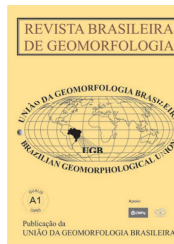


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 18, nº 4 (2017)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v18i4.1210>



COMPORTAMENTO DE ANÁLISES EM SUPERFÍCIE PLANIMÉTRICA E MODELADA FRENTE A REPRESENTAÇÕES CARTOGRÁFICAS E ÍNDICES GEOMORFOLÓGICOS - BACIA DO RIO CUIABÁ - PETRÓPOLIS (RJ)

BEHAVIOR OF ANALYZES ON PLANIMETRIC AND MODELED SURFACES IN RELATION CARTOGRAPHIC REPRESENTATIONS AND GEOMORPHOLOGICAL INDEXES - CUIABÁ RIVER BASIN - PETRÓPOLIS (RJ)

Manoel do Couto Fernandes

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 21941-916. Brasil
Email: manoel.fernandes@ufrj.br*

Luis Felipe Barreto de Oliveira

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 21941-916. Brasil
Email: luisfelipe.b.oliveira@gmail.com*

Igor Vieira Vargas Colares

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 21941-916. Brasil
Email: igorcolares@ufrj.br*

Rodrigo Sá de Araújo

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 21941-916. Brasil
Email: rodrigoaraujo.ufrj@gmail.com*

Pedro Henrique Muniz Lima

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. CEP: 21941-916. Brasil
Email: pedrohe@gmail.com*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):

20/01/2017

Aceito (Accepted):

20/06/2017

Palavras-chave:

Índices Geomorfológicos;
Densidade de Drenagem; Índice
de Eficiência de Drenagem;

Resumo:

Existe uma série de alternativas para trabalhar com a dimensionalidade dos elementos de uma paisagem, e mesmo assim o geoprocessamento possui uma limitação estabelecida pela não consideração da irregularidade do espaço a ser analisado. Neste sentido, a análise em superfície modelada apresenta uma acuracidade maior no que tange a mensurações na paisagem, como é o caso de análises geomorfológicas. Com o intuito de fornecer mais um subsídio de como as diferentes observações em superfície planimétrica e modelada podem se comportar mediante as mensurações morfológicas, o presente trabalho busca

Superfície Modelada; Eixo de Concavidade.

Keywords:

Geomorphological Indices; Drainage Density; Drainage Efficiency Index; Modeled Surface; Hollow.

comparar resultados de índices geomorfológicos obtidos a partir destes dois tipos de observações na bacia do rio Cuiabá, localizada no município de Petrópolis (RJ). Todo estudo foi desenvolvido na escala de 1:10.000, compilada das bases topográficas onde foram construídos os índices geomorfológicos em superfície planimétrica, tais como Gradiente topográfico (Gt), Densidade de drenagem (Dd) e Índice de Eficiência de Drenagem (IED). Estes índices foram extraídos para as 41 bacias de segunda ordem que compõem a bacia do Rio Cuiabá. Os índices Dd e IED foram aplicados à superfície modelada a partir de um modelo digital de

elevação (MDE), que teve como fonte os dados planialtimétricos da base cartográfica. Além destes dois índices, foi considerado também o eixo de concavidade para estas bacias de segunda ordem, o qual faz parte do sistema de escoamento superficial juntamente com a hidrografia. Resultados mostraram um significativo aumento dos valores de área de bacia e comprimento de drenagem para superfície modelada em relação à planimétrica, respectivamente 18,8% e 5,31%. Quando somado o eixo de concavidade à hidrografia, foi obtido um percentual de diferença de 8,19% para a drenagem total. Estes valores foram decisivos para a modificação dos resultados de Densidade de drenagem e do Índice de Eficiência de Drenagem, os quais tiveram um decréscimo médio de respectivamente -9,52% e -9,62%. Com isto, as representações cartográficas geradas a partir das observações em superfície modelada apresentaram diferenciações em relação às elaboradas com observações planimétricas. Além disso, o uso das observações em superfície modelada se apresentou mais representativo quando da análise dos resultados frente aos movimentos de massa investigados na área de estudo. Este quadro aponta para novas possibilidades de análises morfométricas, pois estas observações podem ser utilizadas em outras investigações ou em novas interpretações geomorfológicas, apurando cada vez mais o entendimento das dinâmicas hidrológicas e erosivas de uma paisagem.

Abstract:

There are a number of alternatives to work with the dimensions of the elements of a landscape, such as the use of digital elevation models (DEM), and even then the GIS has a limitation established by not considering the irregularity of the space to be analyzed. In this sense, the analysis in the pattern surface has a greater accuracy regarding the measurements in the landscape, as in the case of geomorphological analysis. In order to provide more subsidy of how different observations in planimetric and modeled surface behave by variations of size and morphological measurements, this work seeks to compare results of geomorphological indices obtained from these two types of observations in the Cuiabá river basin, located in the municipality of Petrópolis (RJ). Every study was developed on the scale of 1:10,000 topographic compiled bases provided by the city of Petrópolis (RJ). From this base were built geomorphological indices in planimetric surface. Indexes works are: Topographic Gradient (Tg), drainage density (Dd) and Drainage Efficiency Index (DEI), which were extracted for 41 second order basins of the Cuiabá River basin. The Dd and DEI indices were applied to the surface modeled from a digital elevation model (DEM) that had as its source the planialtimetric data of the cartographic base. In addition to these two indices, it was also considered the hollows for these second order basins, which is part of the surface runoff system together with the hydrography. Results showed a significant increase in modeled surface compared to planimetric, mainly in relation to basin area and drainage length measurements, with an increase of 18.8% and 5.31%, respectively. When the hollows were added to the hydrography, a percentage difference of 8.19% was obtained for the total drainage. These values were decisive for the modification of the results of drainage Density and Drainage Efficiency Index, which had a mean decrease in their respective values of -9.52% and -9.62%. With this, the cartographic representations generated from the observations in the modeled surface presented differentiations in relation to those elaborated with planimetric observations. In addition, the use of the observations on modeled surface was more representative when analyzing the results in relation to the mass movements investigated in the study area. This framework points to new possibilities of morphometric analysis, since these observations can be used in other analyzes or in new geomorphological interpretations, increasing the understanding of the hydrological and erosive dynamics of a landscape.

Introdução

Parâmetros morfométricos ganharam notoriedade principalmente com a criação da Densidade de drenagem apresentado por Robert Elmer Horton (HORTON 1932, 1945). A partir destes trabalhos, os parâmetros morfométricos começaram a ser aplicados frequentemente por geomorfólogos na busca da compreensão das funcionalidades da paisagem, tendo como unidade de análise a bacia de drenagem. Haggett & Chorley (1969) e Gregory (1992) reconhecem o importante papel desempenhado por Horton, citando-o como o precursor de duas linhas de trabalho: uma, saindo da geomorfologia para a análise localizacional; e a outra, para o estudo das bacias de drenagem como a unidade geomorfológica fundamental.

No tocante às pesquisas morfométricas relacionadas às bacias de drenagem, salienta-se trabalhos como: Strahler (1952, 1954, 1957 e 1958); Smith (1950 e 1958); Miller (1953); Schumm (1956); Leopold & Miller (1956); Maxwell (1956); Leopold & Marchand (1968); dentre outros. Segundo Gregory & Walling (1973), para a compreensão das relações entre sistemas morfológicos e o processo de resposta desse sistema é necessário a expressão das características das bacias de drenagem em termos quantitativos. Assim, a partir de uma análise interdisciplinar que une bases matemáticas com as ciências da terra, o termo geomorfometria ganha destaque. Este pode ser definido como a ciência da análise quantitativa da superfície terrestre, que através de aparatos tecnológicos apresenta uma série de parâmetros e índices que auxiliam na compreensão de fenômenos e relações inerentes às ciências da terra como a geografia e mais especificamente a geomorfologia (PIKE *et al.*, 2009).

No Brasil, estes índices são apresentados por Antonio Christofolletti (CHRISTOFOLETTI, 1969), que sumariza os principais parâmetros geomorfológicos aplicáveis às bacias de drenagem em sua obra. Dentre estes parâmetros podemos salientar a Densidade de drenagem (Dd) sugerida por Horton (1945). A partir da Densidade de drenagem, muitos outros parâmetros foram criados, dentre eles, o Índice de Eficiência de Drenagem (IED) criado por Coelho Netto *et al.* (2007), que ao buscar compreender a dinâmica hidrológica e erosiva dos domínios de colinas da bacia do rio Bananal (RJ/SP), revelaram a importância da densidade de eixos de concavidade, que associados ao Gradiente topográ-

fico (MEIS *et al.*, 1982), exerciam um controle sobre a eficiência dos fluxos d'água ao longo dos eixos das concavidades de modo a ativar a erosão regressiva do canal. Este índice é resultado de uma síntese de parâmetros, como a Densidade de drenagem e o Gradiente topográfico. Este indica as possibilidades de saída de fluxos superficiais na desembocadura das bacias analisadas, sugerindo áreas com capacidades de drenagem distintas, funcionando assim como um indicador da permanência da água no sistema hidrográfico e da energia potencial para deslocamento de materiais por erosão hídrica (COUTINHO, 2011). Juntos, estes parâmetros refletem uma condicionante geomorfológica do tempo de resposta do escoamento das chuvas, ou seja, enquanto os baixos valores refletem a estocagem de água nas encostas favorecendo as ocorrências de movimentos translacionais ou rotacionais, os altos valores refletem condições favoráveis à produção de fluxos detríticos. Sua aplicação destina-se a bacias de primeira ou segunda ordem, por estas refletirem os comportamentos dinâmicos e hidrológicos representativos dos domínios de encostas (LIMA, 2015). Assim, é possível a análise comparativa entre bacias, indicando aquelas onde há maior ou menor permanência de água no sistema, e a partir disso, aquelas com potencial de fluxos erosivos ou de deposição de maiores e menores intensidades.

