

Fabiano Érico Vieira de Souza

Proposta de Compartimentação do  
Relevo baseada em parâmetros  
morfométricos

XV Curso de Especialização em  
Geoprocessamento



UFMG  
Instituto de Geociências  
Departamento de Cartografia  
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha  
Belo Horizonte  
cartografia@igc.ufmg.br

**FABIANO ÉRICO VIEIRA DE SOUZA**

**Proposta de Compartimentação do Relevo baseada em  
parâmetros morfométricos**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Especialista em Geoprocessamento. Curso de Especialização em Geoprocessamento. Departamento de Cartografia. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais.

Orientador: Prof. Bráulio Magalhães Fonseca

**Belo Horizonte**

**2014**

Aluno Fabiano Érico Vieira de Souza

Monografia defendida e aprovada em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do título de Especialista em Geoprocessamento, em 09 de dezembro de 2014, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

---

Prof. Dr. Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega

---

Prof. MSc. Bráulio Magalhães Fonseca

## RESUMO

A contribuição do geoprocessamento para a eficácia dos estudos geomorfológicos tornou-se incontestável nos últimos anos, por possibilitar a análise de vários objetos ou fenômenos de forma integrada, pela relativa facilidade de aquisição e manipulação de dados morfométricos em ambiente de Sistema de Informações Geográficas, dentre outros benefícios. No entanto, ainda carece de metodologias eficientes e aplicáveis a diferentes regiões, de forma a possibilitar análises comparativas entre os resultados obtidos.

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar uma metodologia de aquisição de índices morfométricos para compartimentar o relevo, portanto, possui um viés quantitativo. A área de estudo situa-se na região de entorno da Serra do Curral que também engloba parte do Quadrilátero Ferrífero. Nesse sentido, os dados e ferramentas utilizados foram preparados para serem trabalhados em escala regional. Foram obtidos o Índice de Concentração da Rugosidade Global, o Índice de Hack e a Densidade de Drenagem simplificada, ponderada pelo comprimento e ordem dos canais e o Índice Global de Dissecação do Relevo, este último derivou-se da junção dos índices mencionados. Experimentou-se também espacializar os índices obtidos com método de autocorrelação espacial através da aplicação do Índice de Moran Local, resultando em produtos cartográficos de grande valia para as análises.

Análises geomorfológicas aprofundadas não foram o foco neste estudo, porém, os resultados aqui obtidos serão utilizados para auxiliar os posteriores trabalhos de campo.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	7
1.1	Caracterização da Área de Estudo .....	7
2	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS .....	10
2.1	Objetivos Gerais .....	10
2.2	Objetivos Específicos .....	10
3	REFERENCIAL TEÓRICO .....	11
3.1	Escala de Mapeamento .....	11
3.2	Índice de Concentração da Rugosidade - ICR .....	12
3.3	Índice de Hack .....	13
3.4	Densidade de Drenagem e Densidade de Canais .....	14
3.5	Análise geomorfológica em Bacias Hidrográficas, Sistemas Hidrogeomorfológicos e Morfoestruturais .....	14
3.6	O Mapeamento Geomorfológico da APA Sul RMBH .....	15
	.....	15
4	MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
4.1	Mapa de localização da área de estudo .....	17
4.2	Dados Morfométricos .....	18
4.3	Processos.....	18
4.3.1	Obtenção do ICR Global .....	19
4.3.2	Obtenção do Índice de Hack.....	20
4.3.3	Aquisição da densidade de Drenagem.....	22
4.3.4	Processo de delimitação automática de sub-bacias .....	22
4.3.5	Índice Global de Potencialidade de Dissecção do Relevo-IPDR Global	23
4.3.6	Geração de mapas de Auto Correlação Espacial entre sub-bacias .....	23
5	RESULTADOS OBTIDOS .....	26
5.1	MAPAS RESULTANTES ATRAVÉS DA OBTENÇÃO DOS DADOS MORFOMÉTRICOS .....	26
5.1.1	Mapa hipsométrico da região de entorno da Serra do Curral .....	26
5.1.2	Mapa de Índice de Concentração da Rugosidade Global .....	27
5.1.3	Mapa de Índice de Hack .....	28
5.1.4	Mapa de Densidade de Drenagem Simplificada.....	29
5.1.5	Mapa de Densidade de Drenagem por comprimento dos canais.....	30
5.1.6	Mapa de Densidade de Drenagem por ordem dos canais.....	31

5.1.7	Mapa índice de Potencial de dissecação.....	32
5.2	MAPAS RESULTANTES ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE MORAN LOCAL -LISA .....	34
5.2.1	Agrupamento das sub-bacias em relação ao ICR Global .....	34
5.2.2	Agrupamento das sub-bacias em relação ao Índice de Hack.....	35
5.2.3	Agrupamento das sub-bacias em relação a Densidade de Drenagem Simplificada .....	36
5.2.4	Agrupamento das sub-bacias em relação a Densidade de Drenagem ponderada pelo comprimento de canais .....	37
5.2.5	Agrupamento das sub-bacias em relação a Densidade de Drenagem ponderada pela ordem de canais.....	38
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

## 1 INTRODUÇÃO

Observa-se ao longo da evolução e acessibilidade tecnológica e computacional dos últimos anos, a consolidação do geoprocessamento como ferramenta de suporte para a tomada de decisão para diversas finalidades, entre elas, a sua utilização indispensável nos estudos ambientais.

A manipulação de dados em SIG e a criação de modelos virtuais permitem simular o comportamento sistêmico do ambiente, o que possibilita analisar de forma holística a interação dos elementos físicos e bióticos, bem como a influência antrópica na evolução da paisagem.

Dentro das geociências, em específico para os estudos geomorfológicos, as ferramentas de geoprocessamento possibilitam com facilidade a obtenção de dados morfométricos através dos Modelos digitais de Terreno – MDT e a partir destes, extrair diversas informações do relevo estudado. Permite também aplicar com rapidez e precisão diversas metodologias quantitativas de compartimentação do relevo e de análises espaço-temporais dos processos geomorfológicos.

Sendo assim, este estudo pretende apresentar uma proposta de metodologia de mapeamento geomorfológico embasada na análise de dados quantitativos, manipulados em ambiente SIG e obtidos através de ferramentas de geoprocessamento.

### 1.1 Caracterização da Área de Estudo

A região escolhida para este estudo contempla todo o alinhamento da Serra do Curral e suas imediações, cuja complexa estrutura geomorfológica que se destaca na paisagem da capital mineira. A Figura 1 demonstra o recorte espacial utilizado para realizar as análises no estudo.

A área em estudo está inserida em uma das estruturas geológicas que compõem a província mineral do Quadrilátero Ferrífero – QF, esta, localizada na porção central do Estado de Minas Gerais, onde posiciona-se no extremo sudeste no Cráton do São Francisco. O Quadrilátero possui cerca de 7.000km<sup>2</sup> e é uma das principais províncias



A geometria do QF é definida por mega dobras sinformes (concavidade voltada para baixo) e antiformes (concavidade voltada para cima) truncadas por cinturões de falhas de empurrão norte-sul, na sua parte oriental. Seus limites são marcados a norte pelo homoclinal da Serra do Curral, a oeste pela Sinclinal Moeda, ao sul pela Sinclinal Dom Bosco e a leste, pela Sinclinal Santa Rita. Tais estruturas podem ser vistas na Figura 2.

Ao longo da serra do Curral ocorrem evidências das deformações providas do Evento Transamazônico em sua extremidade oeste, apresentando dobras e falhas de empurrão com direção NE-SW e vergência para NW. O posicionamento dos domos é resultado da tectônica distensional que permitiu o soerguimento de blocos do embasamento granítico-gnáissico, estruturando a serra do Curral e as sinclinais Moeda, Dom Bosco, Santa Rita e Gandarela.

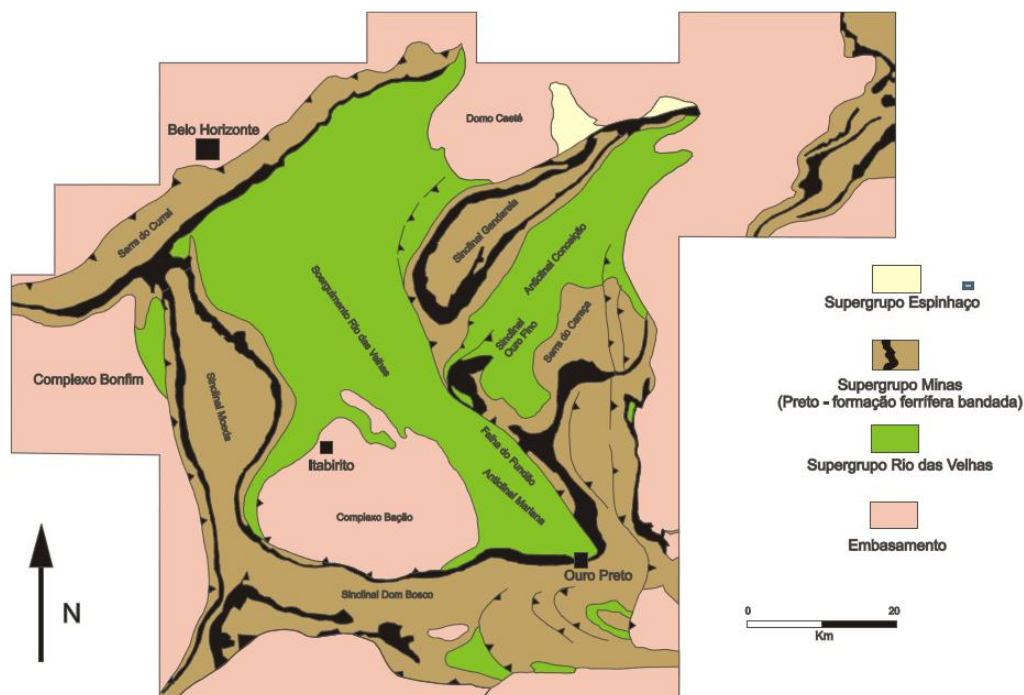


Figura 2: Geologia simplificada do Quadrilátero Ferrífero

Fonte: Azevedo, 2007

Os trechos onde predominam quartzitos e itabiritos do Supergrupo Minas, como demonstra a figura acima, apresentam cristas que se destacam na topografia regional, devido, principalmente, aos efeitos da erosão diferencial. (Projeto APA Sul RMBH, 2005).

## **2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

Este estudo visa apresentar uma proposta de mapeamento de unidades geomorfológicas em escala regional, utilizando ferramentas de geoprocessamento aplicadas em Modelos Digitais de Terreno.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Gerar um mapa de índice de Rugosidade do Relevo – ICR Global para região de entorno da Serra do Curral;
- Gerar um mapa de potencial energético da drenagem com base no Índice de Hack;
- Calcular a densidade de drenagem simples, ponderada pela Hierarquia das Canais de Drenagem, e ponderada pelo comprimento dos canais;
- Gerar mapas de autocorrelação espacial com os índices obtidos;
- Gerar um mapa de Índice Global de Potencialidade de Dissecação do Relevo.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com Florenzano (2011), a complexidade e a variedade de objetos de estudo em Geomorfologia levam a uma conseqüente dificuldade de sua classificação. Além da falta de consenso metodológico e de conteúdo para realizar um mapeamento geomorfológico, a dificuldade de representação cartográfica das feições mapeadas em escala apropriada dificultam a elaboração de um método internacional unificado de mapeamento.

O problema metodológico, segundo Augustin e Sampaio (2014) advém da dificuldade de padronização das feições do relevo, uma vez que a maioria das metodologias possui caráter qualitativo e dependem do grau de conhecimento e experiência do mapeador, o que as tornam subjetivas. Além disso, as metodologias quantitativas, mesmo que bastante utilizadas atualmente devido à implementação de técnicas de geoprocessamento, sensoriamento remoto, bem como a utilização de modelos digitais de elevação (*Digital Elevation Model- DEM*) apresentam também diversos graus de subjetividade.

#### 3.1 Escala de Mapeamento

Em relação à escala de abordagem, geomorfólogos clássicos como Tricart (1965) e Mercejakov (1968) estabeleceram a análise têmporo-espacial como critério de classifica o dos fen menos geomorfológicos, na qual divide-os a partir de ordens de grandeza taxon mica, levando em considera o a influência estrutural nas unidades de maior dimensão e morfoclimática nas de menor dimensão.

