

AGRADECIMENTOS

Agradeço, dedico e entrego este trabalho a DEUS.

A minha família, pai, mãe e Camilinha ,minha base firme. Agradeço a Dayane Andrade pela presença, Amor, e apoio.

A professora Dra. Cristina Augustin, um exemplo vivo de disciplina e sabedoria. Professora, a senhora me ensinou que bem melhor do que receber o “peixe” na “boca” é aprender a “pescar”, gostaria de dizer que a sua trajetória acadêmica já é uma orientação e muito me inspira.

Agradeço ao Centro de Sensoriamento Remoto da UFMG, nas pessoas do Professor Dr. Britaldo Soares Filho, Willian Leles e Hermann Rodrigues, pelo apoio no primeiro ano de pesquisa. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e ao Centro de Geologia Eschwege pela logística de campo, hospedagem e sua vasta biblioteca.

Agradeço a Daniel Peifer e Alfredo Costa pelas discussões teóricas e técnicas que muito contribuíram com a pesquisa. Agradeço ao amigo Professor Leonardo Rocha (UFSJ), e a todos os colegas do programa de pós-graduação. Não poderia deixar de registrar meu muito obrigado a Simone de Moraes e Elaine Piroli e Maria Paula Berlando.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| Agradecimentos..... | i |
| Sumário..... | ii |
| Lista de Figuras..... | iv |
| Lista de Tabelas..... | viii |
| Resumo..... | ix |
| <i>Abstract</i> | x |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.2. HIPÓTESE E OBJETIVOS | 3 |
| 2. A SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL E A ÁREA DE ESTUDO..... | 3 |
| 2.1. CLIMA..... | 4 |
| 2.2. VEGETAÇÃO..... | 5 |
| 2.3. GEOLOGIA..... | 7 |
| 2.3.1. O PADRÃO ESTRUTURAL REGIONAL | 08 |
| 2.4. CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA..... | 09 |
| 2.5. USO DE RECURSOS NATURAIS NA SdEM..... | 12 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 13 |
| 3.1. ANÁLISE MORFOESTRUTURAL E MORFOTECTÔNICA..... | 13 |
| 3.2. A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE ANÁLISE AMBIENTAL INTEGRADA..... | 15 |
| 3.3 - MORFOMETRIA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS..... | 17 |
| 3.3.1. A Análise morfométrica de bacias hidrográficas..... | 19 |
| 3.3.1.2. O Índice de Hack e o perfil longitudinal dos rios..... | 21 |
| 3.4. MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO..... | 23 |
| 3.5. MODELOS HIDROLÓGICOS EM GEOMORFOLOGIA..... | 27 |
| 4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... | 30 |
| 4.1. A BASE CARTOGRÁFICA..... | 32 |
| 4.2. PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS | 32 |
| 4.3. DERIVADOS DA MODELAGEM DIGITAL DE ELEVAÇÃO..... | 38 |
| 4.4. PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO..... | 39 |
| 4.5. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM..... | 40 |