Ao revelar o Gradiente topográfico e a Densidade de drenagem de bacias de mesma ordem hierárquica, este índice proporciona uma leitura em três dimensões da dinâmica hidrológica e erosiva da paisagem (FERNANDES, 2009). Neste sentido, é importante salientar que as leituras tradicionais de apoio às análises geomorfométricas, baseadas em cartas topográficas ou em sistemas de informações geográficas com informações bidimensionais, podem mascarar leituras de uma série de parâmetros, pois não consideram a dimensionalidade dos dados e informações a serem trabalhados, os quais são geralmente avaliados a partir de observações de elementos em superfície planimétrica (SP) e não em superfície modelada (SM). Isto pode interferir na interpretação das variáveis geomorfológicas, principalmente em paisagens com relevo acidentado, como mensurações de áreas e comprimento de feições, a exemplo de área de bacias e comprimento de drenagens (figura 1). É importante salientar que o uso de observações em superfície modelada é uma possibilidade que ganha maior praticidade a partir do emprego do geoprocessamento, onde é possível analisar as estruturas da paisagem de

forma tridimensional, contrastando-as com as observações planimétricas feitas de forma direta a partir de cartas topográficas, fotografias aéreas e outros insumos para análises geomorfológicas. Partindo desse princípio, Fernandes *et al.* (2012) destacam a importância das observações de superfície modelada em avaliações geomorfológicas, para a busca do entendimento funcio-

nal das diferentes estruturas morfológicas da superfície terrestre. Deste modo, as observações em superfície modelada, que primam por leituras mais aprimoradas da estrutura baseada na morfologia da superfície da paisagem, podem revelar diferentes funcionalidades das unidades de análise assumidas em relação às observações planimétricas.

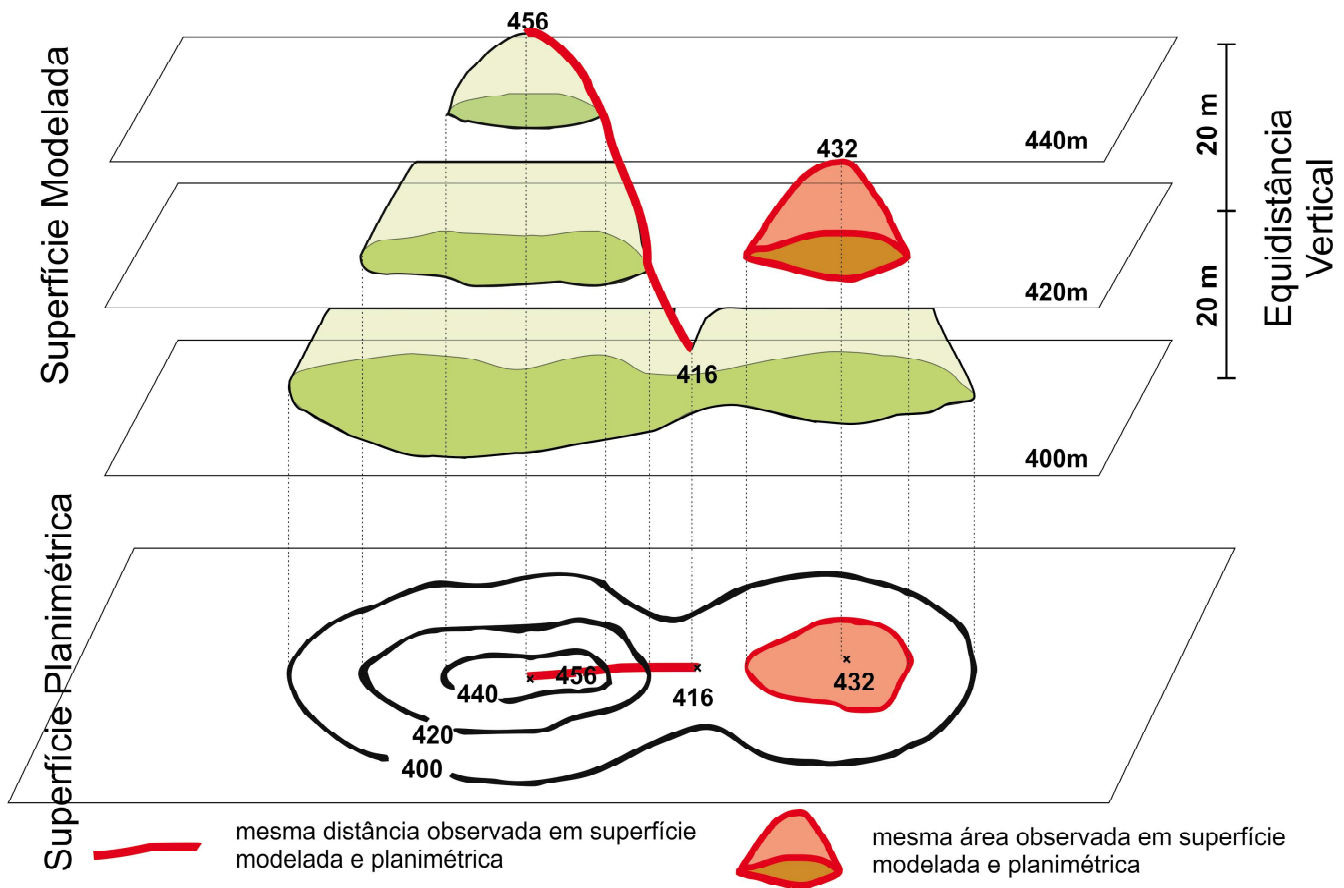


Figura 1 - Representação de uma superfície tridimensional em cartas topográficas por curvas de nível, apresentando uma área e distância qualquer em superfície modelada (SM) e planimétrica (SP) (adaptado de MENEZES & FERNANDES, 2013).

Face ao exposto, o objetivo deste trabalho gira em torno da discussão do uso de observações em superfície modelada (SM) e planimétrica (SP) na definição parâmetros morfométricos, mais especificamente o IED, buscando entender como estas podem influenciar na representação espacial destes parâmetros em mapas temáticos, e na interpretação das funções hidrológicas e erosivas em paisagens com relevo acidentado. Para tanto, foi utilizado como área de estudo a bacia do rio Cuiabá, situada no Vale do Cuiabá, localidade do município de Petrópolis. A construção de conhecimentos geomorfológicos nesta bacia é envolto de importância, na medida em que nela foram registrados 341 desliza-

mentos durante os eventos catastróficos que marcaram a Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro em janeiro de 2011 (Figura 2).

Área de estudo

O Vale do Cuiabá é formado por uma bacia de drenagem cujo rio principal dá nome ao Vale. Esta bacia hidrográfica é do tipo circular, apresenta uma pequena variação litológica e um controle estrutural proeminente, que confina o rio principal, rio Cuiabá, em uma fratura que se estende no sentido NE-SO. Assim este rio se apresenta bem encaixado, recebendo

do os fluxos d'água provenientes de encostas muito íngremes. O desnível altimétrico é de 1100 m, tendo o pico Maria Antonieta como seu ponto culminante (1860 m) e a área mais baixa na foz do rio Cuiabá (760 m). Este forte desnível altimétrico em uma área relativamente pequena (36,19 Km² em superfície planimétrica) resulta em declives acentuados que muitas vezes superam os 75% de declividade. Este quadro físico agrava enormemente os riscos de deslizamentos e transbordamento dos rios na região após eventos de

chuvas de grande intensidade. Esta localidade foi palco de uma série de deslizamentos em 12 de fevereiro de 2011 que causaram inúmeras perdas humanas e materiais, e marcaram profundamente a região (Figura 3 e 4). A maioria dos deslizamentos ocorridos é do tipo translacional raso e ocorre em um plano de ruptura definido, geralmente côncavo. Outra característica é a forma repentina de ocorrência, com curta duração e associada a solos saturados, mostrando uma relação com o índice de eficiência de drenagem.

