

IMAGENS DE SATÉLITE E FOTOGRAFIAS AÉREAS PARA ESTUDOS HIDROMORFOLÓGICOS: HIERARQUIZAÇÃO, MORFOMETRIA E CLASSIFICAÇÃO DE BACIAS DE DRENAGEM POR ANÁLISE DE *CLUSTER* HIERÁRQUICA

Carlos Batista da SILVA¹
José Tadeu Garcia TOMMASELLI²

Resumo

O objetivo principal do presente trabalho é mostrar como que algumas ferramentas de processamento de imagens orbitais podem desempenhar papéis simples, porém, fundamentais para estudos hidromorfológicos no que tange ao conhecimento de variáveis mensuráveis usadas em estudos morfométricos e em estudos de classificação de sub-bacias hidrográficas. As variáveis usadas para a proposta de classificação de sub-bacias foram: área das bacias, perímetro, raio e extensão dos rios. Estas, foram extraídas de imagens de satélites e submetidas a parâmetros morfométricos. Os resultados obtidos após a avaliação dos parâmetros morfométricos foram correlacionados e submetidos à análise de *cluster* hierárquica. Esta análise subsidiou a formação de quatro grupos de sub-bacias com características semelhantes e uma unidade de bacia com características individualizadas. Os dados da análise foram espacializados numa carta de 1:10.000, originando um produto de classificação das sub-bacias da bacia do ribeirão do Peixe/SP. As descrições qualitativas dos grupos classificados, seguindo a metodologia estatística empregada, foram complementadas com as observações realizadas por meio de fotografias aéreas na escala de 1:25.000. Desta forma, chegou-se a conclusão de que classificar sub-unidades de uma bacia hidrográfica usando tal metodologia estatística descrita e, associando-a as potencialidades da fotointerpretação, constituem um estratégia de análise relevante para estudos que visam o planejamento de unidades hidrográficas.

Palavras Chaves: Análise de cluster. Imagens de satélite. Fotointerpretação e morfometria de sub-bacias hidrográficas.

¹ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo (FFLCH/USP). Bolsista: CAPES. E-mail: krlosbatist@gmail.com.

² Professor Doutor da Universidade Estadual Paulista (UNESP) de Presidente Prudente (FCT/UNESP). E-mail: tadeu@fct.unesp.br

Abstract

Satellite images and aerial photographs to hydromorphological studies: hierarquization, morphometry and classification of watersheds by hierarchical cluster analysis

The main purpose of this work is to show how some tools for orbital image processing can play simple roles, although fundamentals to hydromorphic studies in respect to the knowledge of measured variables used in morphometric studies and in classification studies of hydrographic sub-basins. The variables used for the proposal of basins classification are the basins area, perimeter, radius and river extension. This variables were extracted from satellite images and several morphometric parameters. The results obtained after the evaluation of the morphometric parameters were correlated and submitted to the hierarchical cluster analysis. This analysis had subsidized the formation of four sub-basins groups with similar features and a basin unit with individualized features. The data from the analysis were mapped in a 1:10.000 chart, generating a classification product for the sub-basins in the ribeirão do Peixe/SP basin, Brazil. The qualitative descriptions of some classified products following the applied statistical methodology were complemented with the observations accomplished by aerial photographs in 1:25.000 scale. It was concluded that classifying hydrographic basins sub-unities using such statistical methodology, and associating it to photo interpretation possibilities, is an analysis strategy relevant to studies focused on hydrographic unities planning.

Key words: Cluster analysis. Satellite images. Photo interpretation. Morphometry of hydrographic sub-basins.

INTRODUÇÃO

Diante das complexas relações estabelecidas entre a rede de drenagem e as morfologias do relevo, os estudos do comportamento dos sistemas fluviais tiveram desenvolvimento ímpar de procedimentos e técnicas após o século XIX, quando os estudos de caráter indutivos e de observações dos sistemas fluviais deram lugar aos estudos com um viés muito mais analítico.

Segundo Chorley *et al.* (1984), até o começo do século XIX, três atributos geomórficos estruturavam as descrições espaciais e as análises das formas das superfícies.

The first of these was naturally the geological framework of terrain found its most complete expression in the physiographic regions [...] The second special basis was that provided by the Davisian cycle and the associated denudation chronology, whereby regions of differing stage or cycle were believed to form identifiable units [...] and the third spatial basis for landforms analysis, the erosional drainage basin, has been recognized as a viable process-response unit since the beginning of the last century (CHORLEY, *et al.* 1984, p. 316)

As observações realizadas por Chorley *et al.* (1984) revelam uma preocupação nas análises dos sistemas fluviais no que tange a compreensão da dinâmica observada nas formas de superfície. Essa mesma preocupação, também, aparece em outros importantes estudos como os de Strahler (1977, p. 429-521) e Ab'Saber (1949).

Evidenciado por Chorley *et al.* (1984), os primeiros cientistas a terem preocupações com o papel desempenhado pela rede de drenagem dentro dos sistemas fluviais foram Playfair (1802), Gilbert (1877) e Davis (1899). Os dois primeiros abordaram os sistemas fluviais na perspectiva dos processos de estruturação da bacia de drenagem e W. Davis na perspectiva da definição do que seria um rio. Desta forma, para Playfair.

[...] cada rio consiste em um tronco principal, alimentado por um certo número de tributários, sendo que cada um deles corre em uma vale proporcional ao seu tamanho, e o conjunto forma um sistema de vales comunicantes com declividades tão perfeitamente ajustadas que nenhum deles se une ao vale principal em um nível demasiado superior ou inferior: circunstância que seria infinitamente improvável se cada vale não fosse obra do rio que ocupa (PLAYFAIR, 1802 citado por CHRISTOFOLETTI 1971, p. 132).

A citação de Playfair acima, revela alguns elementos importantes a respeito dos sistemas fluviais, dentre elas a *lei das confluências concordantes* dos sistemas. Já Gilbert (1877), recorreu a análises de relações interdependentes existentes ao longo do sistema e que afetaria toda drenagem e as vertentes subjacentes e Davis (1899) definiu os rios como [...] "*as extending all over its basin and up to its very divides such that ordinarily treated, the river is like the veins of a leaf, broadly viewed it is like the entire leaf*" [...], ou seja, como veias de uma folha, organizadas por toda a superfície, seguindo uma ordem lógica e muito bem estruturada.

