

ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA DE ALTERAÇÕES NA REDE DE DRENAGEM DE MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS

Multivariate Statistical Analysis of Alterations in Hydrographic Microbasins Drainage Systems

Eduardo Goulart Collares*

José Eduardo Rodrigues**

Rogério Pinto Ribeiro***

RESUMO – A rede de drenagem se constitui em importante indicador de alterações ocorridas na composição da paisagem de bacias hidrográficas, ou por mudanças na sua estruturação e forma ou então por ganho ou perda de canais. O objetivo deste trabalho é avaliar as alterações ocorridas na rede de drenagem de microbacias hidrográficas, com base em análise morfométrica temporal, correspondente a um período de 23 anos. A metodologia envolve técnicas de geoprocessamento, para a obtenção das variáveis morfométricas e análise estatística multivariada. A proposta foi aplicada na bacia hidrográfica do rio Capivari e os resultados comprovam que ocorreram alterações significativas na composição da rede de drenagem no período de análise. As variáveis morfométricas consideradas mais indicadas para a avaliação das alterações são a Densidade de Drenagem e Densidade Hidrográfica.

SYNOPSIS – A drainage system is known to be an important indicator of the alterations that have taken place in the landscape composition of hydrographic basins, or because of changes in structuring and form, or gain or loss of canals. The objective of the present work is to evaluate the alterations that take place in the drainage system of a hydrographic microbasins base on morphometric time analysis corresponding to a time period of 23 years. The approach employed involves the geoprocessing technique, aimed at obtaining morphometric variables, and multivariate statistical analysis. The proposed methodology was then applied to the Rio Capivari hydrographic basin. The results obtained were shown to prove that for hydrographic basin, a significant alteration in drainage system composition had taken place during the 23-year time period under study. The morphometric variable considered to be more appropriate for estimating the alterations were the Drainage Density and the Hydrographic Density.

PALAVRAS CHAVE – Análise de agrupamento; análise discriminante; zoneamento geoambiental de bacia hidrográfica.

1 – INTRODUÇÃO

A rede de drenagem das bacias hidrográficas atua como registro das alterações ocorridas em seu interior e reflete as mudanças condicionadas por processos naturais ou por atividades antrópicas, seja por meio das alterações na qualidade das águas ou na própria configuração da rede de drenagem.

* Professor adjunto, Fundação de Ensino Superior de Passos – Universidade do Estado de Minas Gerais.
Email – eduardo@passosuemg.br.

** Professor titular, Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, USP.
Email – zeduardo@sc.usp.br.

*** Pós Doutorando, Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, USP.
Email: ribeiro@sc.usp.br.

Alterações temporais na composição da rede de drenagem, sejam por mudanças na sua estruturação, na forma, ou mesmo pela perda ou aparecimento de novos canais, atuam como geoindicadores das condições ambientais da bacia, uma vez que refletem a ocorrência de processos antrópicos ou naturais recentes, que determinam uma nova dinâmica para o escoamento superficial das águas.

Este trabalho pretende avaliar a significância das alterações em microbacias de uma bacia hidrográfica, com base nas variáveis morfométricas de suas redes de drenagem e, posteriormente, classificar as microbacias segundo níveis de alteração. As análises das alterações são referentes a um período de 23 anos e foram efetuadas com o uso de fotografias aéreas datadas de 1972 e 1995.

Para a determinação das variáveis morfométricas, as redes de drenagem foram digitalizadas, georreferenciadas e transformadas em topologia. No total, foram determinadas dezoito variáveis, relativas à morfologia e à composição da rede de drenagem. Utilizaram-se procedimentos estatísticos multivariados para avaliar a significância das alterações ocorridas nas microbacias e classificá-las conforme o nível de alteração. Para o teste de significância das alterações utilizou-se o processo estatístico da análise discriminante e para a classificação das microbacias em níveis de alteração, a análise de agrupamentos.

A área selecionada para aplicar a metodologia foi a bacia do rio Capivari, situada na região centro-leste do Estado de São Paulo – Brasil (Figura 1). Trata-se da região onde está inserido o terceiro maior polo industrial do país e que apresenta uma grande diversidade de formas de ocupação e uso da terra. A bacia foi compartimentada em 64 microbacias de 4ª, 5ª e 6ª ordens de ramificação, acrescida da área adjacente ao leito do rio Capivari, as quais são identificadas pela letra *B* mais uma numeração específica como, por exemplo, *B-5* e *B-36*.

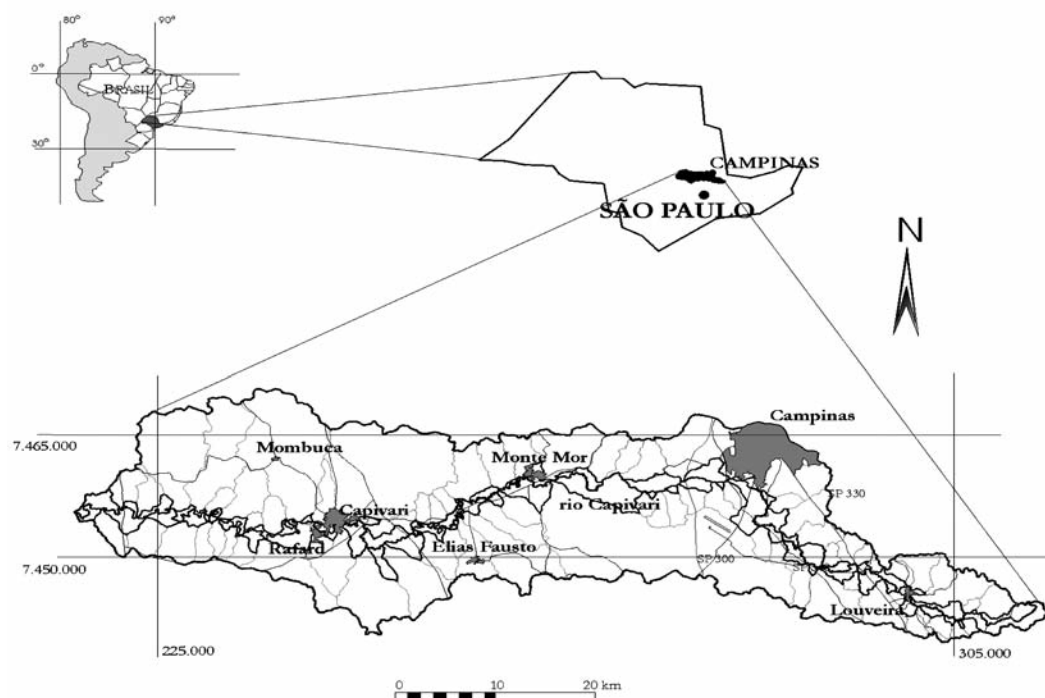


Fig. 1 – Localização da bacia do rio Capivari.