Ab'Saber (1969) e posteriormente, Casseti (2007) estruturaram a abordagem têmporo-espacial em três níveis, como cita Florenzano (2011):

- *Compartimentação topográfica regional e caracteriza o morfológica.* Analisa os níveis topográficos e as características do relevo destacando a morfologia.
- *Estrutura superficial da paisagem.* Relaciona os depósitos correlativos com as condi es climáticas, enfatizando a morfog nese.
- *Processos morfoclimáticos e pedogenéticos atuais, fisiologia da paisagem.* Analisa os processos atuais, a morfodinâmica, inserindo as atividades antrópicas como agente modelador do espaço.

Kohler (2001), ao analisar a relação das escalas temporal e espacial, parte do princípio de que quanto menor a escala do fenômeno geomorfológico estudado, maior a influência dos processos endógenos e quanto maior a escala, maior a influência dos processos exógenos. Com isso, o autor salienta que a escala de estudo é determinante para selecionar as estratégias e técnicas de abordagem da análise do relevo. Sugir também a leitura do artigo de Dragutand Eisank, 2011, publicado na *Geomorphology*, que apresentam um método inovados por GEOBIA.

Ao citar Kugler (1982), o autor acima enfatiza a importância da escala no mapeamento em função da mudança de conteúdo. A partir disso, estabelece os seguintes limites: abaixo das escalas de 1:100.000 (grande escala); 1:500.000 (média escala) e 1:1.000.000 (pequena escala), em que grandes escalas permitem mapear pequenos relevos, pequenas escalas são propícias a mapear a base morfoestrutural e variações climatofaciais dos relevos de grandes espaços.

Augustin *et AL* (2011), utilizaram a escala de 1:100.000 para realizar mapeamentos intermediários da Serra do Espinhaço Meridional e seu entorno imediato e a escala de 1:250.000 para apresentar o produto final, cujo objetivo foi fornecer uma primeira aproximação sobre a caracterização do orógeno mapeado, levando em consideração os *“fatores associados, a dinâmica e distribuição espacial dos principais conjuntos de formas de relevo”*.

A abordagem utilizada segue uma perspectiva de compreensão regional do relevo, o que de acordo com Hayden (1986) citado por Augustin *et AL* (2011), trata-se de uma abordagem mais recente. Este autor aponta que atualmente pode-se observar uma tendência na utilização de dois principais tipos de representação do relevo em mapas: os analíticos e os sintéticos. O primeiro tipo, utilizado para o referido mapeamento, no qual também servirá de base para estruturar este estudo, baseia-se em informações sobre gênese, morfografia, morfometria e cronologia. Já o segundo tipo, baseia-se na síntese dos dados analíticos, combinados com parâmetros como solo, vegetação e hidrologia.

### **3.2 Índice de Concentração da Rugosidade - ICR**

Para minimizar a subjetividade que se encontra nas metodologias quantitativas utilizadas em mapeamentos geomorfológicos, Sampaio (2008) citado em Augustin e Sampaio

(2014), propõe a utilização do Índice de Concentração da Rugosidade (ICR). Sua finalidade é “quantificar, classificar e delimitar unidades de relevo, com base na análise da distribuição espacial da declividade, entendida como padrões de rugosidade”.

Neste sentido, a rugosidade é compreendida por Hobson (1972) como a relação entre a área da superfície do terreno inclinada e a área da superfície do terreno reduzida ao plano, podendo ser esquematizada da seguinte forma: Rugosidade (R) = (Si ou área da vertente) / (Sp ou superfície reduzida ao plano).

Segundo os autores acima, o ICR vem sendo utilizado como uma ferramenta metodológica para realizar, auxiliar e complementar mapeamentos geomorfológicos em várias escalas de abordagem, alcançando excelentes resultados. Sendo assim, este índice pode ser utilizado para indicar a capacidade erosiva da rede de drenagem para esculpir o relevo (dissecação). O ICR baseia-se na análise tridimensional do relevo, como no processamento matemático dos pixels contidos em um Modelo Digital de Elevação - MDE. Porém, ao contrário desta técnica em que cada pixel é quantificado individualmente, o ICR possibilita representar unidades homogêneas de relevo. Deste modo, pode-se dizer que o ICR é a soma dos valores de declividade dos pontos existentes em uma determinada área, em que a quantidade de pontos é determinada pela resolução espacial (tamanho do pixel) do MDE utilizado.

### 3.3 Índice de Hack

Outra técnica a ser utilizada é o Índice de Hack (*StreamLength-Gradient Index*), também conhecida como Relação Declividade-Extensão, na qual foi criada por John T. Hack e apresentada em Hack (1973). De acordo com Fonseca (2010), este índice oferece uma base comparativa entre rios de diferentes extensões e características fisiográficas e possibilita inferências acerca da história e do desenvolvimento geológico e geomorfológico da área estudada. Deste modo, pode ser considerado um parâmetro morfométrico de análise da rede de drenagem.

O índice foi utilizado pelo referido autor para a análise morfométrica e morfológica de bacias de drenagem na serra do Espinhaço Meridional-MG, como forma de analisar a dinâmica energética das bacias hidrográficas da região, bem como detectar alterações nos

cursos de água decorrente de mudanças no substrato geológico, do aporte de sedimento, e de atividades tectônicas.

Etchebehere (2004) citado por Souza et al (2011), explica que o índice baseia-se na razão entre a declividade de um determinado trecho de um canal, multiplicada pela projeção horizontal deste trecho, cuja medição ocorre desde a cabeceira da drenagem até ao ponto mais a jusante do trecho do canal. Hack (1973) citado por Fonseca (2010) conclui ao analisar o trabalho de Leopold et al (1964) que quando a energia de um rio está igualmente distribuída ao longo do mesmo, o produto de sua declividade por sua descarga é igual em toda sua extensão.

### **3.4 Densidade de Drenagem e Densidade de Canais**

O IBGE (2009) conceitua a densidade de drenagem como a relação entre o comprimento total dos canais e a área amostrada. Constitui-se em um dos principais parâmetros na análise morfométrica de bacias hidrográficas. A densidade de canais é referente à quantidade de canais existentes por área.

Estes parâmetros, definidos inicialmente por Horton (1945), permitem apresentar um comportamento hidrológico influenciado pela litologia e estrutura geológica, bem como, por outros parâmetros do meio físico (HIRUMA e PONÇANO, 1994).

### **3.5 Análise geomorfológica em Bacias Hidrográficas, Sistemas Hidrogeomorfológicos e Morfoestruturais**

A utilização de Bacias Hidrográficas como unidade de análise tem aumentado significativamente nos últimos tempos, principalmente a partir da valorização das características que estas apresentam, ao permitir estudar os aspectos biogeofísicos de forma sistêmica e possibilitar resultados mais próximos da realidade.

Para Burt & Walling (1981) citado por Rosse Thomas (2006), as bacias hidrográficas são fundamentais para pesquisas em geomorfologia, devido sua estruturação como sistema aberto, ou seja, com *input/output* de matéria e energia. Isso facilita a identificação e a

delimitação dos diferentes subsistemas hidrogeomorfológicos, como exemplo: sistema de vertentes, sistema dos canais fluviais e as planícies de inundação (FONSECA, 2010).

A análise desses sistemas como processos modeladores da paisagem permite, portanto, compreender a dinâmica da evolução do relevo em diferentes escalas espaciais e temporais (GOERL *et al.*, 2009).

Em relação aos processos morfoestruturais, visíveis em escala regional, leva-se em consideração as diversas feições do relevo condicionadas pela estrutura geológica. Estas, marcadas pela natureza das rochas, pela tectônica que atua sobre elas e também, pela variação dos efeitos climáticos ao longo do tempo geológico (IBGE, 2009).

### **3.6 O Mapeamento Geomorfológico da APA Sul RMBH**

O levantamento geomorfológico regional da APA Sul RMBH, realizado pelo Serviço Geológico Brasileiro – CPRM (2005) foi um dos componentes do estudo do meio físico para auxiliar na criação do Zoneamento Ecológico Econômico da área, visando a proteção e conservação dos sistemas naturais que garantem a manutenção da biodiversidade e dos recursos hídricos necessários ao abastecimento da população da Região Metropolitana de Belo Horizonte, como está definido no Artigo 2 da Lei Estadual 13.960/2001.

O mapeamento foi realizado na escala 1:50.000 e objetivou-se, de acordo com o CPRM (2005), analisar o arranjo geomorfológico do Quadrilátero Ferrífero –QF, embasada em uma abordagem genética. Enfatizou-se no estudo a dinâmica de evolução geomorfológica regional ao longo do Cenozóico e a atuação dos processos geomorfológicos e sua influência na morfodinâmica atual.

De acordo com o CPRM (2005), a configuração geomorfológica da área compreendida pela APA Sul caracteriza-se por um conjunto de relevos predominantemente montanhosos fortemente orientados pelo substrato litoestrutural do Quadrilátero Ferrífero. Os modelados mapeados foram apresentados no estudo como as seguintes Unidades Morfoestruturais: Crista Monoclinal da Serra do Curral, Depressão Marginal do Rio Paraopeba, Platô da Sinclinal Moeda, Depressão Interplanáltica do Alto Rio das Velhas, Vale Anticlinal do Rio das Velhas, Patamares Escalonados da Serra do Jaguará,

Depressão Suspensa da Sinclinal Gandarela, Vale Anticlinal do Rio Conceição, Maciço do Caraça, Depressão Marginal do Rio Piracicaba.

O mapa abaixo demonstra as Unidades Morfoestruturais de interesse para este estudo, no qual servirá de base para a localização e análise comparativa entre as unidades mencionadas e os produtos gerados.

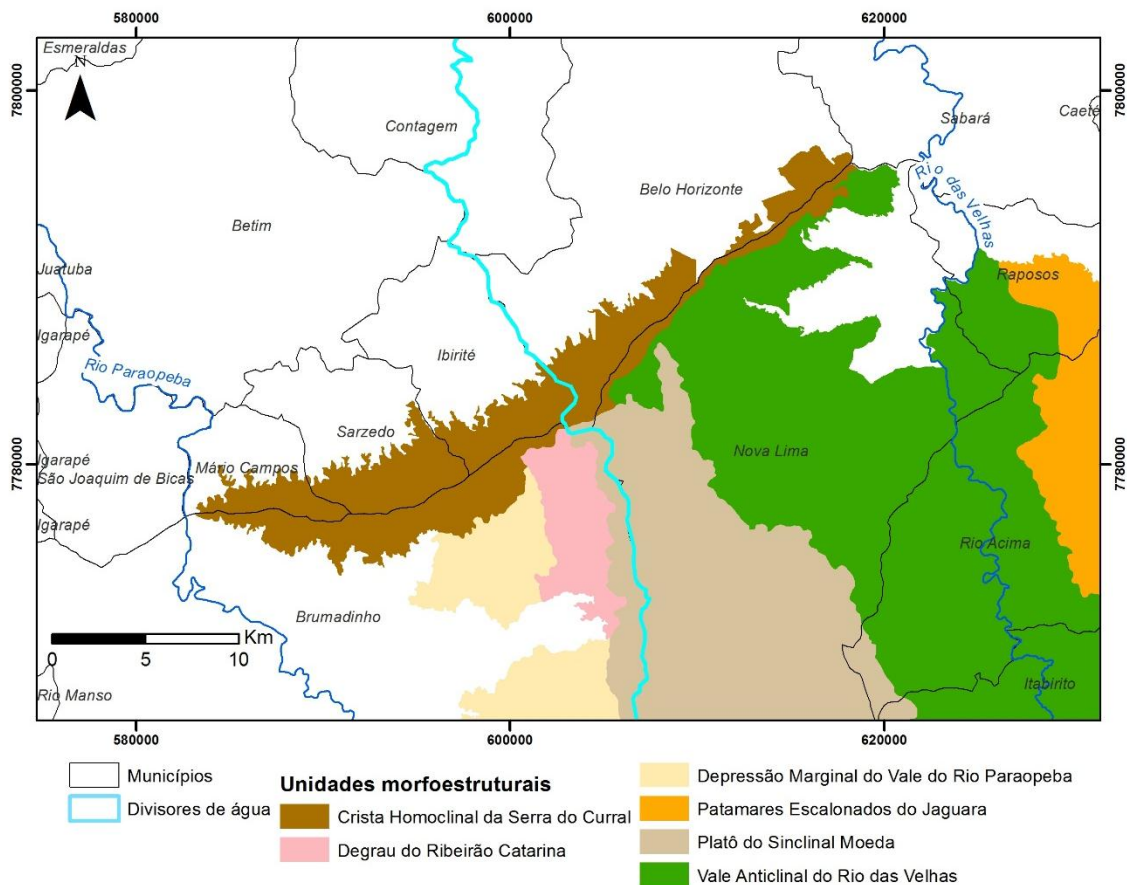


Figura 3: Mapa de Unidades Morfoestruturais da porção norte da APA Sul RMBH

Fonte: CPRM, 2005

## 4 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 4.1 Mapa de localização da área de estudo

Para a caracterização da área em estudo, foi utilizada uma cena do sensor TM/Landsat5, de resolução espacial de 30m com uma composição de falsa cor, utilizando as bandas 5,4 e 3 respectivamente no espaço de cores RGB, onde a Banda 5 corresponde a faixa do comprimento de onda do infravermelho médio, a Banda 4 a faixa do infravermelho próximo e a Banda 3 a faixa com vermelho visível, conforme demonstra a Tabela 1. Esta composição de cores foi escolhida por ser bastante utilizada em mapeamentos geomorfológicos por apresentar melhor destaque das feições. A utilização das bandas da faixa do infravermelho são recomendada por Florenzano (2011) por destacarem feições lineares e topográficas, enquanto que a utilização da banda do vermelho visível permite a distinção da vegetação verde e densa das demais áreas vegetadas, facilitando a identificação da drenagem.