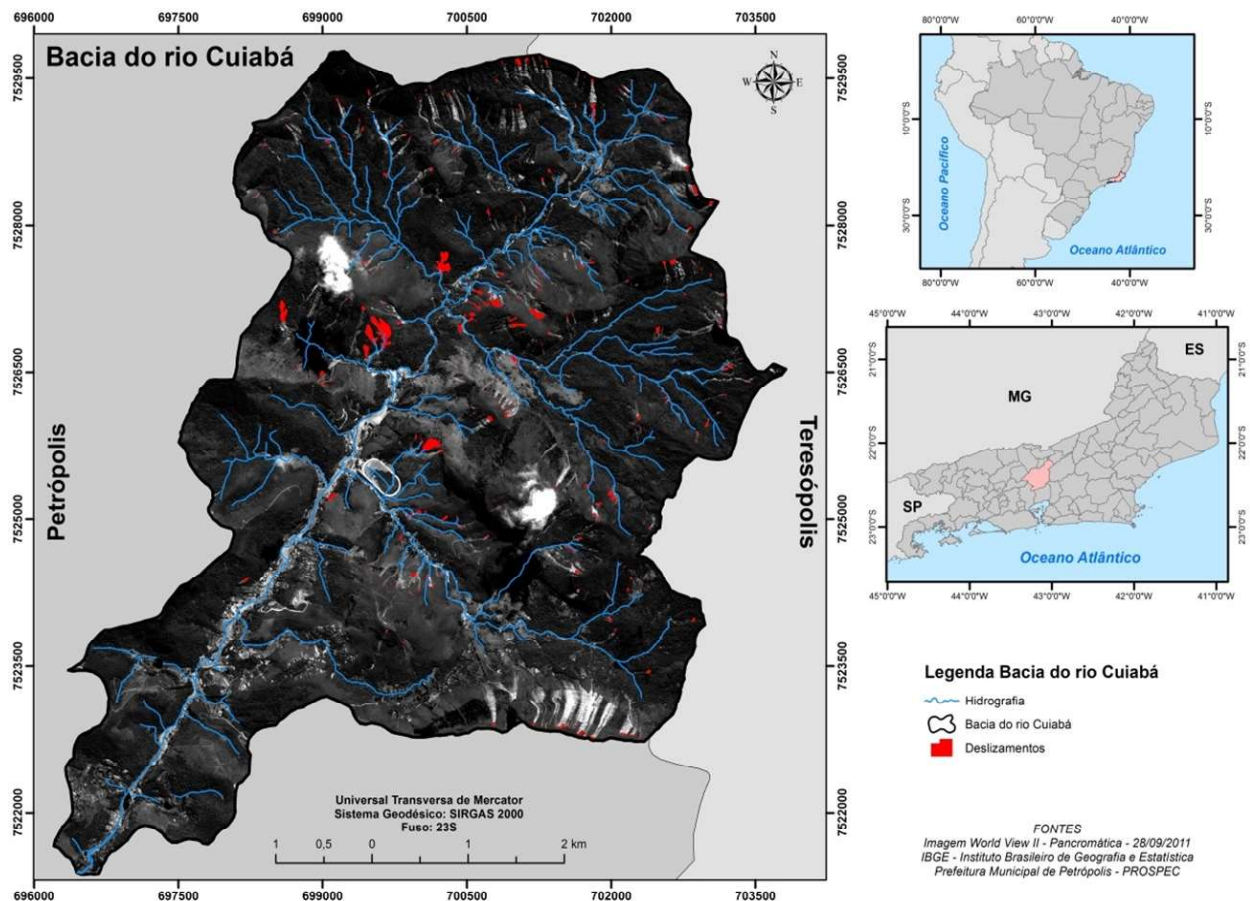


Figura 2 - Localização da bacia do rio Cuiabá e o registro dos 341 deslizamentos.

Botelho (1996), através da análise de índices pluviométricos do município de Petrópolis, afirma que o clima do vale do Cuiabá apesar de compartilhar o mesmo comportamento dos outros distritos do município de Petrópolis, com verões chuvosos e invernos secos, é um tipo mais seco e apresenta clima mesotérmico brando superúmido a úmido, com temperatura média de 18,5 °C. Segundo IBGE (2012), o tipo vegetacional da área é Floresta Ombrófila Densa, abrigando tanto a formação Montana, por estar entre 16° e 24° de latitude Sul e situada no alto dos planaltos e/ou

serras de 500 m até em torno de 1.500 m, quanto a Alta Montana situada acima dos limites estabelecidos para a formação Montana. Entretanto, esta vegetação está restrita a alguns fragmentos devido aos diferentes usos ao qual esta bacia sofrera ao longo dos anos, principalmente pelas atividades agrícolas, como a cafeeira, e atualmente a silvicultura. Estes usos e coberturas convivem com uma intensa ocupação urbana de diferentes níveis de renda que se espalha ao longo dos fundos de vale e das encostas íngremes que caracterizam a região (figura 5).



Figura 3 - Vista do alto da bacia do rio Cuiabá, evidenciando sua característica morfológica e algumas cicatrizes erosivas do evento de janeiro de 2011.

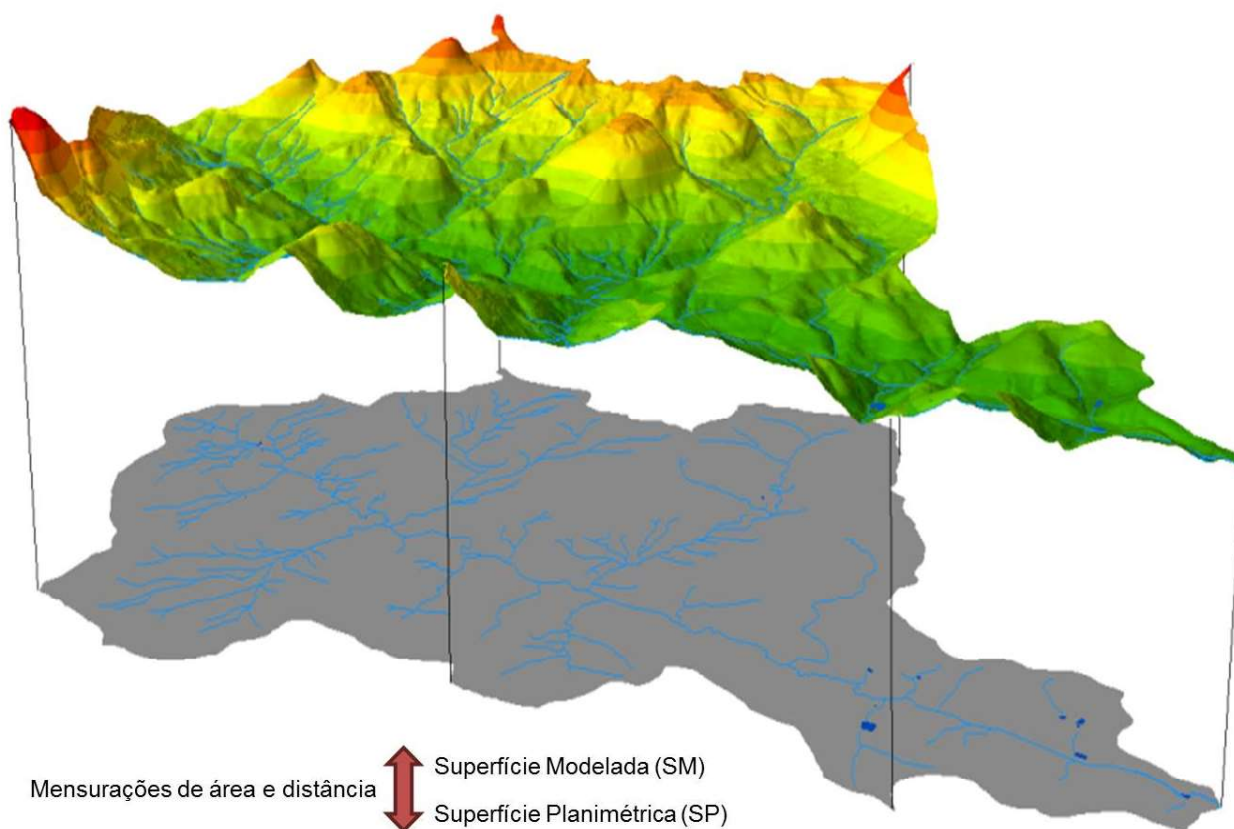


Figura 4 - Representação da bacia do rio Cuiabá, destacando a sua morfologia e as diferenças entre os tipos de observações em superfície modelada e planimétrica (modificado de ARAÚJO, 2014).

Materiais e métodos

A estruturação metodológica do trabalho foi dividida em três etapas: Levantamento de materiais, cons-

trução dos mapas dos elementos estruturais e funcionais; e elaboração das resultantes analíticas integrativas. O fluxograma dos materiais e métodos utilizados pode ser visualizado na figura 6.



Figura 5 - Típica ocupação próxima ao canal fluvial que sofreram com os processos hidrológicos e erosivos de janeiro de 2011. Na foto é possível notar em um primeiro plano a grande quantidade de sedimentos depositada e casas destruídas ao fundo.

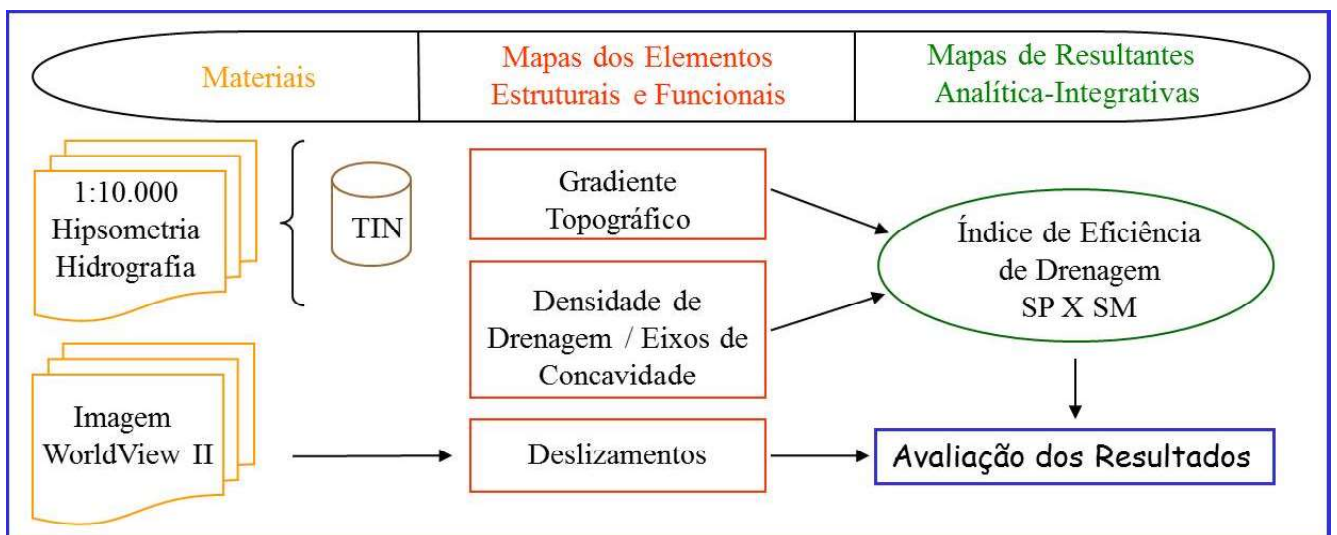


Figura 6 - Fluxograma metodológico adotado no trabalho.