A bacia possui uma área de 1580 km² e os seguintes limites geográficos aproximados: latitudes 22°50' S e 23°20' S e longitudes 46°40' W e 47°50' W. Possuem sede dos municípios, dentro dos limites da bacia, as cidades de Campinas, Monte Mor, Louveira, Capivari, Elias Fausto, Rafard e Mombuca. As principais rodovias que cortam a bacia são: Rodovia dos Bandeirantes (SP-348); Rodovia Anhanguera (SP-330) e Rodovia Santos Dumont (SP-300).

2 – APLICAÇÕES DE ANÁLISE MORFOMÉTRICA EM ESTUDOS GEOAMBIENTAIS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Datam do início do século XIX as primeiras interpretações descritivas referentes a sistemas de drenagem. Playfair (1802, apud Horton, 1945), com base em observações visuais, relata as relações do tronco principal de um rio e os seus tributários, formando um conjunto de canais e vales comunicantes, determinando, assim, a “lei das junções concordantes”.

Horton (1945), com base na lei de Playfair, utiliza pela primeira vez uma análise quantitativa em sistema de drenagem, estabelece um sistema para classificação de canais em uma rede hidrográfica e determina novas leis fundamentais relacionando o número e o comprimento de canais.

Strahler (1957) utiliza um sistema de classificação de canais com algumas modificações com relação ao sistema definido por Horton. Pelo sistema de Strahler, os canais sem tributários são considerados como de primeira ordem; da confluência de dois canais de primeira ordem surgem os canais de segunda ordem, e assim sucessivamente, sendo a ordem da bacia hidrográfica correspondente ao valor do canal de maior ordem. Este procedimento elimina o conceito de que o rio principal deva ter o mesmo número de ordem da nascente até a foz, como proposto por Horton, e facilita a classificação dos canais, eliminando a necessidade de se refazer a ordenação a cada confluência. Esta forma de classificação foi utilizada neste trabalho e tem sido amplamente empregada em todo o mundo na análise morfométrica de bacias hidrográficas.

Além de Horton (1945) e Strahler (1957), vários autores vêm definindo e descrevendo variáveis morfométricas no decorrer dos anos, tais como: Miller (1953); Schumm (1956) e Morisawa (1962). Trabalhos mais recentes passaram a estabelecer novas variáveis, relacionando a dinâmica natural e a atuação antrópica como fatores influentes nas alterações ocorrentes nas redes de drenagem e, em função disso, outros sistemas de classificação foram propostos e debatidos.

Um destes novos sistemas de classificação foi proposto por Rosgen (1994), considerando, principalmente, características relacionadas ao fluxo e não necessariamente características morfométricas, como as variáveis envolvidas nas classificações supracitadas. Miller e Ritter (1996), ao efetuar a análise crítica desta classificação, a contestam como um instrumento para predizer o comportamento fluvial de um rio. Em resposta às indagações de Miller e Ritter (1996), Rosgen (1996) ressalta que o propósito fundamental de sua classificação é facilitar a comunicação entre os especialistas da área e que ela está sendo utilizada por um grande número de profissionais que deverão contribuir para o seu aperfeiçoamento.

Alguns trabalhos têm procurado adequar as análises morfométricas por meio de técnicas de geoprocessamento. Dentre eles estão: Band (1989), Civco et al. (1995), Meisels et al. (1995), Sheng et al. (1997); Garbrecht e Martz (1997); Yin e Wang (1999); Bárdossy e Schmidt (2002) e Awasthi et al. (2002). Estes trabalhos discutem e propõem técnicas para facilitar a obtenção e o processamento relacionados às redes de drenagem e a obtenção dos produtos derivados, utilizando imagens de satélite e/ou sistemas de informações geográficas.

A aplicação de estatística multivariada em uma avaliação ambiental, envolvendo variáveis morfológicas e de comportamento fluvial, foi efetuada por Wood-Smith e Buffington (1996) na avaliação do impacto do uso do terreno nas condições dos canais de drenagem no sudoeste do Alasca – EUA. Os autores utilizaram-se de análise discriminante para testar a classificação previamente adotada para rios degradados e não degradados e também para determinar as variáveis que mais contribuíram para a discriminação entre os rios.

Tucker et al (2001) estudam, especificamente, a propriedade densidade de drenagem e a qualifica como uma propriedade que reflete o clima local, o relevo e a geologia, além de outros fatores. Os autores desenvolvem um Modelo Digital do Terreno (MDT) para a medida eficiente da densidade de drenagem e para determinar a sua variabilidade espacial em uma bacia.

Osterkamp (2002) define geoindicadores importantes para apontar alterações ambientais em regime fluvial de regiões tropicais úmidas. Dentre os geoindicadores, cita a densidade de drenagem, correlacionando-a com a infiltrabilidade das águas da chuva no solo e, em paralelo, com a disponibilidade de precipitações para o regime de fluxo de uma bacia. O autor sugere, além do uso convencional de imagens de satélite e fotografias aéreas, investigações de campo para a mensuração da densidade de drenagem em uma bacia.

Ribeiro e Rodrigues (2004) utilizam a rede de drenagem como geoindicador de mudanças ambientais que ocorreram durante um período de 23 anos em microbacias hidrográficas da bacia do Capivari (Brasil). A análise morfológica indicou uma diminuição no número de canais de primeira ordem e no comprimento total de todos os canais, com conseqüente modificação das densidades hidrográfica e de drenagem. As perdas e os ganhos dos canais de primeira ordem foram influenciados pela declividade e pelos tipos de substrato rochoso e de materiais inconsolidados presentes. Tais mudanças foram deflagradas principalmente pelo controle de expansão urbana e pelo manejo inadequado de atividades agrícolas.

Por meio do uso da densidade de drenagem (Dd), razão de bifurcação (Rb), frequência de canais (Fu) e razão de textura (T), Obi Reddy et al. (2004) revelam que a análise detalhada destes parâmetros de drenagem foi muito útil no entendimento da influência da morfometria de drenagem e formas de relevo, nas propriedades físicas do solo e nas características erosionais da bacia do rio Vena, Índia Central. Com base em dados de sensores remotos e de SIGs, o estudo mostrou-se apropriado em avaliar estas inter-relações para fins de planejamento e de gerenciamento de bacias hidrográficas.

