

UNIDADES BÁSICAS DE COMPARTIMENTAÇÃO (UBC) DO ESTADO DE SÃO PAULO E SEU USO PARA AVALIAÇÕES GEOAMBIENTAIS E PLANEJAMENTO TERRITORIAL

BASIC COMPARTMENT UNITS (BCU) OF THE STATE OF SÃO PAULO AND ITS USE FOR GEOENVIRONMENTAL EVALUATIONS AND TERRITORIAL PLANNING

RICARDO VEDOVELLO

Instituto Geológico-IG, São Paulo, SP, e-mail: rvedovello@sp.gov.br

CLÁUDIO JOSÉ FERREIRA

Instituto Geológico-IG, São Paulo, SP, e-mail: cferreira@sp.gov.br

ALINE SALIM

Coordenadoria de Planejamento Ambiental-CPLA, São Paulo, SP, e-mail: asalim@sp.gov.br

JULIANA AMORIM DA COSTA MATSUZAKI

Coordenadoria de Planejamento Ambiental-CPLA, São Paulo, SP, e-mail: julianaac@sp.gov.br

KENZO MATSUZAKI

Coordenadoria de Planejamento Ambiental-CPLA, São Paulo, SP, e-mail: kenzo@sp.gov.br

DENISE ROSSINI PENTEADO

Instituto Geológico-IG, São Paulo, SP, e-mail: dpenteado@sp.gov.br

ARLETE TIEKO OHATA

Coordenadoria de Planejamento Ambiental-CPLA, São Paulo, SP, e-mail: aohata@sp.gov.br

RESUMO ABSTRACT

A cartografia geotécnica e ambiental de abrangência para todo o estado de São Paulo ocorre em escalas 1:500.000 ou menores. Trabalhos de maiores escalas e resoluções estão restritos, ora a municípios, ora a regiões, porém, a falta de contiguidade geográfica e a heterogeneidade de escalas e métodos dificulta a integração para o território paulista. Este trabalho tem por objetivo apresentar um método para obtenção de uma base de informações do meio físico natural para todo o estado de São Paulo, em escala regional compatível com 1:75.000, organizada em unidades fisiográficas do substrato geológico-geomorfológico-pedológico que correspondam a Unidades Básicas de Compartimentação (UBC) do terreno, adequadas para análises integradas voltadas à gestão ambiental e territorial. O objetivo específico é gerar um mapa de perigo de escorregamento do estado de São Paulo. Em conclusão destaca-se que: a) o produto resultante apresenta formato sim-

The engineering and environmental cartography of the State of Sao Paulo is available only in 1:500.000 or minor scales. Products of larger scales and resolution are restricted to some municipalities or regions. However, the lack of spatial continuity and method and scale heterogeneity makes its integration to the entire territory of the State of Sao Paulo rather difficult. The objective of the study is to present a method to obtain a base of information of the natural and physical environment, to the whole of the State of Sao Paulo, in a 1:75.000 scale, based on physiographic units of the geological-geomorphological substratum (UBC) aimed to integrate environmental and territorial analysis and management. Its specific objective is to produce a landslide hazard map. In conclusion it is highlighted: a) the simple, open and flexible character of the product; b) the numerical approach based on raster layers allowing characterization of any polygon

ples, aberto e flexível, onde se tem apenas um arquivo em formato *shapefile*; b) a utilização de atributos numéricos na forma de camadas matriciais permite definir uma variação contínua de indicadores, cujas médias podem ser extraídas para os polígonos de interesse por procedimentos de médias zonais; c) a abrangência estadual, em escala compatível com 1:75.000 e resolução de 30 metros, confere homogeneidade na análise regional para todo o estado de São Paulo e facilita o uso do produto em ações de planejamento e ordenamento territorial.

Palavras-chave: cartografia geotécnica e ambiental, geoindicadores, perigo de escorregamento.

1 INTRODUÇÃO

As atividades humanas, por meio do uso e ocupação do território, acarretam transformações no meio ambiente, as quais devem ocorrer de forma sustentável. Tal sustentabilidade reside tanto no atendimento às necessidades atuais da sociedade, evitando-se riscos e danos ambientais e socioeconômicos, para as próprias atividades e para a saúde da população, como na preservação de condições que não comprometam as necessidades de um ambiente adequado também para as futuras gerações.

Para se harmonizar as relações entre as atividades humanas e o uso do meio ambiente são adotados mecanismos e procedimentos de gestão ambiental do território. A gestão ambiental, compreendida como o conjunto de procedimentos destinados a definir, organizar e executar o desenvolvimento sustentável de uma dada sociedade, pode ser dividida em três instrumentos básicos: a Política Ambiental, o Planejamento Ambiental, e o Gerenciamento Ambiental (Vedovello 2000). Enquanto o primeiro refere-se à definição dos princípios e diretrizes que vão nortear o desenvolvimento sustentável, o planejamento ambiental contempla a organização do território que, posteriormente, será colocada em prática por meio dos mecanismos de gerenciamento que incluem ações de administração, de controle e de intervenção. Dessa forma, o Planejamento Ambiental é o instrumento essencial que permite articular os procedimentos que compõem a gestão ambiental.

vector layers by zonal statistics procedures in GIS in a continuum numerical range; c) the mapping of the entire area of the State of São Paulo, which is useful in terrain evaluation and environmental planning.

Keywords: Engineering and Environmental Geology, geoindicators, landslide hazard.

De forma simplificada, observa-se que o Planejamento Ambiental é constituído por diagnósticos e prognósticos sobre as potencialidades, fragilidades e problemas ambientais de um determinado território, de forma que se possa viabilizar o uso e a ocupação do meio ambiente em consonância com o princípio do desenvolvimento sustentável (Vedovello 2000). Tais avaliações normalmente são sintetizadas na forma de zoneamentos que objetivam ordenar ou orientar o uso e a ocupação do território.

Evidentemente, as informações sobre o meio físico são essenciais para subsidiar o planejamento territorial, em particular se disponibilizadas com conteúdo e em formatos adequados. Nesse sentido, a cartografia geotécnica e geoambiental constitui uma ferramenta com grande potencial de uso, por meio da qual é possível se dispor de informações sobre fragilidades e potencialidades do terreno e sobre problemas geoambientais associados aos riscos e às áreas degradadas.

De forma correlata à discussão metodológica apresentada pela IAEG (1970) para os mapas e cartas geotécnicos, é possível distinguir entre mapas de condições geoambientais e mapas de zoneamento geoambiental. No primeiro caso há um simples registro das informações do meio físico, sem preocupação com a interpretação dessas informações. No segundo caso as informações geológico-geotécnicas e geoambientais são registradas e interpretadas, com consequente delimitação de áreas que apresentem homogeneidade de condições e/ou comportamento.

Devido ao caráter interpretativo dos zoneamentos geoambientais, as informações presentes nesse tipo de produto são representadas de uma forma mais simples e objetiva. Tal fato facilita e favorece a utilização desse tipo de carta por usuários de outras áreas do conhecimento, como é o caso frequente de equipes e gestores envolvidos no planejamento de territórios e em gestão ambiental.

