

Aplicação da caracterização morfométrica com dados SRTM para análise de enchentes em microbacias urbanas

Application of SRTM data for geomorphometric characterization of urban watersheds

Cassiane Jayrj de Melo Victoria Bariani *
Nelson Mario Victoria Bariani **

Resumo:

Parâmetros morfométricos foram utilizados para a análise de duas microbacias urbanas em Itaqui, RS, visando identificar fatores de impacto para fins de planejamento com foco no problema das enchentes. Os limites das microbacias e os canais da rede de drenagem foram traçados combinando o uso de um algoritmo de detecção de fluxo em dados SRTM e a edição vetorial de imagens de alta resolução do satélite CBERS 4 no SPRING GIS. Os parâmetros morfométricos foram calculados usando ferramentas de operações métricas e medidas de classe. A microbacia do Olaria apresentou valores de fator de forma, coeficiente de compactidade, ordem e sinuosidade com características que favorecem o rápido avanço ou escoamento das águas. Há uma maior tendência à permanência das águas na microbacia do Cambaí, verificada em imagens dos satélites Landsat 5 e 8 em épocas de enchente.

* Doutoranda em Ciência do Solo na UFSM.

** Professor Doutor da Universidade Federal do Pampa

Abstract:

Global altimetry data from the SRTM mission was used as a basis for comparative morphometric characterization of two urban watersheds from Itaqui, Rio Grande do Sul, Brazil. The boundaries of the watershed, and the channels of the drainage network, have been traced combining the use of an automatic flow detecting algorithm, and vector editing capabilities applied on satellite images (CBERS 4, PAN5M Sensor), using SPRING GIS. The morphometric parameters were calculated based on information obtained in the thematic and vector layers of the database created in a Geographic Information System (GIS). The results show a greater tendency to water accumulation in the Cambaí watershed, which was verified by observing Landsat 5 and Landsat 8 satellites images in times of flood. The Olaria watershed had values of shape factor, compactness coefficient, stream order and sinuosity that suggest a more rapid flow of rainwater or flood water through the basin, incremented by the influence of urbanization.

Palavras-chave:

Sensoriamento Remoto,
Altimetria,
Gestão de Microbacias,
Enchentes

Key-Words:

Remote Sensing,
Altimetry,
Watershed Management,
Flood

INTRODUÇÃO

A geomorfometria refere-se ao estudo do relevo feito sob abordagem numérica, baseada na mensuração de características geométricas da configuração tridimensional da superfície do terreno (VALERIANO e ALBUQUERQUE, 2010). As relações topológicas do escoamento da água, assim como as características de relevo podem ser avaliadas por meio desse tipo de estudo.

Embora as funções e fórmulas utilizadas para calcular os parâmetros morfométricos são bastante conhecidas, sua utilização na escala de microbacias ficou limitada no passado pela baixa densidade de dados altimétricos geralmente disponíveis nesta escala. Um dos motivos foi o alto custo e complexidade logística das missões topográficas a campo. Esta limitante começou a ser diminuída a partir da disponibilidade de dados de altimetria fornecidos por técnicas de sensoriamento remoto.

Em particular, a fonte de dados utilizada neste trabalho, oriunda da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) da NASA no ano 2000, permitiu a obtenção de um modelo digital de elevação para boa parte da superfície terrestre (FARR et al., 2007). As medições SRTM foram feitas num curto período de tempo, conseguindo uniformidade de processamento e boa precisão, transformando o modelo obtido numa ferramenta de grande valor para estudos comparativos, com tal que se levem em consideração as limitações da metodologia utilizada. Mesmo assim, como este trabalho não aprofunda na verificação das limitações dos dados SRTM na região sob análise, ele pode ser considerado um trabalho de caráter exploratório, para geração de mapas hipsométricos expeditos com a finalidade de análise de efeitos das enchentes.

Os dados SRTM apresentam aplicabilidade no planejamento e gestão ambiental, assim como em projetos de manejo de bacias hidrográficas, zoneamentos ecológicos, programas de conservação de florestas e do solo, dentre outros (ANDRADES FILHO et al., 2011). No Brasil, os dados originais foram aprimorados pela EMBRAPA e organizados para distribuição com resolução espacial de 90 m. Também o projeto Topodata do INPE (VALERIANO et al., 2010) fornece dados aprimorados, em matrizes com pixels de 30 m, além de uma boa discussão sobre as virtudes e limitações dos

mesmos. Os dados altimétricos SRTM são fornecidos com referência ao datum vertical EGM96 (Earth Gravitational Model 1996) e o datum horizontal WGS84. Trata-se então de alturas ortométricas com relação ao elipsoide mencionado.