NG (2006) examina localidades de deslizamentos com referência as teorias de desenvolvimento de drenagem fluvial. São estudadas oito pequenas bacias de drenagem (5,31km²) em Hong Kong, nas quais 451 deslizamentos foram registrados. Resultados têm mostrado que os deslizamentos estão relacionados à progressão das cabeceiras da rede de drenagem, partindo do canal principal (de quinta ordem) até aos tributários de primeira ordem, indicado pela variação sistemática entre parâmetros morfológicos e densidade dos deslizamentos.

3 – METODOLOGIA

A hierarquização dos canais nas redes de drenagem foi efetuada conforme a classificação proposta por Strahler (1957) com modificações, uma vez que este autor utiliza apenas os canais fluviais. Nesta pesquisa, considerou-se como canais de drenagem todos aqueles perceptíveis nas fotografias aéreas que permitissem o escoamento linear das águas, incluindo os canais pluviais, uma vez que estes constituem uma variável importante para o fluxo das águas na bacia e são os mais suscetíveis a alterações.

Para a determinação das variáveis morfométricas, as redes de drenagem foram digitalizadas, georreferenciadas e transformadas em topologia com o auxílio do programa Autocad Map 3.0®. O uso de entidades vetoriais para a obtenção das variáveis morfométricas, em detrimento da sua obtenção por meio de SIGs, com imagens rasterizadas, deveu-se à maior praticidade e precisão do sistema vetorial.

Civco et al (1995) já haviam discutido esta questão ao avaliar imagens raster e vetoriais para a obtenção de parâmetros de bacias hidrográficas. Segundo estes autores, dados originalmente vetoriais são mais precisos, principalmente na quantificação de dados poligonais, por exemplo, na determinação da área de uma bacia hidrográfica.

Utilizaram-se procedimentos estatísticos multivariados, com auxílio do programa Statistica 5.5®, para avaliar a significância das alterações ocorridas nas microbacias e agrupá-las conforme o grau de alteração. Para o teste de significância, utilizou-se o processo estatístico da análise discriminante e para o agrupamento das microbacias conforme o grau de alteração, a análise de agrupamentos.

3.1 – Variáveis morfométricas

As variáveis morfométricas foram separadas em dois grupos: variáveis relativas à morfologia, denominadas *variáveis morfológicas*, e à composição da rede de drenagem, denominadas *variáveis da rede de drenagem*.

As *variáveis morfológicas* foram consideradas inalteradas para uma mesma microbacia dentro do período analisado, uma vez que envolvem mudanças na morfologia do relevo, o que normalmente são insignificantes dentro de um espaço de tempo tão curto e, portanto, não foram aplicadas diretamente na análise das alterações. As variáveis que compõem este grupo são:

- a) Área da Bacia (A): expressa em quilômetros quadrados (km²);
- b) Perímetro da Bacia (P): expresso em quilômetros (km);
- c) Maior comprimento (L) e largura média (Dm): as duas variáveis expressas em km foram determinadas pelos critérios de Fontes (1997), onde o maior comprimento é representado pelo comprimento do maior eixo longitudinal da bacia e a largura média é resultante da divisão da área pelo maior comprimento.
- d) Índice de Circularidade (Ic): é definido como a relação existente entre a área da bacia (A) e a área do círculo de igual perímetro (Ac). Quanto mais próximo o índice for da unidade (Ic=1,0), mais próximo da forma circular é a bacia.
- e) Amplitude Altimétrica Máxima (Hm): é a diferença altimétrica, em metros, entre a altitude da desembocadura e a altitude do ponto mais alto do divisor de águas (Schumm, 1956).
- f) Relação de Relevo (Rr): é a relação entre a amplitude altimétrica máxima e o seu maior comprimento (L). Quanto maior for o Rr, maior será o desnível entre a cabeceira e a foz (Schumm, 1956).
- g) Índice de sinuosidade (Si): trata-se da relação entre o comprimento do rio principal da bacia e o seu comprimento vetorial.

As *variáveis da rede de drenagem* envolvem variáveis lineares e de superfície e consistem naquelas sujeitas à variações mais significativas no período analisado, constituindo, portanto, parâmetros potenciais para retratar as alterações ocorridas. Fazem parte deste grupo:

- a) Número total de rios (N_r) e número de canais por ordem de ramificação (N_i): quando da utilização do sistema de ordenação de Strahler (1957), corresponde ao número de canais de primeira ordem (N₁), uma vez que qualquer rio surge de uma nascente. Esta variável é particularmente importante para o cálculo da densidade hidrográfica.

- b) Comprimento total da rede de drenagem (Lt), comprimento total dos canais por ordem (Li) e comprimento médio dos canais por ordem (Lmi): são variáveis dimensionais, expressas em quilômetro (km) ou em metro (m), que permitem uma avaliação primária das alterações em termos de perda ou ganho na extensão de caminhos para o escoamento linear das águas na bacia. Nesta pesquisa as variáveis Lt e Li foram expressas em km e a variável Lmi, em m.
- c) Razão de bifurcação (Rb): variável introduzida por Horton (1945) e que deu origem à lei do número de canais. Expressa a relação entre o número de canais de uma certa ordem (N_i) e o número de canais da ordem imediatamente superior.
- e) Razão de comprimento médio (Rlm): também foi introduzida por Horton (1945), deu origem à lei do comprimento dos canais. O índice é expresso pela relação entre o comprimento médio dos canais de determinada ordem e o comprimento médio dos canais da ordem imediatamente inferior.
- f) Densidade de drenagem (Dd): retrata a disponibilidade de canais para o escoamento linear das águas e materiais detríticos e o grau de dissecação do relevo resultante da atuação da rede de drenagem. Foi descrita por Horton (1945) como sendo a relação entre o comprimento total dos canais (Lt) pela área da bacia hidrográfica (A). No comprimento dos canais, segundo Christofoletti (1969), deve-se considerar os canais perenes e intermitentes.
- g) Densidade Hidrográfica (Dh); foi inicialmente definida por Horton (1945) com a denominação de frequência de rios e corresponde à relação entre o número de rios ou cursos d'água e a área da bacia hidrográfica (A). Quando da utilização do sistema de ordenação de canais proposto por Strahler (1957), o número de rios deve corresponder ao número de canais de primeira ordem (N_1), considerando que todo rio se inicia de uma nascente.
- h) Coeficiente de manutenção (Cm): foi definida por Schumm (1956) para fornecer a área mínima necessária em uma bacia para manter em funcionamento um metro de canal de escoamento. A variável é inversamente proporcional à Densidade de Drenagem.
- i) Extensão do percurso superficial (Eps): foi definida por Horton (1945) e representa a distância média (expressa em metros) percorrida pelas águas pluviais, a partir do interflúvio, até encontrar um canal já delineado. A variável é, também, inversamente proporcional à Densidade de Drenagem.
- j) Textura Topográfica (Tt): define o grau de entalhamento e dissecação do relevo e foi inicialmente apresentada por Smith (1950 apud França, 1968) que a relaciona com a densidade de drenagem através de uma função logarítmica. Adaptando a equação de Smith, Freitas (1952 apud Gandolfi, 1971) utiliza a seguinte expressão para o cálculo da textura topográfica:

$$\log Tt = 0,219649 + 1,115 \log Dd$$

3.2 – Levantamento e processamento das informações

Um esquema com os principais procedimentos envolvidos na análise morfométrica das micro-bacias está exposto na Figura 2.