| | |
|--|-----------|
| 4.5.1 – Análise de lineamentos..... | 41 |
| 4.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA ESPACIAL..... | 44 |
| 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 47 |
| 5.1. CORREÇÃO TOPOLÓGICA DA BASE CARTOGRÁFICA REFERENTE À REDE DE DRENAG..... | 47 |
| 5.2. MODELOS HIDROLÓGICOS: BACIAS HIDROGRÁFICAS E HIERARQUIA FLUVIA..... | 49 |
| 5.3. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICO..... | 51 |
| 5.3.1. Análise dos Componentes Principais (ACP) | 51 |
| 5.3.2. Distribuição espacial do Índice de Hack..... | 56 |
| 5.3.4 - Distribuição espacial de lineamentos | 58 |
| 5.4. ANÁLISE HIPSOMÉTRICA..... | 62 |
| 5.5. VARIABILIDADE TOPOGRÁFICA, DECLIVIDADES, ICR E ORIENTAÇÃO DAS VERTENTES..... | 65 |
| 5.6. AS BACIAS HIDROGRÁFICAS E A REDE DE DRENAGEM: PADRÕES E HIERARQUIA FLUVIAL..... | 68 |
| 5.7. ANÁLISE DO ÍNDICE DE HACK E DE PERFIS LONGITUDINAIS..... | 79 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 82 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 83 |
| 9. ANEXOS..... | 93 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura. 1- Mosaico de Imagens Landsat 5 evidenciando a localização da área de estudo na SdEM..... | 5 |
| Figura 2- Mapa de elaboração própria com dados Atlas Digital do Mapeamento da Flora Nativa e Reflorestamentos (IEFMG/UFLA)..... | 06 |
| Figura 3 - Mapa Geológico simplificado, dados do Projeto Espinhaço (COMIG, 1996)... | 08 |
| Figura 4- Uso de recursos naturais e unidades de conservação na área de estudo (bacias hidrográficas do Rio Pardo à esquerda e Alto Rio Jequitinhonha à direita)..... | 12 |
| Figura 05 - Malha Triangular..... | 25 |
| Figura 06 - Malha Retangular..... | 25 |
| Figura 07 – Princípio físico do Modelo Sombreado modificado de Felgueiras e Câmara (2001)..... | 26 |
| Figura 08- Esquema de codificação das direções de fluxo (D8)..... | 28 |
| Figura 09 - Esquema das direções de fluxo da rede de drenagem. A) vetores direcionais. B) Códigos de direção (D8). Fonte: Marcelline (2002)..... | 29 |
| Figura 10 – Matrizes representando o escoamento superficial acumulado. A) vetores representando a rede de drenagem. B) Matriz de fluxo acumulado. Os números representam a quantidade de células que acumularam em uma determinada área drenada. Fonte: Marcellini (2002)..... | 29 |
| Figura 11- Esquema representando o estabelecimento de rede de drenagem. Fonte: Marcellini (2002)..... | 30 |
| Figura 12 - Limite das cartas topográficas, para a área pesquisada, de acordo com o índice do mapeamento sistemático brasileiro..... | 31 |
| Figura 13 – Modelo de hierarquização fluvial proposto por: a) Horton (1945) e b) Strahler (1952). Podemos observar que a hierarquização proposta por Strahler exclui a máxima de que o rio principal tem sempre a mesma ordem em toda a sua extensão. Com a proposta de Strahler não há necessidade de refazer a hierarquização a cada confluência, como ocorre com a proposta de Horton..... | 33 |
| Figura 14 - Parâmetros a serem medidos no cálculo do Índice de Hack. Fonte: Hack (1973)..... | 34 |
| Figura 15 – Modelo representando os quatro principais quadrantes direcionais..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura 16 -Curva de Refletância Espectral gráfico de R (%) em função de $\lambda(um)$. Fonte: IGEO – Portugal..... | 40 |
| Figura 17 – A) Na porção central da imagem observa-se os efeitos da correção radiométrica e nas partes periféricas visualizamos o efeitos da atmosfera . B) Composição 5R,4G,3B, bandas do sensor TM/Landsat 5..... | 41 |
| Figura 21 – NDVI aplicado para realçar fragmentos de vegetação com morfologia linear..... | 43 |
| Figura 22 - Esquema de funcionamento do interpolador Kernel. Fonte: Câmara & Carvalho (2001)..... | 45 |
| Figura 23 – Esquema representando o Diagrama de Voronoi..... | 46 |