Um zoneamento geotécnico ou geoambiental consiste na delimitação de áreas (zonas) do terreno para as quais os elementos componentes do meio físico determinam condições geológico-geotécnicas semelhantes, e para as quais um comportamento geotécnico ou uma aptidão de uso possam ser indicados frente às diferentes atividades antrópicas. Na obtenção de um zoneamento geotécnico são observadas três etapas básicas: 1) compartimentação do terreno, onde ocorre a identificação de zonas com características e propriedades geológico-geotécnicas homogêneas; 2) caracterização geotécnica, com a determinação das características e propriedades geotécnicas das áreas delimitadas; e 3) cartografia temática final ou de síntese, na qual as unidades definidas nas etapas anteriores são analisadas e classificadas em termos de fragilidades e potencialidades do terreno. (Vedovello 2000).

Para a espacialização de dados e informações geoambientais na etapa de compartimentação do terreno é possível identificar duas abordagens operacionais básicas na literatura sobre avaliação de terrenos (*terrain evaluation*). Mitchell (1973) identifica essas abordagens como: fisiográfica ou de paisagens (*physiographic or landscape approach*) e paramétrica (*parametric approach*).

Devido à tendência de priorização de análises integradas em estudos voltados à gestão territorial, a abordagem fisiográfica tem sido cada vez mais utilizada na etapa de compartimentação de terrenos em zoneamentos geoambientais. Esta abordagem se contrapõe à abordagem paramétrica ou analítica que considera cada atributo de análise individualmente para um empilhamento vertical de camadas ou planos de informação. Na abordagem fisiográfica, também por vezes referida como sintética, a forma e distribuição espacial de feições do terreno são analisadas de uma maneira integrada, permitindo a delimitação de uni-

dades de análise que guardam correspondência com características e propriedades do substrato geológico, geomorfológico e pedológico (Vedovello 2000; Cendrero et al. 2004; Fernandes da Silva et al. 2010).

O substrato geológico, geomorfológico e pedológico é resultado da evolução de processos geodinâmicos endógenos e exógenos (Ohara et al. 2003) e orienta as condições evolutivas atuais, resultantes da interação entre sistemas naturais e humanos (Cendrero 1997). Sua caracterização constitui informação fundamental para a elaboração de zoneamentos ambientais, pois condiciona as aptidões e fragilidades do terreno às ocupações e ao uso (Vedovello 2000, Mattos et al. 2007, Fernandes da Silva et al. 2010).

No estado de São Paulo, a cartografia do substrato, realizada com base na abordagem fisiográfica ou sintética, apresenta grande heterogeneidade em termos de escala, abrangência e métodos, própria de cada disciplina do conhecimento e época de geração. Embora existam mapas em nível estadual em escalas 1:500.000 e menores, a exemplo dos mapas elaborados por IPT (1994), Ross & Moroz (1997), Perrota et al. (2005), os estudos em escalas mais detalhadas (1:100.000 e maiores), seja em nível municipal (Cardoso et al. 2009), seja em nível regional (Tominaga et al. 2004; Ferreira & Rossini-Penteado 2011), apresentam falta de contiguidade, diversidade de escala e heterogeneidade metodológica que dificultam a integração dos mapeamentos para o território estadual.

Dessa forma, é fundamental a obtenção de uma compartimentação do terreno uniforme e contínua para todo o estado de São Paulo, segundo uma abordagem sintética ou fisiográfica, e em escala compatível com os instrumentos de planejamento ambiental existentes, de maneira a se obter zoneamentos geotécnicos e geoambientais compatíveis com sua inserção em estudos integrados de gestão e de ordenamento do território.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é apresentar o método de obtenção de Unidades Básicas de Compartimentação (UBC) do estado de São Paulo, o qual constitui uma base de informações do meio físico natural, em escala regional compatível

com 1:75.000, organizada em níveis hierárquicos que expressam em unidades fisiográficas de compartimentação do substrato geológico, geomorfológico e pedológico.

O objetivo específico é apresentar a aplicação do método na elaboração de um mapa de perigo de escorregamento, do tipo planar raso do estado de São Paulo, que possa ser utilizado em zoneamentos geoambientais voltado para subsidiar trabalhos e atividades de gestão ambiental e de ordenamento territorial.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A estrutura metodológica adotada no trabalho, conforme proposto por Vedovello (2000), baseia-se na obtenção de zoneamentos geotécnicos e geoambientais, a partir da análise integrada do terreno e com o uso de procedimentos sistemáticos de fotointerpretação. Para tanto são consideradas três etapas básicas: 1) Compartimentação Fisiográfica do Terreno; 2) Caracterização Geotécnica; e 3) Cartografia Temática Final ou de Síntese. A caracterização e procedimentos operacionais dessas etapas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Síntese das etapas e procedimentos operacionais para a elaboração de zoneamentos geotécnicos (adaptado de Vedovello 2000).

Etapas	Procedimento	Características
compartimentação Fisiográfica do Terreno	a) seleção do produto de sensoriamento remoto	Deve considerar as características espectrais, espaciais e temporais das imagens de satélite, as características específicas sobre as cenas, tais como ângulo de elevação solar, cobertura de nuvens, e as particularidades das áreas de estudo.
	b) compartimentação da área de estudo	Consiste em identificar na imagem divisões fisiográficas em diferentes níveis hierárquicos, através da análise de elementos texturais e tonais das imagens, e consequente determinação de Unidades Básicas de Compartimentação (UBCs).
	c) avaliação de homogeneidade e de similaridade	Refere-se à análise das propriedades dos elementos texturais utilizados na interpretação. Objetiva identificar heterogeneidades internas nas unidades que determinem sua subdivisão, ou classificação sob a mesma denominação.
	d) trabalhos de campo	Objetiva a confirmação ou o ajuste de limites fotointerpretados e a confirmação de características morfoambientais e genéticas atribuídas aos diversos níveis de compartimentação das unidades.
	e) elaboração do mapa de Unidades Básicas de Compartimentação (UBC)	Refere-se à elaboração de um mapa onde as diversas UBCs estão identificadas por uma sigla ou código refletindo, ainda, seu contexto fisiográfico e seus níveis hierárquicos de compartimentação.
Caracterização Geotécnica	a) Identificação dos fatores de análise e das classes dos fatores	Consiste na identificação de propriedades ou características do terreno necessárias para a avaliação pretendida. Contemplam dados e informações sobre rochas, solos, relevo, processos geodinâmicos, recursos hídricos e vegetação.
	b) Obtenção dos fatores de análise e classificação	São obtidos a partir de trabalhos de campo, dados prévios, ou por inferência a partir de imagens de sensoriamento remoto. A forma de obtenção depende do nível de informação necessário dos recursos e do tempo disponíveis.
	c) Sistematização das informações sobre as UBCs	Devem ser padronizadas e referenciadas em classes predeterminadas, face a aplicação prevista, e armazenadas em tabelas ou banco de dados que as relacionem às respectivas UBCs.
Cartografia Temática Final	a) definição das classes da carta final	Depende, essencialmente, da aplicação pretendida e devem refletir as diferentes situações ou condições geológico-geotécnicas que condicionam ou limitam a utilização e a gestão de uma dada área.
	b) definição dos critérios de análise e classificação das UBCs	Estabelecimento de relação entre os fatores geoambientais, suas respectivas classes, e as classes da carta final. Traduz-se em uma regra de classificação (p.ex. tabelas de classificação, árvores lógicas, pesos e somatório de valores).
	c) cartografia final	É obtida através da aplicação da regra de classificação e consiste em atribuir, a cada UBC, uma das classes da carta geotécnica. Pode ser feita diretamente pelo executor da cartografia ou por meio de procedimentos informatizados.