A primeira etapa, referente aos materiais utilizados, foi baseada em levantamentos cartográficos pré-existentes e imagens de alta resolução espacial. As feições cartográficas utilizadas para a construção dos mapeamentos dos índices geomorfológicos propostos foram compiladas da base cartográfica da Prefeitura Municipal de Petrópolis (PMP), confeccionada pela empresa PROSPEC em 1999, na escala de 1:10.000. Desta base foram extraídas informações planialtimétricas (hypsometria - curvas de nível e pontos cotados - e hidrografia) que compuseram a base de apoio temático para o trabalho. A partir desta base foi elaborado um modelo digital de elevação (MDE) baseado em rede irregular de triângulos (TIN) que serviu como base para as observações em superfície modelada. Fernandes & Menezes (2005) sugerem este tipo de estrutura de representação de MDE, elaborada a partir da triangulação de Delaunay e interpolador de ajuste linear, para a obtenção de observações em superfície modelada em áreas de relevo acidentado, com dados de entrada com nível de detalhamento elevado, como é o caso da base utilizada na escala de 1:10.000.

Todas as observações de área e comprimento em superfície modelada utilizadas para a confecção dos mapeamentos dos índices morfométricos, foram extraídas deste MDE a partir do software ArcGis® 10.2. Vale ressaltar que este software foi utilizado para a elaboração de todo trabalho cartográfico e análises espaciais efetuadas.

Outro material de suma importância para o trabalho foi a imagem de alta resolução do satélite Worldview II do tipo *Ortho Ready Standard Level-2A* (ORS2A), adquirida em 28 de setembro de 2011, com ângulo *off-nadir* 22,5° e resolução radiométrica de 8 bits, contendo bandas multiespectrais com resolução espacial de 2 m e banda pancromática com resolução espacial de 0,5 m, incluindo arquivos *Rational Polynomial Coefficient* (RPC). Esta imagem passou por processo de ortorretificação e posteriormente foi utilizada para o mapeamento dos 341 deslizamentos, que serviram como elementos de análise dos resultados dos métodos de definição do IED em superfície modelada e planimétrica. O número de deslizamentos foi utilizado como parâmetro de análise, e por conta disto, vale ressaltar que depois de mapeados os deslizamentos foram individualizados por um ponto relacionado a origem do processo, identificando sempre as cabeceiras dos deslizamentos. Assim, mais de uma cabeceira pode ter sido identificada, mesmo que estes tenham convergido para um único deslizamento. Esta decisão privilegiou o uso da variável número de desliza-

mentos em detrimento da magnitude destes.

A segunda etapa é relacionada aos mapeamentos dos elementos estruturais e funcionais que deram suporte à confecção do IED e ao mapa de deslizamentos, como visto anteriormente. Os parâmetros morfométricos que compõem o IED, como descrito por Coelho Netto, *et al.* (2007) são o Gradiente topográfico e a Densidade de drenagem/eixos de concavidade. Inicialmente foi realizada, em cima da base de apoio temático, a separação das bacias de segunda ordem segundo a classificação proposta por Strahler (1952), que resultou em um número de 41 bacias desta ordem hierárquica. A escolha desta ordem de bacia está intimamente relacionada ao entendimento do comportamento dinâmico hidrológico do domínio de encostas, somado a disponibilidade da base cartográfica detalhada na escala de 1:10.000. Além disso, vale ressaltar que 77% dos deslizamentos mapeados (263) tiveram sua ocorrência em bacias desta ordem. O Gradiente topográfico (Gt) foi definido para cada bacia de segunda ordem através da relação entre a compartimentação topográfica (MEIS *et al.*, 1982) e a mensuração do comprimento do eixo principal da bacia ($Gt = \text{Desnívelamento} / \text{Comprimento do eixo principal}$). Como este parâmetro morfométrico não é associado a nenhuma observações em superfície modelada, pois é obtido, respectivamente, pela diferença do ponto de maior altitude da bacia em relação a altitude da sua saída (*outlet*) e da distância planimétrica entre esses dois pontos, não houve necessidade de calculá-lo em superfície modelada.

A Densidade de drenagem /eixos de concavidade (Dd) foi obtida através da relação entre o comprimento de drenagem e a área da bacia de segunda ordem, como apresentada por Strahler (1952) ($Dd = \text{Comprimento total da drenagem} / \text{Área da bacia de 2ª ordem}$). Para este parâmetro as observações em superfície modelada são importantes e modificam seus valores, e conseqüentemente, os valores do IED. Vale ressaltar que esse índice também foi calculado levando em conta os eixos de concavidade, ou seja, foram mapeados a partir da interpretação da base de apoio temática considerando os fundos de vale sem drenagem permanente. Esses eixos também criaram um novo valor para o parâmetro de Densidade de drenagem em superfície planimétrica e modelada. O uso dos eixos de concavidade (*hollows*), corroborado principalmente pelas observações feitas por Anderson & Burt (1978) e referenciado por Lima (2015), vem de encontro aos trabalhos conduzidos nos domínios de colinas da bacia do rio Bananal (RJ/SP), onde estes eixos são caracterizados

como áreas concentradoras de umidade através dos fluxos superficiais e subsuperficiais e revelam a importância da densidade de eixos de concavidade, associados ao Gradiente topográfico da área de contribuição. Neste sentido, a junção destes dois parâmetros, Gradiente topográfico e Densidade de drenagem/eixos de concavidade exercem um controle sobre a eficiência dos fluxos d'água ao longo dos eixos das concavidades de modo a ativar a erosão regressiva do canal.

A partir deste arcabouço de ideias, dados, observações e discussões, foi subsidiada a elaboração do Índice de Eficiência de Drenagem (IED), pois este, ao associar parâmetros como o Gradiente topográfico e a Densidade de drenagem/eixos de concavidade, revela o comportamento hidrológico e erosivo de cabeceiras de drenagens. Assim, é definida a terceira etapa metodológica, que é associada à definição do IED em superfície modelada e planimétrica, ou seja, usando em seu cálculo os valores de Densidade de drenagem/eixos de concavidade nos dois tipos de observação.

É importante ressaltar que a drenagem retirada da base cartográfica 1:10.000 foi avaliada em campo por amostragem. A não existência de fotografias aéreas com resolução adequada a escala do trabalho impossibilitou

uma análise mais acurada desta feição, assim como dificultou a delimitação dos eixos de concavidade com mais precisão. Estes eixos foram mapeados através da interpretação das feições hipsométricas dispostas na base cartográfica e observações de campo.

Os elementos constituintes do IED podem ser visualizados na figura 7 e sua formulação matemática é expressa da seguinte forma:

$$IED = Dd \times Gt = \frac{\sum Cc + \sum Ch}{Ab} \times \frac{\Delta Z}{C}$$

onde:

IED = Índice de Eficiência de Drenagem

Dd = Densidade de drenagem/eixos de concavidade (m/m²)

Gt = Gradiente topográfico

ΣCc = Comprimento total de canais (m)

ΣCh = Comprimento total de eixos de concavidade (m)

Ab = Área da bacia (m²)

ΔZ = Desnivelamento da bacia (m)

C = Comprimento do eixo principal da bacia (m)