| Figura 24 – Erros topológicos encontrados nas bases topográficas oficiais existentes para a área pesquisada. A) A rede de drenada fragmentada compromete o calculo de parâmetros morfométricos. B) Curvas de nível com erros topológicos..... | 48 |
| Figura 25 A – Rede de drenagem restituída automaticamente através do MDE. Os canais estão hidrologicamente consistentes, mas inconsistentes morfologicamente, conforme evidenciado pelos segmentos extremamente retilíneos gerados pelo modelo hidrológico. Figura 25 B - Rede de drenagem (IBGE/GEOMINAS) corrigida hidrologicamente e morfologicamente em processo semi-automático... | 48 |
| Figura 26 – À esquerda observa-se bacias de 1º, 2º e 3º ordem mais seus fragmentos (bacias de drenagem não classificadas), à direita observa-se as mesmas ordens de bacias de drenagem, porém sem os fragmentos não classificados..... | 50 |
| Figura 27 – Distribuição espacial das três componentes principais para as três primeiras ordens de bacias analisadas..... | 55 |
| Figura 28 – Distribuição espacial dos valores calculados para o Índice de Hack..... | 57 |
| Figura 29 – Distribuição espacial do índice de Hack através do interpolador IDW..... | 57 |
| Figura 30 - Distribuição espacial do índice de Hack através do Diagrama de Voronoi..... | 58 |
| Figura 31 – Resultado dos filtros direcionais na banda 5 do sensor TM Landsat 5..... | 59 |
| Figura 32 – Modelo de orientação das vertentes..... | 60 |
| Figura 33 – Lineamentos morfoestruturais extraídos após processamento aplicado na banda 5 do sensor TM Landsat 5..... | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 33.1 – Índice de vegetação para a área de estudo. Os círculos em vermelho ressaltam áreas onde os fragmentos de vegetação tomam a forma linear ou estão relacionados com a ocorrência de diques de rochas metabásicas..... | 61 |
| Figura 34 – Mapa hipsométrico da área de estudo, à esquerda bacia do rio Pardo, à direita bacia do alto Jequitinhonha..... | 63 |
| Figura 35a – Relação entre a área de ocorrência dos litótipos e sua altimetria média..... | 63 |
| Figura 35b – Relação entre as classes hipsométricas e litótipos (complemento figura 35a)..... | 64 |
| Figura 36 – Integral hipsométrica representando as áreas dos litótipos da bacia do rio Pardo..... | 64 |
| Figura 37 – Integral hipsométrica representando as áreas dos litótipos da bacia do alto Jequitinhonha..... | 64 |
| Figura 38 – Altimetrias (à esquerda) e declividades (à direita) médias para as três primeiras ordens de bacias de drenagem delimitadas mais seus respectivos fragmentos..... | 66 |
| Figura 38.1 – Índice de concentração da rugosidade..... | 67 |
| Figura 39 – Orientação média médias das vertentes para as bacias de primeira, segunda e terceira ordens exceto seus fragmentos..... | 68 |
| Figura 40 – Rede de drenagem e hierarquia fluvial das bacias do rio Pardo à esquerda e alto Jequitinhonha à direita..... | 69 |
| Figura 40.1 – CC: Coeficiente de Compacidade e IC: Índice de circularidade para as três ordens de bacias de drenagem..... | 71 |
| Figura 40.2 – Área e perímetro circularidade para as três ordens de bacias de drenagem..... | 71 |
| Figura 41 – Domínios morfoestruturais e padrões de drenagem para as bacias do rio Pardo à esquerda e alto Jequitinhonha à direita. Na porção central observa-se a zona de adensamento de diques de rochas metabásicas..... | 73 |
| Figura 42 - Frequência absoluta das direções dos canais de drenagem por domínio morfoestrutural. – A) Depressão do rio das Velhas; B) Vale encaixado do alto Jequitinhonha; C) Superfície escalonada da borda oeste; D) Superfície dissecada e basculada da borda leste E) Vertentes e cristas estruturalmente condicionadas; F) Depressão de Couto Magalhães e Maria Nunes..... | 74 |
| Figura 43 – Diagrama de reseta do comprimento médio dos canais de drenagem do domínio morfoestrutural superfície escalonada da borda oeste..... | 75 |