As contribuições desses autores foram essenciais para o desenvolvimento das demais concepções a respeito dos sistemas fluviais e das morfologias de relevo e seus processos. Com isso, Playfair, Gilbert e Davis foram primordiais para o início dos estudos fluviais e de outros segmentos da geomorfologia para o período em que viveram, e que seria mais do que natural – dentro da ciência – que novas concepções teóricas, a respeito dos sistemas fluviais, surgissem e fossem adotadas. Desta forma, jamais todo o emprego teórico dos pioneiros pode ser taxado como ultrapassado.

Os tipos de estudos indutivos e de observações dos sistemas fluviais perduraram durante muitas décadas como uma forma de análise e, trouxeram contribuições muito importantes.

Para Christofolletti (1971), os estudos relacionados aos sistemas fluviais passaram a ter conotações mais analíticas após a contribuição metodológica de Robert E. Horton (1945).

A renovação proposta por Horton (1945), marcou o início dos estudos morfométricos, por meio de proposições analíticas para os cursos d'água e, sobretudo, influenciou uma série de pesquisadores a se dedicarem a estudos morfométricos de vertentes e interflúvios.

Chorley *et al.* (1984), chama atenção à interpretação que Arthur N. Strahler estabeleceu sobre o sistema erosivo fluvial com a unidade geomórfica básica. Para Strahler está claramente definida a unidade topográfica como um fator disponível na hierarquização do ordenamento dos fluxos de uma bacia hidrográfica.

Dentro de um sistema fluvial, podemos subdividir os rios em elementos que se integram a segmentos de uma hierarquia ordenada seguindo a diferentes magnitudes. Strahler (1977), organizou uma proposta de classificação dos segmentos fluviais seguindo a ordenação que os cursos d'água se apresentavam dentro de uma determinada bacia hidrográfica.

Cada cauce extremo se denomina segmento de primer orden. En la conjunción de los segmentos de primer orden se forma

un cauce de segundo orden y se prolonga hasta que se une con otro cauce de segundo orden, de lo cual se origina uno de tercer orden, etc. Sin embargo, si un segmento de primer orden se une a outro de segundo orden, a partir del punto de unión no se produce incremento de orden. El río principal de la cuenca es el que tiene el número más elevado de todo el sistema. Los cauces de primero y segundo orden solamente suelen llevar agua en tiempo húmero (STRAHLER, 1977. p. 524)

Desta forma, pode-se assegurar que grande parte das bacias são divididas em segmentos e cada um desses são estruturados dentro duma ordem de acordo com as condições citadas por Strahler (1977). Além da organização em que cada curso d'água é encontrado dentro da bacia, as análises morfométricas são elementos fundamentais na caracterização de uma bacia hidrográfica.

A essencialidade morfométrica dada a uma unidade hidrográfica é garantida pelo fato dos cursos d'água apresentarem processos relevantes na esculturação da paisagem terrestre, apresentando desta forma, uma função relevante num conjunto de análises elucidativas nos complexos processos geomorfológicos.

Muitos são os trabalhos desenvolvidos que se dedicaram aos estudos morfométricos e que adotaram uma série de técnicas capazes de auxiliarem a compreensão de seus papéis dentro das bacias hidrográficas. Os consagrados trabalhos de Strahler (1977), Christofolletti (1971), Horton (1945) e Miller (1953) já haviam notificado resultados extremamente relevantes.

Na atualidade, o emprego de novas técnicas – como as fornecidas pelo geoprocessamento – associadas as já consagradas, constituem uma interessante potencialidade de estudo para o aprofundamento teórico e na obtenção de resultados mais detalhados, como vem mostram as publicações da UGB (União da Geomorfologia Brasileira), como os trabalhos de Oliveira *et al.*, (2007) e Sodré *et al.*, (2007).

O presente trabalho tem como objetivo exemplificar como algumas ferramentas de processamento de imagem orbital podem desempenhar papéis simples, porém, fundamentais para estudos hidromorfológicos no que tange a hierarquização de bacias hidrográficas, aos conhecimentos de variáveis mensuráveis usadas em estudos morfométricos e em propostas de classificação de sub-bacias hidrográficas.

ÁREA DE ESTUDO

Com partes de suas nascentes localizadas no *front* do relevo de *cuesta* de Botucatu, a bacia do ribeirão do Peixe possui uma extensão territorial de 422.9 mil Km² que avança sobre áreas da Depressão Periférica Paulista - onde recebe contribuições de outros rios tributários – até atingir sua foz no rio Tietê (figura 1).

Os relevos de *cuestas* no Estado de São Paulo são morfologias sustentadas por rochas basálticas (ALMEIDA, 1949), apresentando relevos escarpados nos limites com a Depressão Periférica, seguindo de uma sucessão de grandes plataformas estruturais de relevo suavizados, inclinados em direção ao centro da bacia Paraná (IPT, 1981).

