

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



## TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO

A MORFOMETRIA FLUVIAL COMO INDICADORA DE ATIVIDADES NEOTECTÔNICAS NA BACIA DO RIBEIRÃO DA CACHOEIRA - OURO PRETO, MG.

Vanessa dos Santos Carvalho Coelho

MONOGRAFIA nº 234

Ouro Preto, maio de 2017

# A MORFOMETRIA FLUVIAL COMO INDICADORA DE ATIVIDADES NEOTECTÔNICAS NA BACIA DO RIBEIRÃO DA CACHOEIRA - OURO PRETO, MG.



### FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

*Reitora* Cláudia Aparecida Marliére de Lima

Vice-Reitor

Hermínio Arias Nalini Júnior Pró-Reitora de Pesquisa e Pós-Graduação Prof. Dr<sup>a</sup>. Tânia Rossi Garbin

### ESCOLA DE MINAS

*Diretor* Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. José Geraldo Arantes de Azevedo Brito

### DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Dr. Luís Antônio Rosa Seixas

### TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO

Nº 234

## A MORFOMETRIA FLUVIAL COMO INDICADORA DE ATIVIDADES NEOTECTÔNICAS NA BACIA DO RIBEIRÃO DA CACHOEIRA - OURO PRETO, MG.

Vanessa dos Santos Carvalho Coelho

Orientador

Prof. Dr. Claudio Eduardo Lana

Monografia do Trabalho Final de Graduação apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial à obtenção do Título de Engenheiro Geólogo e à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação em cumprimento ao disposto no Programa de Voluntários de Iniciação Científica – ano 2007

### OURO PRETO

2017

Universidade Federal de Ouro Preto – http://www.ufop.br Escola de Minas - http://www.em.ufop.br Departamento de Geologia - http://www.degeo.ufop.br/ Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita 35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Os direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

### CRÉDITOS DE AUTORIA

Revisão geral: Vanessa Dos Santos Carvalho Coelho Claudio Eduardo Lana

Catalogação elaborada pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

C672m	Coelho, Vanessa dos Santos Carvalho. A morfometria fluvial como indicadora de atividades neotectônicas na bacia
	do Ribeirão da Cachoeira - Ouro Preto, MG. [manuscrito] / Vanessa dos Santos Carvalho Coelho 2017.
	113f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.
	Orientador: Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana.
	Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.
	<ol> <li>Morfometria. 2. Neotectônica. 3. Bacias hidrográficas. I. Lana, Cláudio Eduardo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.</li> </ol>
	CDU: 551.4

Catalogação: ficha@sisbin.ufop.br

### Ficha de Aprovação

#### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: A Morfometria como Indicadora de Atividades Neotectônicas na Bacia do Ribeirão da Cachoeira – Ouro Preto, MG

#### AUTORA: VANESSA DOS SANTOS CARVALHO COELHO

**ORIENTADOR:** Prof. Cláudio Eduardo Lana

Aprovada em: 15 de maio de 2017

#### **BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Cláudio Eduardo Lana

Profa. Raquel Franco Cassino

Paquellosmi

DEGEO/UFOP

DEGEO/UFOP

Prof. Paulo de Tarso Amorim Castro \_

DEGEO/UFOP

**Ouro Preto**, 15/05/2017

Aos meus pais.

### Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças para sempre seguir em frente e não desistir. Agradeço meus pais, irmã, cunhado e sobrinhos por todo o cuidado, dedicação e amor! Daniel pelo incentivo e por ter me inscrito no vestibular. Obrigada a todos os meus amigos pela amizade e pelos momentos de diversão!

Agradeço ao professor Dr. Claudio Lana meu orientador, pela paciência e compreensão e por toda a orientação deste trabalho. À professora Raquel, obrigada pelo incentivo, pela amizade e ajuda nos momentos que precisei! A todos os outros professores do Departamento de Geologia da UFOP, que me ajudaram de alguma forma na realização deste trabalho. Agradeço a UFOP e a Escola de Minas pela qualidade de ensino.

## Sumário

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 - OBJETIVOS	3
1.3 - ÁREA DE ESTUDO	4
1.3.1 - Localização e Vias de Acesso	4
1.3.2 - Aspectos Fisiográficos	5
CAPÍTULO 2	11
GEOLOGIA	11
2.1 - GEOLOGIA REGIONAL	11
2.1.1 - Estratigrafia	11
2.1.2 - Aspectos Estruturais	14
2.2 - GEOLOGIA LOCAL	15
2.3 - EVOLUÇÃO CENOZÓICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	18
CAPÍTULO 3	21
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 - ANÁLISE MORFOMÉRTICA	21
3.2 - PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS	24
3.3 - ÍNDICES GEOMORFOMÉTRICOS INDICADORES DE NEOTECTÔNICA	40
3.3.1 - Índice RDE (Relação Declividade–Extensão) Ou Índice Hack	40
3.3.2 - Fator de Assimetria da Bacia (FAB)	42
3.1.3 - Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT)	43
3.1.4 - Índice Razão Fundo/Altura Do Fundo Do Vale (RFAV)	44

3.2 - ANÁLISE DOS LINEAMENTOS DE DRENAGEM E MORFOESTRUTU	RAIS
	46
CAPÍTULO 4	49
METODOLOGIA	49
4.1 - OBTENÇÃO DOS DADOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	49
4.2 - PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE DADOS	50
CAPÍTULO 5	55
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	55
5.1 - FORMAS DE RELEVO DA ÁREA DE ESTUDO	55
5.2 - CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA	56
5.3 - ÍNDICES GEOMORFOMÉTRICOS INDICADORES DE NEOTECTÔNICA	68
5.3.1 - Índice RDE (Relação Declividade–Extensão) Ou Índice Hack	68
5.3.2 - Fator de Assimetria da Bacia (FAB)	79
5.3.3 - Fator de Simetria Transversal Topográfica (FSTT)	80
5.3.4 - Índice Razão Fundo/Altura de Vale (RFAV)	86
5.4 - ANÁLISE DE LINEAMENTOS	94
5.5 – SINTEXE DOS RESULTADOS	103
CAPÍTULO 6	107
CONCLUSÕES	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

### ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Localização e vias de acesso da área de estudo (modificado de Guimar	rães, 2005).
Figura 1.2 - Índices pluviométricos	5
Figura 1.3- Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira	8
Figura 2.1 – Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero	11
Figura 2.2 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero	12
Figura 2.3 – Mapa geológico da bacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira	17
Figura 3.1 - Hierarquia fluvial	25
Figura 3.2 - Padrões de drenagem	26
Figura 3.3 - Perfil Longitudinal	40
Figura 3.4 - Características do canal para o cálculo do Índice de Hack	41
Figura 3.5 - Bloco esquemático do fator assimétrico de bacia	43
Figura 3.6 - Bloco esquemático do fator de simetria topográfica transversal	44
Figura 3.7 - Procedimento de medida para encontrar os valores do índice morfomét	rico RFAV
	45
Figura 5.1 - Imagem de satélite da área da bacia do Ribeirão da Cachoeira	55
Figura 5.2 - Mapa de drenagens (hierarquia fluvial)	58
Figura 5.3 - Mapa de Declividade (%) da bacia do Ribeirão da Cachoeira	63
Figura 5.4 – Mapa Hipsométrico da bacia do Ribeirão da Cachoeira	64
Figura 5.5 - Representação hipsométrica em 3D	65
Figura 5.6 - Anomalias nas drenagens da bacia.	66
Figura 5.7 - Perfil Longitudinal da bacia do Ribeirão da Cachoeira	67
Figura 5.8- Resultados de RDE <sub>total</sub> das principais drenagens	69
Figura 5.9 - Resultados de RDE <sub>trecho</sub> .	70

Figura 5.10- Mapa geológico com anomalias RDE <sub>trecho</sub>	71
Figura 5.11 - Resultados de RDE <sub>trecho</sub> e o perfil longitudinal do Córrego Meira	72
Figura 5.12 - Resultados de RDE <sub>trecho</sub> e perfil longitudinal do Ribeirão Santa Rita	74
Figura 5.13 - Resultados de RDE <sub>trecho</sub> e perfil longitudinal do Córrego Lavrinha	75
Figura 5.14 - Resultados de RDE <sub>trecho</sub> e perfil longitudinal do Córrego Papa - Cobra	77
Figura 5.15 - Resultados de RDE <sub>trecho</sub> e perfil longitudinal do Córrego Mata da Roça	78
Figura 5.16 - Perfis para cálculo de RFAV da bacia do Ribeirão da Cachoeira	87
Figura 5.17 - Perfis para cálculo de RFAV da microbacia do Córrego Água Limpa	88
Figura 5.18 - Perfis para cálculo de RFAV da microbacia do Córrego Cristais	88
Figura 5.19 - Perfis para o cálculo de RFAV da microbacia do Córrego Meira	89
Figura 5.20 - Perfis para cálculo de RFAV da sub-bacia do Ribeirão Santa Rita	90
Figura 5.21 – Perfis para o cálculo de RFAV da sub-bacia do Rio Ponte	91
Figura 5.22 - Perfis para o cálculo de RFAV da microbacia Córrego Lavrinha	92
Figura 5.23 - Perfis para o cálculo de RFAV da microbacia Córrego Papa Cobra	92
Figura 5.24 - Perfis para o cálculo de RFAV da microbacia Córrego Mata da Roça	93
Figura 5.25 - Lineamentos de drenagem e morfoestruturais da bacia do Ribeirão da Cache	oeira.
	95

Figura 5.26 – Rosetas de lineamentos de drenagem da bacia do Ribeirão da Cachoeira. As rosetas da esquerda indicam a frequência dos lineamentos e as da direita indicam a frequência considerando que os lineamentos de maior comprimento tenham maior peso que os menores.

**Figura 5.27 -** Lineamentos morfoestrutrais da bacia do Ribeirão da Cachoeira. As rosetas da esquerda indicam a frequência dos lineamentos e as da direita indicam a frequência considerando que os lineamentos de maior comprimento tenham maior peso que os menores.

Figura 5.28 – Rosetas dos lineamentos da sub-bacia do Córrego Água Limpa. As rosetas da esquerda indicam a frequência dos lineamentos e as da direita indicam a frequência

considerando que os lineamentos de maior comprimento tenham maior peso que os menores.

### LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Hierarquia da drenagem.	57
Tabela 5.2- Resultados obtidos para as características físicas e parâmetros morfomé	tricos da
bacia	59
Tabela 5.3 - Relação entre canais sucessivos para os parâmetros RLm e R <sub>Lb</sub>	61
Tabela 5.4 - Declividade (%) e Classes de Relevo.	62
Tabela 5.5 - Classes altimétricas.	64
Tabela 5.6 - Resultados de RDEt <sub>otal</sub>	69
Tabela 5.7 - Resultados do FAB	79
Tabela 5.8 - Resultados do FSTT da bacia do Ribeirão da Cachoeira.	81
Tabela 5.9 - Resultados do FSTT para a microbacia do Córrego Cristais.	
Tabela 5.10 - Resultados de FSTT para a microbacia do Córrego Cristais	
Tabela 5.11 - Resultados de FSTT para a microbacia do Córrego Água Limpa	
Tabela 5.12 - Resultados de FSTT para sub-bacia do Córrego Meira.	84
Tabela 5.13 - Resultados de FSTT para a sub-bacia do Ribeirão Santa Rita.	
Tabela 5.14 - Resultados de FSTT para a sub-bacia do Rio Ponte.	85
Tabela 5.15 - Resultados de FSTT para a microbacia do Córrego Papa-Cobra.	85
Tabela 5.16 - Resultados de FSTT para a microbacia do Córrego Mata da Roça	86
Tabela 5.17- Resultados do índice RFAV da Bacia do Ribeirão da Cachoeira.	86
Tabela 5.18 - Resultados de RFAV da microbacia do Córrego Água Limpa.	87
Tabela 5.19 - Resultados de RFAV da microbacia do Córrego Cristais.	
Tabela 5.20 - Resultados de RFAV da sub-bacia do Córrego Meira.	90
Tabela 5.21 - Resultados de RFAV da sub-bacia do Ribeirão Santa Rita	90
Tabela 5.22 - Resultados de RFAV da sub-bacia do Rio Ponte.	91
Tabela 5.23 - Resultados de RFAV da microbacia do Córrego Lavrinha.	92
Tabela 5.24 - Resultados de RFAV da microbacia do Córrego Papa - Cobra	93

Trabalho de Conclusão de Curso - nº 234, 113 p. 2017.

 Tabela 5.25 - Resultados de RFAV da microbacia do Córrego Mata da Roça.
 93

### Resumo

O presente trabalho utiliza-se principalmente de análises morfométricas da rede de drenagem como indicativos de neotectônismo na bacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira localizada no município de Ouro Preto - MG na região centro-sul do Quadrilátero Ferrífero. Parte-se da premissa de que os cursos d'água representam os elementos mais apropriados para este tipo de análise por se ajustarem rapidamente a deformações crustais, mesmo àquelas muito sutis, gerando modificações perceptíveis em seus parâmetros morfométricos. Foi feita a caracterização morfométrica da bacia e aplicados os seguintes indicadores de atividades neotectônica: índice RDE (Relação Declividade-Extensão); Fator de Assimetria de Bacias (FAB); Fator de Assimetria Topográfica Transversal; e índice Razão Fundo/Altura de Vale (RFAV). Também foram feitos mapas de lineamentos de drenagem e morfoestruturais dos quais os dados de azimutes foram obtidos e plotados em rosetas para determinar as direções preferenciais destes lineamentos. As características morfológicas da bacia e os valores obtidos como resultados dos índices morfométricos apontam para a influência de atividades tectônicas recentes sobre a área. A análise conjunta das anomalias das drenagens e das direções preferenciais dos lineamentos morfoestruturais e de drenagem indica que a movimentação tectônica recente na região da bacia hidrográfica está relacionada com reativações de geossuturas proterozóicas e arqueanas e com novas estruturas geradas entre o Oligoceno e o Mioceno em resposta a um regime trativo NNE-SSW.

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O relevo do globo terrestre resulta da interação entre processos tectônicos, intempéricos, pedogenéticos e os materiais rochosos envolvidos. Para investigar as características das diversas formas de relevo, as bacias hidrográficas se configuram como feições importantes, principalmente no que se refere aos estudos de evolução do modelado da superfície terrestre (Alves & Castro, 2003).

A bacia hidrográfica é constituída pelo conjunto de superfícies que, através de canais e tributários, drenam água de chuva, sedimentos e substâncias dissolvidas para um canal principal cuja vazão ou deflúvio converge numa saída única (foz do canal principal num outro rio, lago ou mar). As bacias hidrográficas são delimitadas pelos divisores de água e seus tamanhos podem variar desde dezenas de metros quadrados até milhões de metros quadrados. As bacias de tamanhos diferentes articulam-se a partir dos divisores de água, integrando um sistema de drenagem organizado hierarquicamente. Assim, dependendo da saída única que for escolhida, uma bacia pode ser subdividida em sub-bacias e microbacias de menor dimensão (Granell-Pérez, 2001).

Os cursos d'água são considerados os elementos mais sensíveis às modificações tectônicas crustais, respondendo de imediato a processos deformativos, mesmo aqueles de pequenas escalas e magnitudes (Etchebehere *et al.*, 2004). Desta forma, a análise de propriedades da drenagem constitui-se em elemento de grande significado em estudos geológicos, podendo revelar importantes informações relativas ao contexto tectônico.

A aplicação de parâmetros morfométricos e índices geomorfológicos é uma das principais formas de se avaliar quantitativamente o comportamento das bacias hidrográficas diante dos diferentes condicionantes atuantes nas mesmas. Tais características tornam os elementos das bacias hidrográficas apropriados a análises de cunho neotectônico, buscando determinar áreas sujeitas a movimentações, permitindo, inclusive, avançar em termos quantitativos acerca destas deformações.

O termo Neotectônica foi introduzido em 1948 por Obruchev ao definir movimentos da crosta que se instalaram durante o Terciário Superior e o Quaternário, com influência na

1

formação da topografia contemporânea (Salamuni, 1998). Em 1973, o geólogo soviético E. V. Jain destacou que o advento dos estudos neotectônicos representa um importante fator de avanço para as pesquisas em geotectônica, pois permite a aplicação de fato do princípio do atualismo, através da observação real das feições tectônicas que eram, em grande parte, inferidas (Saadi, 1993).

O estudo dos efeitos da neotectônica na arquitetura das estruturas geológicas e na elaboração das feições geomorfológicas tornou-se uma área específica nas geociências e foi necessário elaborar um conceito compatível com a ideia da Tectônica Global. Nesse contexto, a Comissão de Neotectônica da Associação Internacional de Estudos do Quaternário (INQUA), em 1978, definiu neotectônica como quaisquer movimentos ou deformação do nível geodésico de referência, seus mecanismos, sua origem geológica, independentemente da sua idade, suas implicações para vários propósitos práticos e suas futuras extrapolações. Os movimentos neotectônicos englobam o acervo de deformações rúptil ou dúctil de um período Neotectônico" (Salvador, 1994).

O período neotectônico, ou a idade de início dos movimentos tectônicos constitui um ponto de controvérsia. Porém, atualmente é consenso que o limite de data para o início dos movimentos neotectônicos varia de lugar para lugar e geralmente está compreendido entre o Holoceno e Mioceno.

Os principais métodos empregados no estudo na neotectônica, segundo Salamuni (1998), são:

*Estudo dos sismos atuais:* permite a determinação das tensões aplicadas que estão atuando nas áreas sismogênicas;

<u>Sensoriamento remoto:</u> delimitação de alinhamentos de relevo, traçado da rede de drenagem, mapeamento de aluviões falhados, mapeamento de falhas;

<u>Mapeamento Morfotectônico</u>: reconhecimento de geoformas como indicadoras de movimentos recentes, estudo de deformações pediplanares e estudo dos caracteres geomorfológicos de terrenos atuais;

Determinação dos campos de tensões: métodos dos diedros retos;

*Datação geocronológica:* principalmente pelo método do carbono-14, para datação de material orgânico, e traços de fissão em apatitas para a determinação da idade do último aquecimento pelo qual passou a rocha fraturada;

*Evidências arqueológicas:* artefatos e/ou construções humanas podem indicar camadas geológicas pertubadas e/ou deslocadas devido a ocorrência de antigos terremotos.

Na literatura, dentro do sensoriamento remoto, existem diversas técnicas para a detecção de atividades neotectônicas. Esses métodos mostram, de forma matemática, a ocorrência desses eventos através de dados obtidos com a medição dos canais fluviais, dos desníveis entre topos e fundos de vale, da retilinearidade dos cursos de água, dos dados morfométricos e etc., sendo que os resultados obtidos podem mostrar e avaliar a ocorrência ou não de reativação tectônica na área.

### 1.2 - OBJETIVOS

O principal objetivo deste estudo é detectar áreas sujeitas a possíveis movimentações neotectônicas na Bacia do Ribeirão da Cachoeira, contribuindo assim com os estudos da evolução recente do relevo da área de estudos.

Ente os objetivos específicos têm-se:

- Analisar os parâmetros morfométricos das bacias hidrográficas, sub-bacias, microbacias e canais fluviais utilizando fórmulas matemáticas;

 Estudar a tectônica recente, utilizando para análise neotectônica os índices: Relação Declividade – Extensão (RDE) ou Índice de Hack, Fator de Assimetria da Bacia (FAB), Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT) e Razão Fundo/Altura do Vale (RFVA);

- Realizar uma análise de lineamentos de drenagem e de lineamentos morfoestruturais obtidos a partir de marcações em uma imagem SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com o intuito de definir possíveis direções estruturais preferenciais e, posteriormente, determinar a relação entre os *trends* estruturais e as anomalias encontradas na análise morfométrica.

### 1.3 - ÁREA DE ESTUDO

### 1.3.1 - Localização e Vias de Acesso

A bacia do ribeirão da Cachoeira está localizada entre os municípios de Ouro Preto e Ouro Branco no centro-sul do estado de Minas Gerais. O acesso a região se dá, a partir de Ouro Preto, pela rodovia MG - 129 também conhecida como Estrada Real (Figura 1.1).



Figura 1.1 - Localização e vias de acesso da área de estudo (modificado de Guimarães, 2005).

### 1.3.2 - Aspectos Fisiográficos

### - Clima

O clima predominante do Quadrilátero Ferrífero é o tropical de altitude, segundo a classificação de Köppen, caracterizado pelo inverno seco e verão chuvoso e com pluviosidade média anual de 1100-1500 mm. A temperatura média do mês mais frio é inferior a 18 °C e a do mês mais quente em torno de 22 °C (Gerdau, 2010).

A região da bacia do Ribeirão da Cachoeira normalmente é caracterizada por uma não conformidade climática, ditada pelas peculiaridades do relevo, que condicionam, entre outras coisas, o fluxo das massas de ar. A média anual da temperatura é de 18,5°C, sendo o mês de janeiro o mais quente e o mês de julho o mais frio. As temperaturas mais elevadas coincidem com o período chuvoso enquanto as temperaturas mais baixas ocorrem no período seco. De uma maneira geral, o mês mais chuvoso é dezembro, com precipitação média de 324 mm e junho, julho e agosto, meses com os menores índices pluviométricos quando as precipitações possuem média de 15 mm no mês (Figura 1.2). Apesar das baixas precipitações entre os meses de maio e agosto, os principais rios que drenam o município têm caráter perene em função do acúmulo de água nas vertentes do relevo (Gerdau, 2010).



Figura 1.2 - Índices pluviométricos (Guerdau, 2010).

A umidade relativa do ar apresenta uma amplitude pequena com variação de 78,7% a 86,2% sendo que o primeiro ocorre no mês de agosto e o segundo em dezembro. Os ventos sopram predominantemente do quadrante leste com velocidade média na ordem de 2,6 m/s/ano mas também ocorrem os ventos N, NW e NE em menor frequência (Ataíde, 2010).