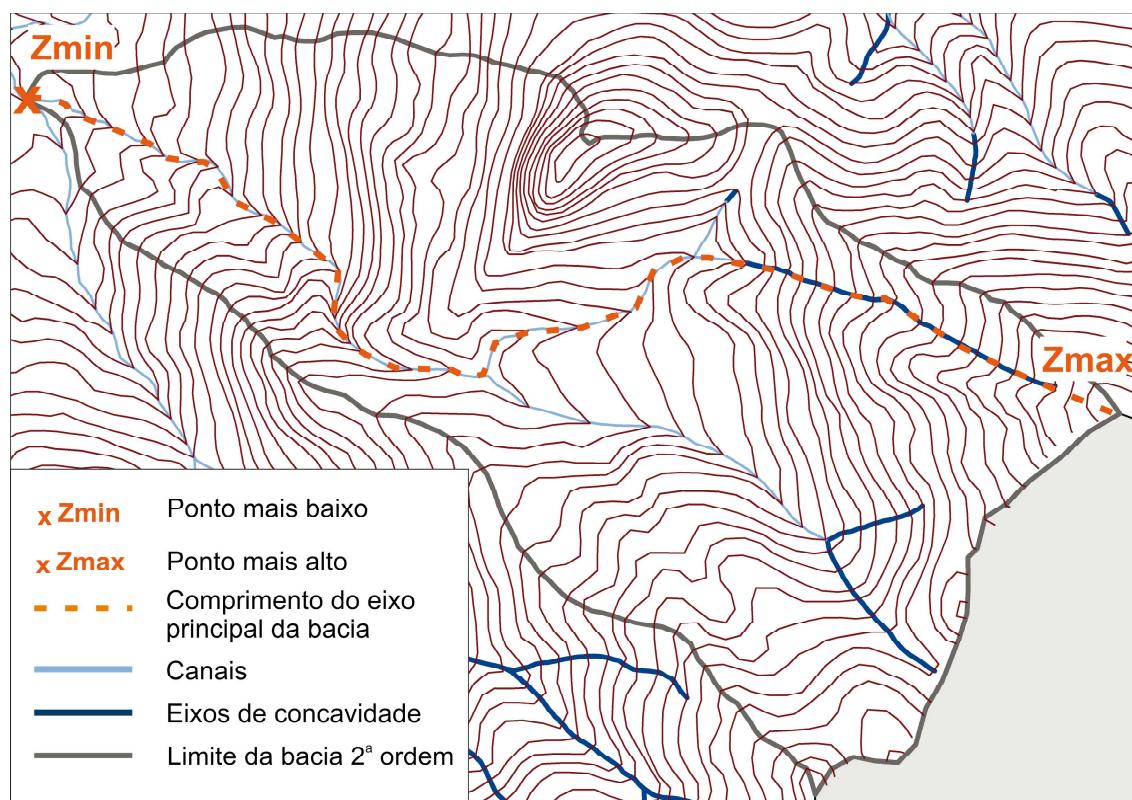


Figura 7 - Representação das feições básicas de uma bacia de drenagem de 2º ordem para o cálculo do IED. A linha azul clara representa a rede hidrográfica da bacia, a linha azul escura, os eixos de concavidade, e a linha laranja, o Comprimento do eixo principal da bacia.

Estes dois mapeamentos de IED gerados serviram como base para entender como estas diferentes observações podem influenciar na representação espacial destes parâmetros em mapas temáticos e na interpretação das funções hidrológicas e erosivas em paisagens com relevo acidentado, tendo como base os movimentos de massa ocorridos nas bacias de segunda ordem. Para tanto, estes mapas foram gerados a partir de duas classificações distintas, ou seja, duas classificações que levavam em consideração as duas observações: uma utilizando os eixos de concavidade e outra não os utilizando. As classes de IED para os diferentes tipos de mapeamento são apresentados na tabela 1. Vale ressaltar que estes valores foram definidos a partir de quebra natural de histogramas, que é um método estatístico que busca agrupar amostras por semelhança de comportamento em função da variável em análise.

Tabela 1: Classes definidas para o mapeamento do IED levando em consideração ou não os eixos de concavidade.

Classes de IED para SM e SP sem utilizar os eixos de concavidade	
CLASSE	VALOR IED (m/m ²)
Baixo	≤ 0,00244
Medio	0,00245 - 0,00372
Alto	0,00373 - 0,00685
Muito Alto	≥ 0,00686
Classes de IED para SM e SP utilizando os eixos de concavidade	
CLASSE	VALOR IED (m/m ²)
Baixo	≤ 0,00449
Medio	0,00450 - 0,00572
Alto	0,00573 - 0,00747
Muito Alto	≥ 0,00748

Resultados e Discussões

Os resultados apontaram para um aumento significativo das observações em superfície modelada quando comparada com a planimétrica, principalmente no que tange às mensurações de área e comprimento de drenagem, com um incremento total de 18,58% (3,98 km²) e 5,31% (3,11 km), respectivamente. Foi observada também uma mudança significativa quando somado o eixo de concavidade à hidrografia, onde houve um

percentual de diferença de 8,19% (9,27 km) para o total da drenagem somado ao eixo. Esse comportamento aponta decisivamente para a diminuição dos valores de densidade de drenagem nas bacias de segunda ordem, visto que as observações em superfície modelada da área das bacias e do comprimento de drenagem, com ou sem os eixos de concavidade, apresentam aumento. Entretanto, esse incremento de valor das variáveis que compõem a densidade de drenagem não é homogêneo. Assim, como o valor de área das bacias de segunda ordem, que consiste no denominador da equação que define a densidade de drenagem, tem um aumento mais significativo (18,58%) do que o de comprimento de drenagem, com ou sem os eixos de concavidade, 8,19% e 5,31%, respectivamente, que é a variável do denominador da equação, foi percebido uma diminuição nos valores de densidade de drenagem quando adotadas as observações em superfície modelada. Deste modo, os valores de densidade de drenagem tiveram um decréscimo de (-10,78%) sem levar em consideração os eixos de concavidade, e de (-8,26%) utilizando estes eixos na construção do índice. Em uma primeira análise, referente à utilização de observações em superfície modelada na construção do índice de densidade drenagem fica claro que este tipo de observação gera diferentes valores para este índice, e que estes são menores do que quando trabalhados em superfície planimétrica, o que sugere uma superestimação deste índice quando trabalhados de maneira convencional, ou seja, a partir de mensurações diretas de uma base cartográfica.

Este comportamento revelado na Densidade de drenagem influencia diretamente os valores obtidos para o índice de eficiência de drenagem (IED). Neste sentido, o IED apresentou uma redução quando comparado o seu valor levando em consideração observações em superfície modelada (SM) em relação à superfície planimétrica (SP). Para o IED sem considerar o eixo de concavidade houve um decréscimo de -10,88% comparando as superfícies. Já adicionando os eixos, esse decréscimo reduziu para -8,37%. Estes resultados apresentados foram obtidos a partir da soma das variáveis para todas as 41 bacias em análise gerais. Estes resultados estão condensados na tabela 2, que revela um quadro geral apresentando as diferenças de observações em superfície modelada e planimétrica para área da bacia, comprimento de drenagem, Densidade de drenagem e IED.

Tabela 2: Valores comparativos entre superfície planimétrica e modelada levando em consideração a soma das variáveis para todas as bacias em análise.

VARIÁVEL	Superfície	Superfície	DIFERENÇA (%)
	Planimétrica (SP)	Modelada (SM)	
Área das Bacias	21,43 (km ²)	25,42 (km ²)	18,58
Comprimento de Drenagem	58,60 (km)	61,62 (km)	5,31
Comprimento de Drenagem + Eixo de concavidade	113,31 (km)	122,59 (km)	8,19
Dd (sem Eixo de Concavidade)	0,129360 (m/m ²)	0,115420 (m/m ²)	-10,78
Dd (com Eixo de Concavidade)	0,238390 (m/m ²)	0,218690 (m/m ²)	-8,26
IED (sem Eixo de Concavidade)	0,049630 (m/m ²)	0,044230 (m/m ²)	-10,88
IED (com Eixo de Concavidade)	0,090730 (m/m ²)	0,083140 (m/m ²)	-8,37

É possível observar nas figuras 8 e 9 as diferenças de análises em superfície planimétrica e superfície modelada para o IED em cada uma das 41 bacias analisadas, levando em consideração ou não os eixos de concavidade. Os valores individuais do IED por bacia apresentam variações significativas em relação às duas observações, com valores variando de -2,8% (bacia 27)

a -17,9% (bacia 14) quando não levado em consideração os eixos de concavidade. Estas diferenças tem uma tendência de diminuição quando os eixos são utilizados (-2,5 bacia 27 e -16,3% bacia 14), o que é relacionado pela menor diferença entre o comprimento de drenagem e a área da bacia, que também influencia a Densidade de drenagem, como visto anteriormente.

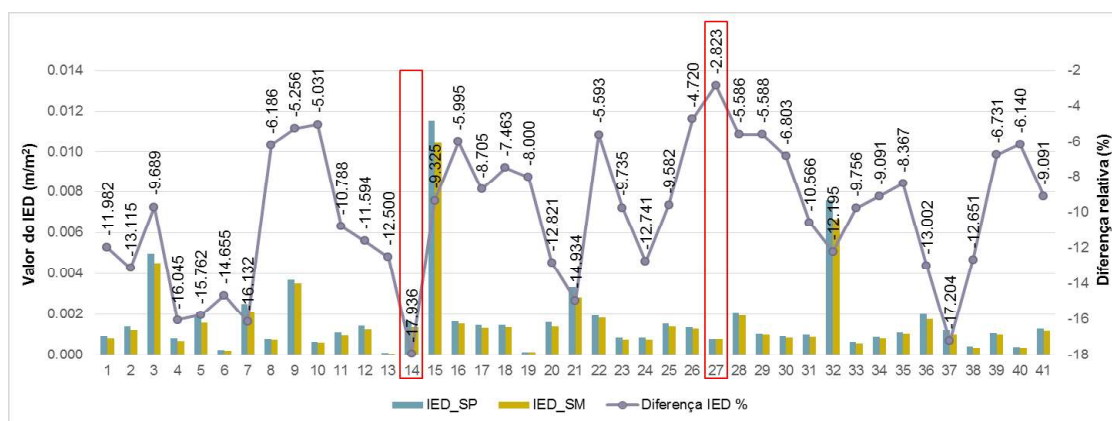


Figura 8 - Comparação do IED em superfície planimétrica e modelada, sem eixo de concavidade. Destacadas em vermelho as bacias com maior e menor diferença de valores.