A digitalização e o processamento dos dados foram efetuados no programa Autocad Map 3.0®. Trata-se de um aplicativo ligado à plataforma do programa Autocad® que permite a manipulação e a interação de vários arquivos de dados ao mesmo tempo e apresenta algumas ferramentas comumente utilizadas em SIGs (Sistemas de Informações Geográficas) para obtenção de dados numéricos e da topologia do terreno.

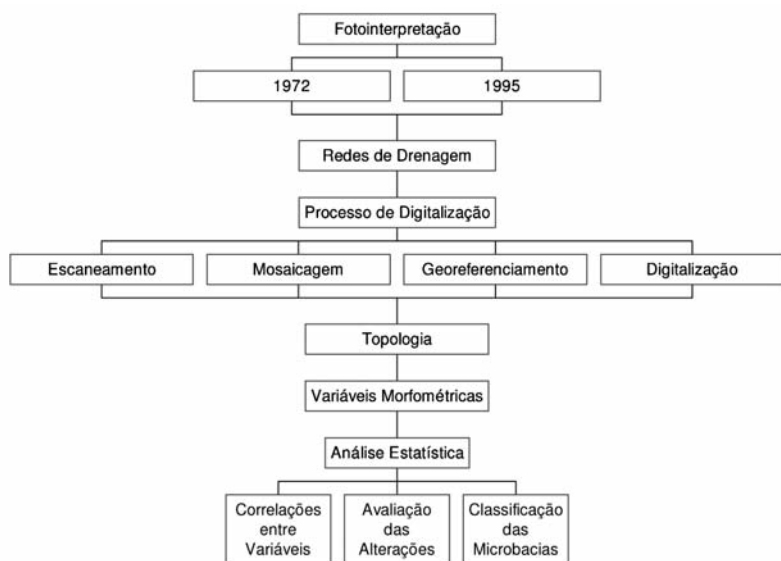


Fig. 2 – Procedimentos adotados na análise morfométrica das microbacias.

3.3 – Obtenção das redes de drenagem

Para a obtenção das redes de drenagem das sessenta e quatro microbacias que compõem a bacia do rio Capivari mais a área adjacente ao rio foram analisadas cerca de quatrocentos pares estereoscópios de fotografias aéreas na escala 1:25.000, datadas de 1972 e de 1995. Foram utilizados estereoscópio de espelho e estereoscópio de mesa com lentes de aumento, para observação de detalhes. Alguns aspectos considerados influentes na obtenção do traçado das redes de drenagem para a análise morfométrica estão listados no Quadro 1.

Quadro 1 – Aspectos referentes à fotointerpretação que influenciaram no traçado das redes de drenagem.

Aspectos influentes na fotointerpretação	
Aspectos intrínsecos	Aspectos extrínsecos
<ul style="list-style-type: none"> – escala – sombras – ocorrência de vegetação densa – área densamente urbanizada – presença de várzeas e áreas alagadas 	<ul style="list-style-type: none"> – Habilidade e experiência do intérprete – qualidade da cópia fotográfica – tipo de estereoscópio – material utilizado como “overlay”

3.4 – Digitalização e processamento dos dados

A preparação das fotografias aéreas para a digitalização das redes de drenagem e processamento das informações no programa Autocad Map 3.0® foi efetuada em três etapas: escaneamento, confecção de mosaicos e georeferenciamento.

Após a preparação das imagens, efetuou-se a digitalização da rede de drenagem em cada microbacia isoladamente. Os canais de cada ordem foram digitalizados em “layers” distintos assim como o traçado da borda da bacia. Este procedimento teve por objetivo facilitar a criação das topologias para obtenção de dados numéricos.

A criação de topologias compreende a etapa final do processamento e são elas que permitem, não só a obtenção de dados numéricos, como também a associação de informações. Visando a obtenção dos dados necessários para a análise das redes de drenagem, utilizou-se de topologias de polígonos para a obtenção da área (A) e do perímetro (P) e de topologias de rede para obtenção do número total de canais (Nt), do comprimento total da rede (Lt), do número de canais por ordem de ramificação (Ni), do comprimento total por ordem de ramificação (Li) e do comprimento médio por ordem de ramificação (Lmi).

3.5 – Alterações nas microbacias: análise estatística multivariada

A estatística multivariada envolve métodos estatísticos que têm por objetivo detectar as relações em um conjunto de dados e variáveis analisando-os conjuntamente e não enfocando uma variável por vez, como ocorre na estatística univariada. Um pré-requisito para este tipo de análise, conforme Manly (1986), é que as variáveis em questão sejam consideradas de igual importância inicialmente. Neste trabalho utilizou-se a análise discriminante para determinar a significância das alterações ocorridas nas microbacias, considerando-se as redes de drenagem em 1972 e 1995 e a análise de agrupamentos, com o objetivo de agrupar as microbacias quanto ao grau de alteração nas suas redes de drenagem.

A análise discriminante é utilizada em estudos estatísticos multivariados quando se pretende decidir qual, de dois ou mais possíveis grupos, um determinado indivíduo submetido a diversas mensurações deve pertencer ou, em outras palavras, indica se dois ou mais conjuntos de indivíduos, previamente agrupados, pertencem realmente a grupos distintos ou não.

A análise de agrupamentos é definida como uma técnica classificatória utilizada quando se deseja explorar as similaridades entre variáveis, denominada *modo R*, ou entre casos, denominada *modo Q*. Davis (1986) enquadra os métodos de agrupamentos em quatro grupos: métodos de partição, métodos com origem arbitrária, métodos por similaridade mútua e métodos hierárquicos aglomerativos, sendo deste último grupo os mais utilizados em questões relacionadas ao meio físico.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a utilização dos dados obtidos na análise estatística multivariada das alterações ocorridas nas microbacias, foi importante uma avaliação prévia das variáveis considerando os seguintes fatores: relações existentes entre elas; aplicabilidade aos métodos estatísticos e a relevância de cada uma como indicadora das alterações ambientais ocorridas no sistema. O objetivo inicial foi reduzir o número de variáveis para a análise estatística, de forma a retratar melhor as alterações.