### - Vegetação

A área de estudo encontra-se numa região de transição entre o Cerrado e Floresta Estacional Semidecidual. A vegetação nativa da região insere-se nos domínios dos campos rupestres e das capoeiras, havendo grandes áreas remanescentes da Mata Atlântica.

A região também é reconhecida como uma 'área de importância biológica especial' devido à presença dos "campos ferruginosos" – uma das denominações para a fisionomia vegetal mais representativa que ocorre nas cangas – e a presença de espécies endêmicas e ameaçadas (Drummond *et al.*, 2005).

A cobertura vegetal atual reflete o resultado da atuação humana sobre o meio ambiente, havendo destaque para as áreas em que a cobertura vegetal original foi substituída pelas lavras de mineração, pastagens e pelos reflorestamentos de eucaliptos. Entretanto, também são encontrados importantes remanescentes florestais sobre as encostas de serras devido à dificuldade de acesso e, também, nas diversas unidades de conservação que estão demarcadas na região.

### - Hidrografia

A bacia do Ribeirão da Cachoeira compõe a bacia do ribeirão do Carmo que por sua vez está inserida na bacia do rio Doce.

O rio Doce é caracterizado pela sua extensão e penetra profundamente no planalto mineiro. Seu traçado a partir de sua constituição retrata mais ou menos a forma do litoral e, em Governador Valadares, o rio toma a direção leste a caminho do oceano. Este traçado do rio é explicado pelas características morfoestruturais variadas que ocorrem no interior da bacia.

A bacia do rribeirão do Carmo compreende uma área de drenagem de 2.279km<sup>2</sup>, 2,73% da bacia do rio Doce. A bacia do Ribeirão da Cachoeira compõe a do rio do Carmo e possui 225,316 km<sup>2</sup>. Está inserida entre os distritos de Santa Rita de Ouro Preto no município de Ouro Preto e Itatiaia no município de Ouro Branco sofrendo influência de barramentos. O Ribeirão da Cachoeira possui sua vazão controlada pela Barragem do Ribeirão da Cachoeira também denominada Represa de Tabuão que foi construída em 1956 para gerar energia elétrica para a antiga fábrica de alumio de Ouro Preto, ALCAN (Guimarães, 2005).

A Figura 1.3 ilustra a barragem e suas fontes de água. A norte da barragem está o rio Ponte e seus tributários onde se observa a presença de mineração de topázio e manganês. Ao sul esta recebe águas de duas vertentes, do ribeirão Santa Rita e do córrego Meira onde há ocorrências de pedreiras de esteatito. A noroeste da barragem está o córrego Água Limpa. Essas drenagens que contribuem para a formação do reservatório recebem o esgoto não tratado dos distritos de Rodrigo Silva, Itatiaia e Santa Rita de Ouro Preto. A jusante da represa essas drenagens formam o ribeirão da Cachoeira que ao se encontrar com o rio Gualaxo do Sul formam o ribeirão do Carmo que compões uma das cabeceiras da bacia hidrográfica do Rio Doce.

A bacia do Ribeirão da Cachoeira pode ser dividida em 4 sub-bacias sendo elas: subbacias dos Córregos Água Limpa e Meira, do Ribeirão Santa Rita e do Rio Ponte. A sub-bacia do Córrego Água Limpa é subdividida em 3 microbacias (Córregos Água Limpa, Cristais e Garcia) e a sub-bacia do Rio Ponte em microbacias do Córrego Lavrinha, Córrego Papa-Cobra e Córrego Mata da Roça.



Figura 1.3- Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira.

- Solos

A região de Ouro Preto possui um grande domínio de solos pouco evoluídos (Cambissolos e Neossolos Litólicos) e algumas áreas com expressiva ocorrência de afloramentos rochosos. Desse modo, é forte a influência do material de origem nas características dos solos, em que se destaca o conjunto de solos de constituição ferrífera, distinguidos pelos teores de óxido de ferro muito elevados e intensa cor vermelha, em alguns casos de notável escurecimento, condicionada à alta concentração de compostos de manganês,

e pela constituição mineralógica oxídrica, independente do grau pedogenético. A ocorrência de concreções ferruginosas é outra característica muito frequente. Predominam Cambissolos Háplicos Perférricos, com ocorrência menor de latossolos Vermelhos Perférricos, que tentem a localizar-se de forma preferencial em rampas coluvionares de sopé, constituindo uma área de transição nos limites daquelas serras (Carvalho Filho, 2008).

Varajão *et al.* (2009) destacam o levantamento pedológico do Estado de Minas Gerais (CETEC, 1983) que definiu três unidades de mapeamento para o Quadrilátero Ferrífero:

(1) AR2, composta por Afloramentos de Rocha (AR), Cambissolos com horizonte A moderado e Solos Litólicos com horizonte A fraco, relacionados principalmente aos itabiritos do Grupo Itabira e aos quartzitos dos grupos Caraça e Itacolomi;

(2) Cd3, formada por Cambissolos distróficos com horizonte A fraco, relacionados aos filitos do Grupo Piracicaba; e

(3) LVAd3, constituída por Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos com horizonte A moderado, relacionados aos gnaisses do Complexo Bação e aos xistos do Grupo Nova Lima.

Os solos desenvolvidos sobre as cangas do Quadrilátero Ferrífero refletem a diversidade geoambiental das áreas ferríferas, sendo considerados solos endêmicos (Atáide, 2010). Independentemente do tipo litológico, Varajão *et al.* (2009) concluem que os solos autóctones da região são predominantemente imaturos (Neossolos e Cambissolos).

### - Geomorfologia

O Quadrilátero Ferrífero é uma típica província de terrenos do tipo domos e quilhas. Seu desenvolvimento fisiográfico está condicionado não só pela litologia e estrutura de suas rochas, mas também por uma história complexa de elevação epirogênica. O relevo desta região apresenta-se como uma superfície topograficamente elevada, em contraste com as terras baixas e as colinas dos complexos metamórficos, onde as altitudes são, geralmente, inferiores a 900 metros. Corresponde a uma superfície planáltica, onde a morfologia varia de suaves colinas nas áreas associadas às unidades graníticas e gnáissicas, a trechos bastante acidentados, onde predominam cristas com vertentes ravinadas e vales encaixados, associados aos afloramentos de quartzitos, itabiritos e canga ferruginosa (Herz, 1978).

As altitudes médias giram em torno de 1000 metros, onde as cotas mais elevadas estão situadas na Serra do Caraça, a leste, onde ocorrem valores superiores a 2000 metros, e as mais baixas na região do município de Sabará, onde as cotas chegam a alcançar 600 metros. Em geral, as altitudes maiores aparecem nas serras que demarcam os limites da região, sobretudo nos maciços formados por itabiritos e quartzitos do Supergrupo Minas e do Grupo Itacolomi; enquanto, as áreas mais rebaixadas aparecem na porção central e no entorno do Quadrilátero Ferrífero, comumente, associadas aos terrenos dos complexos metamórficos (Silva, 2007).

No Quadrilátero Ferrífero, o controle litológico sobre a morfologia é marcante, sendo formado relevos do tipo sinclinais suspensos, anticlinais esvaziados e de cristas do tipo *hogback*. Além do controle litológico, as formas do relevo atual, também resultam da erosão diferencial que se manifesta pelos grandes arcabouços estruturais, como sinclinais e anticlinais, alicerçados pelos quartzitos e itabiritos do Supergrupo Minas e do Grupo Itacolomi, e pelas superfícies rebaixadas dos complexos metamórficos (Silva, 2007).

A cidade de Ouro Preto se encontra em um vale, tendo como limite a norte a Serra de Ouro Preto e a sul a Serra do Itacolomi. Na área distinguem-se duas unidades geomorfológicas bem caracterizadas, que são o Quadrilátero Ferrífero e os Planaltos Dissecados.

A unidade Quadrilátero Ferrífero, apresenta desníveis de centenas de metros em relação às cotas médias das unidades vizinhas, sendo originada não apenas por processos erosivos, mas também por movimentos tectônicos pós-cretácicos que contribuíram para a evolução geomorfológica da área. Os Planaltos Dissecados possuem como característica a dissecação fluvial que, atuando sobre as rochas predominantemente granito-gnáissicas do embasamento Précambriano, originou formas de colinas e cristais com vales encaixados e ou de fundo chato (Barbosa, 2004).

## CAPÍTULO 2 GEOLOGIA

### 2.1 - GEOLOGIA REGIONAL

A área de estudo está inserida em uma região clássica da geologia e da mineração brasileira, na porção centro-sul do estado de Minas Gerais, denominada Quadrilátero Ferrífero (QF). Esta ocupa uma área de aproximadamente 7.200 km<sup>2</sup> e recebeu essa definição por sua forma semelhante a um quadrilátero, que acompanha as serras gerais. É considerado como a mais importante província mineral do Brasil estende-se entre as cidades de Belo Horizonte e Caeté ao norte, Itabira e João Monlevade na porção nordeste, Ouro Preto e Mariana no sudeste, Congonhas no sudoeste e Ouro Branco ao sul, onde ocorrem jazidas de ferro (Fe), manganês (Mn), ouro (Au), bauxita e gemas como topázio e esmeralda (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Alkmin et al., 1998).

### 2.1.1 - Estratigrafia

As unidades litoestratigráficas que compõem o Quadrilátero Ferrífero englobam complexos metamórficos (Arqueanos); sequências de natureza vulcanosedimentares do tipo

*Greenstone Belt*, representadas pelo Supergrupo Rio das Velhas (Arqueano); coberturas plataformais metassedimentares, do Supergrupo Minas (Proterozóico inferior); e coberturas fanerozóicas de ocorrência restrita, representadas por bacias interiores, depósitos cascalhosos, canga e *mudstone* (Alkmim e Marshak, 1998). Na Figura 2.2 está representada a coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.



Figura 2.2 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Alkmin et al., 1998).

O Embasamento Cristalino é parte dos complexos granito-gnáissicos do sudeste do Cráton São Francisco. Estes complexos metamórficos, exceto o Complexo Metamórfico Bação, estão localizados na porção central do Quadrilátero Ferrífero. São constituídos pelas rochas mais antigas do Quadrilátero Ferrífero, geralmente terrenos arqueanos com idades que variam entre 3,28 e 2,61 bilhões de anos (Machado e Carneiro, 1992).

O Supergrupo Rio das Velhas é formado por komatiítos e basaltos, rochas vulcanoclásticas, lavas riolíticas e rochas sedimentares. A sequência vulcano-sedimentar

arqueana, tipo *greenstone belt*, tem idade aproximada entre 2,7 e 2,8 bilhões de anos e se encontra sobreposta em discordância com o embasamento cristalino (Machado e Carneiro, 1992). Conforme descrito por Dorr (1969), o supergrupo apresenta-se subdividido em dois grupos: Nova Lima e Maquiné. As rochas do Supergrupo Rio das Velhas e das unidades de seu embasamento foram deformadas e metamorfizadas durante o Evento Rio das Velhas que ocorreu entre 2780 e 2700 Ma (Alkmim, 2004).

O Supergrupo Minas é constituído por metassedimentos plataformais do Proterozóico Inferior, com idades que variam entre 2,5 e 1,8 bilhões de anos, que repousam em nítida discordância erosiva sobre o Supergrupo Rio das Velhas. Segundo Alkmim e Marshak (1998), o Supergrupo Minas pode ser subdividido da base para o topo em quatro grupos: Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará. Essa divisão se dá a partir da gênese do material de origem (sedimentos clásticos ou químicos). O Grupo Itabira possui origem química e é o mais significativo, pois contém os depósitos de ferro internacionalmente conhecido como *Banded Iron Formations* (*BIF*) dando origem a uma das maiores jazidas de ferro do mundo.

O Grupo Itacolomi ocorre de forma restrita no Quadrilátero Ferrífero, sendo mais comum no Pico do Itacolomi, Serra de Ouro Branco e no Morro do Frazão. É formado por metassedimentos clásticos proterozóicos (Alkmim e Marshak, 1998), com cerca de 2,1 bilhões de anos (Machado e Carneiro, 1992), que repousam através de uma profunda discordância erosiva sobre a parte superior do Supergrupo Minas. Sua litologia é composta por quartzitos na base e no topo, metaconglomerados na base e filitos originados de depósitos aluviais e fluviais na porção intermediária (Ostanello, 2012).

Além desses pacotes de rochas, no Quadrilátero Ferrífero são encontrados diques intrusivos de rochas básicas de idade estimada em 1,714 bilhões de anos (Silva, 2007) cortando as sequências do Grupo Itacolomi, Supergrupo Minas, que recobrem estratigraficamente unidades pré-cambrianas.

Também ocorrem as couraças constituídas por fragmentos de rochas ferruginosas, cimentadas por limonita (Hidróxido de Ferro), conhecidas como cangas que aparecem comumente recobrindo as elevações da Serra da Moeda, Serra do Curral e Serra da Piedade, desempenhando um papel importante de resistência a erosão. Os sedimentos quaternários na região do Quadrilátero Ferrífero estão associados a depósitos aluviais, que aparecem comumente nas planícies de inundação (Silva, 2007).

### 2.1.2 - Aspectos Estruturais

O Quadrilátero Ferrífero tem sua geometria definida por megadobras sinformes e antiformes, truncadas por cinturões de falhas de empurrão norte-sul, na sua parte oriental. A homoclinal da Serra do Curral e as sinclinais Dom Bosco, Santa Rita e Moeda marcam, respectivamente, seus limites norte, sul, leste e oeste.

As estruturas registram intensos e complexos eventos deformacionais. Sua forma quadrangular é o resultado de uma deformação múltipla, com variações significativas do campo de tensão durante períodos de tempo distintos, que vai do Arqueano até o Neoproterozóico. O arcabouço estrutural regional é complexo. Constitui-se, essencialmente, por um conjunto de falhas e dobras, as quais se encontram associadas aos eventos tectônicos e suas respectivas fases de deformação, que atuaram na região (Alkmim e Marshak, 1998).

Alkmin e Marshak (1998) com base em dados geocronológicos e relações de campo propuseram quatro eventos responsáveis pela formação dos três conjuntos de estruturas identificadas por eles no Quadrilátero Ferrífero. Segundo os autores, o primeiro evento apresenta estruturas com direção NE e produziu zonas de cisalhamento e dobras em escala regional. São reconhecidas, como estruturas deste evento, dobras parasíticas alojadas em limbos de dobras regionais, xistosidade de direção SW-NE com mergulho para SE e lineação mineral com caimento para SE. Este evento foi observado na Serra do Curral, porção noroeste do Quadrilátero Ferrífero e está relacionado a uma compressão responsável pelo desenvolvimento de um cinturão de dobras e falhas com vergência para noroeste resultante da Orogênese Transamazônica.

O segundo evento, segundo Alkmim e Marshak (1998), é caracterizado por uma extensão regional, resultou na arquitetura em domos e quilhas, soergueu o embasamento cristalino ao mesmo nível crustal que os metassedimentos dos supergrupos Rio das Velhas e Minas (inversão tectônica). Este evento foi responsável pela formação de dobras da xistosidade com caimento contrário aos domos, clivagem espaçada, dobras e falhas reversas com direção leste-oeste, mudanças na direção de dobras F1, como o Sinclinal Ouro Fino, foliações miloníticas às margens dos complexos metamórficos e gerou o Anticlinal de Mariana e o *"uplift"* Rio das Velhas. Foi primeiro observado na porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero, no contato do Complexo Bonfim com o limbo ocidental da Serra da Moeda. É entendido como

um colapso orogenético do evento Transamazônico e seria o responsável pela deposição dos sedimentos do Grupo Itacolomi.

O terceiro evento de natureza extensional, seria o responsável pela abertura da Bacia do Espinhaço e pela intrusão dos diques de diabásio que cortam as rochas do Quadrilátero Ferrífero (Alkmim e Marshak, 1998).

O quarto evento apresenta natureza compressional, estruturas com direção Norte-Sul, megadobras com vergência para Oeste, mesodobras, foliações e lineações. É bem caracterizado na borda leste do Quadrilátero Ferrífero e apresenta direções das estruturas semelhantes ao sistema de cavalgamento Espinhaço. A este evento está associado um metamorfismo progressivo regional na fácies xisto-verde médio e um cinturão de dobras e falhas vergentes para Oeste. Este evento é denominado de Orogênese Brasiliana ou Pan-Africana e foi responsável pela formação do Supercontinente Gondwana, implicando em um evento de colagem continental (Alkmim e Marshak, 1998).

### 2.2 - GEOLOGIA LOCAL

O município de Ouro Preto está localizado na extremidade sudeste do Quadrilátero Ferrífero. No contexto geológico regional, a área está inserida em grandes estruturas conhecidas como Anticlinal de Mariana e Sinclinal Dom Bosco.

As unidades geológicas ocorrentes (Figura 2.3) pertencem aos grupos Nova Lima, composto por quartzo-sericita xistos alterados; Caraça, representado por quartzitos sericíticos da Formação Moeda e filitos carbonosos pertencentes à Formação Batatal; e Itabira composto por formações ferríferas bandadas (Dorr, 1969).

As unidades estão distribuídas na forma de camadas contínuas, com variações verticais ou laterais, podendo desaparecer em alguns pontos. No contato entre as duas primeiras unidades ocorrem as principais zonas mineralizadas, embora o ouro apareça também em veios nas formações ferríferas e quartzíticas (Vial *et al.*, 2007).

Os topos e as vertentes dos morros, geralmente, possuem coberturas superficiais de crosta laterítica (canga). Estes materiais, de idade cenozóica, são produtos de alteração supergênica em climas tropicais. Os solos, quando ocorrem, são muito pouco espessos, na

ordem dos centímetros, exceto por algumas manchas maiores de material coluvionar (Sobreira, 2014).

A área da bacia do Ribeirão da Cachoeira está inserida no sinclinal Dom Bosco. O sinclinal Dom Bosco envolve todas as unidades supracustrais e apresenta charneira orientada segundo WNW-ESE, caindo cerca de 10° para ESE (Ribeiro e Alkmim, 1997). Santos (1998) afirma que esta estrutura possui um padrão assimétrico onde a seção transversal da aba sul é mais espessa e apresenta maior mergulho que a aba norte.

Uma feição estrutural marcante no Sinclinal Dom Bosco é um sistema de falhas de empurrão na porção leste, com traços curvilíneos, em planta, possuindo concavidade voltada pra leste (Ribeiro e Alkmim, 1997). Na porção sul estas falhas se articulam ao Sistema Engenho mostrando contemporaneidade em sua geração.

A evolução estrutural do Sinclinal Dom Bosco está relacionada ao *uplift* do bloco Rio das Velhas (Dorr, 1969). Dobras secundárias leste-oeste foram formadas durante este período e dobras menores, de eixo norte e sul, foram geradas durante um evento de redobramento. Essa ideia é confirmada por Endo (1997) que afirma que o Sinclinal Dom Bosco encontra-se inserido no ciclo tectono-deformacional Transamazônico que contempla dois megaeventos tectônicos progressivos. Assim sendo o Sinclinal Dom Bosco faz parte dos sinformes gerados no final da orogênia transamazônica, que correspondem a um colapso orogenético ocorrido em 2,095 Ma (Marshak e Alkmim, 1989).


**Figura 2.3** – Mapa geológico da bacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira (modificado de CODEMIG, 2005).

# 2.3 - EVOLUÇÃO CENOZÓICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

A Plataforma Sul-Americana, no seu conjunto, encontra-se em processo de soerguimento (Varajão *et al*, 2009). Para Saadi *et al* (2005), como resposta aos movimentos tectônicos epirogenéticos, o soerguimento do Brasil Oriental teria ocorrido em pulsos, provocando a reativação de lineamentos e geossuturas nos períodos Eoceno-Oligoceno, Mioceno, Plioceno e Pleistoceno de, respectivamente, 35–33, 16–13, 7 e 1 Ma.

O período Eoceno, na região Sudeste, foi marcado por um soerguimento epirogenético concomitante a uma fase tectônica distensiva, com formação de estruturas "horst/graben" e consequente formação de bacias. Têm-se como exemplo as bacias de Taubaté, Resende e, particularmente no Quadrilátero Ferrífero, as bacias de Gandarela e Fonseca (Saadi *et al.*, 2005).

Os depósitos sedimentares do Quadrilátero Ferrífero podem ser divididos em duas unidades. A primeira está associada à sedimentação de baixa energia em ambientes lacustre e fluvial mendrante com idade eo-oligocênica e a segunda foi depositada por fluxos de detritos com idade entre o Oligoceno e Mioceno superior. Sobre estas unidades ocorrem depósitos coluvionares e lateritas de idade pliocênicas e quaternárias (Lipski, 2002).

Lipski (2002) atesta que o Quadrilátero Ferrífero sofreu atividade neotectônica durante o Cenozóico. Ele determinou, através da análise de paleotensões de 14 depósitos sedimentares, quatro eventos tectônico sucessivos, sob campo de tensões distintos.

O evento D1 foi relacionado à geração de um sistema de *grabens* e *horsts* com direção predominante WNW-ESE em regimes trativo e compressivo causadas por movimentações direcionais iniciadas no Eo-Oligoceno. O evento D2 é caracterizado por uma deformação nos depósitos sedimentares sob forte tectonismo provocado por compressões com direção preferencial NW-SE. O evento D3 corresponde ao relaxamento tectônico das estruturas formadas durante o evento D2. O alivio das tensões ocorreram ao longo de estruturas preexistentes nos depósitos sedimentares e no embasamento no início do Plioceno. No evento D4 uma nova fase extensiva ativa desde o final do terciário (Plioceno), com direção E-W e N-S, causou o falhamento em coberturas lateríticas. A integração dos dados evidencia que as deformações observadas nos depósitos estão associadas a lineamentos morfoestruturais E-W e suas inflexões para NE e NW. Os lineamentos definem *trends* estruturais regionais e são

considerados como a manifestação tectônica cenozoica atuante na região. Hackspacher *et al.* (2006) ao analisar trabalhos sobre a tectônica cenozóica da borda sul do Cráton São Francisco e, associando aos seus estudos a modelagem térmica, mostrou que a atual paisagem da borda sul do cráton é resultado da subsidência da bacia do Paraná, seguida de reativações tectonomagmáticas, abertura do Atlântico Sul e soerguimento quaternário.

