfil da vertente	
Amplitude da Vertente (H)	Diferença entre os valores de cota dos pontos mais altos e mais baixos do perfil.
Comprimento Horizontal (L)	Medida da projeção em planta da distância entre os pontos de maior e menor cota.
Comprimento Retilíneo (LR)	Medida do segmento que une os pontos de maior e menor cota do perfil.
Comprimento da Superfície (LS)	Somatória dos comprimentos retilíneos dos intervalos levantados na vertente.
Ângulo Médio ($\alpha_{\text{méd.}}$)	Ângulo, medido num plano vertical, entre os segmento que une os pontos de maior e menor cota e o plano horizontal.
Ângulo Médio Ponderado ($\alpha_{\text{pond. méd.}}$)	Média ponderada dos ângulos dos intervalos da vertente.
Ângulo Máximo ($\alpha_{\text{máx.}}$)	Maior valor angular entre os intervalos da vertente.
Índices e coeficientes derivados	
Índice de Retilidade da Superfície (IR)	Razão entre os comprimentos da superfície e retilíneo da vertente.
Índice de Ruptura de Declive (ID)	Número de pontos de inflexão do perfil, multiplicado por 100 e dividido pelo comprimento retilíneo da vertente.
Coeficiente de Comprimento (CL)	Razão entre os somatórios dos comprimentos dos intervalos das partes convexas (L_x) e côncavas (L_v) do perfil.
Coeficiente de Intensidade (CI)	Razão entre os somatório dos ângulos dos intervalos das partes convexas (I_x) e côncavas (I_v) do perfil.
Índice de Intensidade (I)	Razão entre os coeficientes de comprimento e de intensidade da vertente.
Índice de Forma (IK)	Metade da soma do coeficiente de comprimento da vertente com a razão dos coeficientes de intensidade e comprimento.

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 17 – Representação dos intervalos dominantes na evolução das vertentes



(fonte: adaptado de LOLLO; GANDOLFI, 1991, p. 145)

Quadro 5 – Relação entre a forma da vertente e os processos evolutivos

CARACTERÍSTICAS	INTERVALO DOMINANTE DA VERTENTE		
	Convexo	Retilíneo	Côncavo
TRANSPORTE DOMINANTE	<i>Creep</i>	Gravidade	Escoamento superficial
PEDOGÊNESE MORFOGÊNESE	Predomina pedogênese	Predomina morfogênese	Predomina morfogênese
CONDIÇÕES DE ACUMULAÇÃO	Altas, maior espessura na base	Baixas, pequenas espessuras ao longo de todo perfil	Baixas, maior espessura no topo
INTENSIDADE DE RETIRADA DE MATERIAL	Baixa	Alta, função da declividade	Alta, função do escoamento
CARACTERÍSTICAS DOS DEPÓSITOS	Finos (argilosos e siltsos)	Colúvios grosseiros de pé de vertente	Colúvios de rampas

(fonte: elaborado pelo autor)

As relações apresentadas no quadro 5 estão diretamente associadas às proposições do Sistema de Walther Penck, descritas no item 3.3.2. Conforme figura 4 do item citado, os intervalos dominantes na vertente correspondem à ação diferenciada, em termos de intensidade, dos mecanismos de soerguimento, entalhamento e denudação que ocorrem na vertente. Uma vertente predominantemente convexa, por exemplo, origina-se do forte entalhamento do talvegue e soerguimento da crosta. Já o domínio côncavo na vertente têm origem da forte denudação ou desgaste lateral. A retilinidade da vertente ocorre quando há um equilíbrio das forças atuantes.

Na conclusão de sua tese, Lollo (1995) escreve:

- a) terrenos com formas mais suaves e alongadas representam a predominância dos processos de pedogênese (perfis mais evoluídos e profundos), enquanto em terrenos com formas mais dissecadas, encostas íngremes ou abruptas, por exemplo, predominam os processos erosivos (perfis menos profundos). Quando na ocorrência de mais de uma unidade com formas suaves, aquela que apresentar formas mais aplainadas terá perfis mais evoluídos;
- b) as condições de aparecimento de depósitos aluviais ou depósitos já existentes são de grande importância para o entendimento da evolução dos processos no conjunto de formas consideradas;
- c) em climas temperados as formas estão diretamente relacionadas com o substrato rochoso, devido à imaturidade e pequena espessura dos materiais inconsolidados, com predominância do intemperismo físico. Já em clima tropical, predomina o intemperismo químico com presença de perfis mais maduros e espessos e com formas mais suaves. A relação entre litologia do substrato e forma do terreno só ocorre, em clima tropical, quando há intensa retirada do material ou quando o perfil de material inconsolidado é residual raso (litólico).