**Tabela 1: características espectrais das bandas do sensor TM/Landsat 7 (valores em  $\mu\text{m}$ )**

Sensor	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 6	Banda 7
TM+	0.45 a 0.52	0.53 a 0.61	0.63 a 0.69	0.78 a 0.90	1.55 a 1.75	10.4 a 12.5	2.09 a 2.35

Fonte: INPE, 2009

Foi aplicada nas bandas utilizadas a técnica de realce linear de contraste para melhorar a visualização da imagem. A equação que descreve o processo desta técnica pode ser descrita da seguinte forma (INPE, 2006):

$$Y = AX + B$$

Onde:

- Y corresponde à imagem realçada, com novos valores de níveis de cinza.
- X representa a imagem original de entrada,
- A é a inclinação da reta e B correspondem aos limites mínimos e máximos de espalhamento do histograma da imagem.

## 4.2 Dados Morfométricos

Para a aquisição dos dados morfométricos da área de estudo, foi realizado o processo de mosaicagem de duas imagens SRTM (TOPODATA, 2011 folhas 19S45-20S45), de resolução espacial de 30m, posteriormente convertidas em 90 metros, a fim de evitar dados desnecessários em relação à escala de estudo. As imagens foram adquiridas e utilizadas em projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) e datum WGS84 (*World Geodetic System 1984*).

A rede hidrográfica utilizada para gerar o índice de Hack e a densidade de drenagem e os demais dados vetoriais foram obtidos através do sítio do Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais – ZEE/MG.

## 4.3 Processos

A estruturação geral deste estudo foi composta como demonstra o fluxograma a seguir:

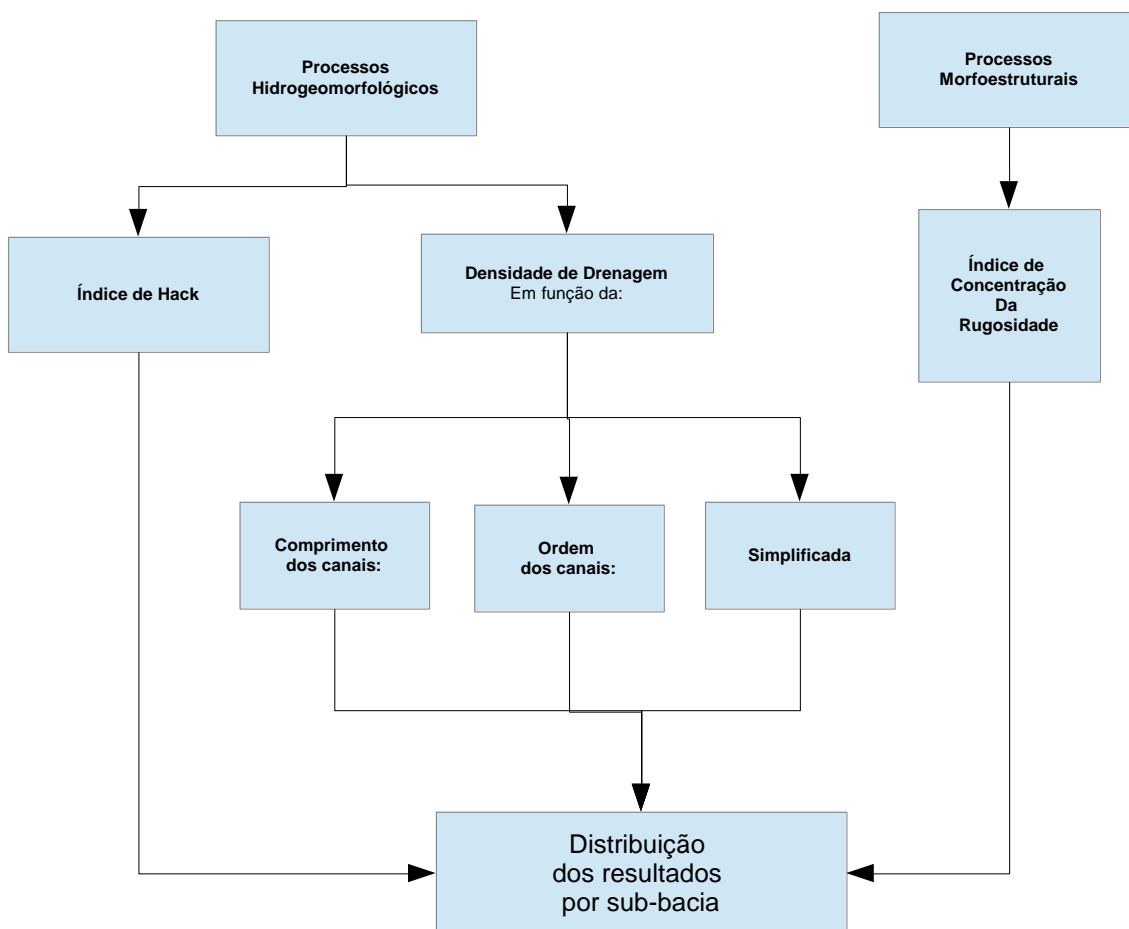


Figura 4: Fluxograma de estruturação geral do estudo

Conforme observado no fluxograma, os índices adquiridos foram associados a dois tipos de processos: os Hidrogeomorfológicos, que leva em conta a atuação da rede de drenagem no esculpimento relevo e os Morfoestruturais, embasados nas características genéticas e tectônicas das estruturas geológicas.

Após a obtenção dos índices, os mesmos serão distribuídos em sub-bacias para realizar a compartimentação do relevo. Os processos de obtenção dos índices serão explicados a seguir.

#### 4.3.1 Obtenção do ICR Global

O processo de obtenção do ICR Global se deu, primeiramente, com a transformação do modelo digital de elevação (MDE), obtido através das imagens SRTM, em valores de declividade em porcentagem (%). Posteriormente, o dado matricial da declividade foi convertido para o formato de pontos (vetorial), em que cada ponto atribuiu o valor de seu pixel de origem, para permitir a aplicação do Estimador de Densidade por *Kernel*, executado através do software Arcgis 10.1. Esta ferramenta de interpolação consiste em traçar uma vizinhança circular ao redor de cada ponto da amostra (Leite ET AL, 2013), correspondendo ao raio de influência estipulado proporcionalmente a escala de análise em que se pretende trabalhar e estimar a densidade do fenômeno dentro do círculo traçado (ASSUNÇÃO e BEATO, 2008). Salienta-se que valores maiores para o raio de busca condicionam uma varredura mais generalizada enquanto valores menores condicionam resultados mais detalhados. O raio de busca estipulado para a aquisição do ICR Global foi de 3.000m, que abrange aproximadamente uma área de 28Km<sup>2</sup>.

Os valores encontrados foram agrupados em 5 classes de intervalos utilizando o método de quebras naturais (*Natural Breaks.*), após realização de testes para averiguar a representação da área e posteriormente normalizados em ambiente SIG, por operação de álgebra de mapas. A operação é efetuada pela divisão da matriz resultante pelo número de pixels computados, conforme expressão a seguir, obtendo-se valores entre 0 e 1:

$$f(X) = \frac{X - Min}{Max - Min}$$

Onde,  $X$  corresponde ao raster resultante dividido pela diferença de seus valores máximo e mínimo.

De acordo com Augutin e Sampaio (2014), a resolução espacial do MDE influencia nos valores do ICR em função da quantidade de pontos somados por unidade de área. Portanto, a normalização tem o intuito de padronizar os valores obtidos, a fim de possibilitar comparações entre diferentes estudos, independente da resolução espacial do MDE de origem. O processo realizado para a aquisição do mapa de ICR é apresentado no fluxograma a seguir:

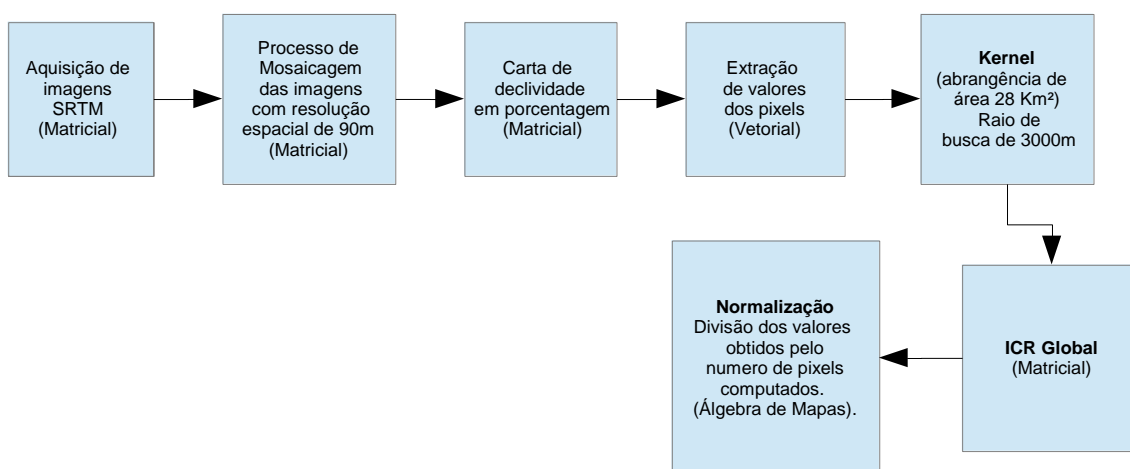


Figura 5: Fluxograma de obtenção do ICR Global

#### 4.3.2 Obtenção do Índice de Hack

O índice de Hack pode ser entendido a partir da seguinte expressão:

$$SL = \frac{\Delta H}{\Delta L} L$$

Onde:

$L$  representa o comprimento do segmento considerado desde seu mais longo alcance (nascente);

$\Delta H$  representa a variação altimétrica do segmento considerado e

$\Delta L$  representa a distância horizontal deste segmento, apresentado em escala semi-logarítmica.

A obtenção do  $\Delta H$  dos segmentos da rede hidrográfica foi realizada por um processo de estatística zonal utilizando o software Arcgis 10.1, onde define-se a forma e os locais das zonas, no caso, os segmentos da rede hidrográfica, para então extrair os dados altimétricos de um MDE. A zona corresponde a um conjunto de células de um raster que possuem o mesmo valor. Os valores de  $\Delta L$  foram calculados em metros e posteriormente transformados em escala semi-logarítmica, visando evitar resultados com muitas casas decimais, o que dificulta o entendimento do índice.