# CAPÍTULO 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

# 3.1 - ANÁLISE MORFOMÉRTICA

A análise morfométrica é uma importante metodologia para assinalar e identificar a dinâmica de um sistema fluvial (Barros *et al.*, 2010). Através do cálculo de parâmetros morfométricos pode-se avaliar quantitativamente o comportamento das bacias hidrográficas diante de diferentes condicionantes geomorfológicos atuantes nas mesmas (Alves e Castro, 2003). Este tipo de análise tem por objetivo caracterizar os aspectos geométricos e de configuração das bacias hidrográficas e da rede de drenagem, estabelecendo indicadores relacionados à forma, ao arranjo estrutural e à composição entre os elementos (Barros *et al.*, op. cit.).

A confecção e interpretação de mapas morfométricos pode revelar anomalias na rede de drenagem sendo uma importante ferramenta em estudos ligados à neotectônica e geomorfologia, onde a resposta da paisagem natural frente à dinâmica interna do planeta é muitas vezes mascarada pela rápida ação dos agentes intempéricos. A presença de anomalias na rede de drenagem e de descontinuidades no padrão de relevo podem refletir movimentações recentes do terreno.

Inicialmente, a obtenção dos parâmetros necessários para uma análise morfométrica de bacias hidrográficas eram extraídos de fontes analógicas (cartas topográficas e cálculo manual) porém, com o advento da computação a obtenção dos parâmetros necessários foi otimizada a partir do uso dos Modelos Digitais de Elevação (MDE), rede hidrográfica digitalizada, ortofotos e imagens de sensores orbitais.

O estudo morfométrico de bacias hidrográficas foi definido por Nunes *et al.* (2006) como a análise quantitativa das relações entre a fisiografia da bacia e a sua dinâmica hidrológica. Segundo Guerra (1993) morfometria fluvial é o estudo das bacias hidrográficas com vistas à análise linear, areal e hipsométrica. Salles (2010) completa esse conceito afirmando que a morfometria de bacias hidrográficas é entendida como uma análise quantitativa dos elementos resultantes do modelamento do relevo (expressão e configuração espacial).

Os primeiros parâmetros morfométricos, segundo Salles (2010), foram definidos por Horton em 1945. Este autor apresentou algumas leis de composição das bacias hidrográficas, definindo um comportamento ideal para as mesmas. Estas são resumidas leis da seguinte forma:

- *Lei do número de canais*: relação entre o número de canais de uma dada ordem (n) e o número de canais de ordem imediatamente superior (n + 1);
- Lei do comprimento de canais: o comprimento médio dos canais de cada ordem forma uma progressão geométrica cujo primeiro termo é o comprimento médio dos segmentos de primeira ordem e tem por razão uma relação de comprimento constante;
- Lei de declividade de canais: observa-se relação geometricamente inversa entre a declividade média dos canais de uma dada ordem e a dos canais de ordem imediatamente superior, na qual o primeiro termo é declividade média dos canais de primeira ordem e a razão é a relação entre os gradientes dos canais;
- Lei da área da bacia de canais: as áreas médias das bacias de segmentos de canais de ordem sucessivas tendem a formar uma progressão geométrica cujo 6 primeiros termos é a área média das bacias de primeira ordem e a razão de incremento constante é a taxa de crescimento de área.

As Leis de Horton são graficamente representadas por retas que representam a correlação entre a ordem dos canais (eixo das abcissas) e o logaritmo do valor dos parâmetros por ordem de canal (eixo das ordenadas). Essas retas correspondem ao comportamento ideal das bacias hidrográficas para Horton e, caso esse comportamento seja observado em uma bacia, significa dizer que não há anomalias na configuração desta bacia. A partir dessas leis, outros trabalhos apresentaram parâmetros para entender e representar matematicamente a evolução e configuração de bacias hidrográficas: Strahler (1952), Schumm (1956), Strahler (1957, 1958), Chorley (1962) e Chorley e Kennedy (1971) (Alves e Castro, 2003).

Na década de 1970, Hack (1973) propõe um índice de gradiente para a determinação de "anomalias" na concavidade natural do perfil longitudinal, o *Stream-Gradient Índex*, também conhecido como Índice de Hack ou RDE (Relação Declividade *vs*. Extensão). Estas anomalias podem estar associadas a desembocaduras de tributários de caudal expressivo, a diferentes resistências à erosão hidráulica do substrato lítico e/ou à atividade neotectônica (Barros *et al.*, 2010).

As classes de informações morfológicas determinam diferenças essenciais entre distintas paisagens e são classificadas e agrupadas de forma diferente por diversos autores. Segundo Tonello (2005), as características morfométricas podem ser divididas em: características geométricas, características do relevo e características da rede de drenagem. Seguindo o conceito de bacia hidrográfica proposto por Guerra em 2003, Salles (2010) dividiu esses parâmetros em três classes: lineares (associados à rede de drenagem e seu arranjo espacial dentro da bacia), zonais (associados à rede de drenagem e seu arranjo espacial em relação à área da bacia) e hipsométricos (associados a tridimensionalidade da bacia).

Para Christofoletti (1980) a análise linear engloba os índices e relações da rede hidrográfica sendo que as medições necessárias devem ser efetuadas ao longo das linhas de escoamento; na análise areal são englobados índices nos quais ocorrem medições planimétricas; por fim, a análise hipsométrica deve ocupar-se em estudar as inter-relações existentes em determinada unidade horizontal de espaço no que diz respeito à sua distribuição em relação às faixas altitudinais, indicando qual a proporção ocupada por determinada área da superfície terrestre em relação às variações altimétricas a partir de determinada isoípsa base. Os parâmetros utilizados neste estudo estão sintetizados na Quadro 1.

Características físicas da bacia e Parâmetros Morfométricos		
Ordem da bacia (hierarquia fluvial)	Relação de relevo Rr	
Padrão de drenagem	Relação de bifurcação Rb/ Lei do número de canais	
Comprimento do eixo da bacia	Extensão do percurso superficial Eps	
Comprimento médio dos canais	Relação entre o Comprimento Médio dos Canais de Cada ordem/ Lei do comprimento dos canais	
Comprimento do curso d'água principal	Relação entre o índice do comprimento médio dos canais e o índice de bifurcação	
Altitude máxima e mínima do rio principal	Relação entre os gradientes dos canais de cada ordem (Rgc)/ Lei da declividade dos Canais	
Área total	Declividade média Dm	
Perímetro total	Índice de rugosidade Ir	
Densidade de drenagem Dd	Índice de Sinuosidade Is	
Densidade hidrográfica Dh	Classe de relevo	
Coeficiente de compacidade K.c	Mapa de altitudes	
Fator de forma F	Curva hipsográfica	
Índice de circularidade Ic	Relação entre as áreas das bacias (RA)/ Lei da área da bacia de canais	
Gradiente do canal principal Gcp	Relação de relevo Rr	
Relação entre as áreas das bacias (RA)/ Lei da área da bacia de canais	Relação de bifurcação Rb/ Lei do número de canais	
	Extensão do percurso superficial Eps	

Quadro 1- Características físicas da bacia e Parâmetros Morfométricos.

# 3.2 - PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS

### Ordem da bacia (hierarquia fluvial)

A hierarquia fluvial consiste em estabelecer um ordenamento na disposição dos canais para efeitos comparativos entre sub-bacias inseridas nos modelados. É um importante parâmetro morfométrico, essencial para a caracterização da rede de drenagem na descrição das unidades geomorfológicas.

A análise morfométrica de bacias hidrográficas inicia-se pelo ordenamento dos canais fluviais, com a finalidade de estabelecer a hierarquia fluvial representada numericamente pela magnitude. De acordo com IBGE (2009) o sistema de Horton, modificado por Strahler (1952),

é atualmente o mais utilizado e assume os canais sem tributários como os de primeira ordem, estendendo-se desde a nascente até a confluência; os de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem e só recebem afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem surgem da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e de primeira ordem, e assim sucessivamente (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Hierarquia fluvial (Christofoletti, 1980).

# Padrão de Drenagem

Os padrões de drenagem referem-se, de acordo com Christofoletti (1980), ao arranjo espacial dos cursos fluviais, que podem ser influenciados em sua atividade morfogenética pela natureza e disposição das camadas rochosas, pela resistência litológica variável, pelas diferenças de declividade e pela evolução geomorfológica da região. De forma geral, refletem a natureza do substrato rochoso, que tem implicação direta nas diferenças de declividade, vazão, fluxo e dinâmica fluvial (Machado *et al.*, 2011).

Segundo Howard (1967), a estrutura geológica é o principal fator condicionante, estabelecendo controles sobre o padrão de drenagem através de inclinações regionais da superfície ou através de descontinuidades estruturais como falhas e fraturas, que podem acarretar assimetria da bacia de drenagem ou mudança brusca do padrão de drenagem.

Utilizando-se o critério geométrico da disposição espacial dos rios e seus afluentes, sem qualquer conotação genética, os tipos básicos de padrões de drenagem expostos em IBGE (2009) são os ilustrados na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Padrões de drenagem (Christofoletti, 1980).

O padrão dendrítica apresenta drenagem que assemelha-se à configuração de uma árvore onde os canais distribuem-se em todas as direções sobre a superfície e se unem formando ângulos agudos de graduações variadas, mas sem chegar ao ângulo reto. Desenvolve-se tipicamente sobre rochas de resistência uniforme ou em rochas estratificadas horizontalmente. Frequentemente está associado a um outro padrão de drenagem, gerando padrões subsidiários, bem como padrões modificados (IBGE, 2009).

O padrão em treliça possui uma drenagem de direção dominante com outra secundária de direção perpendicular a ela. Evidencia o arranjo estrutural da área, associando-se a ambientes que sofreram intensos processos de deformação (Summerfield, 1991).

O padrão radial apresenta canais dispostos como raios em relação a um ponto central. A partir desta geometria surgem duas situações: *Centrífugo* quando as correntes dos canais divergem a partir de um divisor central, comumente associado a altos estruturais, cones vulcânicos, corpos intrusivos ou outras estruturas circulares; e *Centrípeto* quando os canais convergem para um ponto central da sub-bacia. O padrão reflete uma área deprimida, dolina ou cratera vulcânica (IBGE, 2009).

O padrão de drenagem paralelo caracteriza-se por cursos de água que fluem quase paralelamente uns aos outros. As vertentes apresentam declividades acentuadas ou exibem controle estrutural que motiva a ocorrência de espaçamento regular, quase paralelo (IBGE, 2009). Geralmente está presente em áreas com falhas espaçadas, monoclinais ou dobras (Summerfield, 1991).

O padrão anular é formado por rios principais em formato circular com canais tributários em ângulos retos (Summerfield, 1991). É típico de áreas dômicas profundamente entalhadas em estruturas formadas por camadas de diferentes graus de resistência à erosão. Muitas modificações e variações de padrões de drenagem envolvem aspectos característicos de padrões básicos e tais possibilidades são proporcionais à diversidade de ambientes e compartimentos que uma área possa ter (IBGE, 2009).

A drenagem retangular é consequência da influência exercida por falhas ou pelo sistema de juntas ou de diaclases. Os canais formam uma rede perpendicular com duas direções igualmente desenvolvidos (Summerfield, 1991).

### Comprimento do eixo da bacia (m)

O comprimento do eixo da bacia é distância em linha reta entre a foz e o ponto do perímetro, assinalando sua equidistância.

### Comprimento médio dos canais (m)

A média do comprimento dos canais de cada ordem é uma característica usada na "relação dos comprimentos médios dos canais de cada ordem". O comprimento dos canais aumenta à medida que aumenta a ordem em que os mesmos se enquadram.

### Comprimento do curso d'água principal (km)

Distância que se estende ao longo do curso d'água, em linha reta entre a foz e o ponto do perímetro, assinalando sua equidistância. Serve para evidenciar a diversidade de ambientes que o rio percorre, a vazão, a carga de sedimentos e morfologia de foz (Machado *et al.*, 2011). Para determinar qual é o rio principal da bacia utilizam-se os critérios estabelecidos por Christofoletti (1980): "Primeiro, aplicam-se os critérios estabelecidos por Horton, pois o canal de ordem mais elevada corresponde ao rio principal; em cada bifurcação, a partir da desembocadura, optar pelo ligamento de maior magnitude; e em cada confluência, a partir da desembocadura, seguir o canal fluvial montante situado em posição altimétrica mais baixa até

atingir a nascente do segmento de primeira ordem localizada em posição altimétrica mais baixa, no conjunto da bacia; o curso de água mais longo, da desembocadura da bacia até determinada nascente, medido como a soma dos comprimentos dos seus ligamentos."

### Altitude máxima e mínima do rio principal (m)

A variação de altitude associa-se com a precipitação, evaporação e transpiração e, consequentemente, com o deflúvio médio. Grandes variações de altitude numa bacia acarretam diferenças significativas na temperatura média, a qual, por sua vez, causa variações na evapotranspiração, porém são mais significativas as possíveis variações de precipitação anual com a elevação (Silva, 2011).

## Área de drenagem (km<sup>2</sup>)

Toda área drenada pelo sistema pluvial inclusa entre seus divisores topográficos, projetada em plano horizontal, sendo elemento básico para o cálculo de diversos índices morfométricos (Tonello, 2005).

### Perímetro (km)

Comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas (Tonello, 2005).

### Densidade de drenagem Dd (km/km<sup>2</sup>)

Para Christofoletti (1980) esta característica é a relação entre o comprimento total dos canais ou rios e a área da bacia hidrográfica. Este índice apresenta uma relação inversa ao comprimento dos canais, sendo que o aumento na densidade de drenagem provoca uma diminuição no tamanho dos canais que compõem a rede de drenagem. De acordo com Salles (2010), esse índice pode variar de 0,5 km/km<sup>2</sup> em bacias com drenagem pobre a 3,5 km/km<sup>2</sup>, ou mais, em bacias bem drenadas.

O comportamento hidrológico das rochas, em um mesmo ambiente climático, vai repercutir a densidade de drenagem, ou seja, onde a infiltração é mais dificultada há maior escoamento superficial, gerando possibilidades maiores para esculturarão de canais permanentes e consequentemente densidade de drenagem mais elevada (Tonello, 2005).

Silva et al. (2009) consideram que a densidade de drenagem pode ser influenciada pelo embasamento litológico no qual o canal se desenvolve, podendo indicar o grau de permeabilidade do solo. Em locais de rochas impermeáveis, a densidade pode indicar valores mais elevados (Lana *et al.*, 2001), em áreas com predominância de rochas sedimentares, há uma maior probabilidade de altas taxas de infiltração do que o escoamento superficial (Christofoletti, 1980).

Para calcular o comprimento devem ser medidos tanto os rios perenes como os temporários. Definido por Horton (1945), este parâmetro pode ser calculado pela Equação 01:

$$Dd = \frac{L}{A}$$
 (Equação 01)

Sendo:

Dd: densidade de drenagem;

L: comprimento total dos rios ou canais;

A: área de drenagem.

Beltrame (1994) apresenta uma relação entre os valores de densidade de drenagem (Quadro 2).

Quadro 2 - Qualificação dos valores de Dd (Beltrame, 1994).

Valore de Dd (Km/Km²)	Qualificação da Dd
Menor que 0,5	Baixa
De 0,5 a 2,0	Mediana
De 2,01 a 3,5	A lta
Maior que 3,5	Muito alta

### Densidade hidrográfica Dh

O parâmetro de densidade hidrográfica correlaciona a área da bacia com o número total de canais fluviais, perenes, efêmeros, ou intermitentes mapeados (Alves e Castro, 2003). A finalidade é comparar a frequência ou a quantidade de cursos d'água em determinada área (São Miguel *et al.*, 2015). Este parâmetro depende do clima e das características físicas da bacia hidrográfica. O clima atua tanto diretamente, através do regime e da vazão dos cursos d'água, como indiretamente, com influência sobre a vegetação. Quando esse parâmetro é gerado para os canais de primeira ordem de hierarquia fluvial, representa o comportamento hidrográfico das bacias. Bacias com alta densidade hidrográfica apresentam maior capacidade de gerar canais, independentemente de suas extensões (Cherem, 2008).

O parâmetro considera a média da quantidade de canais por quilômetro quadrado de uma bacia, demonstrando sua capacidade hídrica e competência na formação de novos canais fluviais (Santos & Morais, 2012). Esta característica é expressa pela Equação 02 (Tonello, 2005):

$$Dh = \frac{n}{A}$$
 (Equação 02)

Sendo:

Dh: densidade hidrográfica;

n: número de canais;

A: área de drenagem.

### Coeficiente de manutenção Cm (km²/km)

O coeficiente de manutenção, segundo Santos e Morais (2012), é um índice que visa calcular a área mínima que a bacia precisa dispor para a manutenção de um metro de canal fluvial. Christofoletti (1980) ressalta a importância de aplicar esse índice, tendo uma ligação com os canais de primeira ordem, que são os fornecedores da água que mantém o canal principal. Os valores desse índice normalmente são inversos ao índice da densidade de drenagem (Equação 03):

$$Cm = \left(\frac{1}{Dd}\right) x \ 1000$$
 (Equação 03)

Sendo:

Cm: coeficiente de manutenção;

Dd: densidade de drenagem.

### *Coeficiente de compacidade Kc*

A bacia hidrográfica apresenta um formato após ter seu contorno definido. O formato da área plana de uma bacia de drenagem exerce influência no tempo de concentração, ou seja, no tempo decorrido pela água a partir dos limites da bacia até o seu exultório (seção de controle) e o formato depende da estrutura geológica do terreno. Os índices que determinam a forma da bacia procuram relacioná-la com formas geométricas conhecidas. Quanto mais irregular for a bacia, maior será o coeficiente de compacidade. Para coeficientes acima de um, a bacia irá

apresentar baixa suscetibilidade de ocorrência de inundações; por sua vez, quanto menor for o valor desse coeficiente (números próximos a zero), mais arredondada será a bacia e mais sujeita a enchentes ela estará. Esse coeficiente é um valor adimensional que varia com a forma da bacia independentemente do seu tamanho.

O coeficiente de compacidade é dado pela Equação 04 (Vilela e Mattos, 1975):

$$Kc = 0,28 x \frac{P}{\sqrt{A}}$$
 (Equação 04)

Sendo:

Kc: coeficiente de compacidade;

P: perímetro;

A: área de drenagem.

### Índice de circularidade Ic

Este índice propõe a relação entre o perímetro da bacia dividido pelo perímetro do círculo de mesma área da bacia (Christofoletti, 1980). O índice de circularidade tende para unidade à medida que a bacia se aproxima da forma circular e diminui à medida que a forma torna alongada, segundo a Equação 05 (Tonello, 2005):

$$Ic = \frac{12,57 \, x \, A}{P^2} \tag{Equação 05}$$

Sendo:

Ic: índice de circularidade;

P: perímetro.

A: área de drenagem.

Alves e Castro (2003) consideraram bacias com  $I_c < 0,51$  como mais alongadas e favorecem o escoamento, já valores de  $I_c > 0,51$  indicam uma bacia mais circular e com escoamento reduzido, sendo mais propensa a cheias. Esse parâmetro representa a transmissividade do escoamento superficial concentrado, ou seja, se o tempo de concentração da bacia é lento ou rápido (Cherem, 2008).

### Fator de forma (Ff)

O fator de forma também constitui um índice indicativo da maior ou menor tendência para enchentes, quanto maior o fator de forma, maior a tendência enchentes possui a bacia. A relação é definida pela Equação 06 (Vilela e Mattos, 1975):

$$Ff = \frac{A}{Le^2}$$
(Equação 06)

Sendo:

Ff: fator forma;

A: área de drenagem;

Le: comprimento do eixo principal da bacia.

### Gradiente do canal principal Gcp

O gradiente dos canais é a relação entre a diferença máxima de altitude entre o ponto de origem e o término com o comprimento do respectivo segmento fluvial. A sua finalidade é indicar a declividade dos cursos de água, podendo ser medido para o rio principal e para todos os segmentos de qualquer ordem. Este parâmetro reflete o potencial de energia no canal fluvial (Christofoletti, 1980). Este gradiente pode ser obtido através da Equação 07:

$$Gcp = \frac{a Max}{Lcp}$$
 (Equação 07)

Sendo:

Gcp: gradiente do canal principal;

a Max: altitude máxima do canal principal;

Lcp: comprimento do canal principal.

### Relação entre as áreas das bacias $(R_A)$ / Lei da área da bacia de canais

As áreas médias das bacias de segmentos de canais de ordem sucessivos tendem a formar uma progressão geométrica cujo primeiro termo é a área média das bacias de primeira ordem e a razão de incremento constante é a taxa de área (Vestena, 2006). Para Cherem (2008) esse parâmetro estabelece a relação entre o tamanho médio das bacias para cada um dos canais

de uma determinada ordem e as bacias de ordem sucessivamente inferior, representando matematicamente a quarta lei de Horton. Essa relação é dada pela equação 08.

$$R_A = \frac{A_W}{A_{W-1}}$$
(Equação 08)

Sendo:

RA: relação entre as áreas das bacias;

A<sub>w</sub>: área média das bacias de determinada ordem;

A<sub>w-1</sub>: área média das bacias de ordem imediatamente inferior.

Esse parâmetro expressa o grau de normalidade da composição da bacia apresentado por Horton e confirmado por Schumm (1956).

### Relação de relevo Rr

A relação de relevo (Rr) é um parâmetro areal que institui uma relação entre a amplitude altimétrica ( $\Delta a$ ) (diferença entre a maior e menor altitude) com o comprimento do canal principal (Lcp) e é calculada através da Equação 09:

$$Rr = \frac{\Delta a}{Lcp}$$
(Equação 09)

Sendo:

Rr: relação de relevo;

 $\Delta$  a: amplitude altimétrica;

Lcp: comprimento do canal principal.