3.1 Compartimentação Fisiográfica do Terreno

A etapa de Compartimentação Fisiográfica do Terreno consistiu em dividir a área continental do estado de São Paulo em unidades que apresentem homogeneidade quanto às características dos elementos componentes do substrato geológico, geomorfológico e pedológico, e que, portanto, determinam comportamentos específicos frente às ações e atividades antrópicas. Tais unidades, denominadas de Unidades Básicas de Compartimentação (UBC), foram obtidas segundo uma abordagem fisiográfica, a partir da análise sistemática de produtos de sensoriamento remoto.

Esta análise sistemática foi feita com base nas diferenças de homogeneidade, tropia e assimetria de elementos texturais e tonais de imagens, considerando-se ainda, propriedades e características da textura tais como: tipo de elemento textural, densidade de textura, arranjo textural, grau de estruturação e ordem de estruturação dos elementos, segundo abordagem adaptada de Soares & Fiori (1976).

Os trabalhos de fotointerpretação foram realizados com base em imagens digitais do satélite Landsat, composição colorida R(5), G(4), B(3), e com apoio de arquivos matriciais de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de diferentes fontes, tais como GISAT (DAEE 2008), TOPODATA (Valeriano 2008) e ASTER-GDEM (NASA/METI/AIST/JAPAN SPACESYSTEMS 2009). A interpretação foi realizada em escala de tela entre 1:50.000 e 1:75.000.

O procedimento para delimitação das UBCs consistiu na identificação de setores homogêneos definidos pelas características das formas e das propriedades dos elementos texturais observáveis em produtos de sensoriamento remoto (Vedovello 2000, Cardoso et al. 2009).

Para a contextualização das UBCs em termos de domínios fisiográficos, adotou-se como referência de classificação hierárquica/taxonômica a proposição de Ross & Moroz (1997) e, em parte, a proposta por Perrota et al. (2005), resultando na definição de quatro níveis de compartimentação, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Níveis hierárquicos utilizados na obtenção da compartimentação fisiográfica do estado de São Paulo.

Nível 1 – Unidades morfoestruturais e geotectônicas	Nível 2 – Unidades morfoesculturais e litoestratigráficas	Nível 3 – Unidades de relevo e litotipos	Nível 4 – Unidades Básicas de Compartimentação – UBC
Correspondem às grandes macroestruturas, como os escudos antigos, as faixas de dobramentos proterozóicos, as bacias paleomesozóicas e os dobramentos modernos e áreas de sedimentação cenozóicas. Estão representadas por determinadas características estruturais, litológicas e geotectônicas associadas às suas gêneses.	Correspondem aos compartimentos gerados pela ação climática ao longo do tempo geológico, sobre diferentes morfoestruturas. Revela morfologias resultantes de desgaste erosivo promovido por ambientes climáticos específicos e variáveis em ambientes tectônicos diferenciados, tanto atuais como pretéritos.	Correspondem aos conjuntos de formas de relevo e tipos litológicos, que constituem unidades resultantes dos processos intempéricos e de ações erosivas, associados a processos pedogenéticos, os quais em grande parte continuam atuando na modelagem do relevo. Apresentam variações locais e associada a sua localização geográfica.	Correspondem às associações específicas e aos locais de componentes morfológicos e morfométricos do relevo, de aspectos pedológicos, bem como de características e propriedades litológicas, tais como: grau de faturamento, foliação, etc. Refletem anisotropias e variações de organização e associação dos elementos que compõem a forma.

3.2 Caracterização Geotécnica e Geoambiental

A etapa de Caracterização Geotécnica e Geoambiental consiste em determinar, para cada unidade obtida na etapa anterior, propriedades e características dos materiais (solos, rochas e sedimentos) e das formas (tipos de relevo e processos morfogênicos) do meio físico que sejam deter-

minantes das condições geológico-geotécnicas relevantes para a aplicação pretendida.

Para ilustrar a aplicação do produto em análises e zoneamentos geoambientais, foi selecionado um conjunto de atributos considerados adequados para o cálculo de um índice de perigo de escorregamento para cada UBC. Tais índices seriam analisados e agrupados na etapa de cartografia final para a elaboração do Mapa de Perigo

de Escorregamento. No caso do estudo em pauta considerou-se os atributos compatíveis para tratar a ocorrência de escorregamentos do tipo planar raso. Os atributos selecionados foram: declividade, amplitude altimétrica, excedente hídrico, índice de foliação e densidade de drenagem. A Tabela 3 apresenta, de forma sintética, a descrição e a forma de obtenção dos atributos considerados.

Para cada atributo considerado foram inicialmente obtidos Planos de Informação (PI) em formato matricial. Sobre estes PIs foram realizadas operações de média zonal, tendo como restrição os polígonos das UBCs. Para os atributos declividade, excedente hídrico e densidade de drenagem foram obtidos os valores médios de cada polígono das UBCs, utilizando a ferramenta *Zonal Statistics as Table (Statistics type MEAN)*, do software Arc-Map 10.1. A amplitude altimétrica de cada polígono das UBCs foi obtida com base nos dados de altitude, utilizando-se a mesma ferramenta, sendo apenas alterado o tipo de estatística (*Statistics type RANGE*).

Para possibilitar a aplicação de uma fórmula de cálculo, os valores absolutos dos atributos foram padronizados para o intervalo 0-1, conforme a Equação [1], considerando-se como amostragem o estado de São Paulo.

$$\text{Atributo Normalizado} = [(V_n - V_{\min}) / (V_{\max} - V_{\min})] \quad \text{Equação [1],}$$

onde, V_n = valor a ser normalizado; $V_{\min}$ = valor mínimo da amostragem; $V_{\max}$ = valor máximo da amostragem.

Os polígonos das UBCs, obtidos na etapa anterior de compartimentação fisiográfica, foram associados a um banco de dados relacional contendo os atributos considerados. Com base neste procedimento foi possível a modelagem e o cálculo do índice de perigo a ser utilizado na etapa de cartografia final.

Tabela 3. Descrição e forma de obtenção dos atributos utilizados no cálculo do perigo de escorregamento do tipo planar raso para as UBCs.

Atributo	Descrição	Forma de obtenção
Amplitude (AM)	Representa o desnível entre o topo e a base da encosta. Quanto maior a amplitude maior a probabilidade de ocorrência do processo. Fonte: TOPODATA (Valeriano 2008). Unidade: metros.	Obtido a partir da interpolação de valores de cota de grades de 30x30m; obtenção da diferença entre cota máxima e cota mínima e cálculo de média zonal.
Declividade (DE)	Expressa a inclinação das vertentes. Quanto maior a declividade, maior a probabilidade de ocorrência do processo. Fonte: TOPODATA (Valeriano 2008). Unidade: graus.	Obtido a partir da interpolação de valores de cota do Modelo Digital de Elevação (MDE) em grades de 30x30m; e cálculo de média zonal.
Densidade de Drenagem (DD)	Expressa a permeabilidade e grau de fraturamento do terreno. Quanto maior a densidade de drenagem, maior a probabilidade de ocorrência do processo. Fonte: drenagem automática (CPLA 2013). Unidade: metros/m ² .	Obtido a partir da interpolação de valores de Densidade de Drenagem em grades de 90x90m; e cálculo de média zonal.
Índice de foliação (IF)	Expressa o grau de estruturação do terreno. Quanto maior o índice de foliação, maior a probabilidade de ocorrência do processo. Fonte: reclassificação das unidades geológicas. Unidade: adimensional.	Obtido a partir da reclassificação das unidades geológicas, considerando rochas sedimentares as menos foliadas e rochas xistosas as mais foliadas.
Excedente Hídrico (EH)	Expressa a quantidade de chuva. Quanto maior o excedente hídrico, maior a probabilidade de ocorrência do processo. Fator condicionante da variável "Perigo". Fonte: Armani et al. 2007. Unidade: milímetros.	Obtido a partir da interpolação de valores de Excedente Hídrico em grades de 200x200m; e cálculo de média zonal.