Conforme Lollo e Gandolfi (1995), não houve a realização de estudos âmbito nacional considerando esta forma de análise do meio físico. Para verificar a possibilidade de utilização e a eficácia da metodologia, os autores realizaram um trabalho utilizando-se das Variáveis Características da Vertente acima descritas. Aplicaram à área correspondente à Folha de Leme, São Paulo, com informações prévias de mapas anteriores, fotointerpretação e estudos geotécnicos já executados. A parte de cartografia geotécnica foi realizada segundo a metodologia de Zuquette (1987), considerando escala regional. Para aplicação da técnica, e consequentemente a caracterização das variáveis morfométricas, foram selecionadas as vertentes que se encontrassem no centro de cada cela de um quilômetro de lado da malha regular quadrada criada sobre o mapa (Folha de Leme). As informações geométricas das

vertentes foram obtidas de mapas topográficos na escala 1:10.000. Como resultado do trabalho, gerou-se uma tabela contendo as unidades geotécnicas (material inconsolidado, classe de espessura e substrato) *versus* intervalos de variação. A partir da análise destes dados, os autores chegaram às seguintes conclusões:

- a) as variáveis Extensão (L) e Amplitude (H) apresentaram maiores valores para vertentes com maior espessura de material inconsolidado, refletindo aspectos esperados da evolução das vertentes;
- b) variável Ângulo Máximo ($\alpha_{\text{máx.}}$) apresentou maiores valores para unidades com espessura de material inconsolidado menores que dois metros, também esperado da evolução das vertentes;
- c) o Coeficiente de Intensidade (CI) e o Índice de Ruptura de Declive (ID) proporcionaram intervalos de variação que possibilitaram uma boa distinção entre classes de espessura de material inconsolidado;
- d) o Coeficiente de Comprimento (CL) e Ângulo Médio Ponderado ($\alpha_{\text{méd. pond.}}$) não demonstraram utilidade para distinção entre unidades;
- e) dificuldade de utilização das variáveis Comprimento Retilíneo (LR) e Comprimento de Superfície (LS) por apresentarem valores próximos a Extensão (L);
- f) não utilização do Índice de Retilidade (IR) por apresentar valores próximos para todos perfis avaliados;
- g) não utilização do Índice de Intensidade (I) por apresentar grande dispersão de valores calculados, devido a relação entre duas outras variáveis (CL e CI).

Contudo, como este trabalho objetiva orientar a avaliação do meio físico para distinção de vertentes com padrões semelhantes, uma análise crítica deve ser feita quanto à utilização destas variáveis para diferentes condições de terreno, levando em conta as características particulares da sua formação, evolução e modificação. Para tanto, é necessário analisar as relações entre variáveis que demonstrem aspectos diferenciados das formas das vertentes. Neste trabalho foram descritas algumas relações possíveis, apresentadas resumidamente no quadro 6, utilizando-se apenas as variáveis medidas e os coeficientes, pois estes são fáceis de serem visualizados e interpretados.

Quadro 6 – Relações entre Variáveis Características da Vertente e respectivos aspectos observados

VARIÁVEIS RELACIONADAS	RELAÇÕES	OBSERVAÇÕES DOS ASPECTOS DA VERTENTE
LR e L	Valores da razão entre LR e L próximos a 1.	*Relacionados com os processos geomorfológicos, caracterizando as forças internas (resistência dos materiais/tectônica) menores que as forças externas (intemperismo, clima e agentes modificadores).
L e H	Valores da razão entre L e H grandes ou razão entre H e L pequenos.	
LR e LS	Valores da razão entre LS e LR, que correspondem ao índice IR, próximos a 1.	*Concavidades da vertente mais suaves, podendo indicar a presença de substrato rochoso menos resistente às forças externas, predominando a pedogênese.
α .méd. e α .méd. pond.	Valores da razão entre α .méd. e α .méd. pond. próximos a 1.	**Indica a dominância da retinidade da vertente sobre os demais intervalos de domínio.
CL (Lx/Lv)	Coeficientes já expressam a relação entre duas variáveis.	*Indicam o intervalo de dominância da vertente, sendo que:
CI (Ix/Iv)		-valores maiores que 1 - predominantemente convexa; -valores menores que 1 - predominantemente côncava; -valores próximos a 1 - predominantemente retilínea.