A organização das informações sob uma divisão em microbacias permite acompanhar os fenômenos através de uma subunidade mais adequada aos modelos hidrológicos. Sendo a água um componente presente em todas as atividades humanas, consegue-se nesta escala manter um vínculo mais claro com os diversos usos do solo e da água, o que facilita o entendimento dos processos em andamento (BOCKHEIM et al., 2005). Alguns destes podem ser caracterizados como problemáticos, incluindo assoreamentos, enchentes, desmatamentos, contaminação pontual e difusa, perda de fertilidade do solo dentre outros.

Nas microbacias urbanas existe maior concentração de pessoas, moradias, e atividades industriais ou comerciais, que modificam qualitativa e quantitativamente os parâmetros físicos e químicos que descrevem o comportamento da água. Na parte rural destas microbacias, acontece também intensa atividade agrícola, facilitada pela proximidade com o centro urbano (BARIANI et al., 2013a, b, c).

Em particular, a intensa modificação antrópica das microbacias urbanas altera as características originais da rede de drenagem e escoamento das águas. As características morfométricas da microbacia devem ser discutidas, neste caso, levando em consideração os efeitos destas modificações nos padrões originais.

As interpretações dos parâmetros que caracterizam as microbacias devem assimilar elementos das mudanças antrópicas históricas ou em andamento, para poder fornecer conclusões válidas vinculadas a fenômenos como as enchentes.

A região de estudo, rica em recursos hídricos, vem apresentando uma frequência maior de enchentes durante o avanço desta década. A partir de 2006, o número de enchentes tem aumentado, causando danos à atividade agrícola e à população urbana.

O motivo das enchentes na região é o aumento da cota do Rio Uruguai, e não está associado, na grande maioria dos casos, a precipitações nas microbacias locais. Este aspecto deve ser levado em consideração na hora de analisar os parâmetros morfométricos, pois a elevação de cota acontece em sentido inverso ao percurso

da água acumulada por precipitações.

Por outro lado, a região ainda está insuficientemente analisada por trabalhos científicos em nível de microbacias, que possam contribuir no planejamento de estratégias para prevenir danos. Nesse sentido, uma vez que os dados SRTM são fornecidos livremente através de imagens, e que as ferramentas usadas para medição e cálculo correspondem a software livre, estabelece-se um valor de aplicabilidade do presente trabalho em pequenos municípios e prefeituras ou equipes com recursos limitados para a gestão ambiental.

Mediante o uso de sistemas de informação geográfica (SIG) o processamento e a gestão das informações referentes a solos e as águas se dão de maneira mais rápida e facilitada. Em particular, os SIG se adaptam bem à caracterização morfométrica (WAIKAR e NILAWAR, 2014). Um campo de aplicação desta tendência é na administração do uso da água realizada em Comitês de Gerenciamento de Bacias Hidrográficas, atualmente vigente no Brasil.

A delimitação das microbacias hidrográficas e a vetorização da rede de drenagem são os procedimentos iniciais executados em análises hidrológicas ou ambientais. Para isso, tem sido comum no passado a utilização de informações de relevo em formato analógico, como mapas e cartas, cuja resolução está geralmente limitada pelos orçamentos disponíveis para as saídas a campo das equipes encarregadas dos levantamentos planialtimétricos.

A medição individual, ponto a ponto, pode proporcionar uma qualidade de dados superior, mas por outro lado favorece um acúmulo de incertezas, inerentes aos procedimentos manuais, aumentando a probabilidade de erros de diferentes tipos (CARDOSO et al., 2006). Em outras palavras, o alto custo das medições a campo para determinação das isolinhas de relevo acaba limitando a densidade do mapeamento ou a composição das equipes, e, ainda, a metodologia manual pode aumentar a probabilidade de vários tipos de erros, e a incerteza do procedimento.

Diferentemente do exposto no parágrafo anterior, a missão SRTM, usou metodologias baseadas na interferometria de ondas de radar utilizando procedimentos tais que minimizaram as incertezas relativas nas medições altimétricas, trazendo desta forma um bom avanço em termos da qualidade dos dados altimétricos disponíveis globalmente.

Informações do relevo estavam antes limitadas, para o usuário geral, às cartas topográficas da Diretoria do Serviço Geográfico do Exército (DSG, ex: Folha Itaqui – SH.21–X–C-2, MI-2942/2, na escala de 1/50000). Estas cartas, de grande valor, podem ser usadas como referência para calibrar a altura nas imagens SRTM, se necessário. Assim também, pontos da rede geodésica podem ser usados.