3.3 Cartografia Final de Síntese

A etapa de Cartografia Temática Final refere-se à classificação das Unidades Básicas de Compartimentação quanto às fragilidades e potencia-

lidades do terreno. Essa classificação é feita com base na análise das propriedades e características do meio físico, obtidas na etapa de caracterização geotécnica ou geoambiental, sendo determinada

através de critérios ou regras de classificação estabelecidas para cada aplicação pretendida.

No caso do presente trabalho, a cartografia final consistiu na obtenção de um Mapa de Perigo de Escorregamento para o estado de São Paulo. Como “Perigo” foi adotado o conceito proposto em ONU (2009), que o define como fenômeno, substância, atividade humana ou condição que pode causar perda de vidas, ferimentos ou outros impactos na saúde, danos às propriedades, perda de bens e serviços, distúrbios sociais e econômicos e danos ao meio ambiente.

Para exprimir o grau de perigo, foram estabelecidas seis classes, variando de P0 a P5, onde P0 representa uma probabilidade nula a quase nula de ocorrência do processo e P5 (Muito Alta) a probabilidade máxima de ocorrência do processo perigoso. As demais classes representam situações

intermediárias entre estes extremos: P4 (Alta), P3 (Média), P2 (Baixa) e P1 (Muito Baixa).

O critério de enquadramento para a classe P0 foi geomorfológico. Considerando-se apenas o perigo de escorregamento de encostas, todas as UBCs relacionadas às planícies foram diretamente classificadas como P0 (probabilidade nula a quase nula de ocorrência do processo). O critério de enquadramento das demais UBCs quanto às classes de perigo (P1 a P5), seguiu o modelo proposto nas equações [2] a [4], considerando três cenários de intervalos de declividade: Cenário 1 – Declividades entre 0-6° e maior que 24° (equação 2); Cenário 2 – Declividades entre 6-12° e 18-24° (equação 3); e Cenário 3 – Declividades entre 12-18° (equação 4). Os limites das classes de P1 a P5 foram definidos por meio do método das Quebras Naturais.

$$P_ESC=0,8*DE + 0,05*AM + 0,05*DD + 0,05*EH + 0,05*IF$$

Equação [2];

$$P_ESC=0,5*DE + 0,125*AM + 0,125*DD + 0,125*EH + 0,125*IF$$

Equação [3];

$$P_ESC=0,2*DE + 0,2*AM + 0,2*DD + 0,2*EH + 0,2*IF$$

Equação [4];

onde, P_ESC = perigo de escorregamento; DE = declividade; AM = amplitude altimétrica; DD=densidade de drenagem; EH = excedente hídrico; IF = índice de foliação.

4 RESULTADOS

Como resultado, foram obtidas as Unidades Básicas de Compartimentação do estado de São Paulo, hierarquizadas segundo domínios fisiográficos, as quais constituem um plano de informações que contém 24.221 polígonos vinculados a uma tabela de atributos com propriedades e características do terreno. Para o exemplo de aplicação foram obtidos os atributos que possibilitaram obter uma Mapa de Perigo de Escorregamento a partir da aplicação de critérios de classificação das UBCs quanto ao processo de escorregamento do tipo planar raso.

4.1 A Compartimentação Fisiográfica e as UBCs do estado de São Paulo

Os polígonos relativos às UBCs foram obtidos a partir de compartimentações sucessivas, definindo-se inicialmente os compartimentos referentes ao primeiro nível taxonômico adotado (Nível 1 – Unidades Morfoestruturais e Geotectônicas) e, posteriormente, se subdividindo as unidades desse primeiro nível em compartimentos referentes ao Nível 2, Nível 3 e Nível 4, sucessivamente. Os polígonos relativos a cada UBC obtida no nível 4 foram relacionados ao contexto hierárquico definido nos níveis anteriores, con-

forme sintetizado na Tabela 4. A Figura 1 exibe o conjunto de polígonos das UBCs para o estado de São Paulo e os cinco domínios fisiográficos relativos às morfoestruturas adotadas no Nível 1 da compartimentação.

Os procedimentos para a obtenção dos compartimentos de cada nível hierárquico, assim como da forma de utilização do Modelo Digital de Elevação (MDE), foram diversos tendo em vista as possibilidades de contraste mais apropriadas para a distinção das unidades e definição dos limites, devido às peculiaridades de cada ambiente

fisiográfico do estado de São Paulo. A forma de identificação e de delimitação das unidades de compartimentação nos quatro níveis hierárquico adotados para o Estado foi detalhada em SÃO PAULO (2014). Considerando que os procedimentos e critérios foram similares para todos os compartimentos obtidos em cada nível hierárquico, exemplifica-se na Figura 2 o uso de modelo de relevo sombreado, a hipsometria e a declividade para obtenção da compartimentação em cada nível hierárquico.