| | |
|--|----|
| Figura 44 – Lineamentos estruturais e rede de drenagem das bacias do rio Pardo à esquerda e alto Jequitinhonha à direita..... | 76 |
| Figura 45 - Frequência absoluta das direções dos lineamentos estruturais por domínio morfoestrutural. – A1) Depressão do rio das Velhas; B1) Vale encaixado do alto Jequitinhonha; C1) Superfície escalonada da borda oeste; D1) Superfície dissecada e basculada da borda leste E1) Vertentes e cristas estruturalmente condicionadas; F1) Depressão de Couto Magalhães e Maria Nunes..... | 77 |
| Figura 46 – Rios de hierarquia fluvial superior analisados nos diagramas da figura 47... | 78 |
| Figura 47 – FA: Frequência Absoluta e CA: Comprimento Absoluto dos rios principais e lineamentos estruturais..... | 79 |
| Figura 48 – Distribuição espacial do índice de Hack, rios principais e pontos referentes a trechos encachoeirados..... | 80 |

ISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Características espectrais das bandas do sensor TM/Landsat 5..... | 39 |
| Tabela 2 – Matriz de vizinhança para gerar um filtro..... | 42 |
| Tabela 3 – Filtro direcional azimute de 45° (SW-NE)..... | 42 |
| Tabela 4 – Filtro direcional azimute de 315° (NW-SE)..... | 42 |
| Tabela 5 – Filtro direcional sentido E-W..... | 42 |
| Tabela 6 - Filtro direcional sentido N-S..... | 43 |
| Tabela 7 - Filtro direcional (5x5) sentido E-W..... | 43 |
| Tabela 8 – Ranking de contribuição das variáveis obtido através da técnica da APC para as bacias de drenagem de primeira ordem..... | 51 |
| Tabela 09 – Ranking de contribuição das variáveis obtido através da técnica da APC para as bacias de drenagem de segunda ordem..... | 52 |
| Tabela 10 – Ranking de contribuição das variáveis obtido através da técnica da APC para as bacias de drenagem de terceira ordem..... | 52 |
| Tabela 11 - Matriz de correlação entre os parâmetros morfométricos calculados e as três principais componentes identificadas pela APC para bacias de primeira ordem.... | 53 |
| Tabela 12 - Matriz de correlação entre os parâmetros morfométricos calculados e as três principais componentes identificadas pela APC para bacias de segunda ordem..... | 53 |
| Tabela 13 - Matriz de correlação entre os parâmetros morfométricos calculados e as três principais componentes identificadas pela APC para bacias de terceira ordem..... | 54 |
| Tabela 14 – Relação entre as principais orientações de vertentes para as três ordens hierárquicas de bacias analisadas..... | 68 |
| Tabela 15 – Parâmetros morfométricos referentes às dimensões e forma das bacias..... | 70 |
| Tabela 15.1 – Parâmetros morfométricos referentes à relação rede de drenagem/área da bacia..... | 70 |
| Tabela 15.2 – Parâmetros morfométricos referentes à relação rede de drenagem/área da bacia..... | 70 |