Neste contexto, efetuou-se uma análise de correlação entre as variáveis considerando os valores absolutos obtidos para cada microbacia nos conjuntos de fotografias aéreas de 1972 e 1995. A matriz de correlação (Figura 3) mostra uma correlação acima de 0,9 para dois grupos de variáveis: Nt, Lt, N1, L1, N2 e L2; e Dd, Dh, Cm, Eps e Tt. Para as variáveis Lm1, Lm2, Rb1-2 e Rlm2-1 não houve correlação.

Efetuoou-se também a mesma análise considerando a taxa de variação de cada variável no período entre 1972 e 1995, ou seja, a porcentagem de perda (negativa) ou de ganho (positiva) nas redes de drenagem de 1995 com relação às redes de drenagem de 1972. A matriz de correlação obtida (Figura 4) indica uma correlação de 1,0 entre as variáveis Dd, Lt, Cm, Eps e Tt e as variáveis Dh, Nt e N1, confirmando a interdependência existente entre elas. Desta maneira, bastaria uma variável de cada um dos dois grupos para representar as alterações ocorridas em todas as outras do grupo.

	Nt	Lt	Dd	Dh	Cm	Eps	Tt	N1	L1	Lm1	Rb1-2	RLm2-1	N2	L2	Lm2
Nt	1.0	1.0	.0	.0	-.1	-.1	.0	1.0	1.0	-.1	.0	.0	1.0	1.0	-.1
Lt	1.0	1.0	-.1	-.1	-.0	-.0	-.1	1.0	1.0	-.1	.1	.0	1.0	1.0	-.0
Dd	.0	-.1	1.0	1.0	-.9	-.9	1.0	.0	-.0	-.6	-.2	-.2	.0	-.1	-.6
Dh	.0	-.1	1.0	1.0	-.8	-.8	1.0	.0	-.0	-.7	-.1	-.1	.0	-.0	-.6
Cm	-.1	-.0	-.9	-.8	1.0	1.0	-.9	-.1	-.0	.7	.3	.3	-.1	-.0	.8
Eps	-.1	-.0	-.9	-.8	1.0	1.0	-.9	-.1	-.0	.7	.3	.3	-.1	-.0	.8
Tt	.0	-.1	1.0	1.0	-.9	-.9	1.0	.0	-.1	-.6	-.2	-.2	.0	-.1	-.6
N1	1.0	1.0	.0	.0	-.1	-.1	.0	1.0	1.0	-.1	.1	.0	1.0	1.0	-.1
L1	1.0	1.0	-.0	-.0	-.0	-.0	-.1	1.0	1.0	-.1	.1	.0	1.0	1.0	-.0
Lm1	-.1	-.1	-.6	-.7	.7	.7	-.6	-.1	-.1	1.0	.3	-.0	-.2	-.1	.7
Rb1-2	.0	.1	-.2	-.1	.3	.3	-.2	.1	.1	.3	1.0	.5	.0	.0	.5
RLm2-1	.0	.0	-.2	-.1	.3	.3	-.2	.0	.0	-.0	.5	1.0	-.0	.1	.6
N2	1.0	1.0	.0	.0	-.1	-.1	.0	1.0	1.0	-.2	.0	-.0	1.0	1.0	-.1
L2	1.0	1.0	-.1	-.0	-.0	-.0	-.1	1.0	1.0	-.1	.0	.1	1.0	1.0	-.0
Lm2	-.1	-.0	-.6	-.6	.8	.8	-.6	-.1	-.0	.7	.5	.6	-.1	-.0	1.0

Fig. 3 – Matriz de correlação entre variáveis com dados das microbacias da bacia do rio Capivari das fotografias aéreas de 1972 e 1995.

	Nt	Lt	Dd	Dh	Cm	Eps	Tt	N1	L1	Lm1	Rb1-2	RLm2-1	N2	L2	Lm2
Nt	1.0	.8	.8	1.0	-.9	-.9	.8	1.0	.5	-.8	-.4	-.0	.9	.6	-.6
Lt	.8	1.0	1.0	.8	-1.0	-1.0	1.0	.8	.7	-.5	-.3	-.0	.7	.6	-.4
Dd	.8	1.0	1.0	.8	-1.0	-1.0	1.0	.8	.7	-.5	-.3	-.0	.7	.6	-.4
Dh	1.0	.8	.8	1.0	-.9	-.9	.8	1.0	.6	-.8	-.2	.1	.8	.6	-.5
Cm	-.9	-1.0	-1.0	-.9	1.0	1.0	-1.0	-.9	-.7	.6	.3	.1	-.8	-.6	.5
Eps	-.9	-1.0	-1.0	-.9	1.0	1.0	-1.0	-.9	-.7	.6	.3	.1	-.8	-.6	.5
Tt	.8	1.0	1.0	.8	-1.0	-1.0	1.0	.8	.6	-.5	-.3	-.0	.7	.6	-.4
N1	1.0	.8	.8	1.0	-.9	-.9	.8	1.0	.6	-.8	-.2	.1	.8	.6	-.5
L1	.5	.7	.7	.6	-.7	-.7	.6	.6	1.0	-.0	.2	-.3	.3	.2	-.2
Lm1	-.8	-.5	-.5	-.8	.6	.6	-.5	-.8	-.0	1.0	.4	-.2	-.7	-.5	.6
Rb1-2	-.4	-.3	-.3	-.2	.3	.3	-.3	-.2	.2	.4	1.0	.3	-.7	-.4	.5
RLm2-1	-.0	-.0	-.0	.1	.1	.1	-.0	.1	-.3	-.2	.3	1.0	-.2	.5	.7
N2	.9	.7	.7	.8	-.8	-.8	.7	.8	.3	-.7	-.7	-.2	1.0	.7	-.7
L2	.6	.6	.6	.6	-.6	-.6	.6	.6	.2	-.5	-.4	.5	.7	1.0	.0
Lm2	-.6	-.4	-.4	-.5	.5	.5	-.4	-.5	-.2	.6	.5	.7	-.7	.0	1.0

Fig. 4 – Matriz de correlação considerando a taxa de variações das variáveis das microbacias da bacia do rio Capivari no período entre 1972 e 1995.

Com base nos resultados das matrizes de correlação e também devido à grande aceitação e utilização em análises geoambientais de bacias hidrográficas, foram selecionadas inicialmente as variáveis densidade de drenagem (Dd) e densidade hidrográfica (Dh), como representantes de cada um dos grupos com altas correlações e ainda as variáveis Razão de Bifurcação entre os canais de ordem 1 e 2 (Rb1-2) e Razão de Comprimentos Médios entre os canais de ordem 2 e 1 (RLm2-1).