Segundo Farr et al., 2007, a qualidade dos dados SRTM obtidos extrapolou, inclusive, as expectativas dos engenheiros e responsáveis técnicos que planejaram a missão, em termos de resolução e incerteza. A resolução espacial de 90 m do pixel das imagens SRTM, e a resolução máxima de 1-5 m para o relevo no caso do Brasil (CARVALHO, 2009), permitiram um avanço tecnológico na área de representação tridimensional.

Consequentemente foi facilitado o surgimento de formas digitais consistentes de representações do relevo, como os Modelos Digitais de Elevação (MDE), mesmo em regiões anteriormente não atingidas pelos levantamentos topográficos do exército. No caso do modelo SRTM, a elevação de um ponto geográfico está referida à efetiva elevação dos elementos aí existentes (árvores, prédios, vegetação), pois o radar reflete no topo desses elementos, registrando assim sua altura.

Além disso, a disponibilidade de dados em formato digital de imagem, equivale a trabalhar com matrizes de 3 colunas contendo, por exemplo, as coordenadas geográficas e a elevação com relação a um referencial. Este formato facilitou naturalmente a aplicação de métodos automáticos de cálculo, com por exemplo para delimitação de microbacias e rede de drenagem, hoje bem estabelecidos (DIKAU, 1990), e que foram revalorizados por disporem de um conjunto de dados de boa qualidade em nível global.

Segundo Valeriano (2008), na forma trivial, os MDE são arquivos que contêm registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas, como uma imagem com um valor de elevação em cada pixel. O processamento destes dados em SIG permite ampliar a caracterização do estado do sistema terrestre e facilita o uso de informações cruzadas para a identificação de processos ambientais em andamento (VALERIANO e ROSSETI, 2010).

Diante do exposto, o presente trabalho objetivou caracterizar geomorfometricamente duas microbacias hidrográficas que contém a área urbana da sede do Mu-

nicípio de Itaqui, RS, com vistas a analisar o comportamento destas regiões em caso de enchentes.

A caracterização foi realizada mediante cálculos que estão baseados nas informações extraídas por um SIG no processamento de dados SRTM complementado por cartas topográficas e imagens de satélite da região dentro de banco de dados geográfico criado para esse fim.

As características geomorfométricas foram estabelecidas a partir da estimativa de alguns parâmetros físicos, como: coeficiente de compacidade, fator de forma, ordem dos cursos d'água, densidade de drenagem, extensão média do escoamento superficial, sinuosidade do curso d'água, declividade e hipsometria, levando em consideração as características que o ambiente urbano possa imprimir aos mesmos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo abrange uma área correspondente a duas microbacias hidrográficas situadas no município de Itaqui, na Fronteira Oeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A área urbana ocupa uma parte de cada uma delas, e é limitada ao norte pelo rio Uruguai, ao leste pelo arroio Cambaí e seu tributário arroio Chocolate, e a oeste pelo Arroio Olaria (Figura 1).

A região possui clima subtropical, relevo plano a suave ondulado, vegetação rasteira de gramíneas características dos pampas, e com predomínio de luvisolos e chernossolos. A cultura do arroz consorciada com pecuária predomina em termos de uso do solo (EMBRAPA, 2005).

2.2 Características geomorfométricas das microbacias hidrográficas

Para a obtenção das informações necessárias para a caracterização geomorfométrica das microbacias utilizou-se o software SPRING na sua versão 5.1.5 e posteriores, disponível no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CÂMARA et al., 1996). Os cálculos de parâmetros foram realizados em planilhas eletrônicas.

Foram usados dados da missão SRTM, obtidos por meio da imagem SH-21-X-C disponível na Internet

(EMBRAPA, 2012). Também foram utilizadas imagens do sensor TM do satélite Landsat 5, o sensor OLI DO Landsat 8 e do sensor PAN5M do satélite CBERS 4, disponíveis no site do INPE. Reconhecimentos a campo, incluindo registros fotográficos georreferenciados das feições do terreno, também formaram parte do banco de dados criado. Mapas de uso da terra foram obtidos por procedimentos de classificação supervisionada. Essas informações complementares foram importantes para a discussão e conclusões deste trabalho.



Figura 1: Mapa de localização da área de estudo - América do Sul - Brasil - Rio Grande do Sul - Município de Itaqui - Microbacias dos Arroios Olaria, Cambaí e Chocolate.

De posse dessas informações e por meio de geoprocessamento foi possível delimitar as microbacias, extrair automaticamente a rede de drenagem, ajustá-la por meio de edição vetorial e criar os mapas de hipsometria e declividade do terreno.