### Relação de bifurcação Rb/ Lei do número de canais

A relação de bifurcação foi definida, segundo Silva (2011), por Horton (1945) como sendo a relação entre o número total de segmentos de uma certa ordem e o número total dos segmentos de ordem imediatamente superior. Serve para verificar se está acontecendo alongamento ou alargamento da bacia hidrográfica e a relação desta com a topografia e o substrato rochoso. A relação de bifurcação (Rb) é determinada pela Equação 10:

$$R_b = \frac{N_w}{N_{w+1}}$$
 (Equação 10)

Sendo:

R<sub>b</sub>: relação de bifurcação;

N<sub>w</sub>: número total de canais de determinada ordem;

 $N_{w+1}$ : número total de canais de ordem imediatamente superior.

A relação de bifurcação tende a ser maior para área com morros, bacias de drenagem muito dissecadas, do que para áreas com colinas sendo de três e 4 para as primeiras e de dois para as últimas (Machado e Souza, 2005). É maior para solos menos permeáveis e menor para solos mais permeáveis. A pouca variação entre os valores encontrados deste índice em diferentes ordens pode indicar uma relação de anomalias com o controle estrutural (Cherem, 2008).

### Extensão do percurso superficial Eps (km<sup>2</sup>/km)

A extensão do percurso superficial representa a distância média percorrida pelas enxurradas entre o interflúvio e o canal permanente. Indica o desenvolvimento hidrológico e fisiográfico da bacia de drenagem e é determinada pela Equação 11 (Christofoletti, 1969):

$$Eps = \left(\frac{1}{2 Dd}\right) x \ 1000$$
 (Equação 11)

Sendo:

Eps: Extensão do percurso superficial;

Dd: densidade de drenagem.

O resultado obtido é útil para caracterizar a textura topográfica, que expressa maior ou menor espaçamento entre os cursos de água, considerada "grosseira" quando houver amplo espaçamento entre cursos e "fina" quando houver espaçamento estreito entre os mesmos (Barbosa e Furrier 2011).

# Relação entre o Comprimento Médio dos Canais de Cada ordem/ Lei do comprimento dos canais

Horton (1945) afirma que em uma bacia, os comprimentos médios dos canais de cada ordem, ordenam-se seguindo uma série geométrica direta, cujo primeiro termo é o comprimento médio dos canais de primeira ordem, e a razão é a relação entre os comprimentos médios. Este cálculo dá aproximadamente o comprimento médio dos canais de cada ordem. Para calcular a relação entre os comprimentos médios, emprega-se a Equação 12:

$$R_{Lm} = \frac{Lm_u}{Lm_{u-1}}$$
(Equação 12)

Sendo:

R<sub>Lm</sub>: relação entre os comprimentos médios dos canais;

Lm<sub>u</sub>: comprimento médio dos canais de uma determinada ordem;

Lm<sub>u 1:</sub> comprimento médio dos canais de ordem imediatamente inferior.

### Relação entre o índice do comprimento médio dos canais e o índice de bifurcação

A relação entre o índice do comprimento médio dos canais e o índice de bifurcação é um importante fator na relação entre a composição da drenagem e o desenvolvimento fisiográfico das bacias hidrográficas. É determinado pela Equação 13:

$$R_{Lb} = \frac{R_{Lm}}{R_b}$$
(Equação 13)

Sendo:

R<sub>Lb</sub>: relação entre o comprimento médio e de bifurcação;

R<sub>Lm</sub>: relação entre os comprimentos médios dos canais;

R<sub>b</sub>: relação de bifurcação.

### Relação entre os gradientes dos canais de cada ordem $(R_{gc})$ /Lei da declividade dos Canais

É a relação entre a diferença máxima de altitude entre o ponto de origem e o término com o comprimento do respectivo segmento fluvial. Tem como finalidade indicar a declividade dos cursos de água, pode ser medido para o canal principal bem como para todos os segmentos de qualquer ordem (Christofoletti, 1980). A partir da observação da relação entre as

declividades médias dos canais de cada ordem Horton (1945) anunciou a terceira lei da composição da drenagem, segundo a qual em determinada bacia deve haver uma relação definida entre a declividade média dos canais de certa ordem e a dos canais de ordem imediatamente superior. Essa relação pode ser expressa por uma série geométrica inversa, na qual o primeiro termo é a declividade média dos canais de primeira ordem e a razão é a relação entre os gradientes dos canais. Sendo também uma variável que mede o "grau de normalidade" da bacia, segundo as leis estabelecidas por Horton. A relação é dada pela Equação 14:

$$R_{gc} = \frac{Gc_u}{Gc_{u+1}}$$
(Equação 14)

Sendo:

R<sub>gc</sub>: relação entre os gradientes dos canais;

Gcu: declividade média dos canais de determinada ordem;

Gcu+1: declividade média dos canais de ordem imediata

### Declividade média Dm (%)

De acordo com Silva (2010) a declividade média é um parâmetro morfométrico muito importante no diagnóstico físico e na gestão dos recursos hídricos. A declividade relaciona-se com a velocidade em que se dá o escoamento superficial, afetando, portanto, o tempo que leva a água da chuva para concentrar-se nos leitos fluviais que constituem a rede de drenagem das bacias, sendo que os picos de enchente, infiltração e susceptibilidade para erosão dos solos dependem da rapidez com que ocorre o escoamento sobre os terrenos da bacia (Tonello, 2005). Obtendo a declividade média de uma bacia hidrográfica pode-se avaliar se a área de estudo é mais ou menos vulnerável a erosão promovida pelo escoamento hídrico superficial. Comparando bacias hidrográficas de uma mesma região, tem-se que valores mais altos de declividade média identificam bacias com maior risco de sofrerem erosão por escoamento superficial. A declividade Média (Dm) é calculada com auxílio da Equação 15:

$$D_m = \frac{\sum L_{cn} x \,\Delta h}{A} \, x \,100 \qquad (\text{Equação 15})$$

Sendo:

D<sub>m</sub>: declividade média;

 $\Delta$ h: equidistância das curvas de nível;

 $\sum L_{cn}$ : comprimento de todas as curvas de nível;

A: área da bacia.

Herz e De Biasi (1989) *apud* Barbosa e Furrier (2011) propuseram as classes de declividade apresentadas no Quadro 3:

Porcentagem	Graus
< 12 %	< 7,25°
12 - 30%	7,25 - 17°
30 - 47%	17 - 25°
47 - 100%	25 - 45°
> 100%	> 45°

Quadro 3 - Classes de Declividade (Herz e De Biasi, 1989).

# Índice de rugosidade Ir

O índice de rugosidade combina as variáveis, declividade e comprimento das vertentes com a densidade de drenagem. Este índice mostra a relação declividade com os comprimentos dos canais, sendo que quanto maior for o índice implica em relevo mais colinoso e dissecado (maiores declividades) e canais mais entalhados (Machado *et al.*, 2011). O cálculo é feito através da Equação 16:

$$Ir = \Delta a \times Dd \qquad (Equação 16)$$

Sendo:

Ir: índice de rugosidade;

 $\Delta$  a: amplitude altimétrica máxima da bacia;

Dd: densidade de drenagem.

O parâmetro evidencia maior diversidade de ambientes e maior movimento do relevo, o que implica na variação das declividades e comprimento das vertentes, além da dimensão das drenagens. A declividade influencia na infiltração e nos processos erosivos, em função do escoamento superficial. Indica a dissecação do relevo (Castro e Carvalho, 2009).

### Índice de Sinuosidade Is

Representa como a carga sedimentar e as compartimentações litológica e estrutural influenciam o modelamento dos canais. Resultado da razão entre o comprimento do canal principal (Lr) e distância vetorial entre os pontos extremos do canal (L), segundo a Equação 17:

$$Is = \frac{Lr}{L}$$
 (Equação 17)

Valores próximos a um (Is  $\leq$  1) indicam elevado controle estrutural ou alta energia e valores acima de dois (Is  $\geq$  2) baixa energia, assim os valores intermediários seriam formas intermediárias entre canais retilíneos e meandrantes (Alves e Castro, 2003).

### Classe de relevo

A avaliação do relevo ou avaliação morfodinâmica da paisagem tem como base o conhecimento do tipo de relevo, da evolução das vertentes e da dinâmica fluvial sendo possível proceder uma análise integrada do ambiente. Esta avaliação identifica categorias de relevo em função de suas características e sua dinâmica atual, bem como os efeitos das atividades antrópicas e sua reciprocidade sobre a morfodinâmica. Nela é considerada a interação do relevo com outras variáveis ambientais como a rocha, o solo, a cobertura vegetal, além do clima e da hidrologia (IBGE, 2009).

Para avaliar os sistemas de modelados que constituem as unidades geomorfológicas, toma-se como base os parâmetros representados na carta geomorfológica que são:

- Características das formações superficiais, como a gênese, tipo de perfil, espessura, continuidade e descontinuidade espacial e textura;
- Processos morfogenéticos atuantes e suas manifestações através de sua localização, tipo, intensidade e a distribuição espacial;
- Geometria das formas de relevo, suas dimensões e classes de declividade; e

Cinco classes de avaliação morfodinâmica foram definidas (Quadro 4) a partir da classificação dos ambientes em categorias ecodinâmicas segundo Tricart (1977), que classificou os meios em estáveis, *intergrades* (em transição) e instáveis.

Classe de Declividade (%)	Relevo
0 a 3	Muito Fraca (Mfa)
3 a 8	Fraca (Fa)
8 a 20	Moderada (Mo)
20 a 45	Forte (Fo)
> 45	Muito Forte (Mfo)

Quadro 4 - Classes de Declividade.

### Mapa de altitudes

Os mapas de altitudes representam a elevação de um terreno, reduzidas ao nível das águas do mar, representa a altitude através de cores e os espaços entre as curvas de nível são coloridos segundo uma legenda convencional que geralmente apresenta a cor verde para as baixas altitudes e a cor castanha para maiores altitudes.

### Perfil longitudinal dos canais

O perfil longitudinal de um rio consiste na representação bivariada entre a cota altimétrica e o comprimento de um determinado curso fluvial de montante para jusante (Etchebehere *et al.*, 2004) plotados em gráficos de coordenadas cartesianas, considerando-se como variável dependente a altitude dos diversos pontos da drenagem. No eixo das abscissas, costuma-se lançar a extensão do rio, com origem posicionada na cabeceira ou na foz do mesmo. Em geral este gráfico mostra curvas de conformação logarítmica, concavidade para cima, e assíntotas longas com declividades maiores em direção da nascente e com valores cada vez mais suaves em direção ao nível de base (Silva, 2011). Tal comportamento manifesta um equilíbrio entre o fornecimento sedimentar e a capacidade de transporte fluvial.

Ibanez *et al.* (2013) afirmam que os aspectos que marcam o distanciamento dos perfis da forma côncava ideal são a existência de segmentos convexos e de rupturas de declive (*knickpoints*), que podem ser observadas na Figura 3.3. As mudanças no gradiente dos perfis longitudinais são usadas para indicar processos relacionados com as respostas de equilíbrio à variação litológica (Hack, 1973) e de desequilíbrio.



Figura 3.3 - Perfil Longitudinal (Modificado de Etchebehere et al., 2004).

Etchebehere *et al* (2004) afirmam que quanto mais equilibrado (*graded*) for o curso d'água, mais ajustado será o seu perfil e que estes poderão ser considerados em equilíbrio quando não se verificar agradação ou entalhe do talvelgue, havendo, tão somente fluxo da carga sedimentar (*bypassing process*).

# 3.3 - ÍNDICES GEOMORFOMÉTRICOS INDICADORES DE NEOTECTÔNICA

3.3.1 - Índice RDE (Relação Declividade–Extensão) Ou Índice Hack

O Índice de Hack foi proposto por Hack (1973) para detectar alterações no curso de uma drenagem, decorrentes de mudanças no substrato geológico, aporte de carga, ou tectonismo e, desde então, vem sendo designado por diversos nomes como índice de gradiente de canal (*stream gradient index*), e índice SL (S de slope, ou declive, e L de length ou extensão). No Brasil esse índice foi denominado de índice de declividade do canal (Chistofoletti, 1980) e, mais recentemente, índice de relação declividade-extensão, ou RDE (Lima, 2013).

A aplicação deste índice consiste na análise de perfis longitudinais de rios e de trechos selecionados, propiciando as bases para o estabelecimento de comparações entre cursos d'água

de ordem e de porte diferentes. Assim, através do estudo deste índice é possível determinar de forma mais eficiente o controle exercido por fatores geológicos sobre o perfil longitudinal de um canal de drenagem e por ser uma derivação do perfil semilogarítmico, evita o efeito da diminuição da declividade pelos fatores hidráulicos e sedimentológicos (Etchebehere et al., 2004).

Ainda segundo Etchebehere *et al.* (2004), este índice foi aplicado, com sucesso, na definição de fenômenos neotectônicos em diversos contextos geológicos. No território brasileiro já existem registros de aplicação de técnicas semelhantes, como na região amazônica (Rodriguez e Suguio, 1992; Rodriguez, 1993) e na Bacia Sedimentar de São Paulo (Takiya, 1997).

O índice de Hack, para Cremon (2013), é um parâmetro quantitativamente significativo, pois está relacionado à potência do canal (*stream power*) para transportar material de dada granulometria e às características do canal com a resistência de fluxos (Figura 3.4). O índice pode ser calculado para todo o canal (Equação 18), para comparações de diferentes cursos fluviais ou por trechos (Equação 19), este último sendo mais voltado para análise detalhada das variações dos índices.



Figura 3.4 - Características do canal para o cálculo do Índice de Hack.

Índice de Hack<sub>total</sub> = 
$$\frac{H_1 - H_2}{\ln L_2 - \ln L_1}$$
 (Equação 18)

Índide de Hack<sub>trecho</sub> = 
$$\left(\frac{\Delta H}{\Delta L}\right) x L$$
 (Equação 19)

Sendo:

Δh: diferença altimétrica entre o segmento selecionado na drenagem;

 $\Delta$ l: projeção horizontal da extensão do referido segmento;

L: corresponde ao comprimento total do curso d'água

 $\Delta$ H: diferença altimétrica do curso d'água o qual o índice RDE está sendo calculado.

Seeber e Gornitz (1983) estabeleceram uma formulação para anomalias do índice de Hack, onde o valor do índice por trecho é dividido pelo índice total conforme a Equação 20.

$$Anomalia = \frac{\acute{lndice de Hack_{trecho}}}{\acute{lndice de Hack_{total}}}$$
(Equação 20)

Os resultados superiores a 2 e inferiores a 10, ainda de acordo com Seeber & Gornitz (1983), correspondem a anomalias de segunda ordem, e os resultados superiores a 10 correspondem, por sua vez, às anomalias de primeira ordem. Esta classificação é traduzida como sendo as anomalias de 1ª ordem encontradas em locais muito íngremes, as anomalias de 2ª ordem encontradas em locais íngremes e quando o índice calculado é menor que 2 (dois) os trechos são pouco íngremes, configurados como gradiente ideal.

Os valores maiores do índice de Hack ou de sua anomalia têm sido interpretados em estudos morfoestruturais por diferença litológica do substrato ou por movimentações tectônicas que deslocam o relevo, por isso a anomalia do índice também pode ser denominada de anomalia morfoestrutural (Cremon, 2013).

### 3.3.2 - Fator de Assimetria da Bacia (FAB)

O Fatores de Assimetria da Bacia (FAB) e de Simetria Topográfica Transversal (FSTT), segundo Firmino (2015) foram propostos respectivamente por Hare e Gardner (1985) e por Cox (1994). O estudo destes índices possibilita uma análise adequada do controle tectônico e possíveis reativações na área de estudo.

O fator de assimetria, considerando- se os principais rios das bacias hidrográficas, é muito utilizado no reconhecimento de terrenos que tenham sofrido basculamentos, podendo indicar o sentido das movimentações (Mantelli e Rossetti, 2009). O cálculo deste índice é feito utilizando-se a Equação 21 e a descrição dos parâmetros necessário estão exemplificados na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Bloco esquemático do fator assimétrico de bacia (Modificado de Firmino, 2015).

$$Af = 100 \ x \ \frac{A_d}{A_t}$$
(Equação 21)

Sendo:

Af: fator de assimetria,

Ad: área direita da bacia de drenagem,

At: área total da bacia de drenagem.

O resultado do FAB, segundo Firmino (2015) é generalizado para toda a bacia e quando o valor obtido está próximo a 50, significa que não há indicativo de basculamento, porém, quando o valor é menor que 50, pode indicar basculamento para a margem esquerda da bacia, e quando é maior que 50, para a margem direita da bacia.

3.1.3 - Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT)

O fator de simetria topográfica transversal da bacia destina à análise do comportamento dos canais fluviais em relação ao arcabouço geológico, estabelecendo uma relação entre a distância mantida entre a linha média da bacia e o canal funcional e a distância entre a mesma linha e o divisor, ou seja, o limite topográfico da bacia (Neres e Morais, 2014). A Figura 3.6 mostra como são obtidos os parâmetros necessários para o cálculo deste índice por meio da Equação 22.



**Figura 3.6 -** Bloco esquemático do fator de simetria topográfica transversal (Modificado de Firmino, 2015).

$$FSTT = \frac{D_a}{D_d}$$
 (Equação 22)

Sendo:

T: Fator de Simetria Topográfica Transversal;

Da: distância do eixo principal da bacia ao percurso do canal principal;

Dd: distância do eixo principal da bacia ao divisor da bacia naquele mesmo alinhamento.

Os valores obtidos podem variar de 0 a 1, sendo que, quanto mais próximo de 0, mais simétrico, e quanto mais próximo de 1, menos simétrico, podendo indicar basculamento.

3.1.4 - Índice Razão Fundo/Altura Do Fundo Do Vale (RFAV)

Um outro índice morfométrico utilizado para análise da neotectônica em uma bacia hidrográfica é a Razão Fundo/Altura de Vale (RFAV). Esse índice foi desenvolvido, segundo Barbosa e Furrier (2011) por Bull e McFadden e é empregado na avaliação das intensidades de atividades neotectônicas de uma região ao longo de feições estruturais individuais.

Os altos valores de RFAV em determinado canal são atribuídos, geralmente, a vales em forma de "U" ou vales abertos, que ocorre em canais sobrepostos às terras baixas, havendo predomínio de intemperismo químico do rio sobre as vertentes, criando longas planícies de inundação. Os baixos valores de RFAV referem-se a vales em forma de "V" ou vales encaixados, que indicam processos de incisão do rio que escava ativamente o substrato rochoso sendo uma característica comum de regiões tectonicamente ativas e soerguidas há pouco tempo (Barbosa *et al.*, 2013).

A medição inicia-se com o traçado do perfil dentro da bacia hidrográfica, abrangendo os dois divisores de água em lados opostos com pontos altimétricos cotados (Figura 3.7). E conforme Andrades Filho (2010), este índice é definido pela Equação 23.



Figura 3.7 - Procedimento de medida para encontrar os valores do índice morfométrico RFAV (Adaptado de Silva, 2014).

$$RFAV = \frac{2 L_{fv}}{\left[ (E_{de} - L_{fv}) - (E_{dd} - E_{fv}) \right]}$$
(Equação 23)

Onde:

RFAV: razão entre a largura do fundo e a elevação do vale;

Lfv: valor da largura do fundo de vale;

Ede: elevação do divisor do setor esquerdo do vale;

Edd: elevação do divisor do setor direito do vale;

Efv: valor da média de elevação do fundo do vale.

Para a aplicação deste índice é recomendável selecionar alguns perfis que cortam o canal de maior expressão dentro da bacia, efetuando cortes transversais ao vale, escolhidos em locais previamente determinados. Silva et al. (2003) afirmam que, em geral, os valores de RFAV considerados como indicadores de soerguimento e, consequentemente de atividade tectônica ativa, são baixos (<1,0 – vales em forma de V), enquanto que valores que indicam estabilidade tectônica, moldados principalmente pela erosão lateral, são mais altos (>1,0 – vales em forma de U). Os autores afirmam, ainda, que, os valores de RFAV variam, dependendo do tamanho da bacia, da descarga de fluxo e do tipo de rocha.

# 3.2 - ANÁLISE DOS LINEAMENTOS DE DRENAGEM E MORFOESTRUTURAIS

Os lineamentos são segmentos retilíneos ou ligeiramente curvos de possível detecção por meio de cartas topográficas, fotos aéreas ou imagens de radar e satélite, e também em campo, podendo ser lineamentos de relevo (positivos) ou de drenagem (negativos), visualizáveis, por exemplo, através de vales lineares e encaixados e cristas alinhadas (Bricalli e Mello, 2013). Estas estruturas geológicas de relevo e drenagem são interpretadas como possíveis sistemas de fraturamentos. Sabins (1978) define o termo lineamento como sendo uma feição linear topográfica ou tonal, que pode representar uma zona de fraqueza estrutural.

Em termos geomorfológicos, para Bricalli e Mello (2013) lineamentos representam comumente variações na elevação dos terrenos, alinhamento de cristas, segmentos de escarpas, trechos de drenagem e vales, que, por refletirem as principais linhas de fraqueza regionais, podem indicar locais de ocorrência de estruturas geológicas importantes para comprovar a influência estrutural e/ou tectônica na evolução do relevo.

Os lineamentos de drenagem e relevo evidenciam as áreas de alívio tectônico e os cruzamentos de lineamentos podem indicar zonas de maior variação de tensão, ocorrendo o maior número de fraturamento (Feitosa, 2008) que podem ser derivados de movimentos recentes.

A identificação de lineamentos estruturais a partir do traçado da rede hidrográfica (lineamentos negativos), para Gomes (2008), é um método morfológico clássico de identificação de fraturas no substrato rochoso. Segundo Tricart (1968), estas estruturas indicam a existência de faixas lineares mais susceptíveis à erosão assim, os cursos de água utilizam destas fraquezas do substrato e os tornam caminhos lineares preferenciais onde a erosão se realiza mais eficazmente. Já o estudo das feições lineares do relevo (lineamentos positivos) para

a verificação de possíveis atividades neotectônica, segundo Lima (2014), ainda é realizado em menor número porém, associado ao estudo das feições anômalas da rede de drenagem, também pode trazer importantes informações sobre influência estrutural de determinada área.