RESUMO

O presente trabalho analisou vários dados do relevo de duas áreas diferentes do Espinhaço Meridional, MG, para comprovar a hipótese de que a evolução geomorfológica entre as duas apresenta natureza e intensidade distintas, em função das características lito-estruturais e da dinâmica, específicas em cada uma delas. Foram realizadas análises morfométrica e morfológica comparativa entre as bacias hidrográficas dos rios Pardo e Alto Jequitinhonha, que drenam para as bordas oeste e leste do Espinhaço, respectivamente. Essas análises foram conduzidas com instrumentação disponível no Sistema de Informações Geográficas (SIG), o que possibilitou uma melhor integração, manipulação e compreensão dos dados. Foram realizadas correções nas bases cartográficas em escala de 1:100.000, compatíveis com a análise geomorfológica regional proposta. A aplicação do algoritmo D-8 em modelos digitais de elevação, para a confecção de novas bases cartográficas referentes à rede de drenagem, no entanto, não apresentaram boa consistência morfológica. Técnicas de processamento digital de imagens (PDI) e álgebra matricial foram usadas com o objetivo de identificar lineamentos morfológicos e estruturais, os quais tiveram suas direções analisadas em diagramas de rosetas. As direções principais da rede de drenagem e dos lineamentos estruturais foram correlacionadas e revelaram, de modo geral, controle estrutural claro da rede de drenagem. O uso da Análise de Principais Componentes (APC) indicou as variáveis: área, perímetro, índice de circularidade e coeficiente de compacidade, como as que melhor explicam o conjunto de parâmetros morfométricos analisados. Todas as análises efetuadas indicam que na bacia do Alto Jequitinhonha os processos geomorfológicos atuantes são mais intensos do que na bacia do rio Pardo. Os resultados do índice de Hack e dos perfis longitudinais revelaram que a rede de drenagem da bacia do Alto Jequitinhonha possui maior vigor energético do que a do rio Pardo, sendo que seus rios principais encontram-se em estado de desequilíbrio e/ou possuem anomalias ao longo do canal fluvial. Os rios principais da bacia do rio Pardo apresentam perfis longitudinais de estado de equilíbrio, mas possuem um grande número de rupturas de declive (*knickpoints*), possivelmente em função de uma maior variação litológica ao longo dos perfis dos seus rios, e não como indicativo de retomada erosiva. Considerando os resultados alcançados, foi possível aceitar a hipótese de que nas bordas leste e oeste da Serra do Espinhaço ocorrem processos geomorfológicos de natureza e intensidade diferenciadas, gerando formas de relevo distintas o suficiente para serem detectadas por análises morfométricas e morfológicas.

Palavras-chave: Serra do Espinhaço, Análise Morfométrica, Análise Morfológica, Bacias de drenagem, Sistemas de Informação Geográfica, Modelagem Digital de Elevação, Processamento Digital de Imagens e Estatística Multivariada.

ABSTRACT

This study used a wide range of the relieve data of two different areas of the Espinhaço mountain range in Minas Gerais, Brazil, to sustain the hypothesis that the nature and intensity of its geomorphological processes are different from each other due to the influence of specific litho-structural settings and geodynamics occurring in of each of them. To prove this hypothesis a morphometric and morphological comparison was carried out between the basins of the river Pardo and of Upper Jequitinhonha, both draining to the west and east edges of the mountain range, respectively. The tests were carried out using the instruments of Geographic Information System (GIS), which allowed a better integration, manipulation and understanding of the data. Corrections were made in cartographic scale of 1:100,000, consistent with regional geomorphological analysis of this study. Hydrological models using digital elevation models to provided new cartographic bases relating to the drainage network did not show good morphological consistency. Techniques for Digital Image Processing (DIP) and matrix algebra have been used to identify morphological and structural lineaments, which were analyzed through rosette diagrams. The main directions of the drainage network and structural lineaments were correlated and showed, in general, a clear structural control of the drainage network. The use of Principal Components Analysis (PCA) indicated that the variables: area, perimeter, circularity index and coefficient of compactness, are those with the best explanation index for the analyzed set of morphometric parameters. Results of all analyses strongly support that geomorphological processes are operating more intensely in the Upper Jequitinhonha than in the basin of the Pardo river. The analysis of the Hack, and of those of longitudinal profiles show that the drainage from the Upper Jequitinhonha has greater energy, and that its major rivers are in a state of imbalance and/ or have abnormalities along the river channel. Comparatively, the major rivers in the basin of the Pardo river have longitudinal profiles that indicate a state of equilibrium, and also a large number of breaks of slope (knickpoints). Considering the results, it can be assumed that the hypothesis which states that the geomorphological processes occurring at the eastern and western edges of the

Espinhaço have created landforms which are distinct enough to be detected by morphometric and morphological analysis.

Keywords: Espinhaço, Morphometric Analysis, Morphological Analysis, watershed, GIS, Digital Elevation Modeling, Digital Image Processing and Multivariate Statistics.