Os segmentos com os Índices de Hack de valores menores que 1 foram excluídos por serem desprezíveis para uma análise regional. Os demais segmentos foram convertidos para o formato de pontos para aplicação do interpolador IDW (*Inverse Distance Weighting*) e assim permitir a espacialização de forma contínua dos pontos, demonstrando as regiões com maior vigor energético. De acordo com Fonseca (2010), o IDW pondera as informações pontuais durante o processo de interpolação, onde um ponto possuirá menos influência sobre outro em decorrência do aumento da distância entre eles.

O IDW pode ser representado pela seguinte expressão:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}$$

Onde  $z$  corresponde aos valores estimados,  $n$  representa o número de amostras,  $z_i$  os valores conhecidos, e  $d_i$  representam as distâncias entre os valores conhecidos e estimados ( $z_i$  e  $z$ ). O processo para a aquisição do mapa de Índice de Hack se deu da seguinte forma:

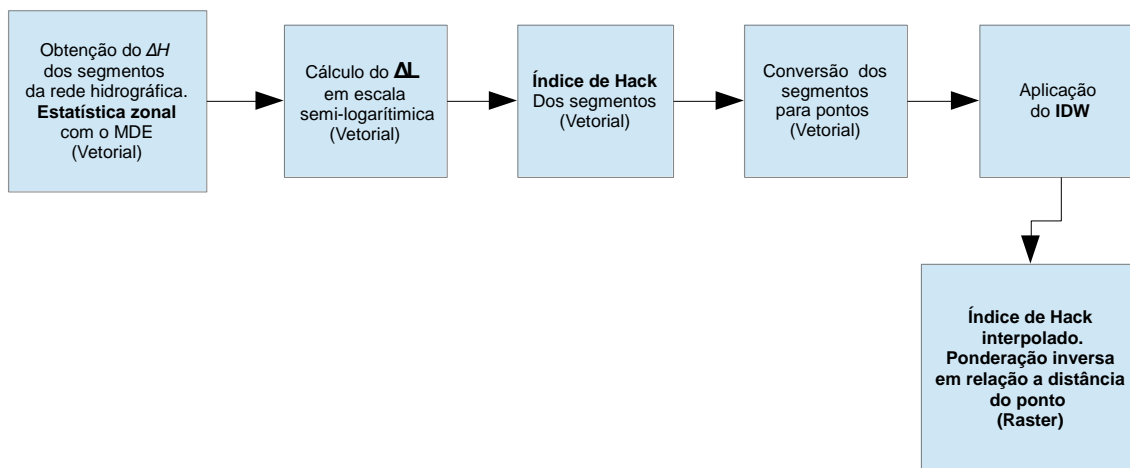


Figura 6: Fluxograma de obtenção do Índice de Hack

#### 4.3.3 Aquisição da densidade de Drenagem

O processo para a aquisição da densidade de drenagem se deu com a aplicação do Estimador de Densidade por *Kernel* em diferentes contextos, embasados em três atributos da rede hidrográfica: a ordem<sup>1</sup> dos canais, o comprimento dos canais e a última, apenas a quantidade de canais. Foram utilizadas na execução do *Kernel* as mesmas configurações adotadas para extrair o ICR Global. Os resultados obtidos também foram normalizados.

#### 4.3.4 Processo de delimitação automática de sub-bacias

O processo de delimitação das sub-bacias também foi realizado em ambiente SIG, utilizando o MDT de resolução espacial de 90m e um modelo numérico de direção do escoamento superficial da água. Este modelo passou primeiramente por um processo de preenchimento de possíveis depressões, que segundo Fonseca (2010) decorre da interpolação numérica durante a geração do MDE.

O modelo é gerado a partir da direção do escoamento de cada pixel para o pixel vizinho contido na matriz utilizada.

<sup>1</sup> Hierarquia fluvial embasada em Strahler (1952), onde os canais de primeira ordem são aqueles que não apresentam tributários (não recebem nenhum afluente), os canais de segunda ordem são os canais subsequentes à confluência de dois canais de primeira ordem e assim sucessivamente.

#### 4.3.5 *Índice Global de Potencialidade de Dissecação do Relevo-IPDR Global*

Este índice indica as áreas de maior atividade de processos de dissecação do relevo, levando em consideração a atuação de processos hidrogeomorfológicos e morfoesculturais. A criação do índice se deu a partir do processo de álgebra de mapas com os *rasters* de ICR Global, Índice de Hack e Densidade de Drenagem ponderada pelo comprimento dos canais. A expressão utilizada é descrita a seguir:

$$\text{IPDR Global} = (\text{ICR Global} \times 0,33) + (\text{IH} \times 0,33) + (\text{Den. Dre. Comp.} \times 0,33)$$

Observa-se que os índices possuem o mesmo peso na expressão, não havendo uma influência maior de algum índice no raster resultante. Os valores do raster variam entre 0 e 1,0.

#### 4.3.6 *Geração de mapas de Auto Correlação Espacial entre sub-bacias*

Para a execução desta etapa, foi utilizada uma ferramenta geoestatística denominada Índice de Moran Local, que consiste em um Indicador Local de Associação Espacial - LISA. O software utilizado neste procedimento foi o Arcgis 10.1. De acordo com INPE (2001), este índice atua a partir da análise das covariâncias entre as diferentes unidades de área, as sub-bacias no caso, em uma vizinhança definida em função de uma distância. Desta forma, aplicação desta ferramenta no objeto analisado espacializa áreas de:

- “Clusters”: objetos com valores de atributos semelhantes (valores altos ou baixos)
- “Outliers”: objetos anômalos

As medidas de significância estatística utilizadas são o P-value e o Z-score. Um alto valor positivo de Z-score significa que os objetos possuem valores semelhantes, independentemente de serem valores altos ou baixos. Segundo o INPE (2011), na geração dos mapas de LISA os índices locais são classificados como;

- Não significantes (0);
- Com confiança de 95% (1, P-value =0.05), 99% (2, P-value =0.01) e 99,9% (3, P-value =0.001).

O P-value é uma probabilidade, na qual define que quanto menor o valor de P, maior a improbabilidade do padrão espacial observado ser resultante de processos aleatórios. O gráfico a seguir demonstra os níveis de significância utilizados para gerar o mapa LISA.

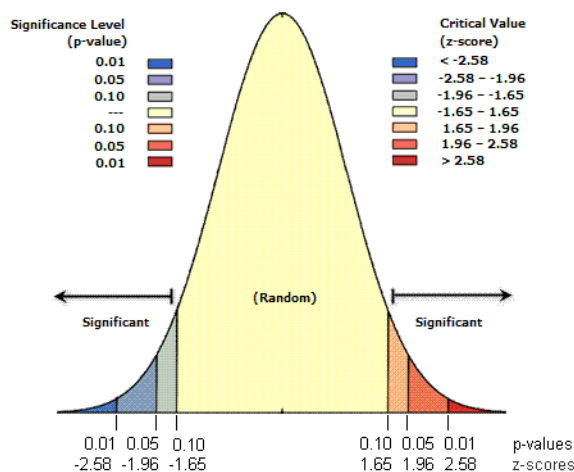


Figura 7: Níveis de significância do P-value e Z-score para a geração de mapas de LISA.

Fonte: Arcgis Resource Center

A visualização da correlação espacial dos resultados se dá a partir da aplicação do Diagrama de Espalhamento de Moran. Este, construído segundo Nunes (2013) embasado nos *valores normalizados (valores de atributos subtraídos de sua média e divididos pelo desvio padrão)*. A ideia é comparar os valores normalizados dos atributos numa área com a média dos seus vizinhos, construindo um gráfico bidimensional de Z (valores normalizados) por WZ (média dos vizinhos, também normalizadas). Os valores são distribuídos em quadrantes para identificar pontos com associação espacial positiva ou não, como mostrado abaixo:

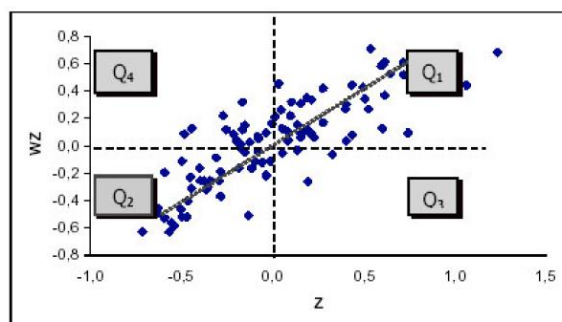


Figura 8: Diagrama de Espalhamento de Moran

Fonte: DPI/INPE

Os valores são interpretados da seguinte forma:

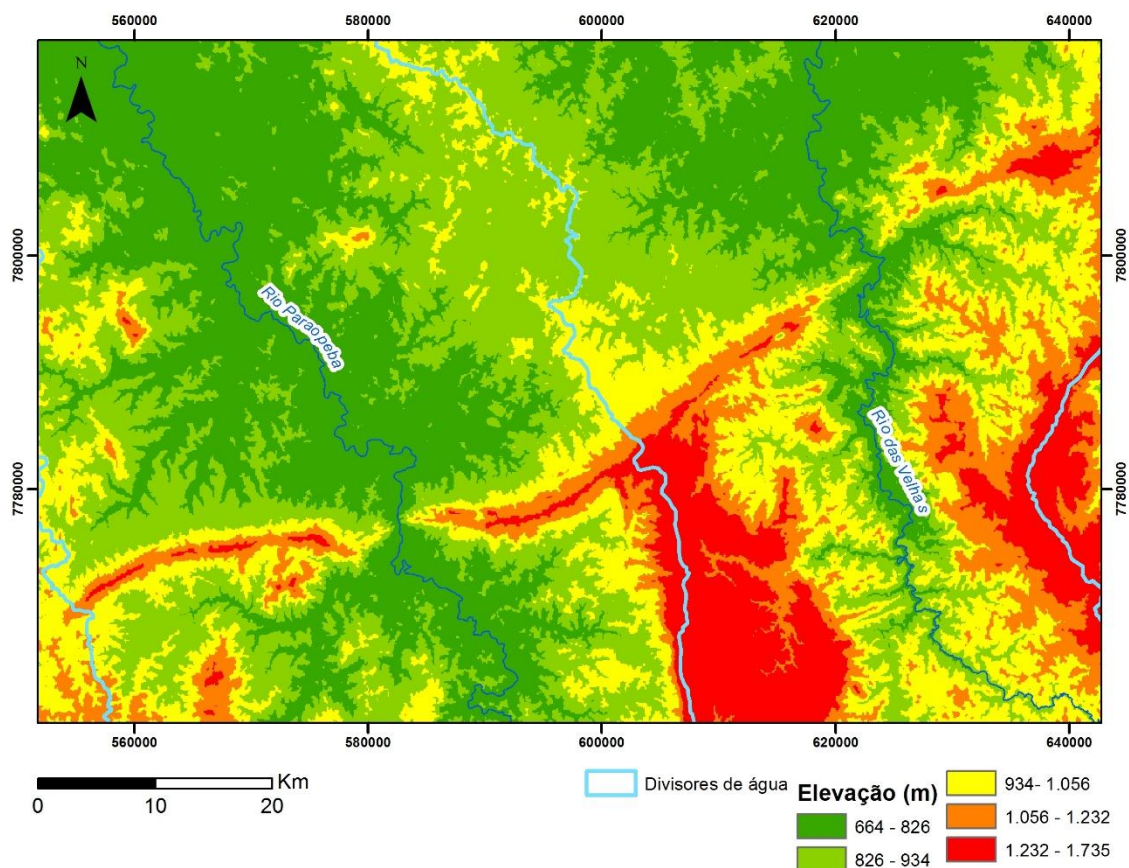
- **Q1:**alta-alta (agrupamento de valores altos e próximos);
- **Q2:**baixa-baixa (agrupamento de valores baixos e próximos);
- **Q3:**alta-baixa (outlier de valores altos que não se agrupam, pois se encontram em meio a valores baixos);
- **Q4:**baixa-alta (outlier de valores baixos que não se agrupam, pois se encontram em meio a valores altos);

O processo de obtenção dos mapas de autocorrelação espacial para os parâmetros morfométricos se deu com a inserção de seus valores médios (Raster) nas sub-bacias geradas do MDT, convertidas posteriormente para o formato vetorial. Esta etapa foi realizada através de ferramentas de estatística zonal.