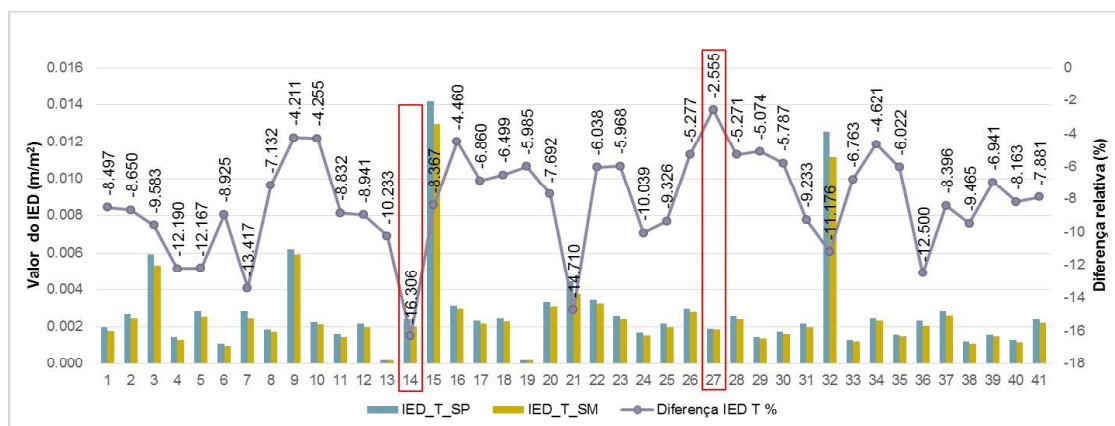


Figura 9 - Comparação do IED em superfície planimétrica e modelada, com eixo de concavidade. Destacadas em vermelho as bacias com maior e menor diferença de valores.

Estas diferenças também interferem na representação espacial dos índices analisados, onde ao se manter uma mesma categorização em intervalos iguais, as ba-

cias mudam de classes de acordo com as observações utilizadas, como pode ser percebido nos mapas gerados nas figuras 10 e 11.

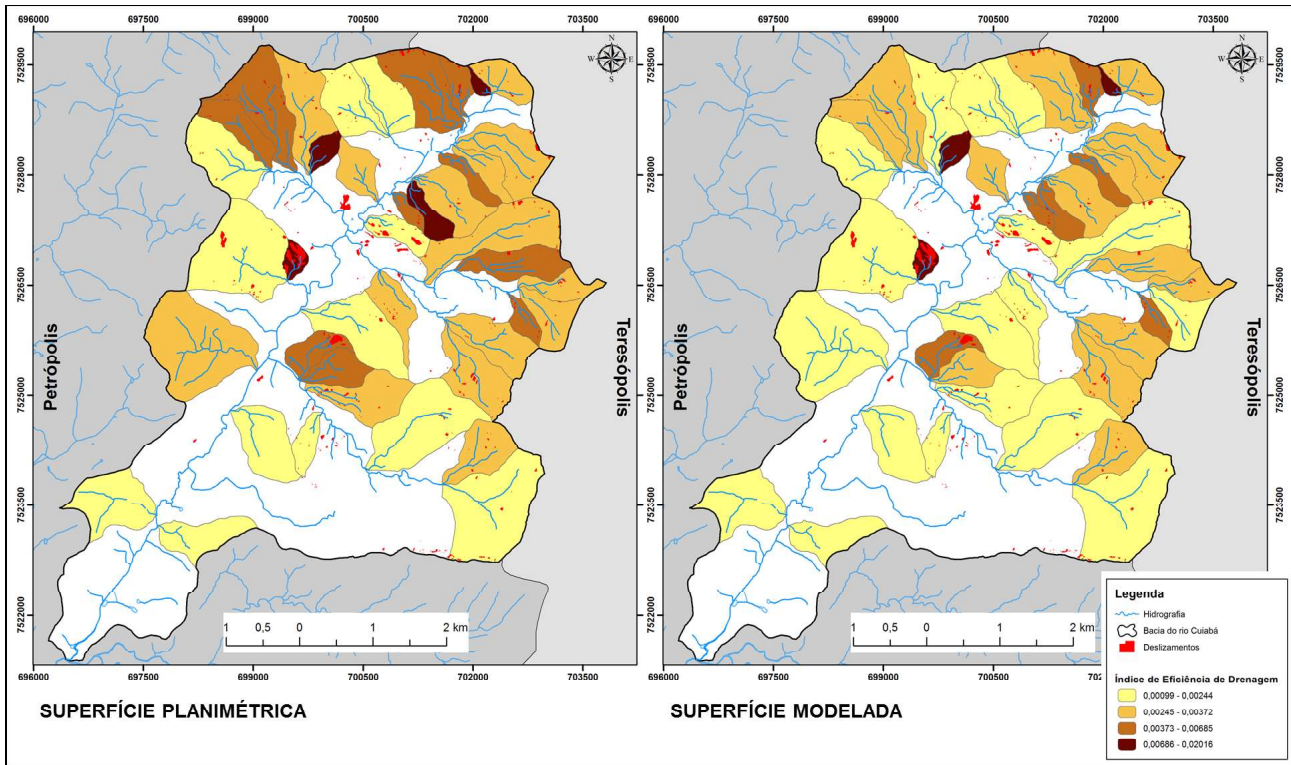


Figura 10 - IED sem os eixos de concavidade em superfície planimétrica e modelada.

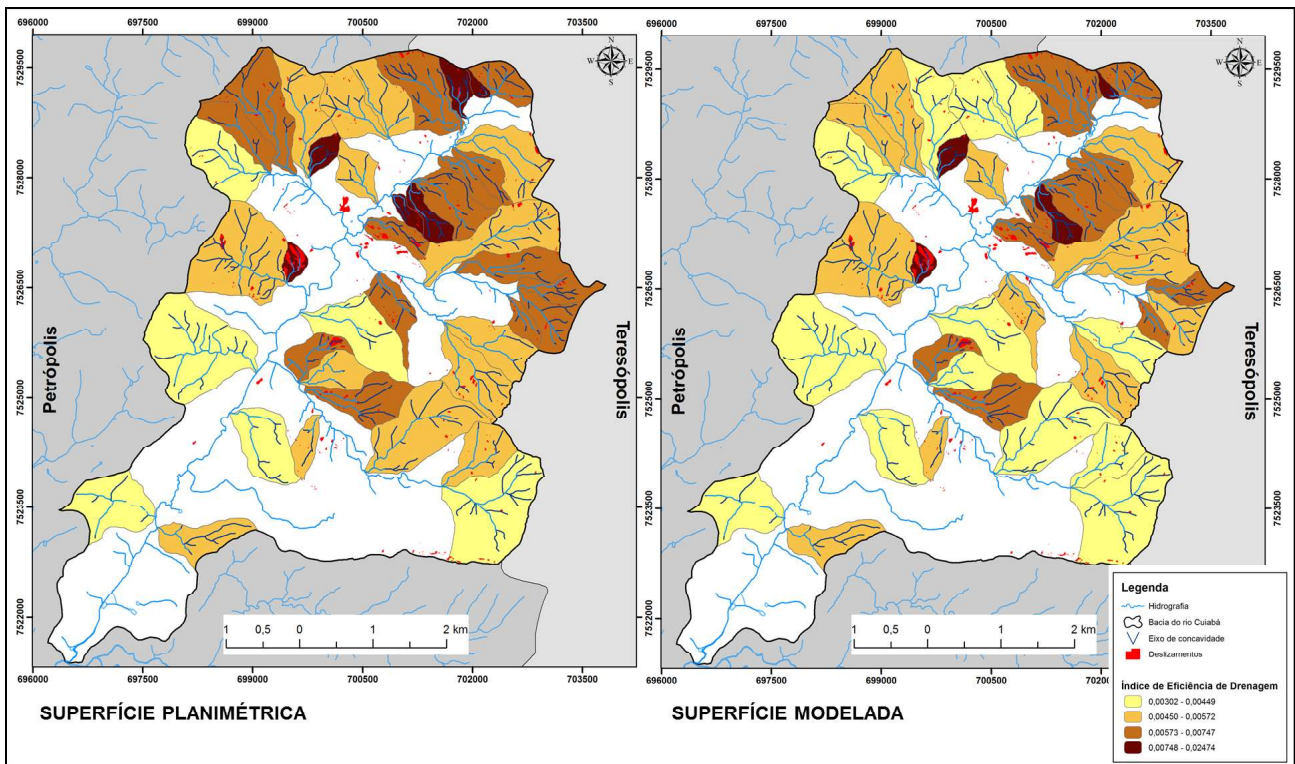


Figura 11 - IED com os eixos de concavidade em superfície planimétrica e modelada.

Nos mapas de IED sem os eixos (figura 10) foi observado que 12 bacias sofreram redução de classes, e nos mapas com eixos esse número subiu para 14. Em ambos os casos fica nítido que estas variações afetam as representações cartográficas dos índices geomorfológicos, assim como a interpretação gerada a partir destas espacializações, onde uma bacia considerada com um valor alto de um determinado índice pode, na verdade, ter um valor mais baixo ao se considerar a superfície modelada. Assim, uma bacia que, por exemplo, tem alto IED em relação às demais pode, em avaliação a partir de observações em superfície modelada, mudar de classe de mapeamento e ser considerada como uma bacia com menor valor deste índice, o que indica outro comportamento geomorfológico frente a esta variável.