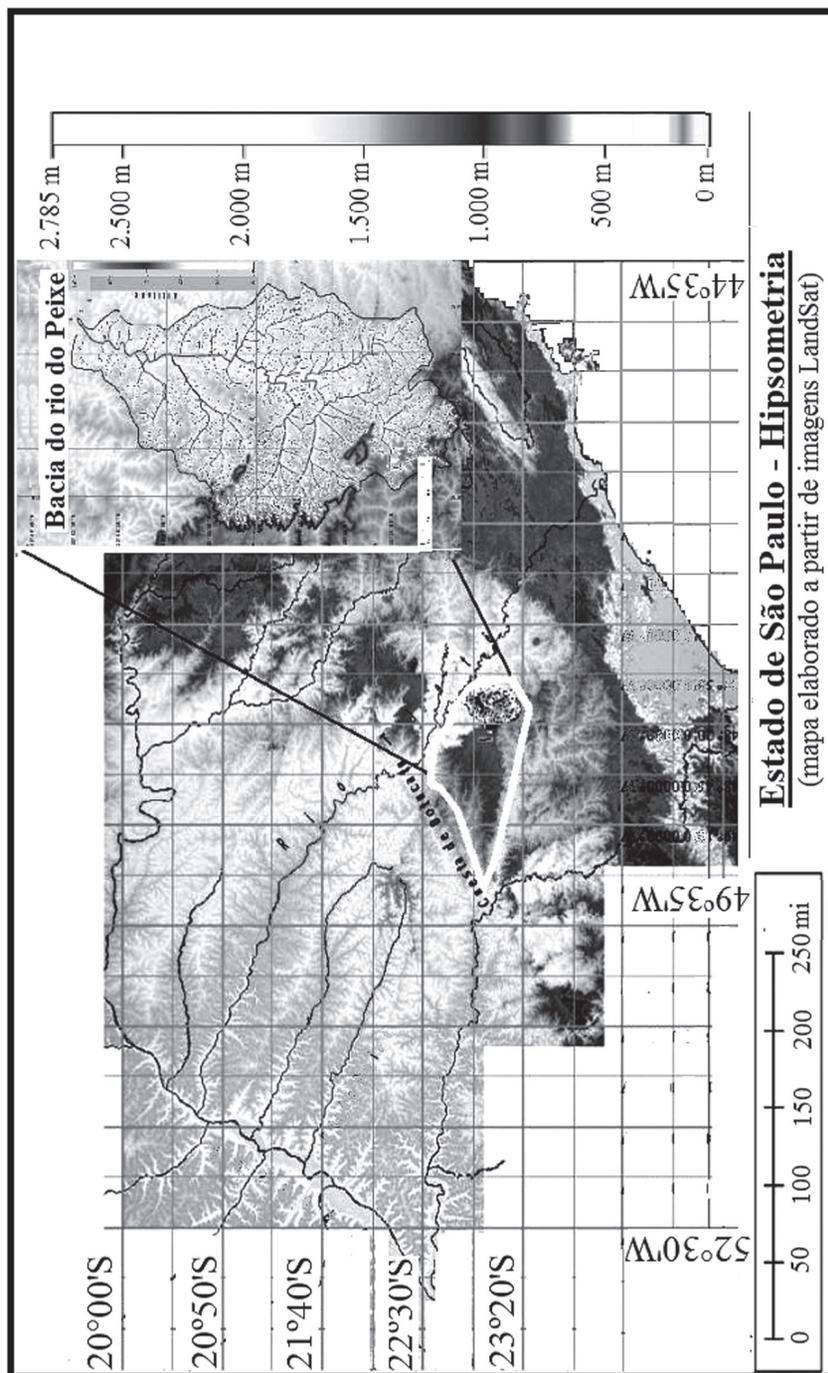


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo

Segundo o IPT (1981), entre a Serra de Botucatu, bem como a sul de Barra Bonita, os relevos de *cuestas* basálticas são interrompidas pelas chamadas *percées*³ do Rio Tietê. O sistema de drenagem na região é diversificado e recebe vários rios que procedem da Depressão Periférica e do Planalto Atlântico. A ação erosiva no reverso das *cuestas* é bem desenvolvida, embora as características das bacias de drenagem promovam a esculturação em diferentes graus. Na região a nordeste da *percée* do Tietê, a erosão causada pela drenagem consequente do reverso favoreceu um dissecamento pronunciado no relevo.

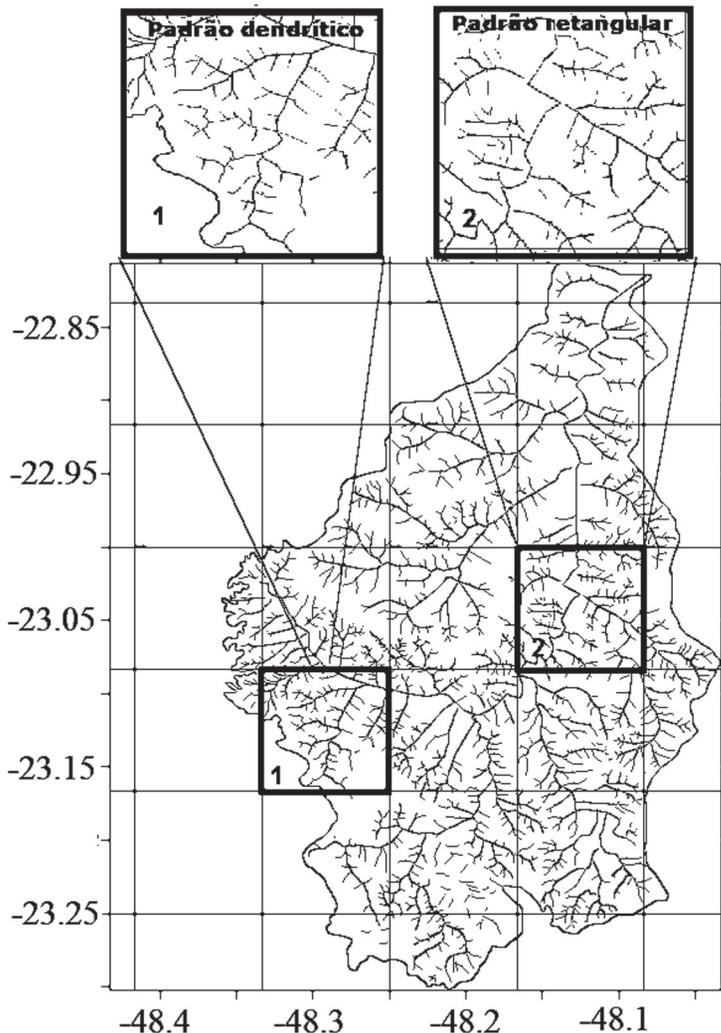


Figura 2 - Padrão misto da bacia do ribeirão do Peixe

³ Segundo Casseti (2005) *percées* podem ser consideradas como "boqueirões escavados no *front* da *cuesta* por superposição de cursos cataclinais

A bacia do ribeirão do Peixe apresenta-se estruturada por arenitos da formação Pirambóia e siltitos da formação Estrada Nova (DIAS FERREIRA, 1979). O curso principal da bacia do ribeirão do Peixe, segundo Almeida (1964), classifica-se como um curso subsequente e, segundo Dias Ferreira (1979), a bacia enquadra-se dentro do padrão misto dendrítico-retangular, como mostra a figura 2.