## 5 RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1 MAPAS RESULTANTES ATRAVÉS DA OBTENÇÃO DOS DADOS MORFOMÉTRICOS

#### 5.1.1 Mapa hipsométrico da região de entorno da Serra do Curral



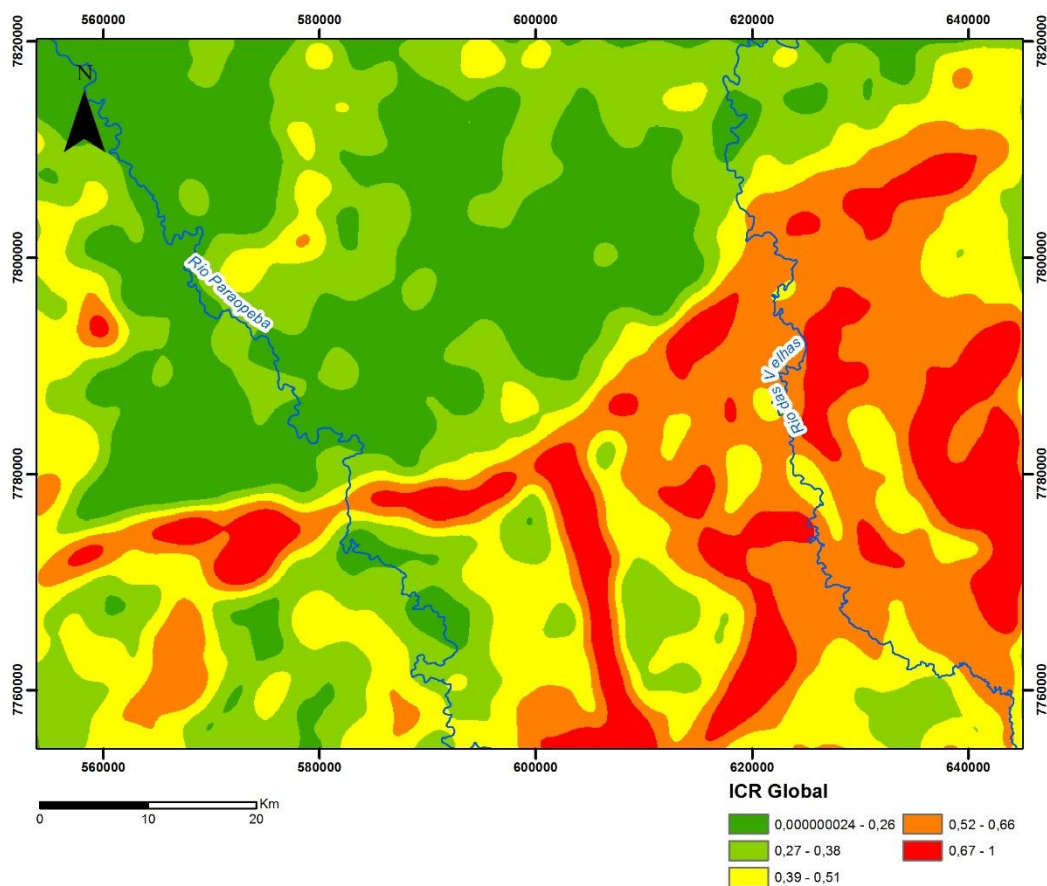
A análise da variação altimétrica na área de estudo não é a única variável considerada para a delimitação de unidades geomorfológicas, mas constitui um parâmetro importante na avaliação dos compartimentos do relevo. O mapa hipsométrico, pode omitir variações de formas e compartimentos topográficos, a exemplo do grande compartimento denominado Sinclinal Moeda, o qual foi classificado em uma única classe altimétrica, escondendo as variações topográficas existentes no interior desta estrutura geológica.

O mapa, portanto, demonstra que as cotas mais elevadas pertencem às cristas de serras que delineiam o Quadrilátero Ferrífero, mas não distingue de forma eficiente, por exemplo, os patamares escalonados no entorno das estruturas lineares da Serra da Moeda.

Os patamares morfológicos que representam a ação das drenagens das bacias do Rio Paraopeba e do Rio das Velhas foram bem definidas por se encontrarem nas cotas mais baixas, com grande variação topográfica em relação às áreas de entorno.

De modo geral, foi possível localizar toda a extensão da Crista homoclinal da Serra do Curral, a Serra da Piedade, a Serra da Moeda e parte da Serra do Gandarela. Observa-se também um grande patamar topográfico entre as cotas de 826 e 934 metros como divisor de águas entre as bacias hidrográficas do rio das Velhas e do rio Paraopeba, na depressão de Belo Horizonte.

### 5.1.2 Mapa de Índice de Concentração da Rugosidade Global

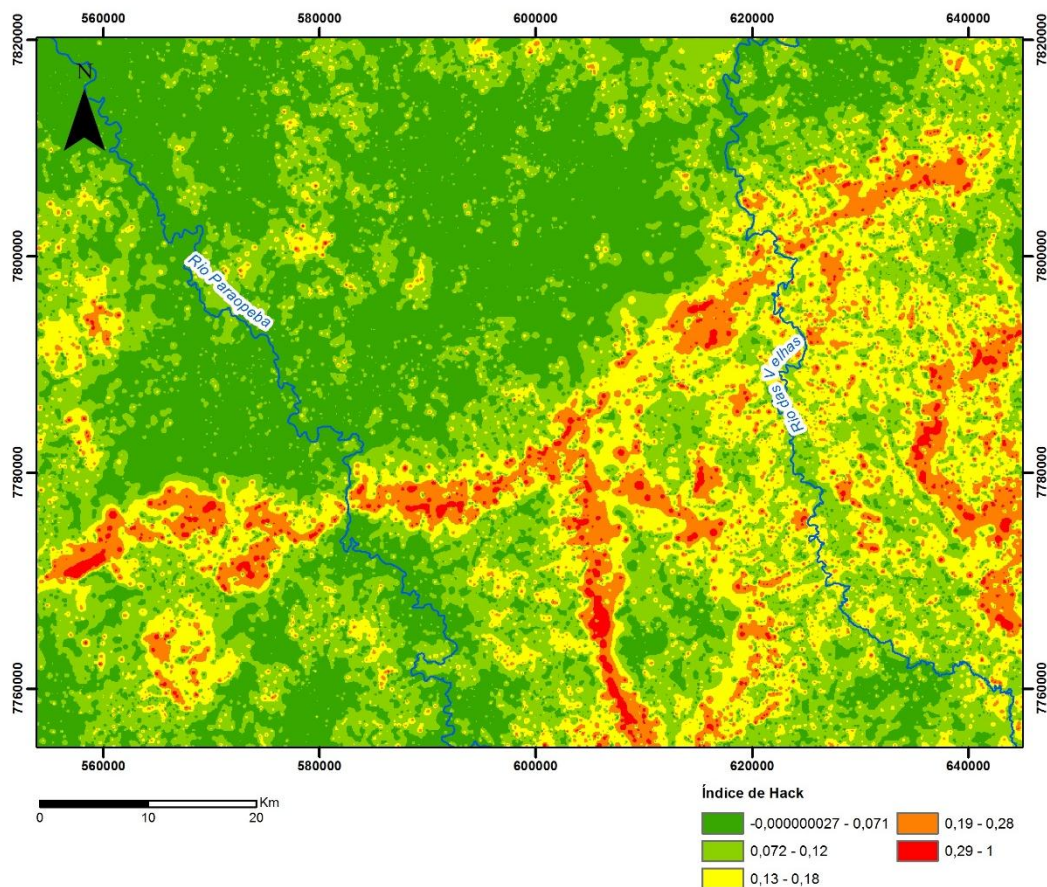


Este parâmetro morfométrico é o resultado da espacialização da densidade dos valores de declividade das vertentes da região em estudo. Com o ICR é possível distinguir as áreas de acordo com o nível de dissecação do relevo, podendo também associar este índice ao grau da influência morfoescultural das unidades do relevo.

Desta forma, a aplicação do índice resultou em duas grandes áreas homogêneas e distintas, onde os altos índices de rugosidade do relevo, representados pelas cores quentes do mapa delimitaram de forma satisfatória a Serra do Curral e as cristas do interior do Quadrilátero Ferrífero. Os baixos valores de rugosidade são representadas pelas tonalidades de verde e correspondem as áreas mais suavizadas da região, podendo ser associadas às áreas de depressão, planícies e fundos de vale. As áreas representadas pela cor amarela podem ser associadas às zonas de transição do relevo, pois geralmente aparecem no contato entre os valores mais extremos, mais espaçadas e de modo gradual.

Nota-se neste mapa uma boa distinção entre a Serra do Curral da Depressão Periférica de Belo Horizonte, na qual abrangeu uma grande porção uniforme contemplando os valores mais próximos de 0 (zero). Outra boa distinção com a execução deste índice foi a diferenciação entre o platô e as cristas da Sinclinal Moeda, não diferenciadas somente com a análise da altimetria.

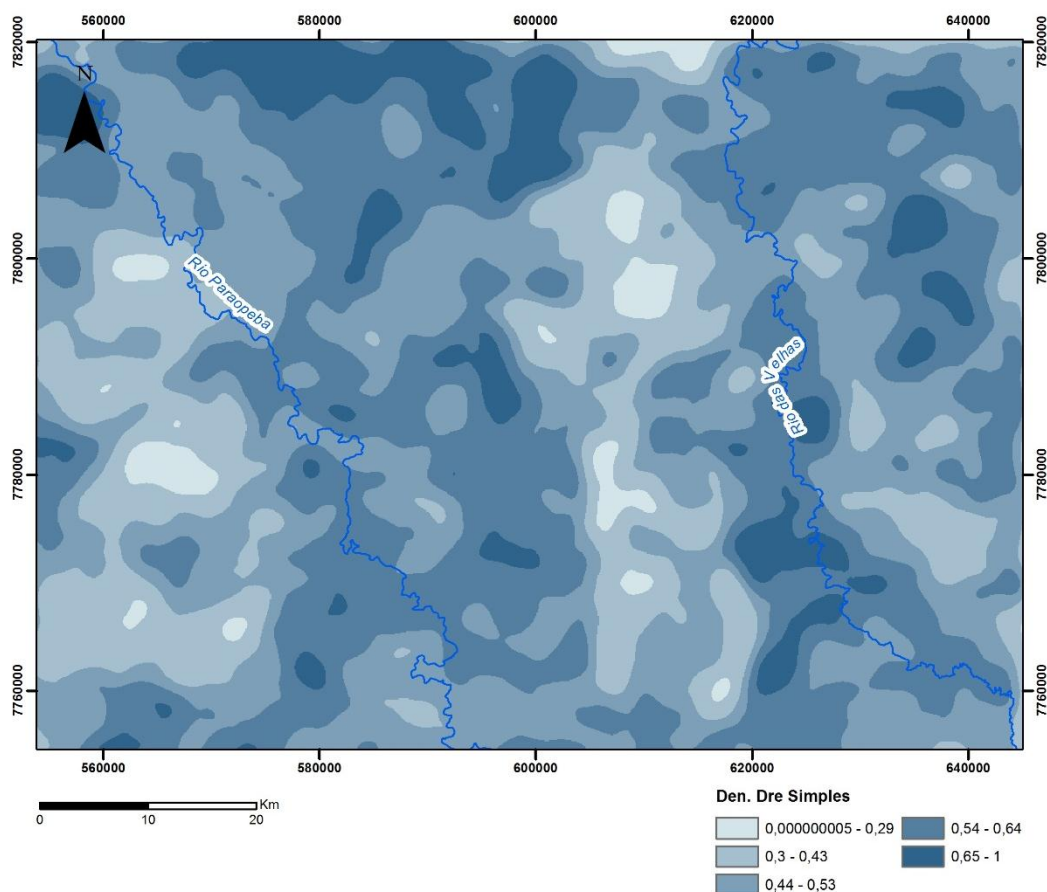
### 5.1.3 Mapa de Índice de Hack



A distribuição espacial do índice de Hack indica as áreas onde os canais de drenagem possuem maior vigor energético. De um modo geral, observa-se que os maiores valores do IH está concentrado nos segmentos de drenagem que tem fluxo hídrico começando nas serras que delineiam o Quadrilátero Ferrífero.

Portanto, pode-se associar o forte vigor energético às cristas dos planaltos, por se tratarem de áreas de alta declividade/rugosidade, onde em muitos pontos correspondem a vertentes escarpadas e possuem uma alta amplitude altimétrica entre as nascentes dos canais e seus pontos de deságue.