Para tentar entender estas diferenças de mapeamentos, a partir de observações em superfície modelada e planimétrica, e sua influência nas interpretações geomorfológicas foi realizada uma análise do IED em superfície modelada e planimétrica e sua relação com os 263 movimentos de massa que ocorreram em 2011 nas 41 bacias de segunda ordem na área de estudo. Nesta análise ficou claro que o número de bacias identificadas com valores baixos de IED aumenta em relação à utilização das observações em superfície modelada, e conseqüentemente o número de movimentos de massa também aumenta em bacias classificadas com IED mais baixo. Este quadro corrobora com o que é sugerido por Coelho Netto *et al.* (2007): que baixos valores de IED refletem a estocagem de água nas encostas favorecendo as ocorrências de movimentos translacionais ou rotacionais. Ou seja, o índice torna-se mais efetivo quando da análise em superfície modelada. Este comportamento fica bem nítido ao se analisar as figuras 12 e 13, que apresentam a concentração de movimentos de massa por classes de IED nos diferentes mapeamentos.

É importante relatar que as análises referentes aos deslizamentos na bacia são restritas apenas às avaliações morfométricas sugeridas no trabalho. Este tipo de processo geomorfológico pode ser interpretado por uma série de outras variáveis que não foram tomadas no escopo deste trabalho, mas que efetivamente podem interferir na ocorrência destes processos, e assim influenciar nas análises propostas. Entretanto, também é válido ressaltar a inexistência de mapeamentos de

susceptibilidades a processos geomorfológicos, geológicos, pedológicos e geotécnicos para a área de estudo em questão que atendam à escala de trabalho. Outro fator que poderia interferir na distribuição e magnitude destes deslizamentos é a distribuição heterogênea do evento pluviométrico que deu origem a eles. Entretanto, Coelho Netto *et al.* (2011) relatam a concentração de chuvas em uma faixa que se estendeu pelos municípios de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo no evento catastrófico de janeiro de 2011. A partir dos dados levantados pelos autores é possível avaliar que o evento se propagou das 20h do dia 11/01/2011, até às 07h do dia seguinte com um total em torno de 150 mm sobre a bacia do Cuiabá de, os quais foram distribuídos de maneira bastante homogênea sobre esta área.

No mapeamento sem eixos de concavidade, ao se levar em consideração as observações em superfície modelada frente as planimétricas, todas as classes tiveram diminuição significativa de movimentos de massa, com valores de -31% a -59%, com exceção da classe Baixo IED que concentrou mais movimentos de massa, totalizando um aumento de 80% destes eventos. Esta concentração de movimentos de massa na classe de IED Baixo já era esperada, pois na área de estudo os IED Baixo estão associados à baixa Densidade de drenagem, visto que o Gradiente topográfico é elevado, porém bastante homogêneo entre as bacias de segunda ordem, com um coeficiente de variação que corrobora com este comportamento quando comparado à Densidade de drenagem sem os eixos de concavidade (Coeficiente de variação – Gt: 32,9% e Dd: 34,6%). Assim, a Densidade drenagem se apresenta como a variável que mais influencia no IED sem os eixos de concavidade, e como esta diminui ao se utilizar observações em superfície modelada o IED também diminui. No mesmo sentido, como o Gradiente é elevado e homogêneo, quanto menor a Densidade de drenagem, menor é a capacidade de drenagem de água superficial da bacia e maior a susceptibilidade a movimentos de massa, principalmente os translacionais rasos, como são a maioria dos registrados na área.

Partindo deste quadro, o IED sem eixos de concavidade se mostrou mais representativo quando da utilização de observações em superfície modelada, com uma maior concentração de movimentos de massa ocorridos em IED Baixo (figura 12).

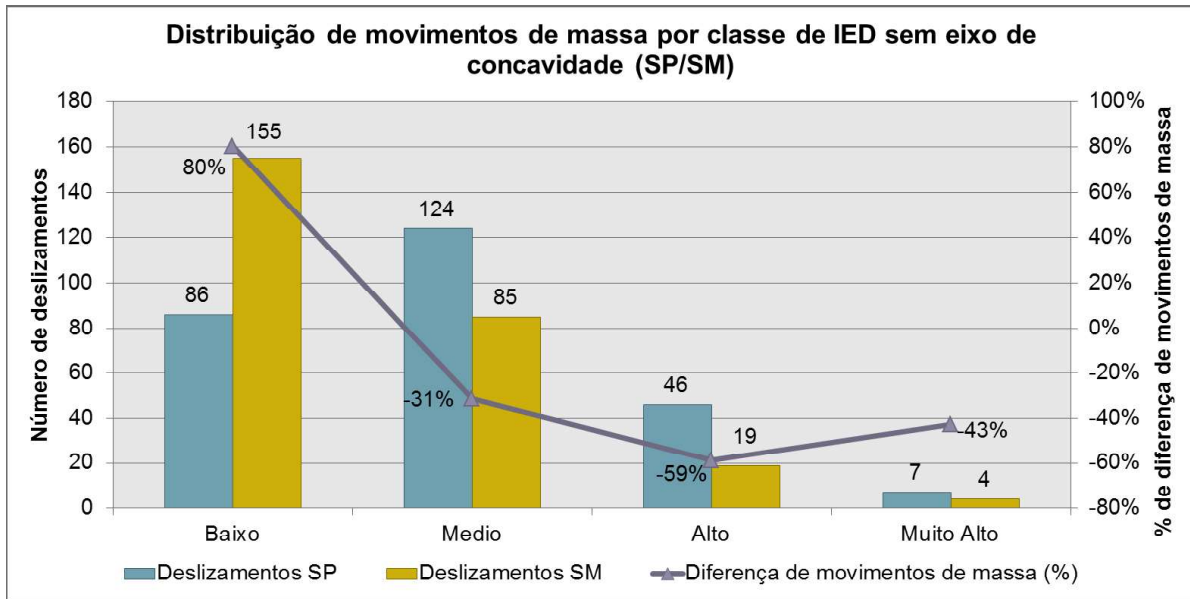


Figura 12 - Distribuição de movimentos de massa por classes de IED sem eixos de concavidade em superfície modelada e planimétrica.

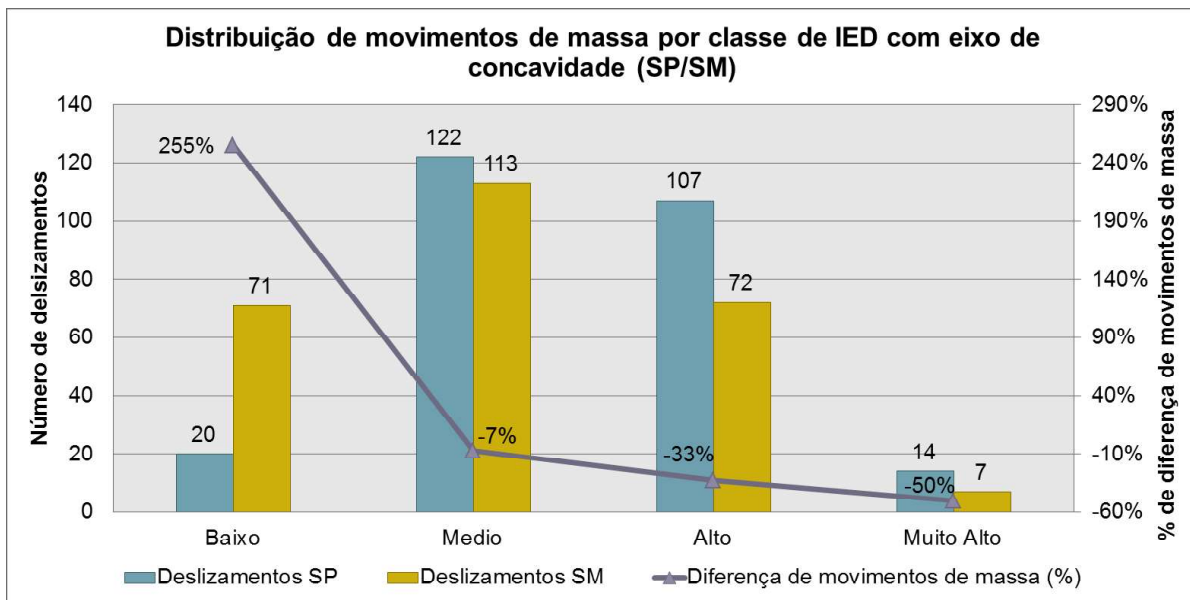


Figura 13 - Distribuição de movimentos de massa por classes de IED com eixos de concavidade em superfície modelada e planimétrica.

Quando os movimentos de massa são avaliados frente ao IED com eixos de concavidade o aumento destes eventos em bacias com IED Baixo cresce significativamente também, assim como ocorre no IED sem eixos, registrando um acréscimo percentual de movimentos de massa nesta classe de 255%. Entretanto, ao se utilizar os eixos de concavidade, a Densidade de drenagem se torna mais homogênea nas bacias do que o Gradiente em função de seu coeficiente de variação ser menor do que o do Gradiente (Coeficiente de variação – Gt: 32,9% e Dd: 22,8%). Neste caso, é esperado que os movimentos

de massa se concentrassem em áreas de Gradiente mais elevado com Densidade de drenagem menos expressivas, o que ocorre nas classes de IED Médio e Alto, seguido do IED Baixo. Esse quadro se efetivou de fato, como pode ser visto na figura 13, onde o IED em superfície modelada também se mostrou mais coerente a partir desta análise.