Segundo Tomazoni (2013) o algoritmo utilizado para extração automática de redes de drenagem presente no software SPRING foi desenvolvido por Soille e Gratin (1994). No SPRING, através do método de interpolação média ponderada por cota e quadrante, foram geradas grades regulares que permitiram a geração de grades hidrológicas, definindo valores de direção de fluxo e valores de fluxos acumulados, em que cada pixel guarda a informação sobre os pixels anteriores no fluxo. A rede de drenagem é definida sobre a grade de fluxos acumulados, que é convertida para imagem com a opção de níveis de cinza, para visualizar o resultado.

O resultado foi ainda convertido para uma representação vetorial, na qual a rede de drenagem pode ser corrigida de falhas ocorridas durante a extração au-

tomática. Na imagem SRTM, o limite das microbacias foi realizado com base nas isolinhas de elevação, desenhando manualmente os divisores de águas por meio de um traço perpendicular às cotas, atravessando os círculos das isolinhas nas cotas mais altas.

A vetorização é um procedimento no qual a posição dos pontos correspondentes a uma imagem, neste caso as linhas do perímetro ou da rede de drenagem, são memorizados em forma de coordenadas e equações matemáticas. Uma vez vetorizado o perímetro das microbacias no programa SPRING, o mesmo fornece opções para operações métricas. Isto deve ser realizado dentro de um modelo de dados, dentre os vários formatos possíveis, que permita operações vetoriais, como é o caso do modelo temático. Os planos de informação temáticos se caracterizam por associar uma cor ou textura a cada ponto do espaço de acordo com classes pré-definidas pelo usuário. Eles são compatíveis com a edição vetorial, fornecendo informações sobre área e perímetro por meio da opção de “medidas de classe”, que fornece, desta forma, dados sobre a camada vetorial desenhada pelo usuário ou pelos algoritmos automáticos utilizados em alguma parte do processo.

Para completar o procedimento de edição vetorial foi utilizada a sobreposição da rede de drenagem às imagens i) SRTM, ii) das cartas topográficas e iii) das imagens de satélite incluídas dentro do SIG criado sobre a região.

Morfometria da microbacia hidrográfica

Após o geoprocessamento obteve-se diferentes características físicas, como: área das microbacias, perímetros, coeficiente de compactidade, fator de forma, ordem dos cursos d'água, densidade de drenagem, extensão média do escoamento superficial, sinuosidade do curso d'água, declividade e hipsometria.

Coefficiente de compactidade (K_c)

Quanto mais irregular for uma microbacia, maior será seu perímetro comparado com um círculo da mesma área, o que leva ao aumento do coeficiente de compactidade, definido como

$$K_c = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{P}{\sqrt{\pi \cdot A}}$$

sendo P o perímetro (m) e A a área de drenagem (m²).

Quanto mais próximo da unidade for o K_c , maior é a eficiência da microbacia para coletar água de chuva ou pelo avanço de uma enchente.

Fator forma

Quanto menor for a relação de áreas entre a microbacia e um quadrado cujo lado é o comprimento do percurso mais longo (seguindo-se o curso d'água desde a cabeceira da microbacia até a desembocadura), “L”, mais alongada longitudinalmente será a mesma, servindo assim para definir o fator de forma adimensional, K_f

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Quanto maior o fator de forma, maior poderá ser a predisposição a enchentes e alagamentos, por ter uma área de captação transversal grande direcionada para um curso d'água curto.

Ordem

A ordem dos rios reflete o grau de ramificação dentro de uma bacia, estando assim relacionada com sua capacidade de captação de águas superficiais. Para obtê-la, foi seguida a metodologia de Strahler (1957), designando-se todos os afluentes que não se ramificam como sendo de primeira ordem; os trechos que recebem afluentes de primeira ordem como de segunda ordem e assim por diante. Isto foi realizado diretamente na camada vetorial da rede de drenagem no banco de dados criado. Porém, considerações sobre a influência da rede de drenagem urbana dentro das microbacias devem ser acrescentadas nas discussões.

Densidade de drenagem

A distância total percorrida pela água dentro dos canais dos cursos de água da bacia, L_t , se relaciona com a velocidade de escoamento da mesma e assim com a eficiência de drenagem. O índice pode ser complementado com a densidade de canais por área. As unidades são (km/km²):

$$D_d = \frac{L_t}{A}$$

sendo Dd - densidade de drenagem, e A - área da bacia analisada. Os valores foram obtidos por edição vetorial.

Extensão média do escoamento superficial

Transformando matematicamente nossa bacia num retângulo da mesma área, com seu eixo central igual à soma dos comprimentos dos rios da bacia ($L = \sum l_i$), e calculando a distância média que a água teria que escoar sobre o retângulo para atingir o eixo central, obtém-se uma estimativa da distância média do escoamento superficial da água de chuva na bacia, l , em km:

$$l = \frac{A}{4L}$$

sendo A a área de drenagem (km^2) e L a soma dos comprimentos de todos os cursos hídricos em km.