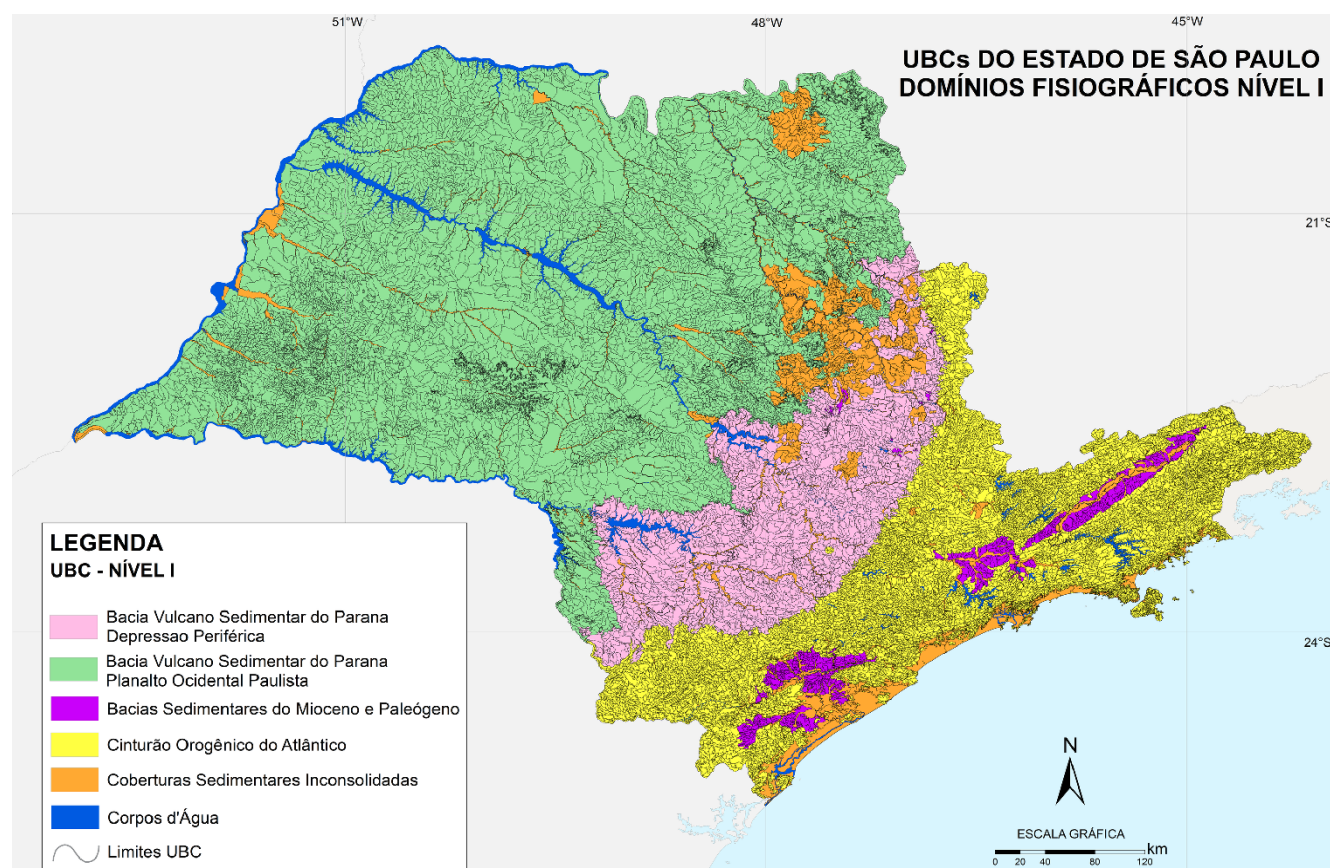


Figura 1. Conjunto de polígonos das UBCs para o estado de São Paulo e os cinco domínios fisiográficos relativos às morfoestruturas adotadas no Nível 1 da compartimentação.

A Figura 2 mostra que a hipsometria e a declividade permitem uma boa diferenciação dos compartimentos nos três primeiros níveis hierárquicos. Como exemplo, para o Nível Hierárquico 1, exemplifica-se a delimitação entre a Depressão Periférica e as unidades morfoestruturais adja-

centes, o Planalto Ocidental Paulista e o Cinturão Orogênico do Atlântico (Figura 2-1A, 1B, 1C).

O nível hierárquico 2 constituído pelas unidades morfoesculturais (depressões, planaltos, serras/escarpas e morros isolados) é exemplificado pela delimitação de serras/escarpas da região

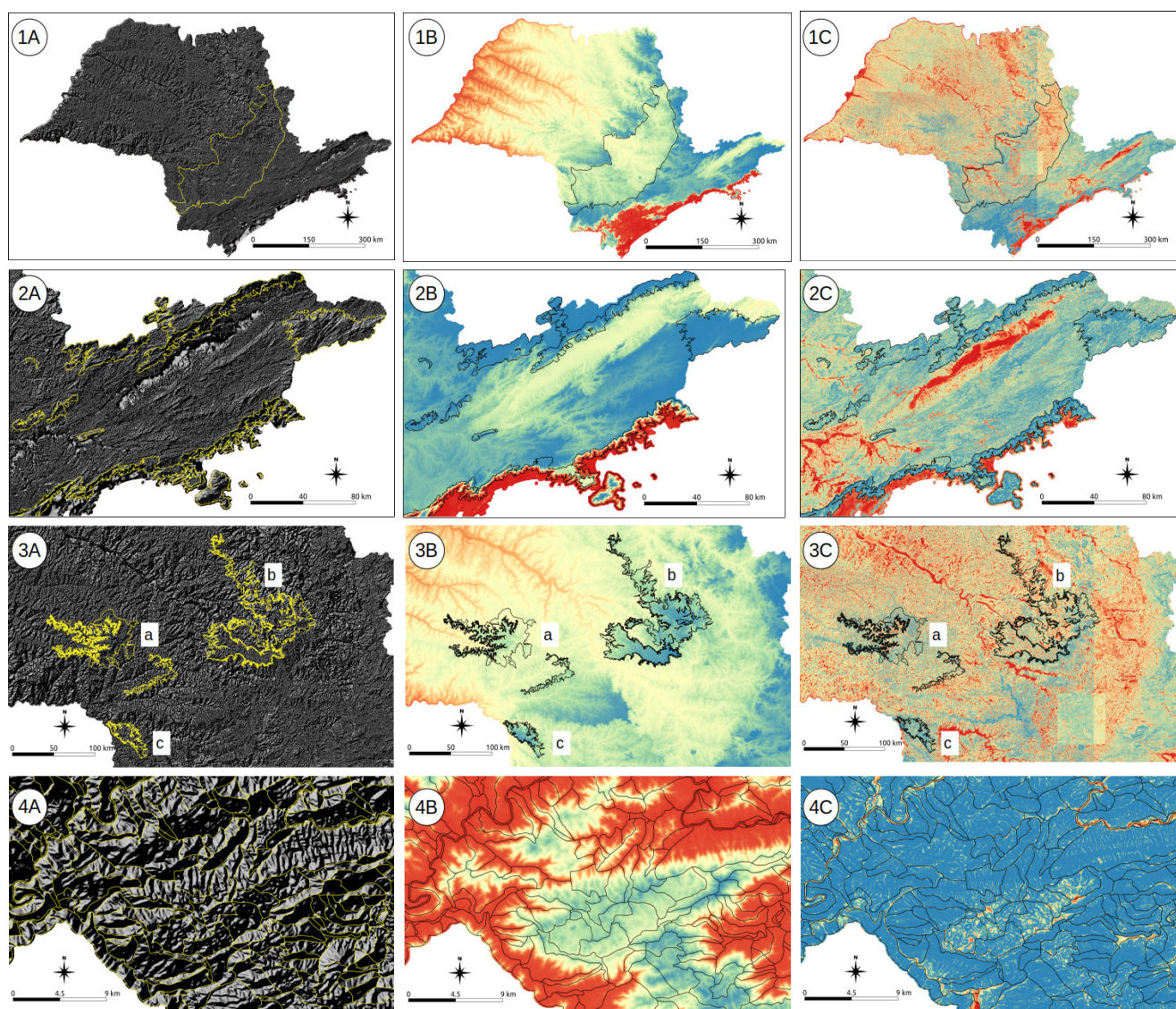


Figura 2. Exemplos de delimitação das unidades do níveis hierárquicos 1 (1A, 1B, 1C), 2 (2A, 2B, 2C), 3 (3A, 3B, 3C) e 4 (4A, 4B, 4C) com apoio de informações de modelo de relevo sombreado (coluna A), altitude (coluna B) e declividade (coluna C). a: Planalto Residual de Marília; b: Planalto Residual de São Carlos; c: Planalto Residual de Sarutaia.

leste do estado de São Paulo (Figura 2-2A, 2B, 2C), do Cinturão Orogênico do Atlântico, do nível hierárquico 2.