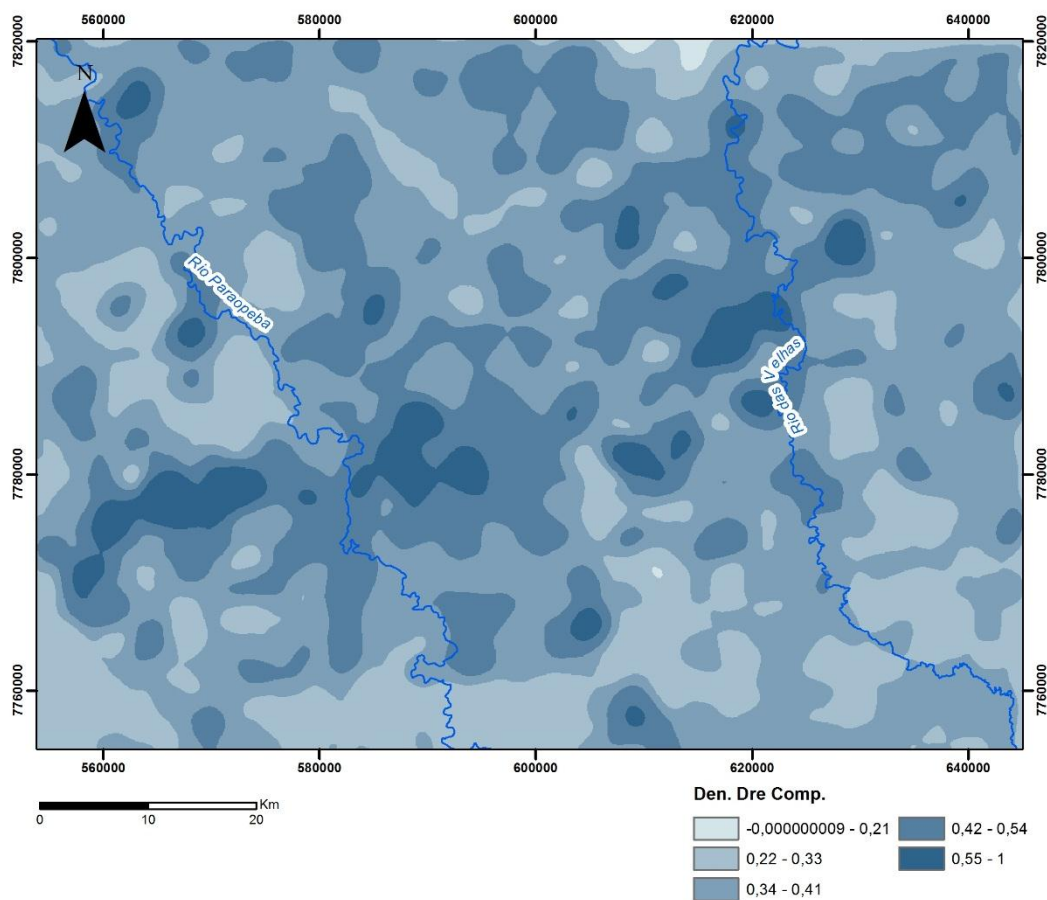
#### 5.1.4 Mapa de Densidade de Drenagem Simplificada



A Densidade de Drenagem simplificada é ponderada apenas pela quantidade de canais de drenagem existentes na área de estudo. Deste modo, sua distribuição espacial resultou em manchas graduais de altas a baixas densidades, independente das características dos canais como comprimento dos corpos hídricos.

As maiores concentrações de manchas com alta densidade de drenagem estão associadas a rede de drenagem dos principais rios da região (Rio das Velhas e do Rio Paraopeba) e a concentração das manchas de menor densidade estão relacionadas com os divisores de água das bacias destes rios. Percebe-se no mapa dois lineamentos de manchas com menor densidade paralelas às concentrações de maior densidade.

### 5.1.5 Mapa de Densidade de Drenagem por comprimento dos canais

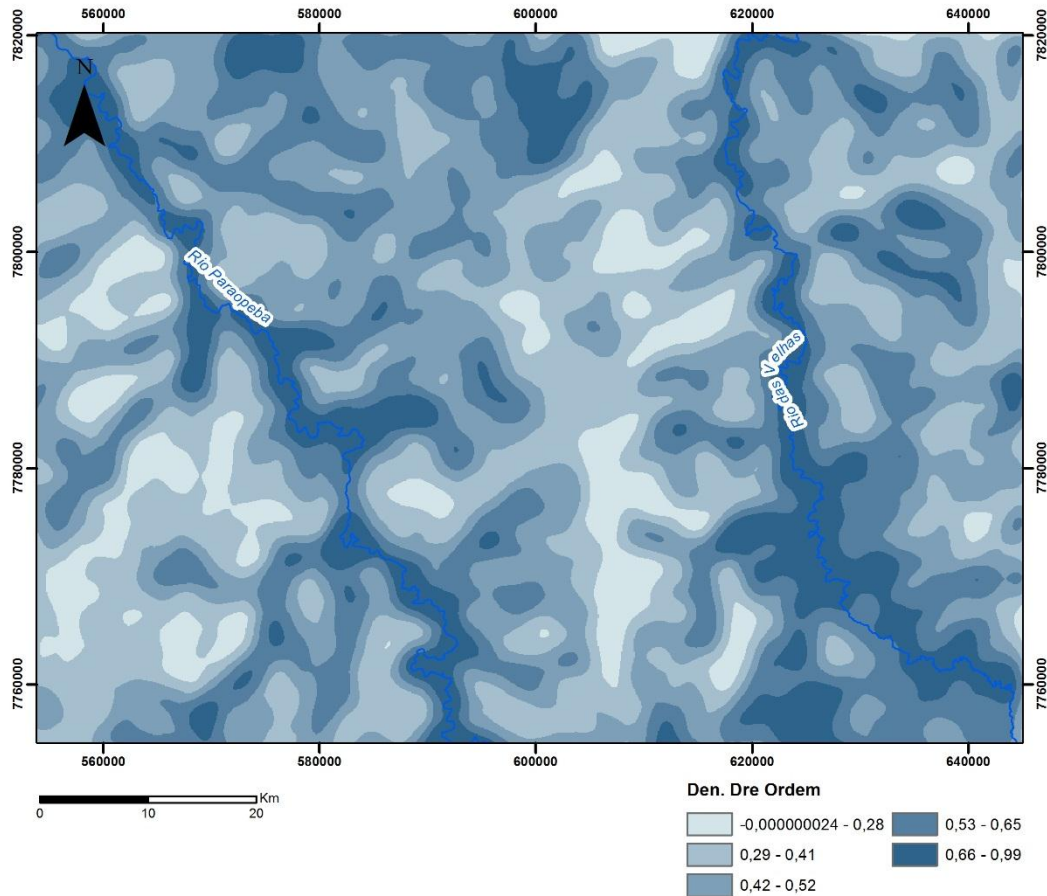


Para a aquisição deste índice, levou em consideração os conceitos de densidade de drenagem adotados por Horton (1945) e pelo IBGE (2009), em que baseia-se na relação entre o comprimento dos canais e a área amostrada.

Percebe-se neste produto que a disposição das manchas de concentração da densidade de drenagem ponderada pelo comprimento dos canais mudou significativamente em relação ao resultado anterior, onde, neste produto, é possível avistar uma alta correlação de manchas de alta densidade com o segmento da Serra do Curral. No entanto, o restante da

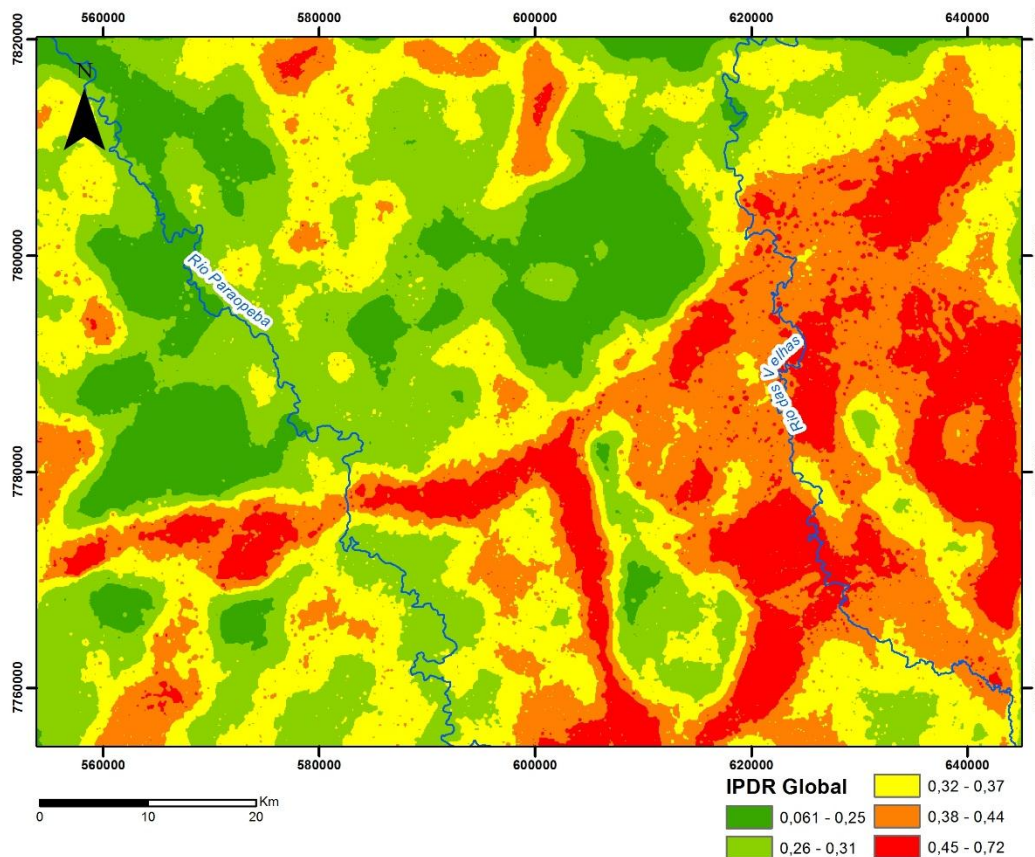
região do QF consolidou-se em manchas de baixa densidade. As demais áreas que correspondem as depressões ficaram sem um padrão definido.

### 5.1.6 Mapa de Densidade de Drenagem por ordem dos canais



A Densidade de Drenagem foi ponderada pela ordem de canais de Strahler (1952), onde ficou evidente a influência da hierarquia fluvial presente na área de estudo na espacialização das manchas de densidade. Nesse sentido, é visível os maiores índices de densidade em função do Rio Paraopeba e do Rio das Velhas, onde cortam um segmento de manchas de menor densidade no sentido do lineamento da Serra do Curral. Também é visível um segmento de manchas de menor densidade no sentido norte/sul, podendo fazer uma associação com os divisores de água das bacias dos rios mencionados.

### 5.1.7 Mapa índice de Potencial de dissecação



O mapa do Índice Global de Potencialidade de Dissecação do Relevo é o resultado da junção do Índice de Hack, do ICR Global e da Densidade de Drenagem ponderada pelo comprimento dos canais, gerados como instrumentos de análise para a compartimentação do relevo. Este índice não leva em consideração apenas as formas, mas também a dinâmica hidrogeomorfológica e a sua intensidade ao atuar no modelado das feições. O IPD Global, portanto, permite avaliar a maior ou menor influência dos agentes modeladores do relevo, podendo também delimitar regiões a partir de sua estabilidade geomorfológica.