A partir da análise da rede de drenagem e a disposição retilínea do relevo é possível também inferir a localização de falhamentos. As falhas são representadas por descontinuidades de zonas homólogas ao longo de lineamentos negativos e positivos. O movimento dos blocos pode ser observado através do deslocamento lateral de zonas homólogas, rupturas e arrastos das feições lineares ao longo destes alinhamentos (Sant'anna e Santos, 1996).

A análise de mapas de lineamentos em escala regional, para Bricalli (2016), tem sido mostrada como uma ferramenta útil em estudos de neotectônica e geomorfologia tectônica realizados no Sudeste do Brasil por diversos autores. Além disso, a análise de lineamentos, previamente a trabalhos de campo, pode apontar áreas de ocorrência de estruturas rúpteis, uma vez que os lineamentos correspondem a feições geológicas lineares.

# **CAPÍTULO 4**

# METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho foi desenvolvida a partir da obtenção de informações referentes ao terreno (características fisiográficas, geológicas e geomorfológicas), da rede de drenagem, seguido da análise morfométrica. Esses parâmetros serviram de base para avaliação das condições físicas da bacia e também para detecção de deformações relacionadas à tectônica recente.

A determinação de índices e parâmetros morfométricos para bacias hidrográficas, historicamente, foi realizada de forma manual o que demandava bastante tempo e grande habilidade técnica para análise. Com o progresso tecnológico, a obtenção e o armazenamento de informações em ambiente computacional tornou o processo mais dinâmico e preciso. Neste trabalho a metodologia proposta envolve principalmente operações básicas de SIG (Sistema de Informações Geográficas), como conversão entre formatos vetorial e matricial, operações matemáticas simples em mapas *raster* e interpolação de valores pontuais em superfícies contínuas.

O SIG é um conjunto harmônico composto por uma base de dados e *softwares* que permitem a manipulação de informações apresentando uma interface gráfica para acesso do usuário. O *software* utilizado neste estudo foi o *ArcGis 10.1*, da empresa ESRI, onde foram confeccionadas as cartas morfométricas, tratamento e leitura dos dados.

O estudo geomorfológico da bacia Ribeirão da Cachoeira foi dividido em duas fases:

- Obtenção dos dados e revisão bibliográfica, e

- Processamento e armazenamento dos dados.

### 4.1 - OBTENÇÃO DOS DADOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os dados foram levantados de acordo com as etapas da análise morfométrica. Para análise fisiográfica e geológica da área da bacia, foram utilizados os dados disponíveis em diferentes referências bibliográficas.

Os dados cartográficos e hipsométricos necessários para o estudo, foram obtidos, em formato *shapefile*, no *site* "Infraestrutura de Dados Espaciais - GeoMinas" sendo compatíveis

com a escala de 1:50.000, e pertencem ao Projeto Geominas (digitalização de cartas topográficas do IBGE) do Governo do Estado de Minas Gerais.

O mapa geológico foi elaborado a partir de uma compilação de dados, também em formato *shapefile*, do mapa geológico da carta de Ouro Preto, em escala 1:50000, do Projeto Quadrilátero Ferrífero, disponibilizado pela Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMIG) na página "Portal da Geologia". A região sul da área de estudo não é contemplada por este projeto então foi necessário usar as informações do Mapa Geológico de Minas Gerais na escala de 1:1.000.000.

Os dados hidrográficos foram obtidos através das imagens SRTM SF-23-X-A e SF-23-X-B disponíveis no site da EMBRAPA, no formato GEOTIFF, resolução espacial de 90 m, reamostradas para 30 metros, e sistema de coordenadas geográficas UTM datum, WGS-84.

A extração automática da drenagem, organizada de forma hierárquica, foi realizada com base nas direções de fluxo e na grade de áreas acumuladas, utilizando o software ArcGIS 10.1. Foi utilizada a ferramenta *ArcToollBox > Spatial Analyst Tools* e gerou-se a direção de fluxo (*flow direction*) e o fluxo acumulado (*flow accumulation*), etapas necessárias para a delimitação da drenagem no programa. Para gerar uma imagem *raster* com as drenagens extraídas utilizou-se no *ArcToolbox* a ferramenta *Spatial Analyst Tools > Condicional > Con*. Para finalizar criou-se a *shapefile* de drenagem através dos comandos ArcToollBox > Spatial Analyst Tools > *Spatial Analyst Tools > Spatial Analyst Tools > Midrology > Stream to Feature*. Os dados extraídos foram comparados e ajustados com imagens de satélite no *Google Earth Pro*. Posteriormente foi necessária a reprojeção cartográfica dos dados de UTM Zona 23S para WGS 84, a fim de parear os parâmetros dos arquivos.

A bacia hidrográfica em estudo foi delimitada a partir do exutório (ponto para onde converge a vazão da bacia) que dá origem ao Ribeirão da Cachoeira. Esta etapa foi feita manualmente conectando os pontos mais elevados, tendo por base as curvas de nível, restringindo as drenagens onde a água da chuva escoa rumo às partes baixas (cruzando perpendicularmente às curvas de nível) na direção da Barragem do Ribeirão da Cachoeira.

### 4.2 - PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO DE DADOS

A análise morfométrica da bacia é definida a partir de parâmetros extraídos que devem ser estruturados na base de dados. Para a geração desses parâmetros, é necessária a extração de atributos da bacia hidrográfica e da rede de drenagem. Esses atributos são extraídos do Modelo Digital do Terreno (MDT) e da rede hidrográfica sendo armazenados e processados em ambientes digitais.

O elemento principal na análise morfométrica em SIG é o MDT, que pode ser construído a partir da interpolação de pontos cotados ou de curvas de nível, estejam elas em formato *raster* ou vetorial. Utilizou-se da *shapefile* da curva de nível da área de estudo para gerar o arquivo TIN na extensão *3D Analyst* e ferramenta *Data Management* > *TIN*. Para a melhor visualização em 3D da área foi usado o aplicativo *Arcsense*.

### - Parâmetros Morfométricos

O padrão de drenagem foi determinado através da análise visual comparando com os padrões especificados em IBGE (2009). Para auxiliar na definição foi utilizado o aplicativo *Arcsense* Sobrepondo-se as imagens TIN e de satélite e o mapa geológico da área de estudo.

As ordens dos canais da bacia foram estabelecidos pelo método de classificação (hierarquia) de Strahler (1964), onde os menores canais sem tributários são considerados de primeira ordem; os canais de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem, e só recebem afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem surgem da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e primeira ordens; os canais de quarta ordem surgem da confluência de terceira ordem, podendo receber tributários de ordens inferiores, assim sucessivamente. Foi utilizado a classificação feita a mão pois a rede de drenagem gerada pelo software foi corrigida.

A área e o perímetro da bacia foram calculados através da ferramenta *Calculate Geometry* dentro da tabela de atributos da *shapefile* do contorno da bacia hidrográfica. O comprimento do rio principal foi obtido através da projeção em linha reta do canal e foi medido com o auxílio da ferramenta *measure* na barra de ferramentas. As altitudes foram obtidas do arquivo TIN. Através da ferramenta *Calculate Geometry* > *Estatistic*, dentro da tabela de atributos da *shapefile* das drenagens e curvas de nível foram obtidas as informações: comprimento total dos canais fluviais, número de canais fluviais e comprimento de todas as curvas de nível. As declividades foram adquiridas do modelo digital de elevação (MDE), através das ferramentas *Spataial Analisty Tools* > *Surface* > *Slope* dentro da extensão *3D Analyst*, em graus e porcentagem. Os valores encontrados foram aplicados nos cálculos dos parâmetros através das equações apresentadas no capítulo 3 no programa Microsoft Excel.

51

O mapa de hipsometria foi elaborado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE). Elaborou-se o modelo de hipsometria com a ferramenta *Hillshade*, nas extensões *ArcToolbox* > *Spatial Analyst Tools* > *Surface* > *Hillshade*. Foram determinadas 10 classes de intervalos hipsométricos e posteriormente foi preenchida uma tabela no Excel que necessita de três dados de entrada: quantidade de *pixel* por faixa de altimetria, proveniente do MDE adquirido, cotas e a área das classes determinadas pelo *software*.

O perfil longitudinal foi obtido com a interpolação da *shapefile* da linha desejada do perfil com o arquivo TIN. Utilizou-se a extensão *3D Analyst Tools > Functional Surface > Interpolation shape* que gerou outra *shapefile* da qual foi obtida o perfil longitudinal através da ferramenta *Profile Graph*. A extração de *knickpoints* e *knickzones* de perfis longitudinais foi feita de modo visual e subjetivo.

### Índices Geomorfométricos indicadores de Neotectônica

### - Índice de Hack (RDE – Relação Declividade-Extensão)

Os procedimentos adotados para se calcular o índice RDE<sub>total</sub> na bacia iniciam-se selecionando os cursos d'água de porte mais expressivo dispersos em toda a bacia incluindo sub-bacias e microbacias. Os cursos escolhidos foram: Córregos Água Limpa, Cristais, Meira, Lavrinha, Papa -Cobra, Mata da Roça e Ribeirão Santa Rita. Os dados da diferença altimétricas e comprimento das drenagens já foram obtidos quando calculou-se as características físicas da bacia. Essas informações foram lançadas no Excel e assim foram calculados os índices RDE<sub>total</sub>. Para a obtenção do índice RDE<sub>trecho</sub> foram analisados pontos distintos ao longo do canal principal e dos cursos d'água escolhidos para o cálculo do RDE<sub>total</sub>. Foram escolhidos pontos, principalmente, onde a drenagem apresenta cotovelos e/ou fortes inflexões e nos intervalos de anomalia do perfil longitudinal.

### - Fator de Assimetria da Bacia (FAB)

Para determinar o Fator de Assimetria da Bacia é necessário o valor da área total e da margem direita da bacia. Para se obter os valores dessas áreas foi utilizada a ferramenta *Calculate Geometry* dentro da tabela de atributos das *shapefiles* dos contornos das sub-bacias e microbacias.
#### - Fator de Simetria Transversal Topográfica (FSTT)

A aplicação deste fator exige o estabelecimento da linha média da bacia e de perfis perpendiculares ao canal principal. Estes perfis foram traçados em meio digital de forma que abrangessem as áreas que demonstraram anomalias no índice RDE<sub>trecho</sub>.

## - Índice Razão Fundo/Altura de Vale (RFAV)

O cálculo deste índice tem como ponto inicial o traçado de perfis perpendiculares aos cursos de água, em trechos escolhidos dentro da bacia hidrográfica, abrangendo dois divisores de água. Foram escolhidos, na maioria das sub-bacias e microbacias, três perfis representando o início, meio e fim da drenagem principal. O perfil foi traçado utilizando as mesmas ferramentas, no *Arcgis 10.1*, usadas para a determinação dos perfis longitudinais das bacias. Através dos arquivos gerados foi possível determinar os parâmetros necessários para o cálculo do índice.

#### Lineamentos de drenagem e morfoestruturais

Os lineamentos foram obtidos a partir das feições de drenagem e alinhamentos do relevo. Os lineamentos foram determinados por extração manual, para os de drenagem foi utilizado como base o mapa de drenagem e os lineamentos morfoestruturais foram identificados através da análise do mapa de relevo sombreado.

O cálculo do azimute das linhas foi feito utilizando a ferramenta *AzimuthFinder* que possui interface com o *Arcgis* e disponibiliza dois métodos de cálculo. O método convencional de medidas é denominado de "frequência", no qual cada lineamento, quando se roda o programa, terá o mesmo peso, independentemente de seu tamanho relativo. No outro método, denominado método do "comprimento", os lineamentos de maior comprimento têm maior peso que os menores, Neste caso, o programa calcula o peso de cada lineamento que é definido pelo número de vezes aproximado em que o comprimento do lineamento é maior que o menor valor de comprimento de lineamento existente quando o peso de um lineamento for maior que 1, o programa copia seus dados. Desta forma, os programas de confecção de Diagramas de Rosetas irão interpretar os valores repetidos como grandes populações de dados azimutais, o que causará uma ênfase nas direções dos lineamentos de maior peso.

Os dados dos azimutes dos lineamentos foram usados para gerar rosetas com a frequência das direções dos lineamentos. Foram usados o programa OpenStereo para gerar rosetas com os dados da frequência das direções dos segmentos e InnStereo para gerar as rosetas

com os dados que consideram diferentes pesos para os diferentes comprimentos destes segmentos.

# CAPÍTULO 5

# APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

# 5.1 - FORMAS DE RELEVO DA ÁREA DE ESTUDO

A análise da imagem de satélite (Figura 5.1) confirma o que foi proposto por Hader & Chamberlin (1915) que afirmam que o relevo da área de estudo é controlado pela estrutura geológica e modelado por processos erosivos diferenciais. Em geral, os quartzitos e itabiritos do Grupo Itacolomi constituem o substrato das terras altas e os complexos metamórficos e os xistos e filitos compreendem o substrato das terras de altitude mediana e as terras baixas.



**Figura 5.1 -** Imagem de satélite da área da bacia do Ribeirão da Cachoeira (adaptado GOOGLE, 2016).

Os traços regionais do relevo, acidentado com vertentes bem íngremes e vales profundos e encaixados, mostram uma dependência com a geologia local, que controla a formação de serras e drenagens em duas direções preferenciais. As principais feições da paisagem são a

Serra de Ouro Branco e a chapada de Lavras Novas, com altitudes oscilando entre 700 e 1772 m. O contexto geomorfológico é caracterizado por *hogbacks*, sendo as cristas e *back-slopes* constituídos por rochas do Grupo Itacolomi, alternados com áreas de relevo mais suave (dip-slopes) associados às intercalações metapelíticas do Grupo Nova Lima.

A parte norte da área de estudo é marcada pela erosão diferencial e por falhas sendo possível perceber que alguns canais aproveitam estas estruturas. Nesta região estão localizados os relevos mais dissecados e rebaixados em relação às cristas do entorno. O alto grau de intemperismo das rochas do Grupo Nova Lima, como também sua baixa resistência aos processos intempéricos, tornaram os vales desta região uma das áreas mais baixas com altitudes aproximadas de 990 a 1200 m. As regiões mais altas da área de estudo também estão localizadas na parte norte.

A Chapada de Lavras Novas, aparece como uma superfície relativamente aplainada, alinhada entre as serras do Itacolomi e Ouro Branco, possui altitude máxima de aproximadamente 1470 m, e é um escarpamento modelado em quartzitos com lentes de metaconglomerados e intercalações de metapelitos (xistos e filitos) pertencentes ao Grupo Itacolomi. Combinada ao fator litológico, tem-se a influência do controle estrutural exercido pela atitude das rochas (acamamento e xistosidade), fraturas e falhas no modelo atual do relevo como, por exemplo, a direção do curso do Ribeirão da Cachoeira e do Rio Maynard. A Serra de Ouro Branco, provavelmente, sofreu influência da atuação da erosão diferencial que permitiu que o Grupo Itacolomi sofresse um intemperismo menor do que as rochas do Grupo Nova Lima (xisto-filito), sustentando-o nos patamares altimétricos que se encontram atualmente a aproximadamente 1400 m.

A região sul da área também possui altitudes médias e baixas e é composta por granitognaisses pertencentes à Suíte Alto Maranhão e Complexo Santo Antônio de Pirapetinga. O aspecto mais suave da paisagem o diferencia das outras unidades no cenário do Quadrilátero Ferrífero onde predominam as colinas de aspecto retilíneo a convexo. A rede de drenagem acontece sob as rochas metamórficas formando planícies fluviais e raras cachoeiras.

# 5.2 - CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA

A bacia do Ribeirão da Cachoeira possui 93 canais distribuídos em uma área de aproximadamente 225 km<sup>2</sup>. O rio principal foi definido de acordo com os critérios estabelecidos

por Christofoletti (1974) e é o Córrego Água Limpa que possui comprimento total de aproximadamente 23 km.

Os canais da drenagem possuem dois padrões distintos. Na parte norte, distribuem-se em todas as direções sobre a superfície permitindo classificá-la em um padrão dendrítico a subdendrítico. Na área sul, os canais fluviais se apresentam reticulados ortogonalmente com mudanças em ângulo reto nos cursos. Os principais canais de drenagem na região a montante da Serra de Ouro Branco possuem direção preferencial E-W, já os canais localizados a jusante da serra (sul da área de estudo) possuem direção preferencial S-N. Essa diferença pode estar relacionada com a presença das Falhas do Engenho.

O ordenamento dos canais e hierarquização das bacias de drenagem, realizado para a bacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeira permitiu verificar que os cursos de água, em um total de 69 (nascentes), são em sua grande maioria de 1ª Ordem, distribuídos em 17 canais de 2ª ordem e 6 de 3ª ordem e o Ribeirão da Cachoeira de 4ª Ordem (Tabela 5.1 e Figura 5.2).

Hierarquia	Número de canais	Comprimento Total (km)	Comprimento médio (km)
1ª Ordem	69	97,28	1,945
2ª Ordem	17	73,19	4,304
3ª Ordem	6	47,11	7,851
4ª Ordem	1	1,34	-
Total	93	218,92	1251

Tabela 5.1 - Hierarquia da drenagem.

Após a aplicação das ferramentas de geoprocessamento nas bases digitais foi possível extrair os atributos necessários aos cálculos dos parâmetros morfométricos aplicados neste trabalho. Os principais dados necessários para estes cálculos e os resultados estão sumarizados na Tabela 5.2 e serão discutidos e comparados entre si.



Figura 5.2 - Mapa de drenagens (hierarquia fluvial).

Resultados					
Área total (km <sup>2</sup> )	224,95	Coeficiente de compacidade Kc (km/km2)	1,48		
Perímetro total (km)	79,12	Coeficiente de manutenção	0,49		
Comprimento do eixo da bacia (m)	23,06	Fator de forma F	1,46		
Comprimento médio dos canais (m)	4,30	Índice de circularidade Ic	0,04		
Comprimento do curso d'água principal (km)	23,06	Gradiente do canal principal Gcp	12,92		
A ltitude mínima do rio principal (m)	1000	Extensão do percurso superficial Eps	0,25		
A ltitude máxima do rio principal (m)	1280	Índice de rugosidade Ir	648,19		
Declividade média Dm (graus)	11,03	Índice de Sinuosidade Is	1,00		
Densidade de drenagem Dd (km/km²)	0,97	Relação Relevo (m/km)	26,89		
Densidade hidrográfica Dh (rios/km²)	0,413	Relação Bifurcação	4,06		

Tabela 5.2- Resultados obtidos para as características físicas e parâmetros morfométricos da bacia.

Os valores encontrados para os parâmetros densidade de drenagem (Dd) e coeficiente de manutenção foram de 0,97 km/km<sup>2</sup> e 1,48 km/km<sup>2</sup>, respectivamente, permitindo classificar a bacia, de acordo com Beltrame (1994), como mediana. Esses valores indicam que tal sistema hidrográfico possui uma boa drenagem, que é influenciada tanto pelos tipos de solos, quanto pela topografia, pois caracteriza sua parte alta como uma cabeceira de nascente, em processo intenso de dissecação, atenuada pelas partes baixas, bem drenadas, com uma capacidade de infiltração. Isso ocorre devido à acentuada diferença das características do substrato rochoso.

Os valores são mais expressivos nas partes altas da região onde afloram as rochas dos Grupos Piracicaba (1,24 km/km<sup>2</sup>) e Itacolomi (1,0 km/km<sup>2</sup>) que possuem solos com baixo grau de desenvolvimento pedogenético (cambissolos), pouco profundos e com baixa velocidade de infiltração. Somados às características litológicas têm-se os fatores topográficos. As altas cotas dessas áreas favorecem o escoamento superficial da água e não a infiltração. As porções onde ocorrem granitos, granitóides e gnaisses da Suíte Alto Maranhão e do Complexo Santo Antônio de Pirapetinga de tem valores de Dd de menor expressão (0,88 km/km<sup>2</sup>). Nestes locais, há uma maior ocorrência de latossolos que são solos mais profundos, em elevado estágio de intemperização, refletido nas grandes diferenças texturais e composicionais de acordo com o

material de origem. Estes apresentam, em geral, valores elevados de condutividade hidráulica saturada e consequentemente uma boa condição de infiltração.

A densidade hidrográfica (Dh) apresentou valor de 0,413 rios/km<sup>2</sup> que é considerado por Machado e Souza (2005) um valor baixo. Dessa forma, entende-se que, em função de seus atributos físicos como geológicos, topográficos esta área tem grande dificuldade para formação de novos canais fluviais.

O valor obtido para o índice de circularidade (IC) é 0,036 que é considerado muito baixo. Como o índice de circularidade tende para unidade à medida que a bacia aproxima-se da forma circular e diminui à medida que a forma torna alongada pode-se afirmar que a bacia é alongada com pouca probabilidade de cheias ou inundações com escoamento superficial rápido. Este resultado é condizente com os valores de Dh e Dd sinalizando o potencial erosivo da região. Outros parâmetros que confirmam o formato alongado e retangular da bacia são o Coeficiente de Compacidade (Kc) e o Fator Forma (Ff) que resultaram respectivamente em 1,48 e 1,46.

O resultado encontrado para o parâmetro gradiente de inclinação do canal principal da bacia (12,9 m/km - 1,29%) indica uma menor competência para transportar materiais sedimentares mais pesados, o que potencializa a sua capacidade de assoreamento e o transporte de sedimentos em solução e suspensão. Quando é analisado setor serrano e de planície separadamente obtêm-se como resultado os seguintes valores respectivamente: 33,3 m/km - 3,33% e 6,57 m/km - 0,657%. Através da análise desses dados pode-se notar a importância das vertentes no modelamento do relevo dessa região.