O relevo onde se insere a bacia do ribeirão do Peixe apresenta degradação, em planaltos dissecados com colinas médias e escarpas festonadas, segundo o IPT (1981). Ainda segundo esse Instituto, na região há o predomínio de interflúvios com áreas de 1 a 4 km², topos aplainados, vertentes com perfis convexos a retilíneos. Nas áreas próximas as cabeceiras do ribeirão, as escarpas festonadas são desfeitas em anfiteatros separados por espigões, topos angulosos, vertentes com perfil retilíneo. Usando as fotografias aéreas de algumas áreas no *front* das escarpas de *cuestas*, foi possível observar uma densidade de rios relativamente alta, seguindo os parâmetros de Soares e Fiori (1976).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração da cartografia base utilizou-se imagens digitais LandSAT, coletadas junto à Embrapa e processadas com o auxílio técnico dos aplicativos Global Mapper⁴ 11.0 e Surfer⁵ 8.0, além de fotografias aéreas na escala de 1:25.000.

A base cartográfica de toda a rede hidrográfica da bacia do ribeirão do Peixe foi elaborada com base em análise estereoscópica de fotografias aéreas do ano de 1962, obtidas pelo IAC (Instituto Agrônomo de Campinas/SP). Essa base cartográfica hidrográfica foi georreferenciada no aplicativo Global Mapper. As imagens digitais de toda a base cartográfica foram sobrepostas, também no Global Mapper, de forma que ambos os *grids* ficassem coincidentes.

Ajustadas os *grids*, as redes hidrográficas foram vetorizadas sobre a imagem de satélites utilizando as próprias ferramentas do Global Mapper. Essas ferramentas de vetorização permitem a obtenção de informações básicas mensuráveis como: área, perímetro, extensão territorial de cada um dos cursos, dentre diversas outras informações. O objetivo de obtenção de todas essas informações durante essa primeira etapa era garantir o máximo de informações descritivas da bacia hidrográfica do ribeirão do Peixe para subsidiar as análises posteriores.

No segundo momento desse trabalho foram calculados alguns elementos morfométricos para as 73 sub-unidades do ribeirão do Peixe com o objetivo de servir como elementos para as análises e para a classificação. Esses elementos foram: relação de bifurcação (R_b), relação entre o comprimento médio dos canais (R_{lm}), índice do comprimento médio dos canais e índice de bifurcação, expresso pela variável (R_{lb}), índice de densidade da drenagem (Dd), índice de densidade hidrográfica (Dh) e o índice de circularidade (Ic). Esses elementos de análise morfométrica foram os mesmos empregados por Christofletti (1971), Strahler (1977), Miller (1953), Horton (1945) e Alves e Castro (2003).

Para a realização do cálculo de relação de bifurcações (R_b) da bacia [eq. 1], empregou-se a técnica estatística definida por Horton (1945), sendo que a relação

⁴ Global Mapper é marca registrada da Blue Marble Geographics, Hallowell, Maine, USA.

⁵ Surfer é marca registrada da Golden Software, Golden, Colorado, USA.

(R_b) pode ser calculada pela razão entre o número total de canais de certa ordem (N_u) e o número total de canais de ordem superior (N_{n+1}).

$$R_b = N_u / N_{n+1} \quad (1)$$

O segundo elemento estudado foi a relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem [eq. 2], calculada com base na seguinte expressão:

$$R_{lm} = Lm_w / Lm_{w-1} \quad (2)$$

sendo, Lm_w o comprimento médio dos canais de determinada ordem e Lm_{w-1} , o comprimento médio dos canais de ordem imediatamente inferior.

O terceiro elemento empregado foi o cálculo de relação entre o índice do comprimento médio dos canais e o índice de bifurcação, expresso pela variável (R_{lb}) [eq. 3] que relaciona o índice do comprimento médio entre duas ordens subsequentes (R_{lm}) e a relação de bifurcação entre as mesmas duas ordens subsequentes (R_b), que pode ser representado por:

$$R_{lb} = R_{lm} / R_b \quad (3)$$

Para Horton (1945), a R_{lb} é um importante fator a ser analisado, pois este mantém uma relação direta entre a composição da drenagem e o desenvolvimento fisiográfico das bacias hidrográficas.

As mensurações da área da bacia e o comprimento do curso principal foram realizadas com o auxílio do aplicativo Global Mapper 11. O índice de densidade hidrográfica (Dh) foi calculado por meio da relação entre a área da bacia (A) e o número total de cursos de rios (N).

O índice de densidade hidrográfica [eq. 4] foi definido por Horton (1945) com a denominação de *stream frequency*. O objetivo deste índice é comparar a frequência de cursos de água existentes em uma área de tamanho padrão e pode ser calculada por:

$$Dh = A/N \quad (4)$$

O índice de densidade hidrográfica [eq. 5] representa o número de canais existentes em cada quilômetro da bacia, indicando o potencial hídrico da região (ALVES e CASTRO, 2003). A densidade da drenagem (Dd) é a razão entre o comprimento total dos canais (L) e a área da bacia (A) e "tem o significado do quanto os processos climáticos atuantes na área influenciam no fornecimento e transporte de material detrítico" (ALVES e CASTRO, 2003).

$$Dd = L/A \quad (5)$$

A importância dos estudos sobre a densidade da drenagem remete-se à descrição e comparação entre áreas distintas.

Para a realização dos cálculos de parâmetros combinados da bacia, buscou-se analisar o índice de circularidade (Ic) [eq. 6]. Ele foi proposto por Miller (1953) e representa a relação entre a área total da bacia (A) e a área do círculo de perímetro igual ao da bacia considerada (A_c). Para Alves e Castro (2003), este índice indica o escoamento e a probabilidade de cheias existentes numa determinada bacia hidrográfica.

$$Ic = 12,57 * A / P^2 \quad (6)$$

Após a realização das análises morfométricas das 73 sub-unidades da bacia do ribeirão do Peixe, foram correlacionados os elementos morfométricos por intermédio do coeficiente de correlação de Pearson. O intuito do emprego dessa técnica foi verificar possíveis relações físicas existentes entre os elementos morfométricos de cada sub-unidades hidrográficas do ribeirão do Peixe. Os resultados obtidos com essa técnica serviram como matrizes de dados, utilizadas dentro da análise de agrupamento representada pela figura 5.