Conforme demonstra o mapa, os maiores valores (manchas em vermelho) estão inseridos no entorno das principais cristas de serras do QF, estando mais agrupados entre a porção central e oeste da Serra do Curral e na porção leste, nas proximidades do município de Taquaraçu de Minas, nas bordas da Sinclinal Moeda, principalmente na Serra de Ouro Fino, nos Patamares Escalonados do Jaguará, nas serras e esporões existentes dentro do Vale Anticlinal do Rio das Velhas e em alguns pontos isolados dentro da Depressão da Belo Horizonte. Existe uma grande concentração de valores de 0,38 a 0,44, representados

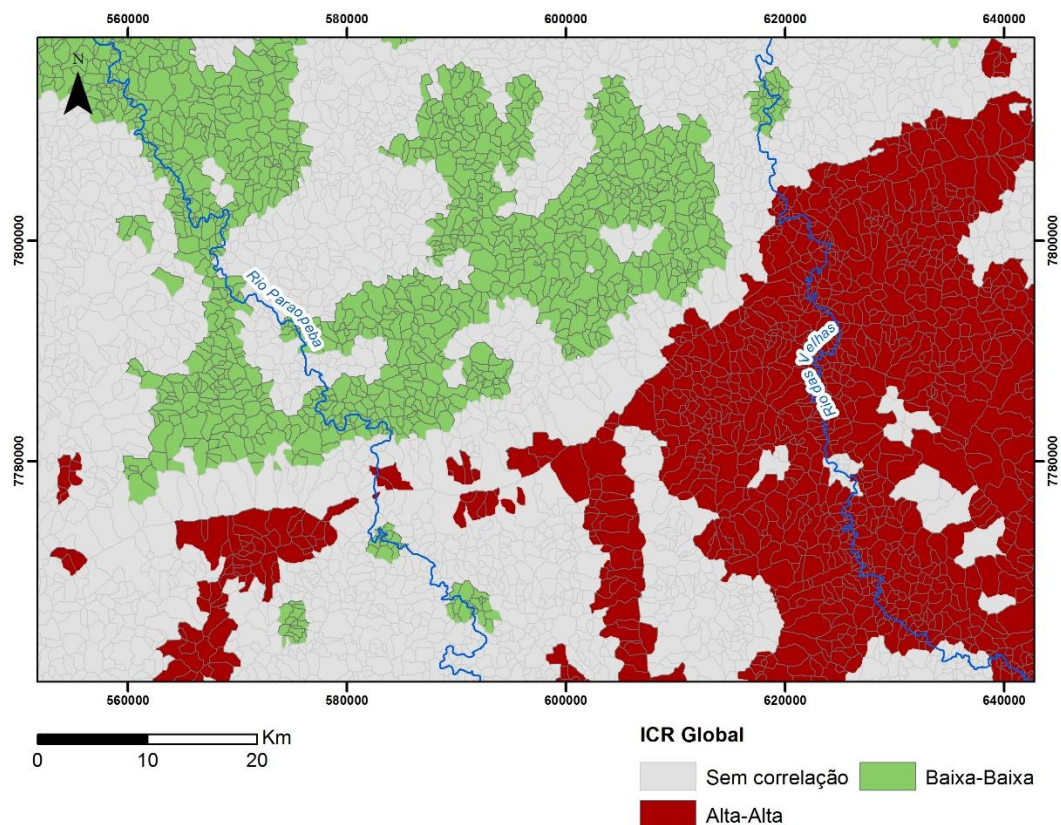
pela cor laranja, nas bordas e no interior do QF, demonstrando significativa intensidade de dissecação nessas áreas.

As áreas com os menores valores de IPDR Global, representados pelas tonalidades de verde, situam-se no Platô do Sinclinal Moeda, na Depressão de Belo Horizonte e na Depressão Marginal do Vale do Rio Paraopeba.

## 5.2 MAPAS RESULTANTES ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE MORAN LOCAL -LISA

A seguir, serão apresentados os mapas resultantes do processo de autocorrelação espacial dos índices morfométricos espacializados nas sub-bacias existentes na área de estudo, obtidos a partir da aplicação do Índice de Moran Local. Os valores estão associados ao diagrama de espalhamento de Moran, facilitando assim a identificação de *clusters* de áreas e *outliers*.

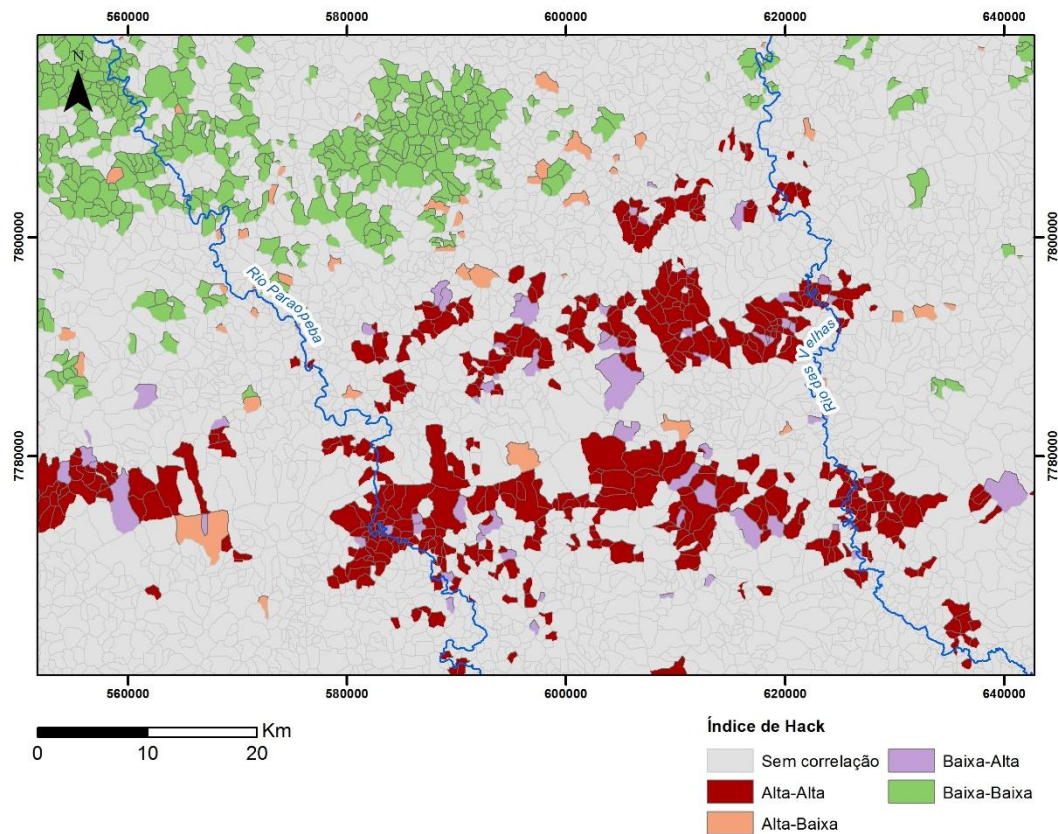
### 5.2.1 Agrupamento das sub-bacias em relação ao ICR Global



A aplicação do índice de Moran Local no ICR Global evidenciou dois grandes agrupamentos de alta correlação espacial entre as sub-bacias. O agrupamento Alto-Alto (cor marron) está associado as sub-bacias do Quadrilátero Ferrífero e as sub-bacias da Serra do Curral orientadas para o sul/sudeste, onde delimitou as regiões mais acidentadas da área em estudo. O agrupamento Baixo Baixo (cor verde), no entanto, associou as sub-bacias que possuem os menores índices de rugosidade, estas, pertencentes a Depressão de Belo Horizonte. Grande parte das sub-bacias da Serra do Curral cujos canais de

drenagem fluem para o norte e do Platô do Sinclinal Moeda, não apresentaram correlação espacial. A Depressão Marginal do Vale do Rio Paraopeba também não apresentou correlação espacial entre as suas sub-bacias, com exceção de alguns pontos isolados que obtiveram o agrupamento Baixo-Baixo.

### 5.2.2 Agrupamento das sub-bacias em relação ao Índice de Hack



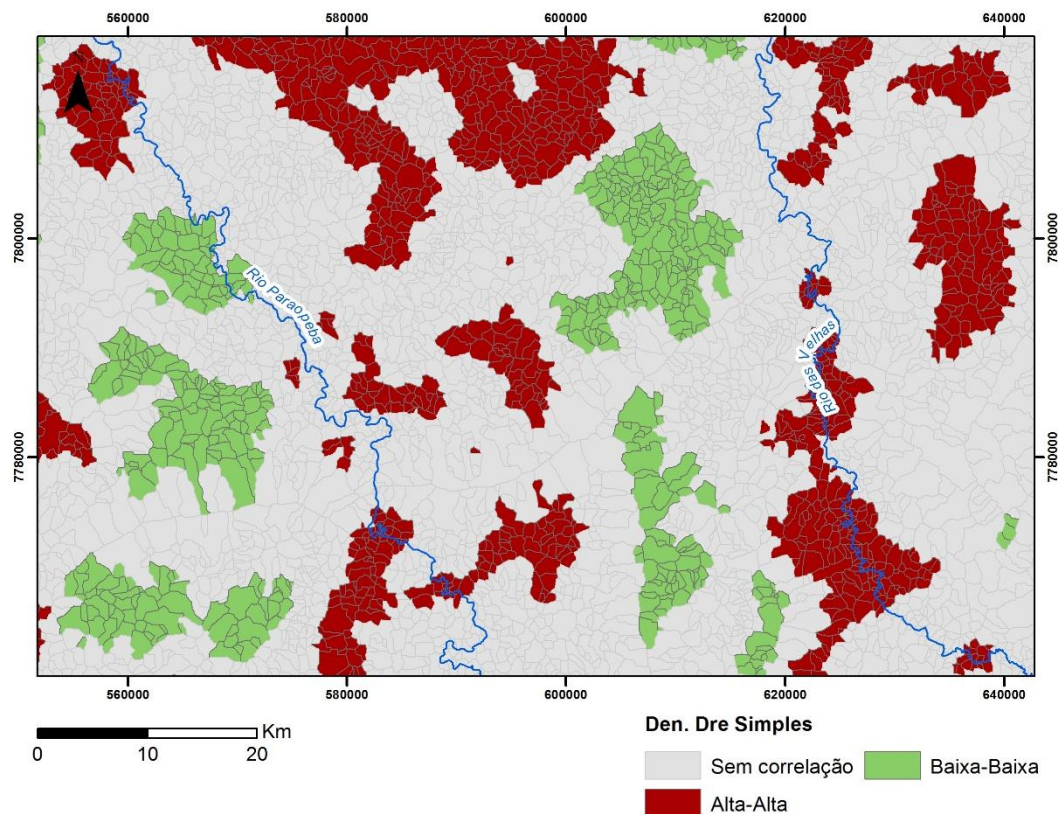
A aplicação do índice de Moran Local no Índice de Hack demonstrou vários agrupamentos espalhados e duas grandes concentrações de agrupamentos. A primeira concentração refere-se ao agrupamento Baixo-Baixo localizado na porção noroeste do mapa. Nota-se que quase todos agrupamentos desta classe estão inseridos na Depressão de Belo Horizonte, podendo caracteriza-la, de modo geral, como uma região onde sua rede de drenagem possui baixo vigor energético.

A maior parte dos agrupamentos de Alto-Alto (é alto alto correlação mesmo?) estão inseridos na região do Quadrilátero Ferrífero, no entanto não apresentarem um padrão bem definido como apresentou o mapa de autocorrelação do ICR Global. É visível um grande agrupamento contínuo e linear, intercalado por bacias de baixo vigor energético

(Baixo-Alto) cortando o QF. Existe outro significativo agrupamento, também intercalado por bacias de baixo vigor energético, na porção central do mapa, provavelmente em função do lineamento da Serra do Curral. Os agrupamentos de Alto-Baixo correlação estão espalhados em toda a porção do mapa, em áreas de baixo vigor energético, sem apresentar nenhum padrão.

Em relação à análise de cluster aplicada ao IH ressalta-se a importância não somente dos agrupamentos de altos e baixos valores, mas sobretudo as bacias que não se enquadraram em uma classe de cluster, as bacias Alto-Baixo e Baixo-Alto. Tais áreas de drenagem devem ser alvos de investigações futuras, visando a busca de evidências de campo relacionadas a possíveis anomalias aparentes nos canais de drenagem, nos terraços fluviais e nos perfis de solos.