As variações em Dh, como mencionado por Christofletti (1974), refletem alterações do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica em seu aspecto mais fundamental, ou seja, o de perder ou ganhar novos cursos d'água e isto é confirmado pela correlação de 100% com N1.

Em resumo, variações significativas em Dd e Dh indicam quanto uma bacia se alterou por perder ou ganhar novos cursos d'água e as variáveis Rb1-2 e RLm2-1 podem indicar alterações internas na hierarquização dos canais, mesmo não ocorrendo alterações significativas no número de canais e no comprimento total da rede. Estas quatro variáveis são independentes entre si e os seus dados apresentam distribuição aproximadamente normal. O teste de normalidade pode ser verificado em Collares (2000).

Para efetuar o teste de significância das alterações utilizou-se o processo estatístico multivariado da análise discriminante considerando-se dois grupos de casos: o *G* 72, com as redes de drenagem das microbacias em 1972 e o *G* 95, com as redes de drenagem das microbacias em 1995. O objetivo foi submeter os dados ao teste de hipótese, ou seja, avaliar se as alterações foram estatisticamente significativas ou não. Para isto, considerou-se as seguintes hipóteses:

- Hipótese nula (H_0) – Não houve alteração nas microbacias da bacia do rio Capivari no período entre 1972 e 1995.
- Hipótese alternativa (H_1) – Houve alterações nas microbacias da bacia do rio Capivari no período entre 1972 e 1995.

O procedimento foi efetuado em dois passos, utilizando-se o programa Statistica 5.5®: o primeiro considerando as quatro variáveis (Dd, Dh, Rb1-2 e Rlm2-1), com o objetivo de identificar as variáveis mais significativas na discriminação e o segundo utilizando apenas as mais significativas para a efetivação do teste de hipótese.

Os resultados obtidos no primeiro passo estão apresentados no Quadro 2. O valor F obtido foi igual 2,22, para graus de liberdade 4 (numerador) e 125 (denominador). O valor F tabelado da distribuição para estes graus de liberdade é de 2,37, para um grau de significância $\alpha = 0,05$. Como F calculado é menor que o F tabelado, não há consistência para rejeitar H_0 , considerando-se o teste que se utilizou das 4 variáveis. Observa-se, entretanto, pelos valores de Wilks' λ que as variáveis densidade hidrográfica (Dh) e densidade de drenagem (Dd) foram as que mais contribuíram para a discriminação entre as bacias e assim foram escolhidas como as mais representativas das alterações.

Quadro 2 – Resultados do Passo 1 da análise discriminante, considerando as variáveis Dd, Dh, Rb1-2 e Rlm2-1.

Teste de significância $\alpha = 0,05$	Porcentagem de acertos	Distância Mahalanobis	Wilks λ para as variáveis
F(4,125)= 2,22 (calculado) F(4,125) = 2,37 (tabelado) p-level = 0,070	G 72 (bacias 1972) = 55,4% G 95 (bacias 1995) = 64,3% Total = 60,0%	D ² = 0,284 Wilks λ para o modelo Wilks λ = 0,934	Dd = 0,953 Dh = 0,968 Rb ₁₋₂ = 0,939 R _{Lm2-1} = 0,940

Os resultados obtidos no passo 2, utilizando as variáveis Dd e Dh (no Quadro 3) indicam um valor F igual 3,90 para graus de liberdade 2 (numerador) e 127 (denominador). O valor F tabelado da distribuição para estes graus de liberdade é de 3,00, para um grau de significância $\alpha = 0,05$. Como F calculado é maior que o F tabelado, há consistência para rejeitar H_0 , ou seja, pode-se afirmar que houve alterações estatisticamente significativas nas microbacias no período considerado. Este fato pode ainda ser comprovado pelo baixo valor obtido para p-level = 0,023.

Quadro 3 – Resultados do Passo 2 da análise discriminante, considerando as variáveis Dd e Dh.

Teste de significância $\alpha = 0,05$	Porcentagem de acertos	Distância Mahalanobis	Wilks λ para as variáveis
F(2,127)= 3,90 (calculado) F(2,127) = 3,00 (tabelado) p-level = 0,023	G72 (bacias 1972) = 50,8% G95 (bacias 1995) = 64,6% Total = 57,7%	D ² = 0,245 Wilks λ para o modelo Wilks λ = 0,942	Dd = 0,968 Dh = 0,986

Considerando a maior influência de Dh e Dd na discriminação entre as bacias e as suas importâncias como indicadores de alterações no número e no comprimento dos canais, efetuou-se uma análise de agrupamento considerando as taxas de variações (em porcentagem) destas variáveis no período entre 1972 a 1995, com o objetivo de agrupar as microbacias por grau de alteração na rede de drenagem.

Foi utilizado o método hierárquico aglomerativo e a técnica de agrupamento pareado igualmente ponderado (*weighted pair-group method*), considerando o coeficiente de distância e a medida de distância euclidiana como critério de similaridade. Pelo dendrograma obtido (Figura 5), tomando-se como limite o valor de distância igual a 10, pode-se observar no lado direito e no centro dois grandes grupos e no lado esquerdo três grupos menores que foram, posteriormente, agrupados em um só, uma vez que se distinguem dos outros dois por apresentarem maiores taxas de variação.