(fonte: elaborado pelo autor)

Já os índices que expressam relações complexas e envolvem um número maior de variáveis, dificultando a compreensão, são apresentados e descritos a seguir em caso de possibilidade ou necessidade de utilização:

- a) Índice de Ruptura de Declive (ID): expressa o grau de uniformidade ou irregularidade da vertente, avaliado em função do modelo de perfil de vertente de Derrau apresentado na figura 16. Valores maiores deste índice podem significar que a vertente é mais heterogênea em sua composição (substrato rochoso e material inconsolidado), conforme demonstra o sistema de John T. Hack apresentado no capítulo 3;
- b) Índice de Intensidade (I): sua utilização pode levar a interpretações contraditórias, pois envolve um número maior de variáveis correlacionadas (Lx, Ix, Lv, Iv). Porém, de um modo geral, assim como descrito pela relação entre CL e CI no quadro 6, este índice indica o intervalo de dominância da vertente;
- c) Índice de Forma (IK): não descrita por se tratar de uma relação complexa entre os Índice de Intensidade e o Coeficiente de Comprimento.

Descritos os processos geomorfológicos de formação e os níveis de classificação do relevo, as principais características das metodologias de mapeamento geotécnico, escalas de utilização, atributos a serem avaliados e as variáveis que caracterizam as vertentes, estes constituem

informações suficientes para avaliação de padrões semelhantes de encostas, objetivo deste trabalho. No quadro 7, apresentado a seguir, são descritas as etapas da sistemática proposta.

Quadro 7 – Etapas da sistemática proposta para avaliação de padrões semelhantes de encostas

ETAPAS	DESCRIÇÃO
1 - Aquisição de dados e reconhecimento geral	<ul style="list-style-type: none"> - Obtenção dos dados geotécnicos disponíveis para a área de estudo; - Distinção de unidades homogêneas utilizando os níveis hierárquicos Sistema e Unidade de terreno; - Análise em escalas menores que 1:25.000; - Reconhecimento do substrato rochoso e material inconsolidado; - Utilização de fotointerpretação (se disponível) ou mapas base (geológico, pedológico e topográfico) adaptados para as condições locais; - Possibilidade de utilização de ensaios SPT para reconhecimento dos materiais inconsolidados.
2 - Levantamento das vertentes	<ul style="list-style-type: none"> - Levantamento dos dados geométricos de perfis das vertentes; - Nível hierárquico Elemento de terreno como condição de estudo; - Análise em escalas maiores que 1:25.000; - Elaboração de tabelas com os dados levantados; - Possibilidade de utilização de ensaios SPT, como dado complementar, para descrição de espessuras de camadas e material presente; - Possibilidade de utilização de retroanálises, conforme finalidade do trabalho.
3 - Análise das vertentes	<ul style="list-style-type: none"> - Distribuição e interpretação dos dados geométricos levantados em intervalos de classificação distintos; - Análise e compreensão dos processos geomorfológicos atuantes nas vertentes em função dos dados levantados na etapa 2 e considerando o reconhecimento geral da área da etapa 1; - Exige conhecimento geomorfológico e geotécnico por parte do profissional; - Trabalhos de campo como ferramenta complementar para checar resultados.
4 - Descrição das vertentes	<ul style="list-style-type: none"> - Descrição das formas e materiais inconsolidados observados nas vertentes analisadas na etapa 3; - Descrição dos processos de formação, evolução e modificação das vertentes, associando às formas e aos materiais inconsolidados observados; - Elaboração de mapa com a representação de vertentes com padrões de forma e composição semelhantes entre si.

(fonte: elaborado pelo autor)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da descrição da sistemática proposta e da análise crítica de sua utilização, a seguir são feitas considerações no sentido de orientar a aplicação da sistemática para diferentes condições. Ainda, são apresentadas sugestões para posterior desenvolvimento e continuidade do trabalho.