O valor encontrado para o parâmetro Relação Relevo (Rr) foi de 26,89 m/km o que indica um moderado a alto desnível topográfico da bacia em estudo. Esse resultado está de acordo com os valores encontrados nos parâmetros anteriores que indicam a presença das nascentes em regiões de altas altitudes que são responsáveis pelo dessecamento das vertentes formando escarpas e prevalecendo o escoamento superficial nessas áreas e em regiões mais baixas, com morros e colinas, a amplitude altimétrica é menor favorecendo a infiltração.

O valor obtido para o parâmetro Relação de Bifurcação (Rb) entre os canais de primeira e segunda ordem (4,06) indicam nascentes com relevo muito dissecado, com escarpas bem desenvolvidas e vales estruturais formando áreas de elevado potencial de erosão. Os vales em "V" são caracterizados pelo sistema de drenagem encaixada, com escoamento superficial de alta velocidade e energia, resultando em processo de erosão inicialmente laminar, podendo evoluir à erosão por sulcos e voçorocas. Entre os canais de segunda e terceira ordem o resultado diminui indicando um relevo menos dissecado, com morros e colinas bem desenvolvidas (2,83) formando uma região de aplainamento.

Os valores de Eps (Extensão do percurso superficial) foram analisados por Sousa e Rodrigues (2012), que definiram uma escala de intensidade para os mesmos. Dessa maneira, o valor de 245 metros é considerado um valor alto, o que indica na bacia as vertentes têm comprimentos médios de 245 metros, onde o escoamento é maior que a infiltração. Ainda com base neste resultado pode-se afirmar que a bacia possui uma textura classificada como "grosseira", pois apresenta um considerável espaçamento entre os seus canais.

A relação do comprimento médio dos canais de cada ordem ( $R_{Lm}$ ) e a relação bifurcação com o comprimento médio dos canais ( $R_{Lb}$ ) são parâmetros que refletem a estruturação interna dos canais na bacia. Observa-se, a partir dos resultados na Tabela 5.3, que com o aumento da ordem hierárquica dos canais, o valor da  $R_{Lm}$  diminui e  $R_{Lb}$  aumenta, mostrando com isso a importância do fator geológico no desenvolvimento da drenagem de maior ordem.

Relação entre canais sucessivos	R <sub>Lm</sub>	RLb
1ª – 2ª ordem	2,21	0,55
2ª – 3ª ordem	1,82	0,64

Tabela 5.3 - Relação entre canais sucessivos para os parâmetros RLm e RLb.

As análises das declividades média da bacia estão ligadas à energia disponível para os processos geomorfológicos nas vertentes e nos canais fluviais. As amplitudes de declividade distinguem-se em máxima com 168,76%, média de 19,79% e a mínima de 0%. As áreas de maior declive (>45%) estão localizadas nas rochas dos Grupos Itacolomi e as mais baixas do Grupo Nova Lima. Desta forma, o relevo da bacia está na transição, segundo Tricart (1977), entre moderada e forte e segundo a Embrapa (1979) entre ondulado e fortemente ondulado. Aproximadamente 45% e 42% da área estão classificadas, respectivamente, como moderada e forte e ondulada e fortemente ondulada. A Figura 5.3 apresenta o mapa de declividade e a Tabela 5.4 apresenta as informações quantitativas associadas às classes de relevo.

Classe de Declividade (%)	Relevo (Tricart - 1977)	Relevo (Embrapa - 1979)	Á rea (km²)	%
0 a 3	Muito Fraca (Mfa)	Plano	7,66	3,41
3 a 8	Fraca (Fa)	Suave ondulado	19,74	8,78
8 a 20	Moderada (Mo)	Ondulado	100,11	44,50
20 a 45	Forte (Fo)	Fortemente ondulado	92,92	41,31
> 45*	Muito Forte (Mfo)	Montanhoso	4,21	1,87
>75	-	Fortemente montanhoso	0,30	0,13

Tabela 5.4 - Declividade (%) e Classes de Relevo.

Um relevo moderado a forte, segundo Tricart (1977), corresponde aos meios *intergrades* (em transição). Ocorre ação generalizada do escoamento superficial dos solos, dando origem a canaletas. Nos relevos dissecados, há uma ação do escoamento superficial semiconcentrado e concentrado demonstrada por remoção do horizonte A, com exposição do horizonte B e formação de canaletas e sulcos profundos; nas planícies fluviais ocorre o escoamento concentrado com desbarrancamento e/ou desmoronamento.

O relevo ondulado, segundo Embrapa (1979), é caracterizado por superfície de topografia relativamente movimentada, constituída por conjunto de colinas média, ou por interflúvios de pendentes curtas, formadas por vales encaixados. Já o relevo fortemente ondulado possui desníveis fortes, formadas por conjunto de morros, ou por superfície entrecortada por vales profundos.



Figura 5.3 - Mapa de Declividade (%) da bacia do Ribeirão da Cachoeira.

A bacia está inserida em um intervalo altimétrico de 920 a 1540 m, como pode ser visto nas Figuras 5.4 e 5.5, e a altitude média é de 1145 m. As cotas altimétricas de maior expressão, como pode ser visto na Tabela 5, estão no alto curso e ocupam menos de 1% da área. As cotas de menor expressão ocupam 7,77% da área e estão localizadas ao redor da represa do Ribeirão da Cachoeira. A maior parte da área da bacia (43,44 %) está inserida no intervalo de 1168 a 1292 e as altitudes aumentam no sentido leste - oeste. As regiões do grupo Nova Lima e da Suíte Alto Maranhão apresentam um relevo mais dissecado, contrastando nitidamente com as áreas do Grupo Itacolomi, de vales bem mais amplos e gradientes suaves para as vertentes.

Classe altimétrica (m)	Área (km²)	%
920 - 1050	17,43	7,77
1050 - 1150	63,57	28,32
1150-1290	97,50	43,44
1290 - 1420	44,20	19,69
1420 - 1540	1,77	0,79

Tabela 5.5 - Classes altimétricas.



Figura 5.4 – Mapa Hipsométrico da bacia do Ribeirão da Cachoeira.



Figura 5.5 - Representação hipsométrica em 3D.

O valor encontrado para o parâmetro índice de rugosidade foi de 648,194. Este valor é considerado alto e implica em relevo mais colinoso e dissecado (maiores declividades) e canais mais entalhados. É de se esperar que bacias de elevada declividade média apresentam um índice de rugosidade também elevado, pois vertentes íngremes tendem a ser curtas, o que se reflete em uma elevada transmissividade hidráulica, ou seja, os fluxos de vertente se convertem mais facilmente em fluxos fluviais (Barros *et al*, 2010) prevalecendo o escoamento superficial nessas regiões.

O resultado para os cálculos do índice de sinuosidade foi de 0,99. Este valor indica elevado controle estrutural, a presença de alta energia na bacia e que os canais podem apresentar padrão retilíneo (1,0). Ao analisar os canais de forma mais detalhada, por meio da Figura 5.5, foi possível identificar anomalias nos padrões de drenagens que demonstram a ocorrência de feições de controle estrutural sobre o arcabouço do canal. Tais feições destacadas na figura tendem a ser indicadores de movimentos neotectônicos, como segmentos de padrões retilíneos das drenagens onde os canais apresentam uma bifurcação em ordem de 90°, podendo ser causadas por falhas transcorrentes (IBGE, 2009) que são comuns na área de estudo.



Figura 5.6 - Anomalias nas drenagens da bacia.

O perfil longitudinal observado na Figura 5.7 refere-se ao perfil do córrego Água Limpa que é a drenagem principal e representa o perfil da bacia. Ao longo de seu curso apresenta trechos em soerguimento e subsidência, possuindo 4 desníveis com irregularidades e porções convexas (*knickzones*).

Nos primeiros metros próximos à nascente, o perfil é tipicamente côncavo e apresenta declividade maior, pois estão relacionados ao relevo mais enérgico da bacia, perfazendo uma distância de 1000 m que se situa entre as curvas de nível de 1240 a 1280 m. Este intervalo está inserido litologicamente dentro do Complexo Santo Antônio de Pirapetinga, que possui rochas muito antigas com terrenos colinosos convexos gerados por processos erosivos superficiais (ravinamentos) e envolvido por escarpas dissecadas.

O primeiro desnível observado, também localizado na região alta do complexo metamórfico, corresponde a *knickzone* entre 1000 e 3000 metros da distância percorrida e situada no intervalo altimétrico de 1160 e 1240 m. Neste trecho a drenagem rotaciona aproximadamente 60° para E.



Figura 5.7 - Perfil Longitudinal da bacia do Ribeirão da Cachoeira.

A segunda zona de inflexão, situada no intervalo aproximado de 7000m a 12000 m da nascente, pode estar relacionada com descontinuidades litológicas e com a presença de rochas intrusivas. A aproximadamente a 6000 m inicia-se a transição entre rochas metamórficas (rochas do Complexo Santo Antônio de Pirapetinga para rochas da Suíte Alto Maranhão) que gera uma diferença significativa de altitude tornando-se menor que 1100m. Neste mesmo ponto, a drenagem muda de direção sendo N-S novamente. A aproximadamente 7000 m ocorre a variação litológica entre as rochas mais resistente dos Complexos Metamórficos, para as rochas mais intemperizadas do Grupo Nova Lima. Após a drenagem percorrer 11000 m, a área pode

ter sido influenciada pela intrusão ígnea presente no local mudando a direção da drenagem para NE-SW.

A terceira e quarta zonas de anomalia podem estar relacionadas com descontinuidades estruturais. A terceira knickzone inicia a aproximadamente 13 km da nascente e está onde a drenagem é rotacionada adquirindo direção E-W quando se aproxima da Falha do Engenho e contorna a Serra de Ouro Branco. O último desnível, localizado no final do perfil representando o final da drenagem antes da represa do Ribeirão da Cachoeira. A interferência estrutural vista neste trecho pode estar relacionada com uma falha NW-SE que gera alternâncias litológicas entre as rochas do Complexo Santo Antônio de Pirapetinga e dos Grupos Maquiné e Nova Lima.

A variação do sentido da drenagem está de acordo com o resultado de alguns parâmetros morfológicos calculados. A relação do comprimento médio dos canais de cada ordem ( $R_{Lm}$ ) e a relação bifurcação indicam um maior controle estrutural na bacia nas drenagens de maior ordem e esses valores foram confirmados na análise do perfil. As mudanças de sentido mais significativas ocorreram quando a drenagem torna-se de 3<sup>a</sup> ordem.

# 5.3 - ÍNDICES GEOMORFOMÉTRICOS INDICADORES DE NEOTECTÔNICA

# 5.3.1 - Índice RDE (Relação Declividade–Extensão) Ou Índice Hack

# - RDE<sub>Total</sub>

Os valores encontrados para o índice RDE<sub>total</sub> dos principais canais da bacia foram plotados em um gráfico em cujo eixo horizontal estão descritas as principais drenagens da bacia do Ribeirão da Cachoeira e o eixo vertical contém os valores obtidos para o índice RDE, mostrado na Figura 5.8.



Figura 5.8- Resultados de RDE<sub>total</sub> das principais drenagens.

Os maiores valores encontrados foram no Córrego Lavrinha e Ribeirão Santa Rita e os menores, que estão abaixo da linha de melhor ajuste, nos Córregos Papa-Cobra e Cristais. O Córrego Água Limpa é o terceiro menor valor encontrado. Ao observar a Tabela 5.6 é possível afirmar que o comprimento das drenagens e diferenças topográficas não estão diretamente relacionados com os resultados de RDE encontrados.

Tabela 5.6 - Resultados de RDEtotal

Nome	L	H(max)	H(min)	ΔH	ln L	RDE
Córrego Água Limpa	18,08	1280,04	1000,00	280,04	2,89	96,74
Córrego Cristais	9,21	1298,39	1118,57	179,82	2,22	81
Córrego Meira	11,36	1241,46	1000	241,46	2,43	99,35
Ribeirão Santa Rita	10,24	1282,61	1000	282,61	2,33	121,48
Córrego Lavrinha	9,78	1420,68	1080,24	340,44	2,28	149,27
Córrego Papa - Cobra	8,15	1276,32	1110,26	166,06	2,10	79,15
Córrego Mata da Poça	7,84	1326,12	1080,24	245,88	2,06	119,43

# - RDE trecho e Ordem das Anomalias

Córrego Água Limpa - Perfil Longitudinal da Bacia

O Córrego Água Limpa foi dividido para o cálculo do RDE<sub>Trecho</sub> em 15 trechos e 6 destes apresentaram anomalias de  $2^a$  ordem. Ao analisar a Figura 5.9 nota-se que 4 pontos sobressaíram e apresentam valores de RDE<sub>trecho</sub> e local aproximado na extensão da drenagem de 5,47 a 2,6 km; 3,83 a 10 km; 4,97 a 13,5 km e 4,64 a 17,5 km.



Figura 5.9 - Resultados de RDE<sub>trecho</sub>.

A drenagem possui aproximadamente 18 km de extensão, destes 5,6 km estão em trechos anômalos. Nota-se que onde os valores do índice  $RDE_{Trecho}$  que apresentam anomalias coincidem com as knickzones no perfil longitudinal.

É possível perceber através da Figura 5.10 que o trecho em que a drenagem percorre as rochas da Suíte Alto Maranhão apresentou apenas um trecho anômalo coincidindo com a área onde não houve mudanças significativas na direção da drenagem. A região com maior concentração de anomalias é justamente a área comumente marcada por uma intensa zona de cisalhamento onde está presente a Falha do Engenho e mudanças litológicas entre os Grupos Itacolomi e Nova Lima. Supõe-se que a concentração de anomalias morfométricas sobre estas estruturas mais antigas indique que as mesmas têm sido continuamente reativadas.



Figura 5.10- Mapa geológico com anomalias RDE<sub>trecho</sub>.

### Córrego Meira

O Córrego Meira foi dividido para o cálculo do RDE<sub>Trecho</sub> em 8 trechos sendo 3 destes apresentaram anomalias de 2<sup>a</sup> ordem e 3 anomalias de 1<sup>a</sup> ordem. Ao analisar a Figura 5.11 as anomalias de 1<sup>a</sup> ordem mais significativas foram a 8,42 km e 11,64 km com resultados respectivamente de RDE<sub>Trecho</sub> de 43,56 e 30,10. Os valores do índice para as anomalias de 2<sup>a</sup> ordem foram 3,25 a 7,93 km; 2,59 a 10,58 km e 6,43 a 10,58 km. Em relação ao percurso total, aproximadamente, 49 %, da drenagem possui anomalias sendo 3,42 km em anomalias de 1<sup>a</sup> ordem e 2,28 km em anomalias de 2<sup>a</sup> ordem.





Ainda de acordo com a Figura 5.11 observa-se que as anomalias mais significativas ocorrem a aproximadamente 8 km. A anomalia apresentada no perfil no trecho entre 2 e 3 km não foi perceptível nos cálculos do RDE<sub>Trecho</sub>.

A drenagem percorre as rochas dos Complexos Metamórficos o que leva a inferir que o contato litológico não está relacionado com as anomalias. Os 3 primeiros trechos ocorrem simultaneamente com uma mudança significativa de altitude que passa de mais de 1100 m a menos de 990 m. Neste intervalo de 2,5 km a drenagem muda de direção três vezes. Os demais 3 trechos também estão interligados e iniciam-se aos 10 km e segue até o final da drenagem que é a represa do Ribeirão da Cachoeira e não apresentam uma diferença altimétrica relevante.

#### Ribeirão Santa Rita

O Ribeirão Santa Rita, como o Córrego Meira, está localizado ao sul da represa e seu traçado sobrepõe as rochas dos Complexos Metamórficos (Figura 5.10). Para o cálculo do RDE<sub>Trecho</sub> a drenagem foi dividida em 4 trechos sendo que 2 destes possuem anomalias totalizando 4,9 km dos 11,4 km que a drenagem possui. As anomalias ocorrem a 7,8 km e 11,4 km de distância da nascente e só são perceptíveis no final do perfil longitudinal da drenagem (Figura 5.12). As zonas anômalas vistas no início do perfil não foram detectadas no cálculo do RDE<sub>Trecho</sub>.

As anomalias de 1<sup>a</sup> ordem são determinadas em terrenos muito íngremes e nesta drenagem o trecho com anomalias desta ordem possui uma amplitude altimétrica de aproximadamente 270 m enquanto a amplitude no trecho anômalo de 2<sup>a</sup> ordem é de 20 m.



**Figura 5.12 -** Resultados de RDE<sub>trecho</sub> e perfil longitudinal do Ribeirão Santa Rita.

## Córrego Lavrinha

O Córrego Lavrinha está localizado a noroeste da bacia e possui aproximadamente 11 km. A drenagem foi dividida em 9 trechos sendo que dois possuem anomalias de 2ª ordem.

Uma das anomalias ocorre a aproximadamente 4,8 km da nascente e pode ser observada, em pequena escala, no perfil longitudinal (Figura 5.13). Neste trecho está presente o contato litológico entre as rochas do Grupo Itacolomi e Grupo Piracicaba e a Falha do Engenho (Figura 5.10). Após a drenagem percorrer mais de 9 km é possível identificar o início da segunda anomalia que é significativa no gráfico e no perfil longitudinal. A região desta possui substrato rochoso pertencente ao Grupo Piracicaba e sofre influência de uma zona de cisalhamento contracional. Ao final deste trecho ocorre a confluência dos Córregos Lavrinha, Mata da Roça e Papa - Cobra gerando o Rio da Ponte.



Figura 5.13 - Resultados de RDE<sub>trecho</sub> e perfil longitudinal do Córrego Lavrinha.

# Córrego Papa-Cobra

O Córrego Papa-Cobra possui aproximadamente 8,2 km e amplitude altimétrica máxima de 177 m. Esta drenagem foi dividida em 12 trechos sendo que 5 destes possuem anomalias de 1ª ordem e 5 anomalias de 2ª ordem.

As anomalias, de acordo com a Figura 5.14, iniciam-se a 2 km da nascente já no perfil longitudinal é possível identificar anomalias a partir do primeiro quilômetro. No geral, os

quilômetros iniciais possuem anomalias de 2ª ordem e o final da drenagem apresenta anomalias de 1ª ordem o que indica que os últimos trechos representam uma região muito íngreme.

Os valores anômalos encontrados estão relacionados com contatos litológicos já que as anomalias iniciam-se quando ocorre a transição entre as rochas dos Grupos Piracicaba e Caraça. O aumento significativo do valor da anomalia do último trecho pode ser associado com a presença da zona de cisalhamento contracional (Falha do Fundão) que corta esta região da bacia.





Figura 5.14 - Resultados de RDE<sub>trecho</sub> e perfil longitudinal do Córrego Papa - Cobra.

## Córrego Mata da Roça

O Córrego Mata da Roça possui aproximadamente 8 km e amplitude altimétrica e declividade máxima de, respectivamente, 247 m e 30°. Esta drenagem foi dividida em 26 trechos sendo que 17 possuem anomalias de 1ª ordem e 4 possuem anomalias de 2ª ordem. É possível observar na Figura 28 que estas anomalias iniciam-se a 1 km da nascente e possui valor máximo de 213 no quilômetro 7,45. Mais de 90% do percurso desta drenagem apresenta anomalias.

O início das anomalias, que também pode ser observado no perfil longitudinal (Figura 5.15), coincide com a mudança de direção da drenagem que passa de E-W para N-S tornando-

se subparalela a Falha do Fundão que representa a zona de cisalhamento dúctil presente na região.





O segundo pico presente no gráfico refere-se a uma anomalia de 2ª ordem de valor de 6,662 a 2,3 km da nascente onde a drenagem percorre rochas do Grupo Sabará. Os demais picos estão relacionados ao trecho com valor de RDE de 37,77 a 4,3 km que corresponde à região em que a drenagem e o contato litológico entre as rochas dos Grupos Piracicaba e Sabará coincidem. A partir deste ponto, com exceção do último trecho, as anomalias presentes na drenagem são de 1ª ordem e os últimos dois picos vistos no gráfico também estão evidentes no perfil. Estes picos estão localizados a 6,75 e 7,44 km da nascente e estão relacionados,

respectivamente, a zona de cisalhamento e amplitude altimétrica significativa existentes nos trechos.

### 5.3.2 - Fator de Assimetria da Bacia (FAB)

O índice FAB foi aplicado em quatro sub-bacias (sub-bacias dos córregos Meira e Água Limpa, do ribeirão Santa Rita e do rio Ponte). No contexto da bacia do córrego Água Limpa, também foi analisada a microbacia do córrego Cristais e, da bacia do rio Ponte, as microbacias dos córregos Lavrinha, Papa-Cobra e Mata da Poça. Com intuito de comparação também foi calculado o índice para toda a bacia do Ribeirão da Cachoeira.

O valor obtido no índice FAB (Tabela 5.7) para toda a bacia do Ribeirão da Cachoeira foi 48 que demonstra a existência de um basculamento da margem esquerda da bacia, porém, por ser um valor muito próximo de 50, sugere uma influência neotectônica regional pouco significativa o que leva à necessidade do estudo mais detalhado das sub-bacias. A sub-bacia do Rio Ponte apresenta valor com maior indicação de neotectônica seguida das sub-bacias do Córrego Meira, Ribeirão Santa Rita e Córrego Água Limpa.

Sub-bacias	FAB	
Córrego Água Limpa		
	Córrego Cristais	
	Córrego Garcia	60
Córrego Meira		26
Ribeirão Sant	ta Rita	42
Rio Ponte		19
	Córrego Lavrinhas	46
Córrego Mata da Roça		38
17	Córrego Papa - Cobra	30

Tabela 5.7 - Resultados do FAB.