Sinuosidade do canal principal

A sinuosidade, Sin , é calculada como a razão entre a distância que une o ponto inicial e final do canal de drenagem principal, L , da bacia, medida sobre o curso do mesmo, e a distância em linha reta entre os mesmos, L_t . Trata-se de um parâmetro adimensional:

Quanto maior a sinuosidade, maior é a resistência ao escoamento.

$$Sin = \frac{L}{L_t}$$

Hipsometria e declividade

A hipsometria representa o estudo da elevação do terreno com relação a um nível de referência pré-estabelecido. A imagem SRTM indica a elevação por meio da tonalidade do pixel, e pode ser convertida numa matriz numérica, contendo nos seus elementos a elevação de cada pixel ou conjunto de pixels da imagem original.

A declividade pode ser calculada como a razão entre a diferença de elevação de dois pixels e a distância entre eles, geralmente expressa em porcentagem, de zero a infinito. A declividade dos terrenos de uma

microbacia determina a componente da força gravitacional que atua sobre a água, afetando a velocidade da mesma.

A caracterização hipsométrica, neste trabalho, consistiu na determinação da altitude ortométrica de pontos situados sobre um plano de referência correspondente ao elipsoide do modelo EGM96, adotado como referência pela missão SRTM (FARR, 2007). Deve ser levado em consideração que as ondas de radar utilizadas não penetram a vegetação e edificações, estando estas incluídas na altitude medida.

Para os mapas de declividade e hipsometria foram feitos os seguintes procedimentos: i) A imagem SRTM, já georreferenciada, foi importada para o aplicativo SPRING; ii) A partir da mesma foi criada uma nova camada de informação no formato Modelo Numérico de Terreno, ou modelo de dados "MNT" que transforma a imagem num formato matricial mais adequado para cálculos, contendo a grade regular e as isolinhas de altitude. Foram geradas isolinhas de 1m de diferença; iii) a partir desse modelo foram geradas as grades de declividade e hipsometria, executando os cálculos já programados no menu MNT do SPRING; iv) posteriormente criou-se um Modelo de Dados "Temático", base dos mapas coloridos, e se definiu os intervalos das classes e suas cores; e v) executou-se o procedimento de fatiamento que relaciona os pixels com as respectivas cores, de acordo com os intervalos indicados anteriormente e que aparecem posteriormente na legenda.

Para visualização da tendência a enchente das microbacias, foram analisadas imagens do Satélite Landsat 5, das órbitas 224 e 225, que incluem a região sob estudo, nas datas de: 18/09/1989, 08/06/1990, 17/06/1990, 26/10/1997, 18/11/1997, 12/10/2001, 25/05/2005, 31/10/2008, 05/12/2009, 06/09/2011 e a imagem do satélite Landsat 8, nas mesmas órbitas, na data de 05/07/2014, em termos de áreas de inundação relativas das bacias. Também foi analisada a imagem CBERS4 correspondente ao sensor pancromático PAN5M do dia 23/10/2015.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1, 3 e 4 mostram os limites das microbacias sob estudo obtidos por edição vetorial conforme a metodologia. O contorno da cidade também é

apresentado na Figura 3, permitindo visualizar a região da mesma dentro das microbacias do Arroio Olaria e do Arroio Cambaí. As respectivas redes de drenagem naturais são apresentadas na Figura 2, junto com a ordem dos afluentes. A rede de esgoto da cidade também é apresentada na mesma Figura 2, pois foi considerada como parte da rede de drenagem nos cálculos de parâmetros morfométricos.

É importante a percepção de um resultado que precede à criação dos mapas da Figura 1 e seguintes, que é a criação de um banco de dados geográfico específico da região sob estudo dentro de um SIG (software SPRING), com os seguintes planos de informação georreferenciados principais: imagem SRTM, grade regular de altitude, rede de drenagem, limites urbanos e de microbacias, quadras, rede de esgoto, imagens Landsat TM, imagem CBERS 4/PAN5M, carta topográfica de Itaquí.

co de dados de um SIG específico da região sob estudo, o que transforma ele num resultado relevante desde o ponto de vista aplicado. Isto devido à grande carência de sistemas de organização das informações geográficas municipais. Por outro lado, o cruzamento de dados SRTM em conjunto com outros dados provenientes de imagens georreferenciadas e introduzidas no SIG, correspondentes a cartas topográficas do exército e imagens de satélite LANDSAT, ou CBERS permite a criação de camadas de informação de maior confiabilidade, pela condensação da informação de três fontes independentes, cada uma com limitações de diferentes tipos, num único mapa. Com relação ao uso de dados SRTM e procedimento de extração automática da rede de drenagem, verificou-se as observações de Valeriano (2008), no sentido que espera-se que os vetores de drenagens constituam redes, porém nem sempre isso acontece.