O método empregado para a realização do agrupamento das sub-unidades da bacia foi a *análise de cluster hierárquico*, usando as tradicionais distâncias euclidianas. Essa etapa do artigo foi elaborada com o auxílio do aplicativo *Statistica*⁶. *Um dendrograma síntese serviu para* representar os *clusters* gerados (JOHNSTON, 1968), também utilizando o mesmo aplicativo. Esse dendrograma foi essencial na identificação precedente aos processos de classificação das 73 sub-unidades da bacia do ribeirão do rio do Peixe. Para Metz e Monard (2005) o dendrograma permite analisar os *clusters* em diferentes níveis de granularidade.

Após a obtenção do dendrograma foi possível classificar as 73 sub-unidades em 5 grandes grupos e uma unidade. Essa unidade e esses grupos foram espacializados num produto cartográfico. Essa mesma metodologia de classificação já fora aplicada em outras áreas do conhecimento, como mostra Silva *et al.* (2006). Contribuindo aos processos de classificação no produto cartográfico final, utilizou-se fotografias aéreas para descrição de algumas características encontradas nas áreas de cabeceira da bacia do ribeirão do Peixe, no intuito de qualificar a classificação de algumas sub-unidades da bacia. Além disso, o uso das fotografias aéreas permitiu a extração visual de todos os cursos d'água

RESULTADOS

Usando os critérios de Strahler (1977) na hierarquização de bacias, foram encontradas 45 sub-unidades com cursos até primeira ordem, 16 com cursos até segunda ordem, 7 com cursos até terceira ordem, 4 com cursos até quarta ordem e apenas 1 sub-unidade com cursos até de quinta ordem, como mostra a figura 3.

A realização do produto cartográfico representado na figura 3 foi primordial para o desenvolvimento das demais etapas. Com este produto e com o auxílio do aplicativo Global Mapper, mensurações como: comprimento de rios, área, perímetro e raio da bacia do ribeirão – e de suas 73 sub-unidades – foram adquiridas e aplicadas aos testes morfométricos já descritos dentro da metodologia do trabalho.

Os métodos de análise para a obtenção das representações morfométricas das sub-unidades geraram um enorme conjunto de dados, os quais foram correlacionados e submetidos às análises do método de *cluster hierárquico*. Os resultados obtidos com essa análise podem ser observados pelo dendrograma da figura 4.

⁶ O *software* Statistica é marca registrada da StatSoft, Inc. USA

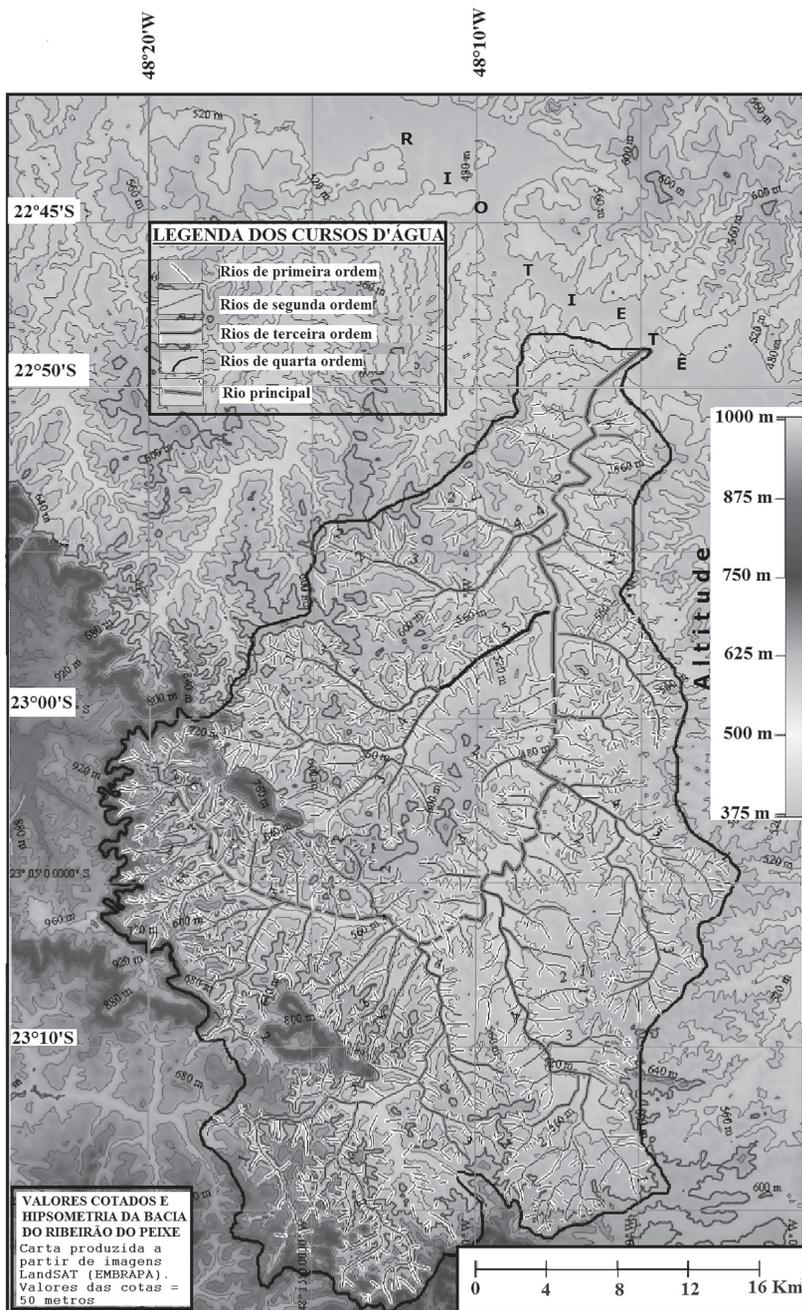


Figura 3 - Carta hipsométrica e a hierarquia dos cursos da rede de drenagem da bacia do ribeirão do Peixe/SP