No nível hierárquico 3, as unidades morfoesculturais do nível anterior foram subdivididas considerando-se os tipos e formas de relevo associados entre si, diferenciados por sua localização geográfica. Exemplifica-se na Figura 2 (3A, 3B, 3C) as morfoesculturas dos planaltos residuais/escarpas de Marília, São Carlos e Sarutaia, do Planalto Ocidental Paulista (nível hierárquico 1) e Planaltos e Escarpas do nível hierárquico 2.

O Nível Hierárquico 4 o representa os menores compartimentos obtidos nesse estudo, considerando-se o nível de abordagem e escala de análise adotados, compreendendo as Unidades Básicas de Compartimentação. A Figura 2 (4A, 4B, 4C) ilustra um trecho da compartimentação referente ao Nível Hierárquico 4 das UBCs, para a unidade “Cinturão Orogênico do Atlântico”, “Planalto/Escarpas” e “Planalto Escarpas do Ribeira/Turvo”, respectivamente níveis hierárquicos 1, 2 e 3.

Tabela 4. Compartimentos fisiográficos obtidos para cada um dos níveis hierárquicos adotados.

Nível 1 – Unidades morfoestruturais e geotectônicas	Nível 2 – Unidades morfoesculturais e litoestratigráficas	Nível 3 – Unidades de relevo e litotipos	Nível 4 – Unidades Básicas de Compartimentação – UBC
Coberturas Sedimentares do Pleistoceno e Holoceno (Q)	Planícies Fluviais. Depósitos aluvionares associados à drenagem atual (A)	1 Paraná, 2 Paraíba do Sul, Ribeira, 3 Tietê, outros.	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
	Planícies Litorâneas. Depósitos marinhos, fluviais e mistos (L)	1 Iguape-Cananéia, 2 Praia Grande-Peruíbe, 3 Santista, 4 Bertioja, 5 Litoral Norte, outros.	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
	Depósitos coluvionares e de tálus; depósitos colúvio-eluvionares; e coberturas detríticas indiferenciadas (C)	Planaltos, Serras, etc com depósitos coluvionares associados e com referência a localização geográfica (N).	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
Bacias Sedimentares do Terciário (Mioceno e Paleógeno) (T)	Sem subdivisão nesse nível (X)	1 Planalto de São Paulo, 2 Depressão Médio Paraíba, 3 Depressão do Baixo Ribeira, 4. Formação Rio Claro, outros	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
Bacia Vulcano- Sedimentar do Paraná – Depressão Periférica (Paleozóico-Triássico) (D)	Depressão indiferenciada (D), Planaltos, (símbolo P), serras/escarpas (E), morros isolados (M)	1 Depressão Moji-Guaçu, 2 Depressão Médio Tietê, 3 Depressão Parapanema, Outros	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
Bacia Vulcano- Sedimentar do Paraná – Planalto Ocidental Paulista (Jurássico-Cretáceo) (O)	Planalto Centro Ocidental indiferenciado (O), Planaltos (P), serras/escarpas (E), morros isolados (M)	1 Planalto Centro Ocidental, 2 Planalto em Patamares Estruturais de Ribeirão Preto, 3 Planaltos Residuais de Franca/Batatais, 4 Planalto Residual de São Carlos, outros	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
Cinturão Orogênico do Atlântico (Proterozóico) (P)	Planaltos (P), serras/escarpas (E), morros isolados (M)	1 Planalto da Mantiqueira, 2 Planalto da Bocaina, 3 Planalto de Paraitinga/Paraibuna, outros	UBC1(U1), UBC2(U2), etc.
Corpos D'Água			

4.2 A Caracterização das UBCs – tabela de atributos

Após a delimitação dos polígonos, procedeu-se a caracterização das unidades de compartimentação. Esta etapa foi realizada sobre a tabela de atributos associada às UBCs (*shapefile*), a qual contém a estruturação dos níveis hierárquicos já apresentados na Tabela 4 e suas classes de atributos exibidas na Tabela 3. Com base nesta tabela também foram realizados a modelagem e o cálculo do perigo de escorregamento. Inicialmente, foram selecionados os atributos que constituem

fatores de análise na equação do perigo de escorregamento, sendo eles: 1) declividade, 2) índice de foliação, 3) amplitude altimétrica, 4) excedente hídrico, e 5) densidade de drenagem. A Tabela 5 discrimina os atributos de cada UBC associado ao *shapefile*.

Nas tabelas também foram incluídas informações sobre os valores das classes e do índice de perigo, obtido conforme os procedimentos detalhados no item 3.3. A inserção destas informações permite atualizações ou revisões dos atributos e critérios de obtenção dos mapas a partir de processamento automático.

Tabela 5. Tabela de atributos associada às UBC (*shapefile*).

Coluna	Descrição
NIVEL_1	Unidades morfoestruturais
NIVEL_2	Unidades morfoesculturais
NIVEL_3	Unidades morfoesculturais classificadas segundo a localização geográfica
NIVEL_4	Unidade Básica de Compartimentação – UBC
DECLIV_MED	Declividade média em graus
AMPLIT_ALT	Amplitude altimétrica em metros
E_HIDR_MED	Média do excedente hídrico em milímetros
DDREN_MED	Média da densidade de drenagem em metros/m ²
DECLIV_N	Declividade média em graus normalizada
E_HIDR_N	Média do excedente hídrico em milímetros normalizada
DDREN_N	Média da densidade de drenagem em metros/m ² normalizada
AMPLIT_N	Amplitude altimétrica em metros normalizada
FOLIACAO	Intensidade de foliação
P_ESC_CLAS	Classes de perigo de escorregamentos para o estado de São Paulo
P_ESC_IND	Índice de perigo de escorregamentos para o estado de São Paulo

4.3 O Mapa de Perigo de Escorregamento

Para ilustrar a aplicação do método, foi feita uma análise de perigo escorregamento. Como produto resultante dessa análise foi gerado o Mapa de Perigo de Escorregamento do Estado de São Paulo, obtido a partir da aplicação das regras de associação dos atributos selecionados, apresentadas nas equações [2] a [4], item 3.3.

O mapa obtido refere-se especificamente ao perigo de escorregamento translacional raso e contempla seis classes de perigo, variando de muito baixo a muito alto, conforme apresentado na Figura 3 e descritas a seguir:

Nulo a quase nulo (P0) – Terrenos planos com probabilidade extremamente baixa a nula de ocorrência de escorregamentos planares esparsos.

Muito Baixo (P1) – Terrenos geralmente pouco inclinados, com probabilidade muito baixa de ocorrência de escorregamentos planares esparsos, de pequenos volumes, associados com acumulados de chuva excepcionais.

Baixo (P2) – Terrenos geralmente com inclinações muito baixas a baixas, com probabilidade baixa de ocorrência de escorregamentos planares esparsos, de pequenos volumes, associados, inicialmente, com acumulados de chuva moderados,

podendo evoluir para escorregamentos de proporções intermediárias, com acumulados de chuva muito altos a altos.

Moderado (P3) – Terrenos geralmente com inclinações moderadas a altas, com probabilidade moderada de ocorrência de escorregamentos planares esparsos, de volumes pequenos a intermediários, associados, inicialmente, com acumulados de chuva baixos, podendo evoluir para escorregamentos de grandes proporções, com acumulados de chuva altos a moderados.

Alto (P4) – Terrenos geralmente com inclinações altas com probabilidade alta de ocorrência de escorregamentos planares esparsos, de volumes pequenos a grandes, associados, inicialmente, com acumulados de chuva baixos, podendo evoluir para escorregamentos de grandes proporções com acumulados de chuva maiores moderados a baixos.