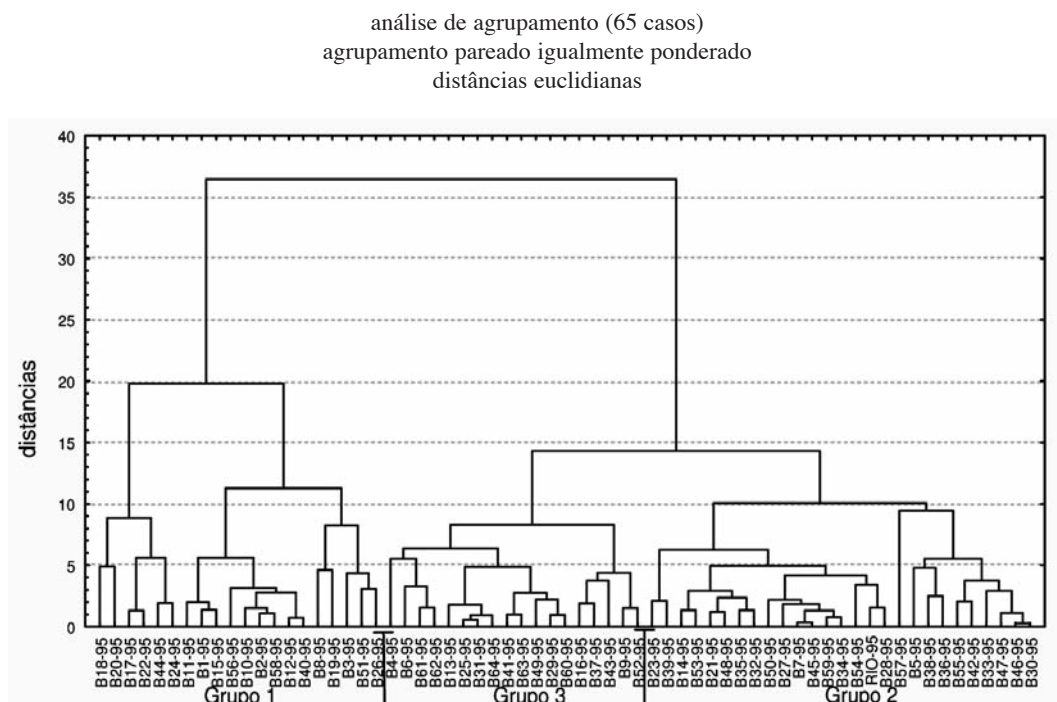


Fig. 5 – Dendrograma obtido para as 65 microbacias da bacia do rio Capivari considerando a taxa de variação das variáveis Dr e Dh entre 1972 e 1995.

Para analisar e classificar os grupos definidos pela análise de agrupamento, efetuou-se novamente a análise discriminante, desta vez considerando cada grupo separadamente (Quadro 4). Os principais resultados obtidos estão apresentados no Quadro 05.

Observa-se uma discriminação altamente significativa para o grupo 1, onde $F(2,37) = 5,07$ e o $p\text{-level} = 0,011$, sendo, então, classificado como de *alterações significativas*. Para os outros grupos, o teste de significância não confirma alterações significativas entre 1972 e 1995, entretanto, pode-se observar por meio de D^2 e da porcentagem de acertos, que o grupo 2 está melhor discriminado que o grupo 3. Desta forma, o Grupo 2 foi então denominado como de *alterações medianamente significativas* e o Grupo 3 como de *alterações pouco significativas*. O mapa com o resultado da classificação é apresentado na Figura 6.

Quadro 4 – Classificação das microbacias por grau de alteração com base nos grupos obtidos com a análise de agrupamento.

Grupo	Relação de microbacias
Grupo 1	B26, B24, B40, B44, B56, B58, B51, B22, B20, B18, B19, B17, B15, B12, B10, B8, B11, B3, B2, B1
Grupo 2	B28, B30, B32, B34, B36, B38, B42, B46, B48, B50, B54, B59, B57, B55, B53, B47, B45, B39, B35, B33, B27, B23, B21, B14, B7, B5, Rio
Grupo 3	B52, B60, B62, B64, B63, B61, B49, B43, B41, B37, B31, B29, B16, B25, B13, B9, B6, B4

Quadro 5 – Resultados da análise discriminante obtidos no programa Statística 5.5® para grupos definidos na análise de agrupamento.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
<i>teste de significância</i> $\alpha = 0,05$	F(2,37)= 5,07 (calc.) F(2,37) = 3,25 (tab.) p-level = 0,011	F(2,51)= 1,52 (calc.) F(2,51) = 3,20 (tab.) p-level = 0,227	F(2,34)= 0,30 (calc.) F(2,34) = 3,30 (tab.) p-level = 0,743
<i>Porcentagem de acertos</i>	G72 = 50,0% G95 = 75,0% Total = 62,5%	G1 = 55,5% G2 = 66,6% Total = 61,1%	G1 (B1972) = 50,0% G2 (B1995) = 66,6% Total = 58,3%
<i>distância mahalanobis</i>	D² = 1,096	D² = 0,239	D² = 0,073

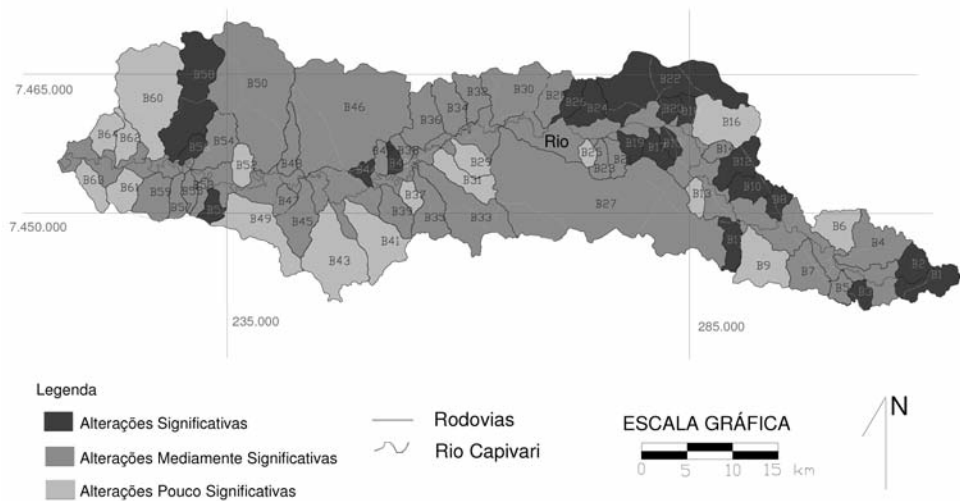


Fig. 6 – Mapa com a classificação das microbacias quanto ao grau de alteração entre 1972 e 1995 (análise de agrupamento).

5 – CONCLUSÕES

Utilizando-se de variáveis morfométricas das redes de drenagem de microbacias e de análise estatística discriminante, pode-se afirmar que ocorreram alterações significativas na composição da

rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Capivari, no período entre 1972 e 1995. Dentre as variáveis analisadas, as que melhor expressam as alterações ocorridas são a *densidade de drenagem* e a *densidade hidrográfica*. Com base nestas variáveis, as 64 microbacias e a área adjacente ao rio Capivari puderam ser classificadas quanto ao grau de alteração, utilizando-se de análise de agrupamento, e, novamente, análise discriminante para a qualificação dos grupos.