A sub-bacia do Rio Ponte possui assimetria que indica um basculamento da margem esquerda da bacia. Essa hipótese é reforçada quando também se analisa a diferença do padrão de drenagem dos canais da área à direita e à esquerda da drenagem e a variação de direção, de um pouco menos de 90°, que a drenagem principal faz decorrente de uma movimentação do substrato rochoso. A microbacia do Córrego Lavrinhas apresenta índice de assimetria muito baixo com basculamento mínimo para esquerda. Este resultado, apesar de não estar de acordo com o valor de RDE<sub>Total</sub> do curso d'água, está relacionado com o RDE<sub>trecho</sub> que possui apenas

2 trechos com anomalias que coincide com as falhas do Engenho e do Fundão. Após o contato litológico, entre as rochas do Grupo Itacolomi e Grupo Piracicaba, pode-se afirmar que a região à direita do córrego está topograficamente mais baixa que a área a esquerda e localizada entre as falhas.

A microbacia do córrego Mata da Roça possui assimetria mediana com basculamento da margem esquerda. Esta drenagem é a que possui mais trechos anômalos em seu percurso sendo também, a área que mais sofre influência das falhas de empurrão com traços curvos comuns na Sinclinal Dom Bosco. A microbacia do Córrego Papa-Cobra é a que possui maior assimetria e o resultado também indica basculamento da margem esquerda da bacia. Porém, diferente das outras, a zona de cisalhamento atuante na região não atravessa a microbacia e este resultado pode estar relacionado com a presença do Grupo Caraça na margem direita da bacia.

A sub-bacia do córrego Água Limpa é a que possui a maior área (aproximadamente 80 km<sup>2</sup>) e menor índice de assimetria. Porém, esse resultado não oferece dados muito condizente com a região pois a bacia possui três padrões distintos e desta forma é necessário fazer uma análise mais detalhada.

As microbacias do Córrego Cristais e Garcia possuem um valor de assimetria mediano mas, diferente das demais microbacias da área de estudo, o índice FAB indica basculamento da margem direita. O Córrego Garcia está localizado ao norte da Serra de Ouro Branco com direção preferencial E-W com percurso subparalelo a Falha do Engenho. Já o Córrego Cristais está localizado ao sul da sub-bacia com direção preferencial S-N. As sub-bacias do Córrego Meira e do Ribeirão Santa Rita possuem assimetria que indica um basculamento da margem esquerda que possuem maior densidade de drenagem. Estes córregos também possuem direção preferencial S-N como o Córrego Meira.

# 5.3.3 - Fator de Simetria Transversal Topográfica (FSTT)

A bacia do Ribeirão da Cachoeira tem valor médio de FSTT de 0,56 que indica presença de anomalias. Porém, os valores individuais de cada seção transversal mostram que, embora na seção 15 a bacia tenha índice relativamente baixo (Tabela 5.8), na seção 3 a assimetria fica muito evidente com valores acima de 0,8.

Seção	Distância da nascente (km)	FSTT
1	0	0,83
2	0,74	0,85
3	1,72	0,85
4	2,53	0,84
5	3,20	0,67
6	4,80	0,51
7	5,88	0,57
8	6,80	0,56
9	7,58	0,52
10	8,59	0,48
11	9,65	0,46
12	10,51	0,80
13	11,30	0,41
14	12,36	0,54
15	13,83	0,36

Tabela 5.8 - Resultados do FSTT da bacia do Ribeirão da Cachoeira.

Os maiores valores são encontrados nas seções de maior altitude e estas anomalias também são vistas no perfil longitudinal da bacia sendo que a anomalia encontrada na seção 4 também é identificada através da RDE<sub>trecho</sub>. Outra região com alterações no perfil, a 6,5 km da nascente, apresenta resultados de FSTT medianos e a seção 12 pode ser destacada por possuir um valor alto de FSTT e esta anomalia também foi identificada nos resultados do índice RDE e no perfil longitudinal do córrego Água Limpa.

O estudo das microbacias dentro da sub-bacia do Córrego Água Limpa mostrou que este fator pode variar de acordo com características locais dos efluentes do canal principal e as anomalias são influenciadas em escala de sub-bacia e não microbacia. O valor médio do FSTT na microbacia do Córrego Garcia é de 0,427 sendo que os maiores resultados foram encontrados na foz do curso d'água que é influenciada pela Falha do Engenho (Tabela 5.9). Já na microbacia do Córrego Cristais o valor médio do FSTT é 0,36 e os trechos que possuem resultados iguais ou maior que 0,5 estão no final do percurso do córrego (Tabela 5.10). Ao comparar este último resultado com o valor determinado para FAB percebe-se que, apesar de ambos os fatores mostrarem a possível ocorrência de atividades neotectônica, indicam movimentos com diferentes intensidades. A microbacia do Córrego Água Limpa possui valor médio de FSTT de 0,55 e poucos resultados se distanciaram deste valor (Tabela 5.11). O resultado mais alto foi

encontrado na seção 6 que está a aproximadamente 10 km da nascente e onde inicia-se a rotação da direção de drenagem que torna-se W-E.

Seção	Distância da nascente (km)	FSTT
1	0,24	0,30
2	0,49	0,13
3	0,71	0,22
4	0,80	0,23
5	1,28	0,28
6	1,49	0,30
7	1,66	0,32
8	1,82	0,35
9	2,42	0,32
10	3,18	0,21
11	3,63	0,24
12	4,21	0,12
13	4,43	0,26
14	4,14	0,08
15	4,50	0,27
16	4,72	0,34
17	5,17	0,39
18	5,46	0,50
19	6,01	0,18
20	6,09	0,19
21	7,06	0,13
22	7,40	0,48
23	8,01	0,61
24	8,73	0,53
25	9,17	0,61

 Tabela 5.9 - Resultados do FSTT para a microbacia do Córrego Garcia.

Seção	Distância da nascente (km)	FSTT
1	1,51	0,36
2	2,47	0,56
3	3,44	0,17
4	3,96	0,52
5	4,59	0,59
6	5,49	0,48
7	6,26	0,27
8	6,96	0,05
9	8,03	0,03
10	9,21	0,18
11	9,28	0,51

Tabela 5.10 - Resultados de FSTT para a microbacia do Córrego Cristais.

Tabela 5.11 - Resultados de FSTT para a microbacia do Córrego Água Limpa.

Seção	Distância da nascente (km)	FSTT
1	2,13	0,12
2	3,82	0,56
3	5,80	0,57
4	6,66	0,14
5	8,37	0,20
6	10,31	0,65
7	11,15	0,55
8	12,25	0,30
9	16,62	0,57

A sub-bacia do Córrego Meira possui valor médio de FSTT de 0,46 que sinaliza um efeito tectônico de intensidade mediana. Ao analisar os resultados determinados nas diferentes seções (Tabela 5.12) nota-se que estes variam de 0,101 a 0,85. Os dados encontrados para a seção 1 indicam que a nascente deste córrego está mais próxima dos divisores laterais da bacia o que permite inferir uma movimentação lateral da margem esquerda que também foi mostrado no valor encontrado no FAB. A seção 4 corresponde à região com maior declividade da bacia e a amplitude altimétrica interfere no percurso do córrego diminuindo a simetria da bacia. A seção 5 não aponta a realidade pois neste trecho se esperava um valor alto conforme os resultados do RDE<sub>trecho</sub> e do perfil longitudinal do córrego demonstrando que o método não é muito eficaz para caracterizar anomalias que ocorrem muito próximo da linha longitudinal da bacia. No trecho da drenagem que retrata as seções 9 e 10 ocorrem mudanças repentinas na direção do curso d'água mas como este intervalo não está muito próximo à linha longitudinal,

os valores de FSTT são próximos de 1 apontando resultados coerentes com os estabelecidos no parâmetro RDE<sub>trecho</sub> e no perfil da bacia.

Seção	Distância da nascente (km)	FSTT
1	0,216	0,649
2	1,609	0,374
3	3,694	0,473
4	5,443	0,518
5	7,377	0,101
6	8,252	0,448
7	9,067	0,423
8	10,212	0,312
9	11,097	0,779
10	11,952	0,850

Tabela 5.12 - Resultados de FSTT para sub-bacia do Córrego Meira.

O valor médio do FSTT calculado para a sub-bacia do Ribeirão Santa Rita foi de 0,3. As principais mudanças de deslocamento preferencial do rio surgem ainda em seus pontos iniciais (seção 2 e 3) a aproximadamente 1,5 km da nascente (Tabela 5.13), também identificado no perfil longitudinal, com tendência de deslocamento da margem direita. Após o curso de água percorrer 3 km o sentido dessa movimentação muda para a esquerda o que condiz com o resultado encontrado de FAB para sub-bacia. O valor da seção 8 foi subestimado pela aproximação da drenagem ao centro da bacia.

Seção	Distância da nascente (km)	FSTT
1	0,293	0,353
2	1,229	0,448
3	1,902	0,493
4	3,393	0,309
5	4,136	0,182
6	5,373	0,154
7	6,793	0,257
8	8,368	0,000
9	9,387	0,276
10	10,087	0,400

 Tabela 5.13 - Resultados de FSTT para a sub-bacia do Ribeirão Santa Rita.

A sub-bacia do Rio Ponte possui valor médio de FSTT de 0,63 o que aponta um movimento tectônico alto. Os trechos com maior resultado (Tabela 5.14) iniciam-se a aproximadamente 3 km da nascente (a drenagem ainda é denominada Córrego Lavrinha neste ponto) onde a área sofre influência da Falha do Engenho. Os maiores valores ocorrem nas

seções 6 e 10 sendo que a primeira está próxima do contato litológico entre as rochas dos Grupos Piracicaba e Nova Lima e da região da zona de cisalhamento compressional. O setor da drenagem que corresponde ao trecho da seção 10 também está dentro da área que sofre intervenção da zona de cisalhamento e no ponto de deságue de um afluente da drenagem.

Seção	Distância da nascente (km)	FSTT
1	1,336	0,188
2	2,151	0,272
3	3,091	0,246
4	4,197	0,743
5	5,239	0,663
6	6,943	0,849
7	7,990	0,691
8	9,579	0,521
9	11,009	0,597
10	12,011	0,822
11	14,34	0,680
12	15,976	0,230

Tabela 5.14 - Resultados de FSTT para a sub-bacia do Rio Ponte.

As microbacias Córrego Papa-Cobra e Mata da Roça da sub-bacia do Rio da Ponte possuem valores médios de FSTT de 0,46 e 0,22 respectivamente. Na primeira microbacia, o maior resultado encontrado foi na seção 7 (Tabela 5.15) a aproximadamente 6,5 km da nascente e não está diretamente relacionada com contatos litológicos e/ou falhas geológicas. Já a microbacia do Córrego Mata da Roça (Tabela 5.16) está em uma região com grande influência de atividades tectônicas paleozóicas o que dificulta a interpretação dos dados obtidos deste fator.

Tabela 5.15 - Resultados de FSTT para a microbacia do Córrego Papa-Cobra.

Seção	Distância da nascente (km)	FSTT
1	0,917	0,642
2	1,659	0,459
3	2,492	0,325
4	3,656	0,093
5	4,635	0,292
6	5,760	0,595
7	6,702	0,914
8	7,244	0,289

Seção	Distância da nascente (km)	FSTT
1	0,593	0,681
2	1,467	0,501
3	1,873	0,308
4	2,212	0,412
5	2,669	0,201
6	2,999	0,244
7	3,381	0,000
8	4,341	0,103
9	5,066	0,063
10	5,876	0,571
11	6,334	0,202
12	6,839	0,111

 Tabela 5.16 - Resultados de FSTT para a microbacia do Córrego Mata da Roça.

## 5.3.4 - Índice Razão Fundo/Altura de Vale (RFAV)

O RFAV foi aplicado no canal principal da bacia do Ribeirão Cachoeira, nas sub-bacias dos Córrego Água Limpa e Meira, Ribeirão Santa Rita e Rio da Ponte. Na sub-bacia Água Limpa também foi analisado a microbacia do Córrego Cristais e na sub-bacia do Rio da Ponte obteve-se o índice das microbacias dos Córregos Lavrinha, Papa-Cobra e Mata da Roça.

Os perfis estabelecidos para análise da bacia do Ribeirão da Cachoeira apresentam valores anômalos o que mostra uma irregularidade na relação entre o fundo e altura do vale do canal (Tabela 5.17 e Figura 5.16). Para o perfil 2 obteve-se o menor valor (0,42), o que aponta um possível soerguimento recente na área que de acordo com o FAB ocorreu na margem direita e teve intensidade mediana como indicado pelo FSTT.

Tabela 5.17- Resultados do índice RFAV da Bacia do Ribeirão da Cachoeira.

Perfil	RFAV
Perfil 1	0,74
Perfil 2	0,42
Perfil 3	0,75



Figura 5.16 - Perfis para cálculo de RFAV da bacia do Ribeirão da Cachoeira.

Os resultados de RFAV alcançados para a microbacia do Córrego Água Limpa (Tabela 5.18) indicam anomalia apenas no perfil 1 (Figura 5.17) divergindo do que foi obtido para este córrego quando considera-se a bacia do Ribeirão da Cachoeira. Na sub-bacia do Córrego Cristais os perfis não apresentaram anomalias (Figura 5.18 e Tabela 5.19) para este parâmetro apesar de os resultados de FAB indicar um basculamento para a direita, de intensidade baixa conforme o FSTT e trechos anômalos do RDE<sub>trecho</sub>.

Tabela 5.18 - Resultados de RFAV da microbacia do Córrego Água Limpa.

Perfil	RFAV
Perfil 1	0,35
Perfil 2	0,98
Perfil 3	1,12



Figura 5.17 - Perfis para cálculo de RFAV da microbacia do Córrego Água Limpa.



Figura 5.18 - Perfis para cálculo de RFAV da microbacia do Córrego Cristais.
Perfil	RFAV
Perfil 1	1,12
Perfil 2	1,81

 Tabela 5.19 - Resultados de RFAV da microbacia do Córrego Cristais.

As sub-bacias do Córrego Meira e do Ribeirão Santa Rita possuem perfis (Figuras 5.19 e 5.20) com resultados inferiores a 1 (Tabelas 5.20 e 5.21) apontando soerguimento recente de intensidade média da margem direita, conforme os valores calculados para FAB e FSTT. O valor determinado, deste parâmetro, no perfil 3 do Córrego Meira não indica atividades tectônicas recentes o que diverge dos resultados de FSTT e RDE<sub>trecho</sub> calculados na mesma área sugerindo que a influência tectônica nessa região da sub-bacia está relacionada com movimentações que podem ter ocorrido em toda a bacia do Ribeirão da Cachoeira ou ter sido consequência da construção da represa.



Figura 5.19 - Perfis para o cálculo de RFAV da microbacia do Córrego Meira.



Figura 5.20 - Perfis para cálculo de RFAV da sub-bacia do Ribeirão Santa Rita.

Tabela 5.20 - Resultados de RFAV da sub-bacia do Córrego Meira.

Perfil	RFAV
Perfil 1	0,53
Perfil 2	0,05
Perfil 3	3,57

Tabela 5.21 - Resultados de RFAV da sub-bacia do Ribeirão Santa Rita.

Perfil	RFAV
Perfil 1	0,19
Perfil 2	0,16

O valor do índice RFAV calculado para a sub-bacia do Rio Ponte foi de 0,33 (Tabela 5.22 e Figura 5.21) que, juntamente com os resultados de FSTT e FAB, apontam uma movimentação tectônica recente intensa onde ocorre o basculamento da margem esquerda do rio. Todas as microbacias do rio também apresentaram perfis (Figuras 5.22, 5.23 e 5.24) que possuem resultados de RFAV < 1 (Tabelas 5.23, 5.24 e 5.25) sendo que o menor valor encontrado em toda a bacia do Ribeirão da Cachoeira foi no perfil 4 da microbacia do Córrego Mata da Roça. A microbacia do Córrego Papa-Cobra se difere das microbacias dos Córregos Lavrinhas e Mata da Roça por possuir os menores valores deste parâmetro no alto curso da

drenagem enquanto os demais apresentam estes resultados nos perfis próximos a área de confluência entre as drenagens.



Tabela 5.22 - Resultados de RFAV da sub-bacia do Rio Ponte.

Figura 5.21 – Perfis para o cálculo de RFAV da sub-bacia do Rio Ponte.



Figura 5.22 - Perfis para o cálculo de RFAV da microbacia Córrego Lavrinha.



Figura 5.23 - Perfis para o cálculo de RFAV da microbacia Córrego Papa Cobra.



Figura 5.24 - Perfis para o cálculo de RFAV da microbacia Córrego Mata da Roça

Tabela 5.23 - Resultados de RFAV da microbacia do Córrego Lavrinha.

Perfil	RFAV
Perfil 1	1,42
Perfil 2	0,34

 Tabela 5.24 - Resultados de RFAV da microbacia do Córrego Papa - Cobra.

Perfil	RFAV
Perfil 1	0,57
Perfil 2	0,46
Perfil 3	1,40

 Tabela 5.25 - Resultados de RFAV da microbacia do Córrego Mata da Roça.

Perfil	RFAV
Perfil 1	3,43
Perfil 2	0,71
Perfil 3	0,52
Perfil 4	0,0089

### 5.4 - ANÁLISE DE LINEAMENTOS

A partir da drenagem foram extraídos 565 lineamentos que possuem segmentos métricos a quilométricos (Figura 5.25). O diagrama de rosetas indica lineamentos em todas as direções mas pode-se destacar uma maior frequência nas direções N-S, W-E e E-W maior peso que os menores, as direções que apresentam maior frequência foram W-E e NE-SW. Com o intuito de fazer um exame mais detalhados da área foram confeccionadas rosetas (Figura 5.26) dando-se destaque a frequência e ao tamanho dos mesmos de acordo com a ordem dos canais (1<sup>a</sup> ordem, 2<sup>a</sup> ordem e 3<sup>a</sup> ordem).

Os lineamentos referentes às drenagens de 1<sup>a</sup> ordem possuem direções preferenciais de N-S, NE-SW, E-W e W-E e quando considera-se a média dos tamanhos tem-se como direções preferenciais NE-SW e E-W. Nas rosetas dos lineamentos de segunda ordem no que se refere às direções dos lineamentos, o quadrante NW é o que possui a maior frequência e levando em consideração o comprimento dos segmentos, as direções evidenciadas pela roseta são NW-SE, N-S e W-E. Os lineamentos referentes aos cursos d'água de 3<sup>a</sup> ordem possuem distribuição homogênea, com a ocorrência de lineamentos em todas as direções, contudo percebe-se que há uma maior frequência de lineamentos no quadrante NW com direções preferenciais NW-SE e E-W.





Figura 5.25 - Lineamentos de drenagem e morfoestruturais da bacia do Ribeirão da Cachoeira.

Lineamentos de drenagem



**Figura 5.26** – Rosetas de lineamentos de drenagem da bacia do Ribeirão da Cachoeira. As rosetas da esquerda indicam a frequência dos lineamentos e as da direita indicam a frequência considerando que os lineamentos de maior comprimento tenham maior peso que os menores.

Através da análise desses resultados pode-se inferir que a orientação dos lineamentos de drenagem da bacia segue o padrão dos lineamentos dos cursos de 1ª ordem, porém é

necessário evidenciar que para os lineamentos de 2ª e 3ª ordem a maior frequência de segmentos é no quadrante NW indicando uma direção preferencial NW-SE.

Os lineamentos extraídos através dos mapas de relevo sombreado (Figura 38) possuem direção predominante NW-SE tanto em frequência quanto considerando o comprimento dos segmentos e de forma secundária identifica-se as direções E-W e NE-SW. Especificamente na região sul da área a direção NW-SE é a dominante, sendo seguida pelos lineamentos NE-SW e na região ao norte da Serra de Ouro Branco identifica-se a baixa frequência na direção E-W (Figura 5.27).



Lineamentos Morfoestruturais

**Figura 5.27 -** Lineamentos morfoestrutrais da bacia do Ribeirão da Cachoeira. As rosetas da esquerda indicam a frequência dos lineamentos e as da direita indicam a frequência considerando que os lineamentos de maior comprimento tenham maior peso que os menores.

As rosetas de lineamentos referentes à sub-bacia do Córrego Água Limpa (Figura 5.28) seguem o mesmo comportamento identificado para a bacia do Ribeirão da Cachoeira sendo que os lineamentos referentes à drenagem possuem distribuição homogênea das direções porém, com prevalência para W-E e N45E - SW e os lineamentos morfoestruturais possuem, com maior

frequência, as direções E-W, N45W-SE e N60E-SW. Para a microbacia do Córrego Cristais as rosetas de lineamentos de drenagem e morfoestruturais (Figura 5.29) possuem com maior frequência as direções NW-SE e NE-SW e se diferenciam através da presença das direções E-W e W-E na primeira. Esta microbacia, conforme indicado pelo parâmetro FAB, possui basculamento para NE portanto este resultado é congruente com a direção de maior frequência apontada pela roseta de lineamento total (NW-SE) já que esta movimentação gera novos cursos de águas de 1ª ordem de pequena extensão a NW da bacia devido ao aumento da declividade da região e drenagens de maior comprimento a SE.

#### Lineamentos da sub-bacia do Córrego Água Limpa



**Figura 5.28** – **Rosetas dos l**ineamentos da sub-bacia do Córrego Água Limpa. As rosetas da esquerda indicam a frequência dos lineamentos e as da direita indicam a frequência considerando que os lineamentos de maior comprimento tenham maior peso que os menores.

Os lineamentos de drenagem das sub-bacias do Córrego Meira (Figura 5.30) e Ribeirão Santa Rita (Figura 5.31) possuem distribuição homogênea mas levando em consideração a média ponderada do comprimento dos segmentos é possível identificar uma maior frequência do quadrante NE. Em relação aos lineamentos morfoestruturais, a sub-bacia do Córrego Meira apresenta de forma secundária as direções E-W e W-E que pode estar relacionado a migração lateral da drenagem principal. Ambas as sub-bacias possuem basculamento para SW o que gera lineamentos curtos na direção NE-SW e longos na direção SW-NE.





**Figura 5.29 -** Lineamentos da microbacia do Córrego Cristais. As rosetas da esquerda indicam a frequência dos lineamentos e as da direita indicam a frequência considerando que os lineamentos de maior comprimento tenham maior peso que os menores.