Muito Alto (P5) – Terrenos geralmente com inclinações altas a muito altas com probabilidade muito alta de ocorrência de escorregamentos planares esparsos, de volumes pequenos a grandes, associados, inicialmente, com acumulados de chuva muito baixos, podendo evoluir para escorregamentos de elevadas proporções com acumulados de chuva baixo a muito baixos.

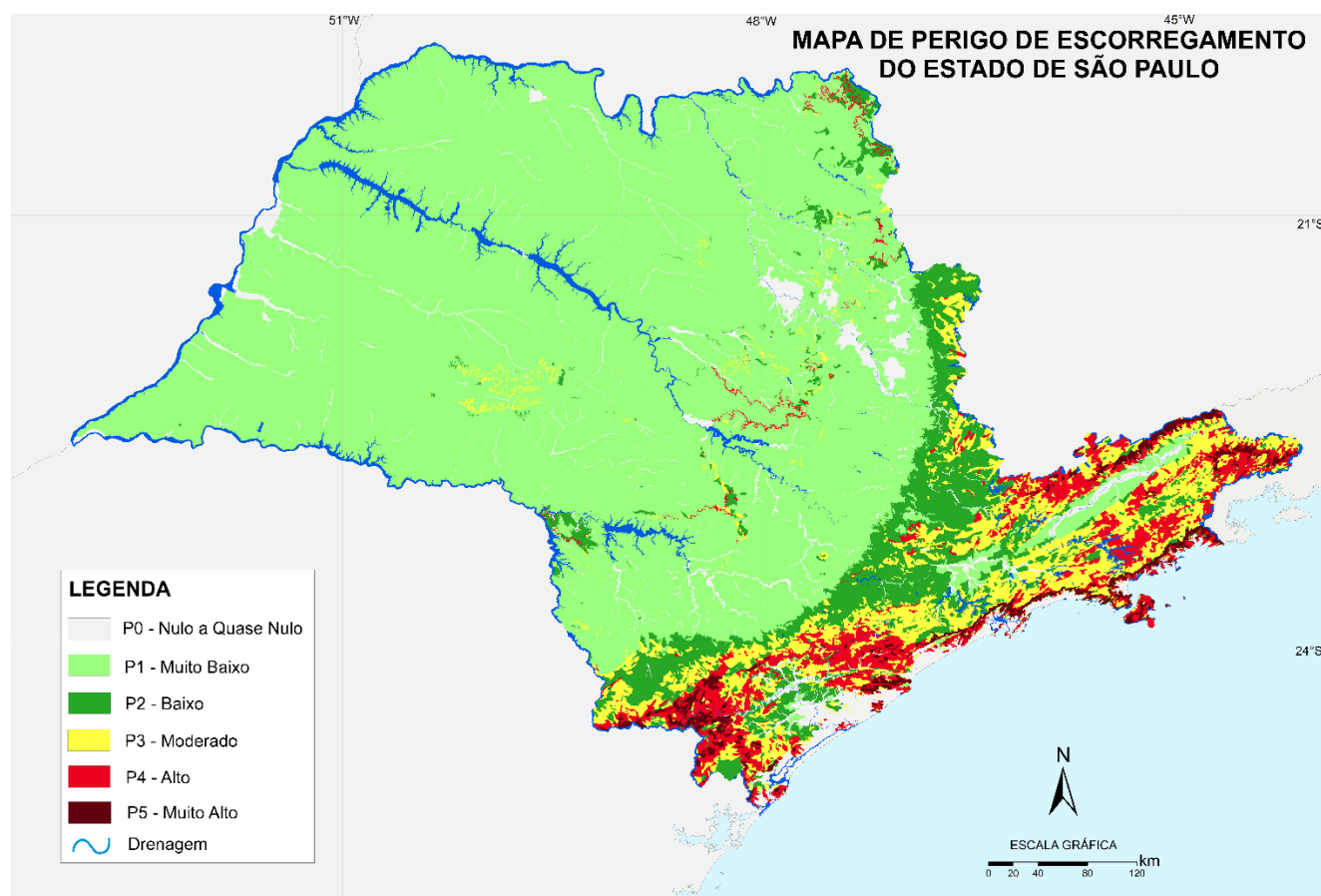


Figura 3. Mapa de Perigo de Escorregamento Planar Raso do estado de São Paulo.

5 CONCLUSÃO

A obtenção de um plano de informação com a compartimentação do terreno em diferentes níveis hierarquizados, obtida de forma contínua e uniforme, para o estado de São Paulo é fundamental para subsidiar avaliações geoambientais a serem incorporadas em atividades e instrumentos de planejamento ambiental territorial. Tal produto é essencial uma vez que representa a diversidade de associações dos materiais e formas que constituem o substrato geológico, geomorfológico e pedológico.

O método proposto, relativo a uma cartografia de síntese em escala regional, baseada em uma compartimentação de caráter fisiográfico e com a obtenção de Unidades Básicas de Compartimentação (UBC), permite a manutenção de uma base permanente de unidades, que podem ser visualizadas com facilidade no terreno e classificadas para obtenção de produtos geoambientais diver-

sos associados às potencialidades e fragilidades do terreno.

Quanto aos aspectos específicos da abordagem, destacam-se três características importantes: a) os quatro níveis hierárquicos que determinam as UBCs, constituem um produto simples, aberto e flexível, constituído por apenas um arquivo em formato ESRI *shapefile*; b) a obtenção de atributos numéricos expressos na forma de camadas matriciais, permite especializar uma variação contínua de indicadores e índices, cujas médias podem ser extraídas para outros polígonos de interesse a partir de procedimentos de médias zonais; c) a abordagem regional, bem como a abrangência estadual do produto, espacializado de forma contínua, em escala compatível com 1:75.000 e com resolução de 30m, permite a realização de análises regionais com homogeneidade de atributos e de critérios de compartimentação e de caracterização do terreno, e consequentemente sua utilização nos mais diversos instrumentos de ordenamento do território.

Destaca-se também, conforme indicado por Vedovello et al. (2002), que, por serem as menores unidades de coleta, armazenamento e análise de dados para a escala do produto, as UBCs podem ser utilizadas como Unidades Básicas de Gerenciamento de Banco de Dados (UBGBDs) em sistemas gerenciadores de informações geográficas. Tal fato permite a obtenção automatizada de mapas derivados, bem como favorece a consulta ao conjunto de atributos e às funções e operações definidas para a obtenção de tais mapas. Permite, ainda, a atualização ou aperfeiçoamento das análises sem a necessidade de geração de novos elementos gráficos, uma vez que a inserção de novos atributos ou parâmetros, bem como a aplicação dos critérios de obtenção dos mapas, estão vinculados aos limites das unidades básicas de compartimentação.