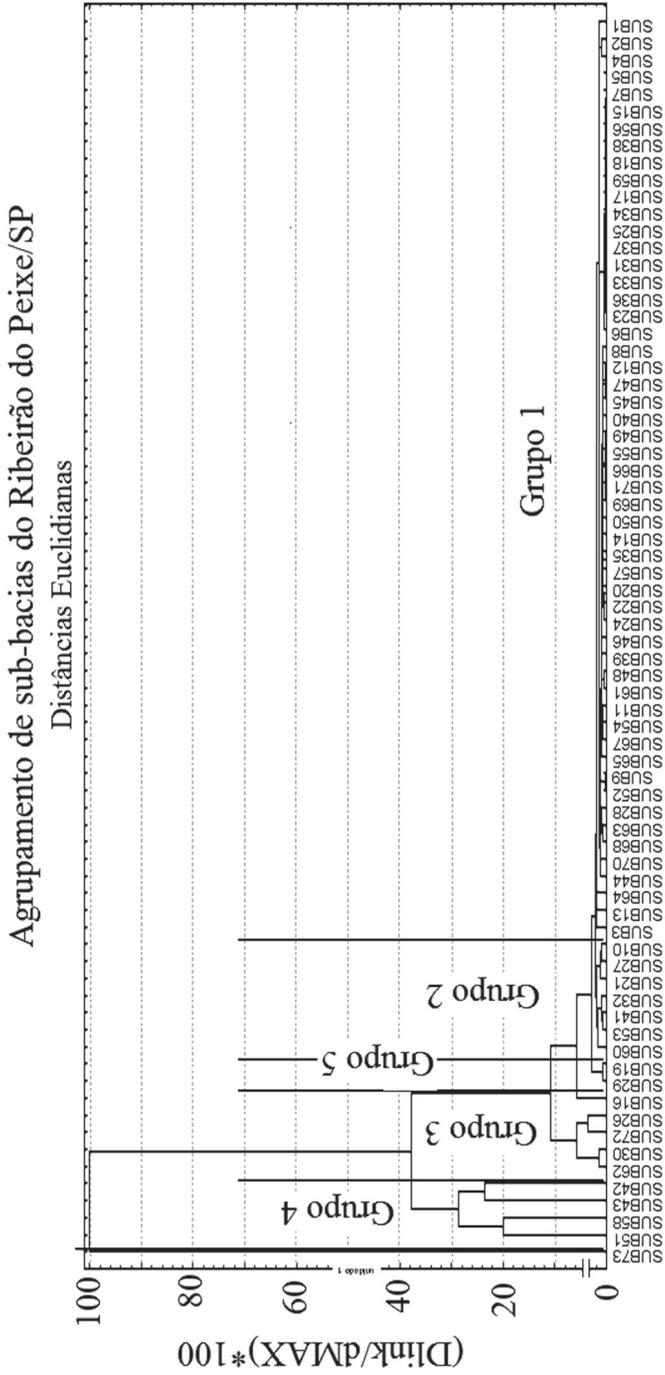


Figura 4 - Dendrograma dos clusters obtidos após a correlação dos elementos morfométricos da 73 sub-unidades da bacia do ribeirão do Peixe/SP

O dendrograma mostrou a presença de 5 grupos e apenas uma unidade. Os grupos formados a partir da análise de *cluster* dos valores de correlação apresentaram características reais muito aproximadas, constituindo desta forma, uma ferramenta de análise relevante para a classificação de sub-bacias hidrográficas e de uso plausível em possíveis estudos de planejamento e gestão de sub-unidades hidrográficas. Entretanto, acredita-se que para tal função outros elementos do meio natural devam ser incorporados às análises de correlação e de *cluster*. A sugestão é incorporar elementos como: característica do solo, declividade do relevo, estrutura geológica, índice de ocupação ou transformação do meio natural, índices de erosividade e de erodibilidade.

Os grupos e a unidade obtidos no dendrograma foram cartografados num produto e nomeados de acordo com suas particularidades, como mostra a figura 5. Os critérios utilizados para tal nomeação foram os baseados na estruturação da organização hierárquica das sub-bacias e, de acordo com os resultados e, sobretudo, o significado qualitativo que cada elemento morfométrico representa para as sub-unidades hidrográficas.

Os grupos e unidade da bacia do ribeirão do Peixe apresentam as seguintes características:

Grupo 1 – Bacias de ordem composta: constituídas por mais de 90% de cursos de primeira e segunda ordem. Área quadrada com mínimo de 2 mil km² e máximo de 10 mil km². Bacias com, no máximo, 12 rios de primeira ordem com extensão de, no máximo, 600 m e 3 rios de segunda ordem com rios que atingem até 2000 m de comprimento. Bacias com a presença rara de rios que atingem a terceira ordem. Bacias em que os valores máximo e mínimo da densidade da drenagem de 1,71 e 0,917, respectivamente. Índices de circularidade acima de 1,2 para todas as unidades. Observa-se nas áreas mais próximas às escarpas da *cuesta* que alguns rios de primeira ordem são de gênese pluvial, além de apresentar áreas com topos estreitos, vertentes retilíneas, vales em “V” recobertos por mata galeria e com algumas áreas com disputa de captação da drenagem.

Grupo 2 – Bacias de ordem simplificada: constituída por todos os cursos de primeira ordem e que possuem extensões médias de 1100 m e valores máximos de 2000 m. As áreas onde se inserem estas bacias possuem valores máximos de 3,8 mil km². Bacias em que a densidade de drenagem é em muito baixa (0,016), índice de circularidade mínimo de 1,2 e máximo de 2,16 e os valores de densidade hidrográfica médio de 0,49 canal por km². Observa-se nas áreas mais próximas às escarpas das *cuestas* a presença de alguns topos mais rebaixados, alongados com a presença rara de encosta do tipo côncavo-retilíneo-convexa. Nessas regiões observa-se, também, a presença de planícies, áreas de pastagem, de plantio de culturas intermitentes e largas faixas de topos com solo exposto.