Lineamentos da sub-bacia do Córrego Meira



**Figura 5.30 -** Lineamentos da sub-bacia do Córrego Meira. As rosetas da esquerda indicam a frequência dos lineamentos e as da direita indicam a frequência considerando que os lineamentos de maior comprimento tenham maior peso que os menores.



#### Lineamentos da sub-bacia do Ribeirão Santa Rita

**Figura 5.31 -** Lineamentos da sub-bacia do Ribeirão Santa Rita. As rosetas da esquerda indicam a frequência dos lineamentos e as da direita indicam a frequência considerando que os lineamentos de maior comprimento tenham maior peso que os menores.

As microbacias da sub-bacia do Rio da Ponte apresentam diferentes padrões nos lineamentos de drenagem. Apenas a microbacia do Córrego Lavrinha (Figura 5.32) não possui entre as maiores frequências a direção E-W que é a direção principal dos segmentos na microbacia do Córrego Mata da Roça (Figura 5.33). As rosetas que representam os segmentos obtidos através da análise dos mapas de relevo sombreado indicam, para as microbacias do Papa-Cobra (Figura 5.34) e Mata da Roça, direções de maior frequência respectivamente, N50W e N65W enquanto para o Córrego Lavrinha N35E.

Lineamentos da microbacia do Córrego Lavrinha



**Figura 5.32 -** Lineamentos da microbacia do Córrego Lavrinha. As rosetas da esquerda indicam a frequência dos lineamentos e as da direita indicam a frequência considerando que os lineamentos de maior comprimento tenham maior peso que os menores.



Figura 5.33 - Lineamentos da microbacia do Córrego Papa - Cobra. As rosetas da esquerda indicam a frequência dos lineamentos e as da direita indicam a frequência considerando que os lineamentos de maior comprimento tenham maior peso que os menores.



Lineamentos da microbacia do Córrego Mata da Roça

Figura 5.34 - Lineamentos da microbacia do Córrego Mata da Roça. As rosetas da esquerda indicam a frequência dos lineamentos e as da direita indicam a frequência considerando que os lineamentos de maior comprimento tenham maior peso que os menores.

### 5.5 – SINTEXE DOS RESULTADOS

A geomorfologia do Quadrilátero Ferrífero, como foi explicitado através da análise dos parâmetros morfométricos, apresenta forte controle lito-estrutural e fortes contrastes de resistência litológica. De acordo com Hasui (1998) existe uma relação direta entre o neotectonismo e a reativação de falhas e outras linhas de fraquezas (zonas de cisalhamento dúctil, por exemplo), baseando suas afirmações no fato de que é mais fácil reativar uma linha de fraqueza preexistente do que nuclear uma nova.

Os resultados deste estudo demostram que na bacia do Ribeirão da Cachoeira existem indicadores geomorfológicos que coincidem com áreas que podem sofrer influência de reativações tectônicas como visto, em escala regional, nos perfis 2 e 3 traçados para o cálculo do índice RFAV (Figura 5.16). No perfil 2 é possível identificar uma mudança brusca na direção do Córrego Água Limpa coincidindo com a área de soerguimento apontado pelo perfil longitudinal da bacia, com valores anômalos de índice RDE<sub>trecho</sub> e com a presença de rochas intrusivas. Já o perfil 3 está inserido em uma região tectonicamente influenciada pela Falha do Engenho mas que também possui resultados anômalos dos índices RDE<sub>trecho</sub> e FSTT indicando atividades tectônicas recentes.

A influência de reativações tectônicas também é identificada em escala local, como na sub-bacia do Rio Ponte, principalmente na microbacia do Córrego Mata da Roça. Essa área está sob forte influência da Falha de Fundão e possui valores anômalos para o índice RDE<sub>trecho</sub> em quase todo o percurso da drenagem e o valor mais significativo do índice RFAV de toda a bacia.

Ao estudar as atividades neotectônicas no Quadrilátero Ferrífero Lipski (2002) afirma que a região sofreu atividade neotectônica durante o Quaternário identificando quatro eventos tectônico sucessivos, sob campo de tensões distintos. O evento D1 está relacionado à geração de grabens e horsts com direção predominante WNW-ESE em regimes trativo e compressivos causadas por movimentações direcionais iniciadas no Eo-Oligoceno que dão origem a falhamentos paralelos à direção do esforço. Neste mesmo contexto, ao analisar os lineamentos morfoestruturais da bacia do Ribeirão da Cachoeira nota-se que esta direção está entre as mais frequentes na bacia. Ao se analisar as sub-bacias e microbacias individualmente, esta é a direção preferencial da sub-bacia do Córrego Água Limpa e microbacias dos Córregos Mata da Roça e Papa – Cobra.

O evento D2 é caracterizado por compressões com direção preferencial NW-SE e o evento D3 corresponde ao relaxamento tectônico das estruturas formadas durante o evento D2. Os eventos compressivos geram falhas paralelas ao do esforço e esta é a direção preferencial dos linemametos total da bacia com destaque para os lineamentos de drenagem referentes aos cursos d'águas de 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> ordem. A fase de relaxamento gera falhas normais que, no Quadrilátero Férrifero, ocorreram ao lado de estruturas preexistentes nos depósitos sedimentares e no embasamento no início do Plioceno reativando as estruturas *grabens* e *horsts*. Ao analisar os basculamentos das sub-bacias da área sul e da área norte separadamente pode-se perceber uma possível presença destas estruturas.

No evento D4 uma nova fase extensiva é ativada no final do neógeno (Plioceno), com direção E-W e N-S, que causou o falhamento em coberturas lateríticas. A direção E-W e W-E possui maior frequência absoluta na área sul da bacia porém, quando também se considera os comprimentos dos segmentos a área norte possui resultados mais significativos. Esta direção é muito frequente na sub-bacia do Córrego Água Limpa nos lineamentos de drenagem e morfoestruturais. Destaca-se também, nets direção, os lineamentos de drenagem dos Córregos Papa – Cobra e Mata da Roça. A direção N-S é mais frequente nos lineamentos de drenagem principalmente nas microbacias do Córrego Mata da Roça.

Trabalho de Conclusão de Curso - nº 234, 113 p. 2017.

Lipski (2002) concluiu em seu estudo que as deformações nos depósitos do Quadrilátero Ferrífero estão associadas aos lineamentos morfoestruturais E-W e suas inflexões para NE e NW definindo *trends* estruturais regionais considerados como a manifestação tectônica cenozoica atuante na região. Ao analisar as rosetas referentes aos lineamentos a bacia do Ribeirão da Cachoeira (Figura 5.27) é possível perceber que este mesmo padrão ocorre na área em estudo.

# **CAPÍTULO 6**

## CONCLUSÕES

O emprego de métodos de análise neotectônica baseados em parâmetros de morfometria fluvial ainda não é utilizado com frequência na literatura geológica brasileira. Considerando que os cursos d'água são sensíveis a qualquer processo deformacional de seus leitos, tem-se em mãos uma ferramenta de análise bastante útil em estudos neotectônicos.

Os resultados apresentados na análise dos parâmetros morfométricos indicam que o estudo de uma bacia que drena sobre litologias variadas, o que é o caso da bacia do Ribeirão Cachoeira, generaliza a diversidade dos valores que podem ser encontrados em diferentes áreas da bacia tornando-se necessário determinar resultados em diferentes regiões da mesma. Os parâmetros calculados mostraram resultados diferentes ao serem aplicados no contexto geral e nas regiões norte e sul da bacia.

Os dados obtidos nas análises morfométricas mostraram, de uma forma geral, que a bacia apresenta um forte entalhamento, elevado grau de dissecação do relevo e alto controle litológico e estrutural. Os padrões de drenagem variam, sendo na parte norte um padrão dentrítico a subdentrítico e na área sul, retangular. Outra diferença entre as regiões diz respeito a declividade onde os maiores valores estão localizados na área norte.

Os resultados encontrados com a aplicação dos índices morfométricos voltados para a detecção de influências neotectônicas forneceram informações importantes na medida em que indicaram as anomalias. A análise do perfil longitudinal assinalou estreita relação com os valores de RDE<sub>trecho</sub> calculados, o que aponta a importância do estudo com diferentes recursos metodológicos. O estudo do perfil longitudinal viabilizou a análise preliminar dos cursos de água, mostrando irregularidades nas configurações dos canais desde a cabeceira até a foz denotando forte desequilíbrio em toda rede de drenagem da bacia hidrográfica. O cálculo do índice RDE se mostrou como técnica bastante eficiente para a detecção de pontos anômalos nas drenagens desta bacia além de ter sido utilizado como subsídio para a escolha das áreas onde foram calculados os demais índices indicadores de neotectônica.

O índice FAB revelou quais sub-bacias e microbacias sofreram influências neotectônicas através de subsidência de blocos. Destaca-se que todas as microbacias e sub-

bacais, com exceção da microbacia do Córrego Cristais, apresentaram resultados que indicam o basculamento da margem esquerda da drenagem. O índice FSTT apresentou resultados heterogêneos sugerindo a presença também de um controle neotectônico relacionado a falhamentos. Os resultados para o índice RFAV mostraram que a maior parte das bacias apresenta basculamento, embora as maiores assimetrias sejam apenas pontuais. De forma geral, os resultados indicaram que as drenagens estão localizadas nos vales em forma de "V" ou vales encaixados, que indicam processos de incisão do rio que escava ativamente o substrato rochoso.

A análise dos lineamentos de drenagem e morfoestruturais possibilitou a identificação de uma maior frequência na direção NW-SE e de forma secundária as direções E-W e NE-SW indicando que as drenagens, principalmente os cursos d`água de 1ª e 2ª ordem, estão adaptadas às morfoestruturas. Por fim, através da análise dos índices indicadores de atividades neotectônicos com as direções preferenciais dos lineamentos é possível sugerir que os movimentos tectônicos recentes, apontados pelas anomalias nas drenagens, na bacia do Ribeirão da Cachoeira estão relacionadas com reativações de geossuturas proterozóicas e arqueanas como também por estruturas novas geradas entre o Oligoceno e o Mioceno em resposta a um regime trativo NNE-SSW.

### **Referências Bibliográficas**

- Alkmim, F.F.; Marshak, S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero Precambrian. Research, (90): 9-58.
- Alves, J.M.P.; Castro, P.T.A. 2003. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. Revista Brasileira de Geociências, (33) 2: 117-127.
- Ataíde, E. S. 2010. Zoneamento florístico em campo ferruginoso em uma área do sul-sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 91 p.
- Andrades Filho, C. O. Análise Morfoestrutural da porção central da Bacia Paraíba (PB) a partir de dados MDE-SRTM e ALOS-PALSAR FBD. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Dissertação de Mestrado, 150 p.
- Barbosa, S. E. S. 2004. Análise de dados hidrogeológicos e regionalização de vazões da Bacia do Rio do Carmo. Núcleo de Pesquisa em Recursos Hídricos Pró Água, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 211p.
- Barbosa, T. S.; Lima, V. F.; Furrie, M. 2013. Anomalias em padrões de redes de drenagem como fatoe de verificação de neotectônica - Um estudo de caso nas sub-bacias do Rio Mamuaba - PB. Revista do Departamento de Geografia – USP, (26): 195-213.
- Barros, L.F.P.; Barros, P.H.C.A.; Magalhães Junior, A. P. 2010. Condicionamento Litológica e Tectônica na morfometria da bacia do Rio Conceição -Quadrilátero Ferrífero/MG. Revista de Geografia, v.especial 7(1): 195 - 209.
- Beltrame, A. V. 1994. Diagnóstico do meio físico de bacias hidrográficas modelo e aplicação. Ed. UFSC, Florianópolis. 112 p.
- Bricalli, L. L. 2016. Procedimentos Metodológicos e Técnicas em Geomorfologia Tectônica. Espaço Aberto: PPGG - UFRJ, (6) 1: 75-110.
- Bricalli, L. L.; Mello, C.L. 2013. Padrões de lineamentos relacionados à litoestrutura e ao fraturamento neotectônico (Estado do Espírito Santo, SE do Brasil). Revista Brasileira de Geomorfologia, 14 (3): 301-311.
- Carvalho Filho, A. 2008. Solos e ambientes do Quadrilátero Ferrífero (MG) e aptidão silvicultural dos Tabuleiros Costeiros. Curso de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Tese de Doutorado, 256 p.
- Castro, S.B.; Carvalho, T. M. 2009. Análise morfométrica e geomorfologia da bacia hidrográfica do rio Turvo GO, através de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Scientia Plena, (5) 2: 1-7.
- CODEMIG. 2005. Mapa Geológico de Ouro Preto. Disponível em: <u>http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/?lang=en</u>. Acesso em: 22 de dezembro de 2016.

- Coelho, A. L. N. 2009. Bacia Hidrográfica do Rio Doce (MG/ES): uma análise socioambiental integrada. Geografares, Vitória, (7) 1: 131-145.
- Cremon, E. H. 2013. Espacialização da anomalia do índice de Hack como suporte a estudos morfoestruturais. Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, São José dos Campos. Monografia, 26p.
- Dorr, J.V.N. II, 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the QuadriláteroFerrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S.Geol. Surv. Prof. Paper, 641- A: 1-110.
- Drummond, G.M., C.S. Martins, A.B.M Machado, F.A. Sebaio & Y. Antonini (eds.). 2005. *Biodiversidade em Minas Gerais: um atlas para sua conservação*. *Fundação Biodiversitas*. 2a. ed. Belo Horizonte, Brasil. 222 p.
- Endo, I. 1997. Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Áreas Adjacentes, Minas Gerais. Int. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 243p.
- Etchebehere, M.L.; Saad, A. R.; Fulfaro, V.J.; Perinotto, J.A.J. 2004. Aplicação do Índice Relação Declividade-Extensão - RDE na Bacia do Rio do Peixe (SP) para Detecção de Deformações Neotectônicas. Revista do Instituto de Geociências - USP, (4) 2: 43-56.
- Gerdau. Proposta de Criação Monumento Natural da Serra da Moeda. Relatório Técnico Final, 2010.
- GOOGLE. Google Earth Pro. 2016. Disponível em: <a href="http://www.google.com.br/earth/media/licensing.html">http://www.google.com.br/earth/media/licensing.html</a>. Acesso em: 15 de agosto de 2016.
- Granell-Péres, M.D.C. 2001. Trabalhando geografia com as cartas topográficas. Ed. Unijuí. Ijuí. 128p.
- Guerra, A. T. 1993. *Dicionário geológico-geomorfológico*. IBGE, Rio de Janeiro, 446 p.
- Ibanez, D. M.; Miranda, F.P.; Filho, R. A. 2013.Controle de estruturas do embasamento sobre o relevo da porção central da Bacia do Parnaíba evidenciado pela análise de perfis longitudinais de rios. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto SBSR, 16, Anais: 3572 3579.
- IBGE. 2009. *Manual Técnico de Geomorfologia*. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro, 2. ed. 182 p.
- Hack, J.T. 1973. Stream-profile analysis and stream-gradient index. U.S. Geological Survey Journal of Research, (1) 4: 421–429.
- Hackspacher P.C., Saad A.R. & Hadler Neto J.C. 2006. O registro do limite Cretáceo Superior-Paleógeno em rochas Pré-Cambrianas da região sudeste do Brasil com base em datação por traços de fissão em apatitas. In: SBG, Simp.Cretáceo do Brasil, 7, Simp. Terciário do Brasil, 1, Boletim de Resumos, p. 65.
- Hader, E.C. & Chamberlin, R.T. 1915. The geology of Central Minas Gerais. J. Geol., (23): 341-424.

- Hasui, Y. 1998. Evolução Morfotectônica do Sudeste do Brasil. In: SBG/Núcleo Minas Gerais, Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Belo Horizonte, Anais: 78.
- Herz, N. 1978. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Geological Survey Professional Paper, 641-C: 1-81.
- Howard, A. D. 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. Bulletin. American Association of Petroleum Geologists, v. 51, n. 1: 2246-2259.
- Feitosa, F.A.C. 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. CPRM. Rio de Janeiro. 812p.
- Firmino, I.G. 2015. Avaliação de modelos cartográficos de índices morfométricos voltados à análise neotectônica. Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium,(6) 2: 168-182.
- Fonseca, M.A.; Sobreira, F.G.; Rainho, M.E.; Oliveira, M. 2001. Unbridled Development of Urban Space and its Implications for the Preservation of Landmarks: The Morro da Queimada Archaeological Site, Ouro Preto, Brazil. Cities. Pergamon, (18) 6: 381-389.
- Lana, C.; Alves, J.; Castro, P. T. A. 2001. Análise Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Tanque, Minas Gerais, Brasil. Revista da Escola de Minas, (54) 2:
- Lima, A. G. 2013. Índice de gradiente de canal: significados e diretrizes para aplicação. Geosul, (28) 56: 147 162.
- Machado, G.; Souza, J. O. P. 2005. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do rio Chôco Ibaiti PR. In: Encontro de Geógrafos da América Latina, 20, São Paulo, Anais: 8366 8382.
- Machado, N.; Carneiro, M.A. 1992. Um Significativo Evento Tectôno-termal de 2,78 Ga no Quadrilátero Ferrífero: Evidências U/Pb a partir do Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional. Revista da Escola de Minas, (45) 1-2: 138-139.
- Machado, R. A. S.; Lobão, J. S. B.; Vale, R. M. C.; Souza, A. P. M.J. 2011. Análise morfométrica de bacias hidrográficas como suporte a definição e elaboração de indicadores para a gestão ambiental a partir do uso de geotecnologias. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, Curitiba. Anais: 1441 -1448.
- Mantelli, L.R., Rossetti, D.F. 2009. Significado tectônico de lineamentos de drenagem no sudoeste da ilha do Marajó. Revista Brasileira de Geociências, (39) 1: 1-13.
- Neres, D.F.; Morais, F. 2014. Estudo das anomalias de drenagem como indicador de neotectônica na bacia do Rio Douradinho, município de Lagoa da Confusão
  - TO. In: Seminário de Iniciação Científica da UFT, 10, Palmas.
- Ostanello, M. C. P. 2012. Patrimônio geológico do Parque Estadual do Itacolomi (Quadrilátero Ferrífero, MG): inventariação e análise de lugares de interesse geológicos e trilhas geoturísticas. Evolução Crustal e Recursos Naturais,

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 204p.

- Ribeiro, F. M., Alkimim, F. F. 1997. O sistema de falhas de empurrão do Sinclinal Dom Bosco, Porção sul do Quadrilátero Ferrífero (MG), em Modelagem Física 3D. In: SBG, Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 9, Ouro Preto, Anais, 7475.
- Rodrigues, A. S. L.; Malafaia, G.; Castro, P. T. A. 2008. Avaliação ambiental de trechos de rios na região de Ouro Preto MG através de um protocolo de avaliação rápida. Revista de Estudos Ambientais, (10) 1: 74-83.
- Saadi, A. 1993. Neotectônica da Plataforma Brasileira: Esboço e interpretação preliminares. Geonomos, (1):1-15.
- Sabins Jr. F. F. 1978. Remote Sensing: Principles and interpretation. W.H. Freeman and Company. 2<sup>a</sup> ed. São Francisco. 464p.
- Salamuni, E. 1998. Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Tese de Doutorado, 233p.
- Salvador, E. D. 1994. Análise Neotectônica na Região do Vale do Rio Paraíba do Sul – região localizada entre Cruzeiro (SP) e Itatiaia (RJ). Pós-graduação em Geologia Sedimentar, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 124p.
- Sant'anna, M. V.; Santos, A. R. 1996. Identificação e análise de estruturas tectônicas rúpteis e rúpteis-dúcteis em parte do Quadrilátero Ferrífero e Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto,7, Salvador, INPE: 659-662.
- Santos, D. A. R.; Morais, F. 2012. Análise Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Lago Verde como subsídio à compartimentação do relevo da região de Lagoa da Confusão - TO. Revista Geonorte, (3) 4: 617-629.
- Seeber, L.; Gornitz, V. 1983. River profile along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. Tectonophysics, (92): 335-367.
- Silva, R. C. 2011. Análises morfométricas e hidrológicas das bacias hidrográficas do Córrego Teixeiras, Ribeirão das Rosas e Ribeirão Yung, afluentes do Rio Paraibuna, Juiz de Fora/MG. Análise Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização, 97p.
- Silva, D. G.; Melo, R.; Francisca T.; Corrêa, A. C. B. 2010. Influência da densidade de drenagem na interpretação da evolução geomorfológica do complexo de Tanques do município de Brejo da Madre de Deus – Pernambuco, Nordeste do Brasil. Revista de Geografia, 294 - 306.
- Silva, F. R. 2007. A paisagem do Quadrilátero Ferrífero, MG: Potencial para uso turístico da geologia e geomorfologia. Geografia e Análise Ambiental, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 144 p.

- Silva, P. G.; Goy, J. L.; Zazo, C.; Bardají, T. 2003. Fault-generated mountain fronts in southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. Geomorphology, 50 (1): 203-225.
- Sobreira, F. 2014. Mineração do ouro no período colonial: alterações paisagísticas antrópicas na serra de Ouro Preto, Minas Gerais. Quaternary and Environmental Geosciences, 05 (1): 55-65.
- Souza, F. A.; Rodrigues, S. C. 2012. Aspectos morfométricos da alta bacia do rio dos Bois em Iporá-GO. Mercator, (11) 25:141-151
- Tonello, K.C. 2005. Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhães, MG. Ciências Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Tese de Doutorado, 69p.
- Varajão, C. A. C.; Salgado, A. A. R.; Varajão, A. F. D. C.; Braucher, R.; Colin, F.; Naline JR., H. A. 2009. Estudo da Paisagem do Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brasil) por meio da mensuração das taxas de erosão (10Be) e da pedogênese. Revista Brasileira de Ciências do Solo, (33): 1409-1425.
- Vestena, L. R; Checchia, T; Kobiyama, M. 2006. Análise morfometria fluvial da bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 06, Goiânia.
- Vial D.S., Duarte B.P., Fuzikawa K., Vieira M.B.H. 2007. An epigenetic origin for the Passagem de Mariana gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Ore Geology Reviews, (32): 596-613.