Não obstante a importância das UBCs para o entendimento do território, destaca-se que o estudo do substrato geológico-geomorfológico-pedológico e processos associados constitui uma das etapas para obtenção de uma unidade de análise espacial que exprima toda a complexidade do território (Ferreira & Rossini-Penteado 2011, Ferreira et al. 2013). Como apontado por Vedovello (2000), o estudo do meio físico, quer seja no desenvolvimento metodológico, tecnológico, quer seja nas formas de representação, deve adequar-se à análise integrada com outras variáveis ambientais e socioeconômicas e culturais, especialmente no campo da análise de risco de eventos geodinâmicos. Neste sentido, a associação das unidades cartográficas definidas pelas UBCs com as unidades cartográficas de uso e ocupação do território, definidas como Unidades Homogêneas de Cobertura e Uso da Terra e Padrão da Ocupação – UHCT (São Paulo 2016), permite a obtenção de Unidades Territoriais Básicas – UTB (São Paulo 2017) que apresentam grande aplicabilidade em estudos de zoneamento territorial, tais como: Zoneamentos Ecológico-Econômicos, Planos de Manejo de Unidades de Conservação, Planos Diretores Municipais, dentre outros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao FEHIDRO (empreendimento 2010-CORHI-112) pelo suporte fi-

nanceiro e à FUNCATE – Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais pela realização dos trabalhos de delimitação das UBCs (contrato Nº 1/2013/CPLA).

REFERÊNCIAS

- Armani G.; Tavares R.; Silva M.G. 2007. Mapeamento digital do balanço hídrico climatológico do Município de Ubatuba – SP. In: Simp. Bras. Geografia Física Aplicada, 12, Natal, RN. Anais... Departamento de Geografia/CCHLA/UFRN, p. 747-764. CD-ROM.
- Cardoso D., Riedel P.S., Vedovello R., Brollo M.J., Tominaga L.K. 2009. Compartimentação fisiográfica do município de Peruíbe, litoral de São Paulo – uma abordagem metodológica como subsídio a avaliação geotécnica de terrenos. Pesquisas em Geociências, 36(3):251-262.
- Cendrero A. 1997. Indicadores de desarrollo sostenible para la toma de decisiones. Naturzale, 12:5-25.
- Cendrero A., Frances A., Del Corral D. 2004. Environmental quality indices: a tool for assessing and monitoring geoenvironmental map units. In: Pejon O. & Zuquette L. (eds.), 2004. Anais do 5º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, São Carlos, SP. p. 525 -564.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). 2008. Base cartográfica digital, escala 1:50.000 – Projeto GISAT. São Paulo: DAEE, 2008.
- Fernandes da Silva P.C., Vedovello R.; Ferreira C.J., Brollo M.J., Fernandes A.J., Cripps J.C. 2010. Geo-environmental mapping using physiographic analysis: constraints on the evaluation of land instability and groundwater pollution hazards in the Metropolitan District of Campinas, Brazil. Environmental Earth Sciences, Vol.59, p.124.
- Ferreira C.J. & Rossini-Penteado D. 2011. Mapeamento de risco a escorregamento e inundação por meio da abordagem quantitativa da paisagem em escala regional. In: ABGE, Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia

e Ambiental, 11, 2011, São Paulo. Anais... São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2011. CD-ROM.

Ferreira C.J., Rossini-Penteado D., Guedes, A.C.M. 2013 O uso de sistemas de informações geográficas na análise e mapeamento de risco a eventos geodinâmicos. In: LOMBARDO M.A. & FREITAS M.I.C (org.): Riscos e Vulnerabilidades: Teoria e prática no contexto Luso-Brasileiro. Cultura Acadêmica-Editora UNESP, São Paulo, p.:155-188.

IAEG – INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY. 1970. Reports of two working groups. Bulletin da IAEG, 6, 1970.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1994. Carta Geotécnica do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000. São Paulo. (Publicação, 2089). Vol. I e II. 1, 22 p.

Mattos J.T., Pupim F.N., Jiménez-Rueda J.R., Caetano N.R., Coelho J.O.M., Moura C.A., Daitx E.C. 2007. Zoneamento Geoambiental da região de Campo Grande-MS a partir da interpretação de imagens orbitais ETM+/Landsat-7: base para o planejamento ambiental. In: INPE, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, p.5365-5372.

Mitchell C.W., 1973. Terrain Evaluation: the world's landscapes. London: Longman, 221p.

NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems. 2009. ASTER Global Digital Elevation Model V002. 2009, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC.

Ohara T., Jiménez-Rueda J.R., Mattos J.T., Caetano N.R. 2003. Zoneamento geoambiental da região do alto-médio rio Paraíba do Sul e a carta de aptidão física para a implantação de obras viárias. Revista Brasileira de Geociências, 33(2-Supl.):173-182.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS 2009. Terminology on Disaster Risk Reduction. Estratégia Internacional para Redução de Desastres. Organização das Nações Unidas.

Disponível em <http://www.unisdr.org/eng/library/lib-terminology-eng.htm>. Acessado em 06 mai 2009.

Perrota M.M., Salvador E.D., Lopes R.C., D'Agostinho L.Z., et al. 2005. Mapa geológico do estado de São Paulo, escala 1:750.000. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil, CPRM, São Paulo, 2005.

Ross J.L.S. & Moroz I.C. 1997 Mapa geomorfológico do estado de São Paulo. São Paulo: Departamento de Geografia- FFLCH-USP. 2 volumes, Mapas e Relatório.

SÃO PAULO. Estado. 2014. Unidades Básicas de Compartimentação do Meio Físico (UBC) do Estado de São Paulo. INSTITUTO GEOLÓGICO; COORDENADORIA DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL, SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2014. Ficha Técnica, arquivos digitais formatos pdf e shapefile.

SÃO PAULO. Estado. 2016. Sistema de classificação Unidades Homogêneas de Cobertura da Terra e do Uso e Padrão da Ocupação Urbana (UHCT) e Mapeamento da Vulnerabilidade de Áreas Urbanas de Uso Residencial/comercial/serviços a Eventos Geodinâmicos do Estado de São Paulo. INSTITUTO GEOLÓGICO; COORDENADORIA DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL/ SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2016. Ficha Técnica, arquivos digitais formatos pdf e shapefile.

SÃO PAULO. Estado. 2017. Sistema de classificação “Unidades Territoriais Básicas” (UTB) e mapeamento de risco de áreas urbanas de uso residencial/comercial/ serviços à eventos geodinâmicos do estado de São Paulo. INSTITUTO GEOLÓGICO, 2017. Ficha Técnica, arquivos digitais formatos pdf e shapefile.

Soares P.C. & Fiori A.P. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. Notícias Geomorfológicas, 6(32):71-104.

Tominaga L.K., Ferreira, C.J., Vedovello R., Tavares R., Santoro J., Souza C.R.deG. 2004. Cartas

de perigo a escorregamentos e de risco a pessoas e bens do Litoral Norte de São Paulo: conceitos e técnicas. In: Pejon O. & Zuquette L. (eds.), 2004. Anais do 5º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, São Carlos, SP. p.: 5-216.

Valeriano M.M. 2008. TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. INPE, 2008. Disponível em: <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>.

Vedovello R. 2000. Zoneamentos geotécnicos aplicados à gestão ambiental, a partir de unidades básicas de compartimentação - UBCs. Tese de Doutorado. IGCE, UNESP, Rio Claro. 154p.

Vedovello R., Riedel P., Brollo, M.J., Hamburger D.S., Camargo, A.A.X. 2002. Modelagem e arquitetura de um sistema gerenciador de informações geoambientais (SGIG) como produto de avaliações geológico-geotécnicas. In: ABGE, Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 10, Ouro Preto, 2002. Anais, São Paulo: ABGE, 2002. CD-ROM.