Grupo 3 – Bacias de ordem composta com baixo grau de complexidade: Todos os cursos de água das bacias deste grupo atingem a terceira ordem e começam a surgir cursos de quarta ordem. Os rios de primeira ordem têm extensão máxima de 1000 m e mínima de 400 m. Os rios de segunda ordem atingem valores máximo de 2000 m e mínimo de 1200 m e os cursos de terceira ordem atingem extensões máxima de 7000 m e mínima de 2200 m, aproximadamente. Os cursos que surgem enquadrados como de quarta ordem apresentam extensão acima dos 2500 m. Os valores máximo e mínimo da área nesse grupo atingem os 85,5 mil km² e os 16 mil km², respectivamente. Os índices de circularidade são mínimo de 1,0 e máximo de 1,8. A densidade da drenagem é em média 0,5 canal por km². Observa-se nas áreas mais próximas às escarpas das *cuestas* a presença de rios de segunda ordem com meandros, morros rebaixados, topos curtos e vertentes côncava-convexas e convexa próximo ao curso principal do ribeirão do Peixe.

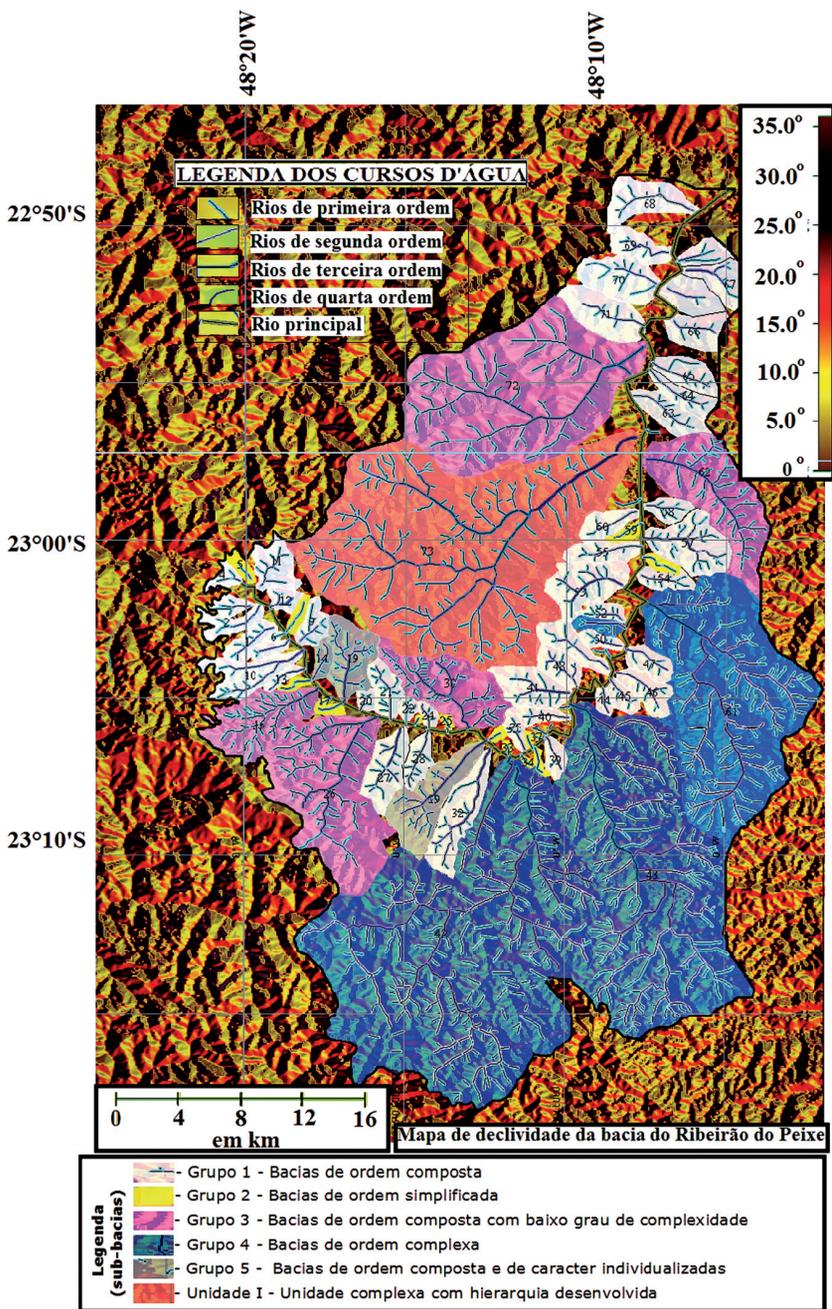


Figura 5 - Classificação hierárquica das sub-unidades hidrográficas da bacia do ribeirão do Peixe/SP

Grupo 4 – Bacias de ordem complexa e de uniformidade parcial: Todas as unidades deste grupo são cursos de quarta ordem com comprimento máximo de 12.000 m e mínimo de 2110 m. Os cursos de primeira ordem podem ser considerados como uniformes pelo fato de atingirem extensões máxima de 1200 m e mínima de 1100 m. Os de segunda ordem possuem comprimento entre 1000 a 2000 m. Os cursos de terceira ordem também podem ser considerados com cursos com extensão uniforme. Seus valores mínimos e máximos são 2475 m e 2500 m, respectivamente. Os valores máximo e mínimo da área quadrada da bacia são de 128 mil km² e 195 mil km², respectivamente. A densidade da drenagem média é de 2,0 km/km² e a densidade hídrica é de 1 canal/km². Os índices de circularidade apresentam valores máximos de 1,33 e mínimos de 0,88.

Grupo 5 – Bacias de ordem composta e de caráter individualizado: O caráter individualizado é garantido pelo fato das áreas de nascentes dessa bacia estarem associadas com os relevos testemunhos das regiões das *cuestas*, como se observa na figura 4. Um outro fator importante é a relação entre extensão dos cursos de terceira ordem e a área da bacia em que se insere os mesmos. Esses cursos chegam até 5000 m e a área da bacia atinge o máximo de 11 mil km² e mínimo de 9 mil km². Essa relação, em termos proporcionais, difere das outras áreas/grupos em que há cursos de terceira ordem, como é o caso do grupo 3, por exemplo. Os cursos de primeira ordem chegam a extensão de 500 metros em média. As bacias apresentam dois rios de segunda ordem com comprimentos de 1000 m cada. A densidade hídrica da bacia é de 0,5 canal/km² e a densidade da drenagem se enquadra dentro da categoria mediana. O índice médio de circularidade é de 1,3.