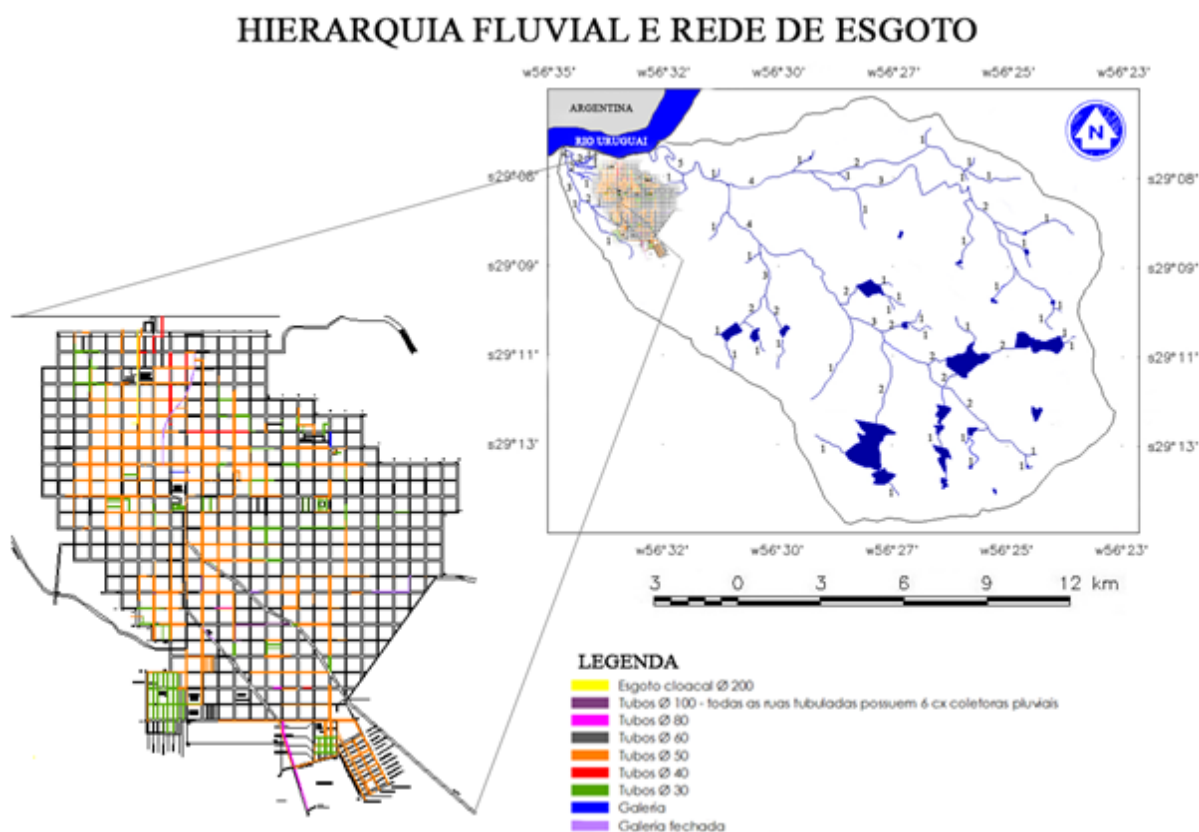


Figura 2 - As redes de drenagem natural traçada por edição vetorial e a rede urbana de esgoto e pluvial fornecida pela Prefeitura de Itaquí são apresentadas. Indica-se também a ordem dos afluentes segundo a classificação de Strahler. Ambas redes foram consideradas nos cálculos de parâmetros morfométricos.

O mapa apresentado na Figura II está constituído por camadas de informação vetoriais contidas num ban-

Cabe então ao operador a pronta interpretação da provável rede e sua digitalização em vetor. Por ou

tro lado, as imagens de satélite e o reconhecimento das regiões a campo, principalmente em área urbana, onde porções da rede podem estar ocultas, foram importantes para completar o traçado da rede hidrográfica.

A partir das camadas de informação disponíveis no SIG, mediante as fórmulas apresentadas na metodologia, aplicadas em planilhas eletrônicas, foram realizados os cálculos da caracterização morfométrica cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Pode ser verificado na Tabela 1 que a microbacia do Olaria é uma ordem de magnitude menor em área que a do Cambaí. No entanto, pode ser observado que as áreas urbanas correspondentes de cada uma são da mesma ordem, com a primeira sendo maior. Observa-se, nos limites de microbacia e urbano da Figura 3, que o Arroio Olaria interage mais fortemente com a área urbana, enquanto que o Arroio Cambaí interage mais intensamente com a área rural.