Dos níveis de classificação a serem considerados na análise do meio físico, tanto os propostos por Ross (1992), apresentados no item 3.2, como os de Lollo (1995), apresentados no item 4.2, não necessariamente deve-se estar restrito à utilização de um único nível taxonômico ou hierárquico para uma determinada escala de avaliação. Isso significa que níveis menores de análise de táxons (escalas grandes) podem ser avaliados em níveis maiores de análise de táxons (escalas pequenas), porém, é preciso ter claro que esta condição acarretará uma diminuição da precisão cartográfica e um aumento no grau de generalização das informações, devido à incompatibilidade entre escalas avaliadas e representadas.

Os Sistemas apresentados por Lester C. King e John T. Hack explicam formações de grandes extensões considerando o conjunto de relevo. Neste caso, os processos atuantes sobre a vertente (desagregação mecânica e sedimentação), são avaliados em escalas menores, considerando a compartimentação topográfica como nível de tratamento.

A utilização de metodologias de mapeamento geotécnico para escalas menores que 1:25.000 fica condicionada, neste trabalho, à análise preliminar das condições do relevo, delimitações de unidades, tipos de materiais e geologia associada. Serve como ferramenta base para reconhecimento geral da região de estudo.

Dependendo das condições de formação, evolução e modificação da vertente, conforme a região em que se encontra, a análise de algumas variáveis morfométricas pode não apresentar variações significativas que possibilitem a diferenciação entre vertentes. Neste caso, a avaliação deve ser concentrada e aprofundada sobre variáveis que sejam mais representativas daquela condição de estudo.

As relações entre variáveis geométricas citadas e respectivas observações dos aspectos das vertentes tiveram caráter teórico, exceto aquelas em que Lollo e Gandolfi (1995) aplicaram para a região correspondente a Folha de Leme (SP). Neste caso, fica como trabalho indicativo a complementar o presente trabalho, buscar relações entre outras variáveis existentes e aprofundar as relações descritas no quadro 6, através de pesquisas aplicadas a diferentes condições de terreno.

Neste trabalho, a utilização do nível hierárquico Elemento de terreno restringiu-se à avaliação de dados geométricos representativos dos perfis das vertentes. No entanto, não deve ser descartada a possibilidade de avaliação das formas topográficas em planta, assim como no nível hierárquico Sistema e Unidade de terreno, considerando aspectos de textura da superfície, vegetação, redes hidrográficas, variações laterais de materiais inconsolidados, etc. Além disto, a avaliação pode ter caráter preferencial geológico, considerando os lineamentos estruturais, as orientações, distribuições e composições mineralógicas das rochas no terreno e demais aspectos condizentes à área da geologia.

As relações apresentadas no quadro 5 (forma da vertente e processos evolutivos) têm finalidade principal de descrição do comportamento da vertente. A respeito da avaliação do meio físico para determinação de padrões semelhantes de encostas, utilizando o respectivo quadro citado, é possível proceder a análise de forma inversa, ou seja, partindo do conhecimento dos mecanismos atuantes sobre a vertente e os materiais que a compõe. Neste caso, a análise pode ser mais subjetiva, pois tem caráter qualitativo, dependendo muito do conhecimento em geologia, geomorfologia e geotecnia por parte do profissional.

A utilização da retroanálise como ferramenta para avaliação do meio físico não foi identificada nos estudos bibliográficos deste trabalho. Assim, fica como proposta para trabalhos posteriores, desenvolver estudos que relacionem os parâmetros dos materiais obtidos por retroanálise às formas topográfica e de perfis das vertentes, criando novos mecanismos de espacialização e avaliação de padrões semelhantes de encostas.

A análise do meio físico utilizando-se ferramentas 3D, não consideradas neste trabalho, pode contribuir para uma delimitação mais precisa das áreas, bem como auxiliar na avaliação lateral de vertentes analisadas em função do seu perfil de melhor representatividade.