Paralelo à classificação das microbacias da Bacia do Rio Capivari quanto ao grau de alteração, objeto deste trabalho, realizou-se um estudo das condições de uso e ocupação destas microbacias, descrito em Collares e Rodrigues (2000), com o objetivo de compreender o que motivou as alterações ocorridas na rede de drenagem. Comparando-se este estudo com a classificação aqui determinada, verifica-se que das vinte microbacias classificadas como de *alterações significativas*, doze (B8, B10, B12, B15, B17, B18, B19, B20, B22, B24 e B26) estão inseridas na área metropolitana da cidade de Campinas e a B40 abrange parte do perímetro urbano da cidade de Capivari e compreendem microbacias que sofreram alterações motivadas por processos urbanos ou de expansão urbana, neste período de 23 anos. A remobilização de terras e impermeabilização dos terrenos provocadas pela implantação de obras de grande porte e de loteamentos contribuiu para a desativação de canais primários naturais. A implantação de obras como o aterro sanitário Delta, a Rodovia dos Bandeirantes e a duplicação de uma avenida também contribuíram para alterar a dinâmica de escoamento linear das águas.

As microbacias B1, B2, B3 e B11, constituem microbacias em áreas de expansão urbana e com intervenções pontuais para a instalação de empreendimentos de médio e grande portes, além do intensivo cultivo de cítricos na região de cabeceira do rio Capivari. As microbacias B44, B50, B51 e B56, que completam o grupo de bacias com alterações significativas, são microbacias agrícolas, de cultivo de cana de açúcar. A remobilização de terra condicionada pelo manuseio de cultivo temporário, deve ter contribuído para o desconfiguração dos canais de drenagem.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP N° Processo 97/12794-7), imprescindível à realização deste trabalho.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Awasthi, D. K.; Sitaula, B. K.; Singh, B. R.; Bajacharaya, R. M. (2002). *Land-use change two empálese watersheds: gis and geomorphometric análisis*. Land degradation & development, vol. 13, pp. 495-513.
- Bárdossi, A.; Schimidt, F. (2002). *GIS approach to scale issues of perimeter-based shape indices for drainage basins*. Hydrological Sciences, vol. 47, pp. 931-942.
- Band, L.E. (1989). *A terrain-based watershed information system*. Hydrological Processes. Vol. 3, pp. 151-162.
- Christofoletti, A. (1969). *Análise morfométrica das bacias hidrográficas*. Notícias Geomorfológicas. Vol. 9, n. 18, pp. 19-34.
- Christofoletti, A. (1974) *Geomorfologia*. 2ed. São Paulo. Ed. Edgard Blucher Ltda.
- Civco, D. L.; Garcia, A. R.; Warner, G.S. (1995). *Key steps to effective watershed characterization*. GIS World. Vol. 95, pp. 62-67.

- Collares, E. G. (2000). *Avaliação de alterações em redes de drenagem de microbacias como subsídio ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: aplicação na bacia hidrográfica do rio Capivari - SP*. São Carlos, 2000. 2v. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Collares, E.G.; Rodrigues, J.E. (2000). *Geoprocessamento aplicado à caracterização das atividades modificadoras do meio físico na bacia hidrográfica do rio Capivari*. Geociências, vol. 19, n. 1, pp. 141-152.
- Davis, J. C. (1986). *Statistics and data analysis in geology*. 2 ed. USA. John Wiley & Sons.
- Fontes, A.L. (1997). *Caracterização geoambiental da bacia do rio Japaratuba – SE*. Rio Claro. 283p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- França, G.V. (1968). *Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba*. Piracicaba. 151p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo.
- Gandolfi, N. (1971). *Investigações sedimentológicas, morfométricas e físico-químicas nas bacias do Moji-Guaçu, do Ribeira e do Peixe*. São Carlos. 108p. Tese (Livre-docência). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Garbrecht, J. & Martz, L.W. (1997). *Automated channel ordering and node indexing for raster channel networks*. Computers & Geosciences. Vol. 23, n. 9, pp. 961-966.
- Horton, R. E. (1945). *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*. Bulletin of the geological Society of America. vol. 56, pp. 275-370.
- Manly, B. F. J. (1986). *Multivariate statistical methods: a primer*. New York. Chapman and Hall Ltd.
- Meisels, A.; Raizman, S.; Karnieli, A. (1995). *Skeletonizing a DEM into a drainage network*. Computers & Geosciences. vol. 21, n. 1, pp. 187-196.
- Miller, V. C. (1953). *A quantitative geomorphic study of drainage basins characteristic in the Clinch Mountain área*. Technical report, vol. 3.
- Miller, J. R.; Ritter, J. B. (1996). *An examination of the Rosgen classification of natural rivers*. Catena, vol. 27, pp. 295-299.
- Morisawa, M.E. (1962). *Quantitative geomorphology of some watersheds in the Appalachian Plateau*. Geological Society of America Bulletin. Vol. 73, n. 9, pp. 1025-1046.
- NG, K.Y. (2006). *Landslide locations and drainage network development: a Case Study of Hong Kong*. Geomorphology, vol. 76, pp. 229-239.
- Obi Reddy, G.; Maji, A.K.; Gajbhike, K.S. (2004). *Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India – a remote sensing and GIS approach*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 6, pp. 1-16.
- Osterkamp, W. R. (2002). *Geoindicators for river and river-valley monitoring in the humid tropics*. Environmental Geology, vol. 42, pp. 725-735.
- Ribeiro, R.P.; Rodrigues, J.E. (2004). *Use of Terrain Evaluation Techniques in the Study of Drainage Network Changes in Microbasins of the Capivari River Basin, State of São Paulo, Brazil*. Bulletin of the Engineering Geology and the Environment, vol. 63, pp. 41-50.

- Rosgen, D. L. (1994). *A classification of natural rivers*. Catena, vol. 22, pp. 169-199.
- Rosgen, D. L. (1996). *A classification of natural rivers: reply to the comments by Miller and J. B. Ritter*. Catena, vol. 27, pp. 301-307.
- Schumm, S. A. (1956). *Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey*. Bulletin of the geological Society of America, vol. 67, pp. 597-646.
- Sheng, T.C.; Barrett, R.E.; Mitchell, T.R. (1997). *Using geographic information systems for watershed classification and rating in developing countries*. Journal of Soil and Water Conservation, vol. 52, n. 2, pp. 84-89.
- Strahler, A. N. (1957). *Quantitative analysis of watershed geomorphology*. Transaction of the American Goeophysical Union, vol. 38, n. 6, pp. 913-920.
- Tucker, G. E.; Catani, F.; Rinaldo, A.; Bras, R.L. (2001). *Statistical analysis of drainage density from digital terrain data*. Geomorfology, vol. 36, pp. 187-202.
- Wood-Smith, R. D.; Buffington, J. M. (1996). *Multivariate geomorphic analysis of forest streams: implications for assessment of land use impacts on channel condition*. Earth surface processes and landforms, vol. 21, pp. 377-393.
- Yin, Z. Y.; Wang, A. X. (1999). *A cross-scale comparison of drainage basin characteristics derived from digital elevation models*. Earth surface processes and landforms, vol. 24, pp. 557-562.