Tabela 1 - Características físicas das microbacias hidrográficas dos arroios Olaria e Cambaí.

Características Físicas	Microbacia Olaria	Microbacia Cambaí
Área de drenagem (km ²)	14,368	157,519
Área urbana (km)	7,065	2,677
Perímetro (km)	17,961	53,235
Coefficiente de compacidade, K _c	1,337	1,197
Fator de forma, K _f	1,158	0,379
Ordem fluvial	4	5
Densidade de drenagem (km/km ²)	3,627	1,07067
Extensão média do escoamento superficial (km)	0,069	0,220
Sinuosidade do curso d'água	1,009	1,186
Declividade máxima (%)	6	12
Declividade média (%)	3	3
Declividade mínima (%)	0,8	0,8
Altitude máxima (m)	97	114
Altitude média (m)	65	70
Altitude mínima (m)	40	46

O coeficiente de compacidade mostra que a microbacia do Olaria (K_c=1,337) se afasta mais da forma circular, alongando na direção NO-SE (Figura 3). Por esse motivo, a microbacia pode ter menor tendência a reter água proveniente de precipitação. Porém, esse fator pode ser compensado pelo fato da captação de água da microbacia acontecer em área urbana, menos permeável e com tubulações de escoamento rápido, podendo ter maior tendência para produzir alagamentos por acumulação rápida de água e transbordamento do canal. Por outro lado, ela é suscetível à entrada rápida de um pulso de onda de enchente na sua foz, pois sua forma é mais semelhante a um canal.

No caso da microbacia do Cambaí, esta se apresenta com características que propi-

ciam mais a acumulação de água no seu interior, com K_c = 1,197, mais próximo da unidade.

Segundo alguns autores como Cardoso et al., (2006) e Tonello et al., (2006), a análise do valor obtido pode-se resumir da seguinte forma: Cambaí, com 1,0 < K_c < 1,25 é uma bacia com maior propensão a acumulação de água, tanto em forma de chuvas quanto oriundas de um pulso de onda de enchente; Olaria, com 1,25 < K_c < 1,50 é uma bacia com tendência mediana a grandes enchentes, porém com influência da rede urbana e fácil penetração por um pulso de onda de enchente.

Quanto ao fator de forma, por um lado temos a maior tendência relativa para retenção de água da bacia do Cambaí (K_f = 0,38), mais alongada longitudinalmente. E por outro temos a indicação de tendência do Olaria, com K_f = 1,158, com formato mais adaptado para captação transversal rápida da água escoada pela rede urbana, com possível tendência a enchente e alagamento perto do canal principal.

Com relação à hierarquia fluvial, incluída na Figura 2, a microbacia do arroio Olaria é de quarta ordem, na hierarquia de Strahler e a microbacia do arroio Cambaí é de quinta ordem. Isso indica que o sistema de drenagem na microbacia do Olaria é menos ramificado, enquanto que o da microbacia do Cambaí é bastante ramificado.

No entanto, existe grande influência da rede de drenagem urbana na microbacia do Olaria, que aponta para uma capacidade mais uniforme de captação de água e uma maior velocidade de escoamento das águas pluviais. Esta rede também pode ser canal de entrada rápido para os pulsos de enchente. A rede urbana mista (pluvial e esgoto) da cidade pode ser visualizada na Figura 2.

A densidade de drenagem encontrada nas microbacias foi de 3,627 (Olaria) e 1,134 (Cambaí) em km/km². De acordo com Villela e Mattos (1975), esse índice pode variar de 0,5 km/km² em microbacias com drenagem pobre a 3,5 km/km², ou mais, em microbacias bem drenadas, indicando, assim, que a microbacia do Olaria tem uma rede de drenagem capaz de reagir rapidamente tanto a precipitações quanto a pulsos de onda de enchente.

No caso da microbacia do Cambaí, esta possui baixa capacidade de drenagem, tendo tendência a reter a água por mais tempo, tanto introduzida na microbacia por chuvas ou por enchentes. Como exemplo, Cardoso et al., (2006) encontraram um índice de densidade de drenagem de 2,35 km/km², considerando que aquela ba-

cia apresentava moderada capacidade de drenagem. Em outro trabalho realizado na bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, a densidade de drenagem encontrada foi de 1,049 km/km² para uma área de 6,981km², indicando baixa capacidade de drenagem (TONELLO et al., 2006).