Unidade I – Unidade complexa com hierarquia desenvolvida: Esta sub-unidade, constituiu-se como a mais complexa hierarquia da bacia do ribeirão do Peixe. O nível hierárquico atinge ao quinto nível com extensão territorial de mais de 7000 m. A unidade possui mais de 100 tributários de primeira ordem com extensão acima dos 1000 m. Mais de 25 tributários são de segunda ordem com comprimento acima dos 2100 m. Os tributários de terceira ordem são em número de 10 com valores médios acima dos 2200 m e apenas 2 cursos tributários são de quarta ordem com extensão acima dos 5300 m. A área da bacia é de mais de 150 mil km². O índice de circularidade da bacia é de 1,3, o que caracteriza uma bacia com forma quase circular e que favorece os processos de inundações. O valor médio da densidade da drenagem é de 2 km/km², e apresenta característica de densidade média de drenagem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego da metodologia descrita mostrou ser uma ferramenta de análise estatística satisfatória para estudos que visam classificar sub-bacias hidrográficas. Entretanto, a associação de tal metodologia com as observações feitas a partir de fotografias aéreas contribuiu para que as unidades classificadas tivessem um viés mais qualitativo. No entanto, as descrições de ordem qualitativa só foram possíveis para os grupos I, II e III. Nos demais, a indisponibilidade de fotografias aéreas fez com que as análises não tivessem um viés tão qualitativo. Observou-se que o índice de circularidade de quase todos os grupos classificados apresentaram-se acima de 0,51, o que representaria, de acordo com Alves e Castro (2003), bacias com o formato aproximadamente circular e com favorecimento aos processos de inundações em temporadas de chuva.

A relevância deste índice e destas informações é algo primordial dentro das análises morfométricas das sub-unidades de bacias hidrográficas, pois a partir dele,

órgãos de planejamento das administrações públicas municipais poderão elaborar planos de zoneamento dos espaços agrícolas e urbanos, visando um “equilíbrio” social e ambiental com o intuito de minimização de perdas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao laboratório de Aerofotogeografia e Sensoriamento Remoto (LASERE) da Universidade de São Paulo e a Professora Doutora Rosely Pacheco Dias Ferreira da Universidade de São Paulo (USP/FFLCH) pelo empréstimo de todo o material cartográfico, teórico e trabalho de campo realizado durante a disciplina da pós de 2010.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A.N. Regiões de circundesnudação Pós-Cretácea, no Planalto Brasileiro. **Boletim Paulista de Geografia**. n. 1, p. 3-21, 1949.
- ALMEIDA, F.F.N. de. Relevo de “Cuestas” na Bacia Sedimentar do Rio Paraná. **Boletim Paulista de Geografia**. n. 3, p. 21-33, 1949.
- ALMEIDA, F. F. M. Os Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. **Boletim do Instituto Geográfico e Geológico do Estado de São Paulo**, n. 41, p. 167-262, 1964.
- ALVES, J.M. de P.; CASTRO, P. de T.A. 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**. v. 33, n. 2, p. 117-124, 2003.
- CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.l.]. 2005. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em 10 dezembro 2009
- CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica das bacias hidrográficas. **Boletim Geográfico**. Rio de Janeiro, v. 30, n. 220, p. 131-159, 1971.
- CHORLEY, R.J.; SCHUMM, S.A.; SUDFEN, D.E. **Geomorphology**. London: Methuen.1984. 607p.
- DAVIS, W.M. The geographical cycle. **The Geographical Journal**. v. 14, p. 481-504, 1899.
- GILBERT, G.K. **Report on the Geology of the Henry Mountain**. Washington, D.C.: Department of the Interior, U.S.Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region. 1877, 27p.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basis: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**. v. 56, p. 275-370, 1945.
- IPT – **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Volume III. São Paulo: IPT, 1981.
- JOHNSNTON, R.J. Choice in classification: the subjectivity of objectivity methods. **Annais of Assoc. American Geographers**. Washington, v. 58, n. 3, p. 575-589, 1968.

METZ, J.E.; MONARD, M. C. Clustering hierárquico: uma metodologia para auxiliar na interpretação dos clusters. CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, 25, 2005. Disponível em: <www.sbc.org.br/bibliotecadigital/download.php?paper=376>. Acesso em: 13 janeiro 2010.

MILLER, V. C. **A quantitative geomorphic study os drainage basin characteristic in the Clinch Mountains area.** Department of Geology, Columbia University. 1953. 51p.

OLIVEIRA, S.N. de, CARVALHO JUNIOR, O.A., SILVA, T.M. da, GOMES, R.A.T., MARTINS, E.S., GUIMARÃES, R.F. e SILVA, N.C. da. Delimitação automática de bacias de drenagem e análise multivariada de atributos morfométricos usando Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente corrido. **Revista Brasileira de Geomorfologia.** UGB. n.1, p. 3-21, 2007.

PLAYFAIR, J. **Illustrations of the Huttonian theory of the earth.** Edinburgh: Cadell, Davies, and William Creech, 1802. 528p.

SILVA, C.B., SANT'ANNA NETO, J.L., TOMMASELLI, J.T.G. PASSOS, M.M. Dinâmica atmosférica e análise geoestatística do clima na área de integração paisagística "Raia Divisória" SP/PR/MS: uma proposta de tipologia climática. **Revista Brasileira de Climatologia.** ABClima. v.2, p. 53-70, 2006.

SOARES, P.C. e FIORI, A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em Geologia. **Not. Geomorfol.** Campinas, v. 16, n. 32, p. 71-104, 1976.

SODRÉ, R.V.R., CARVALHO JUNIOR, O.A., MACHADO, W.P., OLIVEIRA, S.N. de, GOMES, R.A.T., GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO, A.P.F. de; MARTINS, E.S. Classificação de bacias de drenagem do Alto Jequitai (MG) a partir de análise de Componentes Principais e análise de grupos. **Revista Brasileira de Geomorfologia.** UGB. n.2, p. 73-86, 2007.

STRAHLER, A.N. **Geografía Física.** Barcelona: Editora Omega. Terceira edição. 1977. 636p.

Recebido em junho de 2014

Revisado em outubro de 2014

Aceito em novembro de 2014