Conclusão

As avaliações morfométricas sempre se mostraram como método importante para o entendimento das

formas e processos geomorfológicos. Até então, a utilização de parâmetros compilados de maneira manual de documentos cartográficos, como as cartas topográficas, se mostrou bastante eficiente. Entretanto, com a disseminação de geotecnologias que permitiram obter estas informações de maneira mais automatizada, possibilitou uma melhoria na obtenção de parâmetros morfométricos. Ainda assim, estas não levavam em consideração a distribuição de algumas variáveis que compõem alguns índices, fruto de avaliações morfométricas, em uma superfície tridimensional. Até porque trabalhar com modelos digitais de elevação ainda não é algo muito trivial, assim como a obtenção de informações para a construção dos mesmos. Porém, a consideração das observações em superfície modelada, como constatado, apresenta um diferencial significativo tanto nas representações cartográficas de índices relacionados às avaliações morfométricas, quanto no significado destes frente às funções hidrológicas e erosivas em análise.

Ainda em relação à superfície planimétrica, vale ressaltar que esta ao ser avaliada a partir de documentos cartográficos, como cartas topográficas, é também uma superfície modelada caracterizada por um modelo bidimensional (modelo 2-D). Isto porque estes documentos cartográficos são modelos de representação resultados de um processo rigoroso de transformações geométricas, projetivas e cognitivas que, neste caso específico, resultam em uma superfície plana contendo informações planialtimétricas. Neste trabalho o termo superfície modelada é exclusivamente remetido ao sentido de modelos tridimensionais (modelo 3-D), ou seja, construídos a partir de um modelo digital de elevação (MDE) gerado a partir de informações planialtimétricas extraídas de cartas topográficas.

As observações em superfície modelada apresentaram valores maiores quando confrontadas com as observações em superfície planimétrica, caracterizando assim interpretações mais próximas de leituras geomorfológicas da paisagem. Assim, levando em consideração as irregularidades expressas pela morfologia da superfície terrestre, as observações de uma paisagem deixam de ser subestimadas e podem mostrar uma realidade diferente em relação às mensurações mais usuais em superfície planimétrica.

A análise elaborada sobre o índice de eficiência de drenagem com a utilização de observações em superfície modelada revelou uma nova abordagem em relação à estrutura e funcionalidade de uma bacia,

caracterizando um comportamento mais próximo do que o índice propõe. Neste sentido, são abertas novas possibilidades para análises morfométricas, pois estas observações podem ser utilizadas em outras análises ou em novas interpretações geomorfológicas, aprofundando cada vez mais o entendimento das dinâmicas hidrológicas e erosivas de uma paisagem. Ainda neste sentido, outras avaliações devem ser sugeridas para se criar um arcabouço de conhecimento em torno da avaliação proposta, pois uma série de parâmetros que não foram abordados neste trabalho, como a área dos deslizamentos, podem indicar outros comportamentos da distribuição destes em relação às diferentes leituras em superfície planimétrica e modelada.

Outro ponto relevante a ser mencionado é que todo o processo de elaboração das informações utilizadas é passível de passar por uma propagação de erros e isto pode influenciar no resultado obtido. Entretanto, é importante referenciar que todos os cuidados possíveis dentro das limitações impostas, como falta de fotografias aéreas para a delimitação de eixos de concavidades, foram adotados, como as campanhas extensivas de campo para a validação dos resultados.

Vale ressaltar, que o uso das observações em superfície modelada não se restringe às análises geomorfológicas, podendo também ser aplicado em outras áreas do conhecimento. Entretanto, ao se assumir este tipo de observação para a realização de uma investigação é importante realizar uma série de questionamentos para nortear o trabalho, visto que não existe um método fechado para a elaboração de modelos digitais de elevação, assim como uma definição sobre modelos gerados a partir de sensores óticos e radares e em diferentes plataformas, para a obtenção de observações em superfície modelada. Além disso, é importante destacar que a utilização de observações em superfície modelada é bastante pertinente em áreas de relevo acidentado, o que não ocorre em áreas de relevo aplainado, onde este tipo de leitura perde seu sentido.

Referências Bibliográficas

ANDERSON, M.G.; BURT, T.P. The role of topography in controlling throughflow generation. **Earth Surface Processes**, vol.3, p.331-344. 1978.

ARAÚJO, R.S. **Avaliação de índices geomorfológicos em Superfície Planimétrica (SP) e Superfície Modelada**

- (SM), Vale do Cuiabá, Petrópolis – Rio de Janeiro, Brasil. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas (FCSH). Universidade Nova de Lisboa. 2014.
- BOTELHO, R. G. M. **Identificação de unidades ambientais na Bacia do rio Cuiabá (Petrópolis-RJ) visando o planejamento de uso do solo.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia/UFRJ. 1996.
- CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, v. 18, n. 9, p. 35-64. 1969.
- COELHO NETTO, A.L.; AVELAR, A.S.; FERNANDES, M.C. & LACERDA, W.A. **Landslide Susceptibility in a Mountainous Geocosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: The Role of Morphometric Subdivision of the Terrain. Geomorphology.** Amsterdam, 87(3): 120-131. 2007.
- COELHO NETTO, A.L.; SATO, A.M.; AVELAR, A.S.; VIANNA, L.G.; ARAÚJO, I.; FERREIRA, D. L. C.; LIMA, P. H.; SILVA, A.P.A.; SILVA, R.P. **January (2011): the extreme landslide disaster in Brazil.** Proceedings of the Second World Landslide Forum, Rome, Italy. p. 3-7. 2011.
- COUTINHO, B.H. **Vulnerabilidade geo-hidroecológica em diferentes escalas na paisagem: subsídios à conservação e segurança ambiental.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geografia/UFRJ, 523 p, 2011.
- FERNANDES, M.C. Discussões conceituais e metodológicas do uso de geoprocessamento em análises geoecológicas In: **Questões metodológicas e novas temáticas na pesquisa geográfica.** 1a ed. Rio de Janeiro: Publit, p. 280-299. 2009.
- FERNANDES, M. C.; AVELAR, A. S.; MENEZES, P. M. L.; COELHO NETTO, A.L. Comparação do uso de superfície real e planimétrica para análises do índice de eficiência de drenagem: um estudo de caso no Maciço da Tijuca - RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, p. 29-37. 2012.
- FERNANDES, M.C.; MENEZES, P.M.L. Avaliação de métodos de geração de MDE para a obtenção de observações em superfície real: um estudo de caso no maciço da Tijuca - RJ. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 57(02), p. 154-161, 2005.
- GREGORY, K. J. **A Natureza da Geografia Física.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1992.
- GREGORY, K.J.; WALLING, D.E. **Drainage Basin Form and Process: A Geomorphological Approach**, Edward Arnold, London, 456p., 1973.
- HAGGETT P.; CHORLEY, R.J. **Network Analysis in Geography**, London: Edward Arnold. 1969.
- Horton, R.E. Drainage basin characteristics. **Transactions—American Geophysical Union**, Vol. 13, p. 350-361. 1932.
- HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative geomorphology. **Geological Society American Bulletin**, 56(3): 275-370. 1945.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA **Manual Técnico da Vegetação Brasileira.** Série: Manuais Técnicos em Geociências. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
- LEOPOLD, L.B.; MARCHAND, M.O. On the Quantitative Inventory of the Riverscape. **Water Resources Research**, v.4, no.4, p.709-717. 1968.
- LEOPOLD, L.B.; MILLER, J.P. Ephemeral Streams: Hydraulic Factors and Their Relation to Drainage Net. **U.S. Geological Survey Professional Paper**, 282-A, 38p. 1956.
- LIMA, P.H.M. **O índice de eficiência de drenagem como subsídio à análise espacial de áreas suscetíveis a ocorrência de movimentos de massa.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia/UFRJ, 140 p, 2015.
- MAXWELL, B. E. Hydrobiological observations for Wellington Harbour. **Transactions of the Royal Society of N.Z.** 83: 493-503. 1956.
- MEIS, M. R. M; MIRANDA, L. G. H.; FERNANDES, N. F. **Desnívelamento de altitude como parâmetro para a compartimentação do relevo: bacia do Médio Vale do rio Paraíba do Sul.** Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador 4: 1489-1509. 1982.
- MENEZES, P.M.L.; FERNANDES, M.C. **Roteiro de Cartografia.** São Paulo: Oficina de Textos, 1ª edição, 288 p., 2013.
- MILLER, V. C. **A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristic in the Clinch Mountain area.** New York, Columbia University, Dept. of Geology, Tec. Report, 3, 30 p. 1953.
- PIKE R.J.; EVANS I.S.; HENGL, T. Geomorphometry—Concepts, Software, Applications, Developments in **Soil Science**, vol. 33, Elsevier, Amsterdam, pp. 3–30. 2009.
- SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. **Geological Society American Bulletin**, 67, 597 - 646. 1956.
- SMITH, K. G. Standard for grading texture of erosional topography. **Amer. Journal of Science**, 248, p. 655 - 668. 1950.
- SMITH, K. G. Erosional process and landforms in Badlands

- National Monument South Dakota. **Geological Society American Bulletin**, 69, p. 975 - 1008. 1958.
- STRAHLER, A.N. Dynamic basis of geomorphology. **Geological Society American Bulletin**, 63: 923 -938. 1952.
- STRAHLER, A. N. Statistical Analysis in Geomorphic Research. **Journ. Geol.**, Chicago: v. 3, 62, n. 1, p. 1-25. 1954.
- STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed Geomorphology. **Transactions—American Geophysical Union**, 38, p. 913 - 920. 1957.
- STRAHLER, A. N. Dimensional analysis applied to fluvial eroded landforms. **Geological Society American Bulletin**, 69, p.279 - 300. 1958.