### 5.2.3 Agrupamento das sub-bacias em relação a Densidade de Drenagem Simplificada

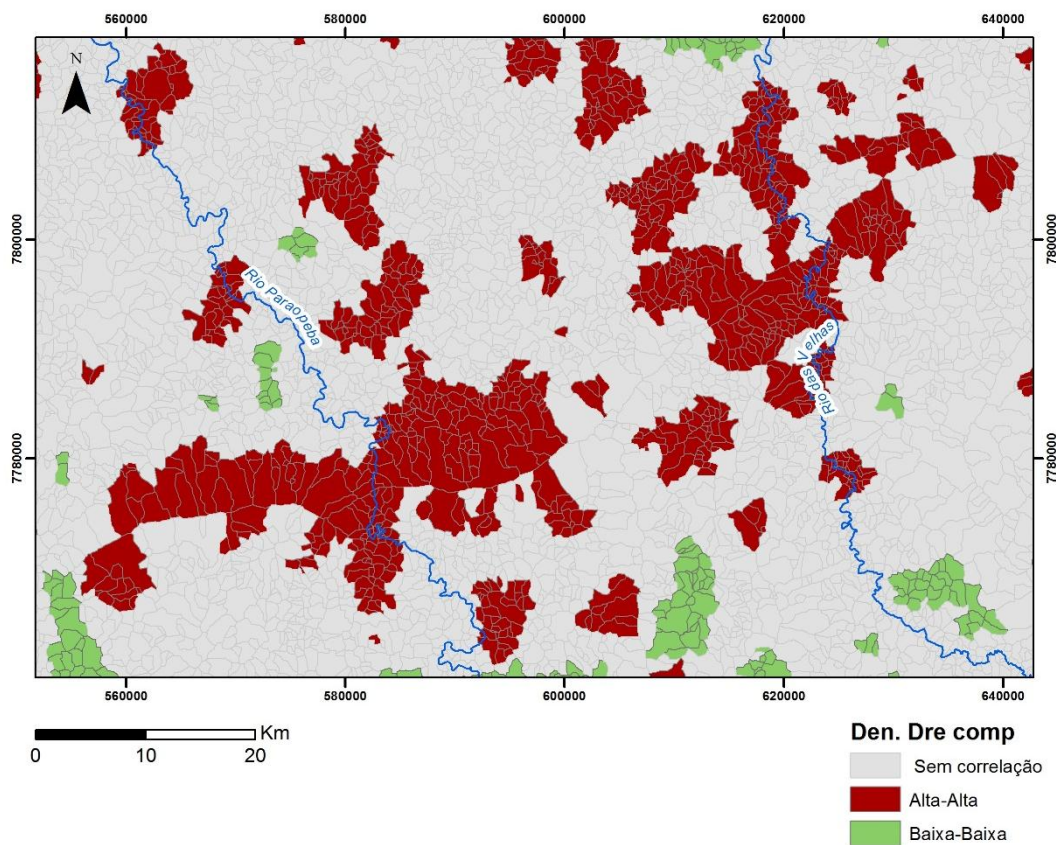


A disposição espacial dos agrupamentos das sub-bacias com maior densidade de drenagem (Alta-Alto) aparentam apresentar maior relação com o fluxo dos dois principais rios da área de estudo, sendo mais evidente na bacia do Rio das Velhas. O maior

agrupamento desta classe está situada na porção norte do mapa, inserida na depressão de Belo Horizonte.

Os agrupamentos Baixo-Baixo, ou seja, as áreas com menores valores de densidade de drenagem situam-se paralelamente aos agrupamentos Alto-Alto, intercalados com bacias que não apresentam nenhuma correlação. Os maiores agrupamentos se encontram próximos à vertente norte da Serra do Curral, no platô do Siclinal Gandarela e a oeste da Depressão do Vale do Rio Paraopeba, localizada na porção sudoeste do mapa.

#### 5.2.4 Agrupamento das sub-bacias em relação a Densidade de Drenagem ponderada pelo comprimento de canais

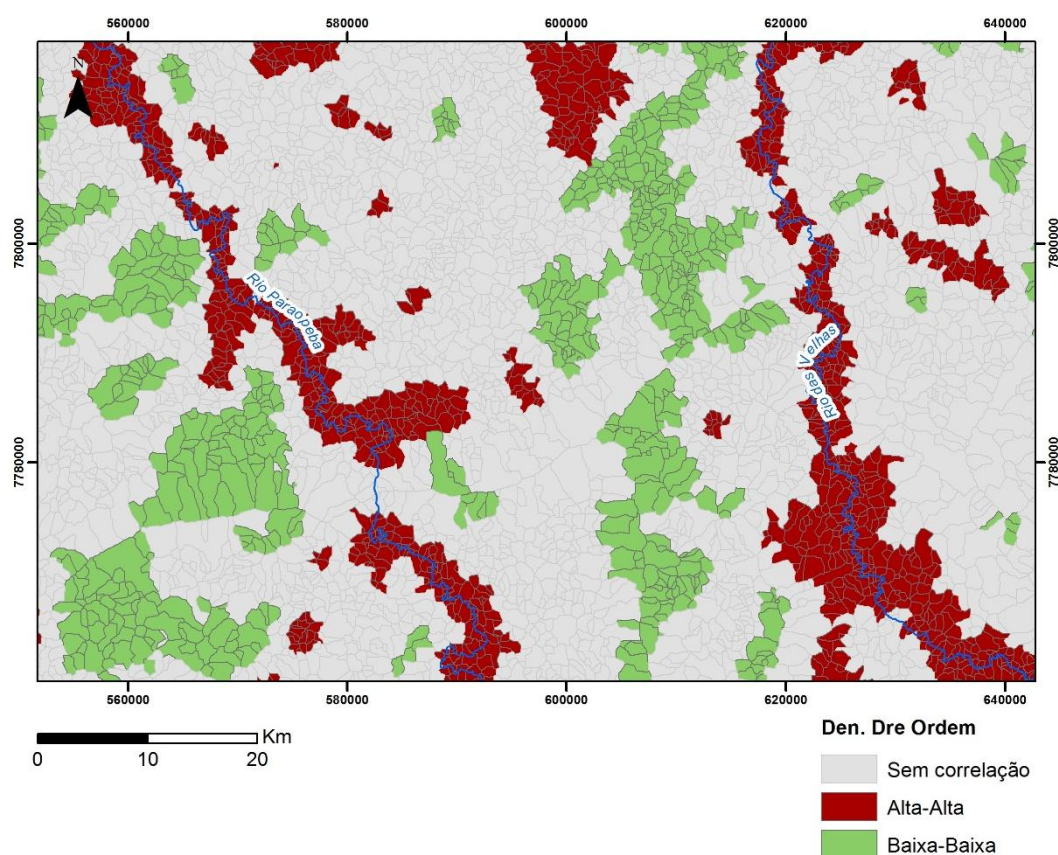


A aplicação do Índice de Moran Local neste parâmetro evidenciou que os maiores valores deste índice (agrupamento Alto-Alto) se concentram praticamente nas sub-bacias da Serra do Curral e dão segmento no sentido dos fluxos do Rio das Velhas e do Rio Paraopeba, na Depressão de Belo Horizonte. Uma grande concentração de sub-bacias sem correlação espacial, situadas na porção da Serra pertencente ao território de Belo Horizonte (porção

central do mapa), rompe a continuidade do Agrupamento Alto-Alto nessa estrutura e se segmenta no sentido do lineamento do divisor de água das bacias dos rios mencionados.

Os agrupamentos das sub-bacias com baixa densidade de drenagem (Baixo-Baixo) estão em menor proporção no mapa e se distribuem de forma espalhada em regiões de baixa rugosidade.

### 5.2.5 Agrupamento das sub-bacias em relação a Densidade de Drenagem ponderada pela ordem de canais



Assim como no mapa de Densidade de drenagem ponderado pela ordenação dos canais, apresentado anteriormente, o resultado da aplicação do Índice de Moran Local neste parâmetro demonstra a grande influência dos canais que recebem maior número de tributários. Portanto, os agrupamentos Alto-Alto concentram-se nos vales do Rio das Velhas e do Rio Paraopeba.

Os agrupamentos Baixo-Baixo também apresentaram um alto número de concentrações, localizados principalmente no lineamento do divisor de águas das duas grandes bacias, agregando sub-bacias do Platô do Sinclinal Moeda até a Depressão de Belo Horizonte,

nas sub-bacias da Serra do Curral localizadas na porção sudoeste do mapa e a oeste da Depressão do Vale do Rio Paraopeba.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a execução da metodologia proposta neste trabalho, foi possível testar o potencial das ferramentas de geoprocessamento quando aplicadas a Modelos Digitais de Terreno na contribuição para o desenvolvimento de estudos geomorfológicos. Os resultados aqui apresentados foram bastantes satisfatórios, dentro da escala de análise proposta, deixando em evidência a grande eficácia de se trabalhar com parâmetros morfométricos em ambiente SIG. Também foi demonstrada a possibilidade de se obter mapas que simulam cenários provindos da interação entre os objetos ou fenômenos espaciais estudados, resultantes do processo de álgebra de mapas.

O mapa de Índice Global de Dissecação do Relevo, resultante desse processo, foi uma tentativa de apresentar compartimentos geomorfológicos não como formas estáticas, mas como modelados que se encontram em desenvolvimento em função de processos geomorfológicos dinâmicos, que atuam em diferentes escalas temporais. Portanto, é válida a criação de outros índices morfométricos com diferentes dados espaciais para compor modelos geomorfológicos cada vez mais condizentes com a realidade.

Vale salientar que a metodologia aqui apresentada pode ser aplicada em escalas locais, como deduziram Augustin e Sampaio (2014) para o Índice de Concentração da Rugosidade, dependendo apenas da resolução espacial do MDT e do comprimento do raio de abrangência do Estimador de Densidade de Kernel, para a extração das densidades dos atributos. No entanto, apesar destes índices serem embasados em dados sólidos e coesos, esta metodologia não exclui a necessidade de visitas a campo, sendo estas imprescindíveis para validá-los. Os demais dados espaciais utilizados nos modelados também devem estar condizentes com a escala de trabalho adotada, de modo a evitar a geração de informações distorcidas.

Em relação as impressões com os resultados da espacialização dos índices obtidos em sub-bacias e posterior aplicação do Índice de Moran, foi notória a alta potencialidade desta técnica para a delimitação de morfoestruturas e unidades/sistemas, levando em de menor ou maior influência de um determinado índice. Além disso, permite detectar anormalidades em pontos dominados por unidades de auto correlação espacial.

Embora este índice seja amplamente utilizado em pesquisas de cunho socioeconômico, como foi notado durante o processo de coleta de referencial teórico, ainda é pouco

conhecido na área ambiental. Portanto, é válido difundir-lo em vista da sua versatilidade de utilização.

As análises geomorfológicas não foram aprofundadas, mesmo porque não era a proposta deste estudo, cujo enfoque foi gerar compartimentações a partir de dados quantitativos, sem análises subjetivas. Como mencionado anteriormente, os produtos gerados serão futuramente utilizados para orientar os trabalhos de campo e serão analisados junto com dados extraídos *in loco*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUGUSTIN, C. H. R. R. e SAMPAIO, T. V. M. **Índice de Concentração da Rugosidade: Uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v-15, n°1, 2014.

FONSECA, B. M. **O uso do sistema de informações geográficas na análise morfométrica e morfológica de bacias de drenagem na Serra do Espinhaço Meridional-MG.** Dissertação de Mestrado. IGC – UFMG. Belo Horizonte. 2010. 93 p.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Curso de Análise Espacial de Dados Geográficos :Análise de Padrões de Área.** Divisão de Sensoriamento Remoto. Maio, 2001.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Projeto Terraview. **Aulas e tutoriais.** Divisão de Processamento de Imagem. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/terraview/index.php>. Acesso em nov. 2014.

IBGE. **Manual técnico de geomorfologia.** Manuais técnicos em geociências n. 5. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2. ed. - Rio de Janeiro : IBGE, 2009. 182 p.

NUNES, F. G. N. **Análise exploratória espacial de indicadores de desenvolvimento socioambiental das regiões de planejamento do norte e nordeste goiano.** Ateliê Geográfico, v-7. Goiânia, 2013.

Projeto APA Sul RMBH: Geologia estrutural / Orivaldo F. Baltazar, Márcia Zuchetti – Belo Horizonte SEMAD/CPRM, 2005.

Projeto APA Sul RMBH: Geomorfologia / Medina A. I. M; Dantas M. E.; Saadi A. – Belo Horizonte SEMAD/CPRM, 2005.

SOUZA, L. F. e SAMPAIO, T. V. M. **Aplicação do Índice de Concentração da Rugosidade à identificação de classes de dissecação do relevo:** uma proposta de quantificação e automatização em ambiente SIG. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife -PE, 27-30 de Julho de 2010.