Nos trabalhos que utilizam a técnica de avaliação do terreno, é importante a definição clara da conceituação de *landforms* que serão adotadas nos estudos, suas limitações e condicionantes. Isto permite uma maior objetividade de análise e clareza para o elaborador do trabalho e ao usuário para obtenção da informação.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. **Geomorfologia**: um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas do Quaternário. 18. ed. São Paulo: Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 1969. Não paginado. Disponível em:
<<http://xa.yimg.com/kq/groups/14599993/294513207/name/Um+conceito+de+geomorfologia+a+servi%C3%A7o+das+pesquisas+sobre+o+quarten%C3%A1rio.pdf>>. Acesso em: 2 jun. 2012.
- ANDRADE, R. F. **Mapeamento geotécnico preliminar em escala de semidetalhe (1:25.000) da área de expansão urbana de Uberlândia-MG**. 2005. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.
- ARGENTO, M. S. F. Aplicabilidade dos mapeamentos temáticos em geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 365-391.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1994. v. 1.
- CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S. l.]: 2005. Não paginado. Disponível em:
<<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 2 jun. 2012.
- CHRISTOFOLETTI, A. Aplicabilidade do conhecimento geomorfológico nos projetos de planejamento. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 415-440.
- DIAS, R. D. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 16, n. 1-2, p. 51-55, jan./dez. 1995. Disponível em:
<http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/revista_ig/v16nspa07.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2012.
- FRANCO, G. B.; MARQUES, E. A. G.; CALIJURI, M. L.; GOMES, L. R. Cartografia geotécnica: estágio atual do conhecimento. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 11, n. 35, p. 158-172, set. 2010. Disponível em:
<http://www.dec.ufv.br/modules/mastop_publish/files/PublicacoesdoPrograma/CAMINHOS%20DE%20GEOGRAFIA%20_Revista%20on%20line_2010.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2012.
- LOLLO, J. A. **O uso da técnica de avaliação do terreno no processo de elaboração de mapeamento geotécnico**: sistematização e aplicação para a quadrícula de Campinas (SP). 1995. 247 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.
- LOLLO, J. A.; GANDOLFI, N. Variáveis características das vertentes: possibilidade de utilização do meio físico com vistas ao planejamento urbano regional. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 44, n. 3-4, p. 142-146, jul./dez. 1991.

_____. Tentativa de utilização de variáveis morfométricas de perfis de vertentes para o zoneamento preliminar do meio físico: o caso da folha de Leme, São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 16, n. 1-2, p. 107-114, jan./dez. 1995. Disponível em: <http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/revista_ig/v16nspa15.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2012.

MIO, G.; GANDOLFI, N. Cartografia geotécnica da região de Mogi-Guaçu, São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 16, n. 1-2, p. 99-105, jan./dez. 1995. Disponível em: <http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/revista_ig/v16nspa14.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2012.

PEJON, O. J.; ZUQUETTE, L. V. Mapeamento geotécnico regional na escala 1:100.000 – considerações metodológicas. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 16, n. 1-2, p. 23-29, jan./dez. 1995. Disponível em: <http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/revista_ig/v16nspa03.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2012.

REHBEIN, M. O.; FUJIMOTO, N. S. V. M. Mapeamento geomorfológico: análises morfogenéticas e morfodinâmicas em estudo de caso do urbano. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 42., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 2006. p. 163-183.

ROSS, J. L. S. **O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo**. São Paulo: Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 1992. Disponível em: <http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&sqi=2&ved=0CFIQFjAB&url=http%3A%2F%2Fcitrus.uspnet.usp.br%2Frdg%2Fojs%2Findex.php%2Frdg%2Farticle%2Fdownload%2F245%2F224&ei=8vHLT5OmAaaM6QHs3vD3Dw&usq=AFQjCNG8U0BPi04n78q5fMQC-wURVJAv_A>. Acesso em: 2 jun. 2012.

SILVA, J. X. Geomorfologia e geoprocessamento. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 393-414.

SOUZA, N. M. **Cartografia geotécnica: conceitos básicos da cartografia geotécnica**. Brasília: Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2004.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Metodologia para mapeamento geoambiental no oeste do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 11., 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005. p. 3606-3615. Disponível em: <<http://www.ufsm.br/lageolam/arquivos/romario.pdf>>. Acesso em: 4 nov. 2012.

ZUQUETTE, L. V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. 1987. 673 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

_____. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. 1993. 256 f. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.