A extensão média do escoamento superficial, calculadas com o auxílio do software SPRING, indicam que a distância média que a água da chuva teria que escoar sobre os terrenos da microbacia do Olaria (0,069 km = 69 m), do ponto onde ocorreu a queda até o curso d'água mais próximo, é menor que na microbacia do Cambaí (0,23 km = 230 m). Isto se justifica pois a primeira possui grande número de ramificações dentro da área urbana e maior capacidade de drenagem, com possibilidade de um escoamento rápido das águas.

Enquanto que a microbacia do Cambaí apresenta características com tendência a aumentar o tempo de concentração, por unidade de área, necessário para escoamento das águas de chuva ou enchente, tendo maior tendência à retenção das águas.

Com relação à sinuosidade, o arroio Olaria apresentou valor menor (1,01) comparado com o Cambaí (1,19). Isso também aumenta a tendência para um escoamento superficial mais rápido do Olaria, de comprimento axial mais retilíneo; enquanto o arroio Cambaí é mais sinuoso, e, portanto, suas curvas podem ocasionar um escoamento mais lento.

A caracterização hipsométrica com relação ao modelo EGM96, adotado como referência pela missão SRTM (FARR, 2007) aparece na Figura 3, na qual as tonalidades representam intervalos de altitude nas microbacias estudadas. A partir da grade de hipsometria, foi gerada uma grade de declividade, que revela a inclinação do terreno na região. Elas permitem caracterizar a variabilidade das mudanças na topografia. O mapa de hipsometria, Figura 3, mostra a predominância da classe de 40 a 70 m, em tonalidade cinza média, e da classe de 70 a 100 m, em tonalidade cinza clara quadriculada.

Na Figura 4 é possível visualizar que a maior parte da área das microbacias sob estudo apresenta declividade, entre 0 a 6%. Porém, separadas por regiões estreitas de declividade entre 6 a 12 %.

A declividade das microbacias (Figura 4) influencia a relação entre precipitação e o deflúvio condicionando a velocidade de escoamento superficial. O tempo de concentração destas microbacias poderá ser maior comparado com outras que possuam alta

declividade, e os picos de enchentes menores. As linhas estreitas correspondentes a declividades mais altas, entre 6 e 12 %, podem corresponder a barrancos ou a rampas, o que deve ser identificado em visitas a campo, visto que o pixel SRTM tem uma resolução espacial de 90 m, que pode mascarar a maior declividade de uma região onde aconteça uma mudança abrupta de altura como é o caso de barrancos, bastante comuns nesta região com características de várzea.

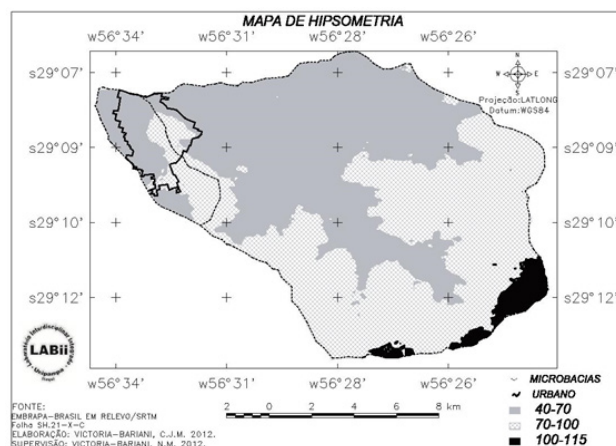


Figura 3 - Mapa de hipsometria das microbacias hidrográficas correspondente a alturas ortométricas com relação ao datum vertical EGM96.

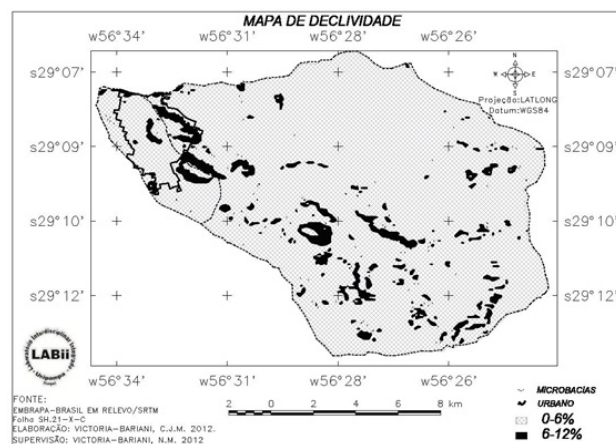


Figura 4 - Mapa de declividade nas microbacias hidrográficas.

Outros resultados relevantes são as estatísticas das grades de hipsometria e de declividade das microbacias estudadas, apresentados na Tabela II.

O programa SPRING permite a obtenção de parâmetros estatísticos sobre as grades dos modelos numéricos (MNT). Na Tabela II observa-se que as microbacias sob estudo apresentaram altitude média de 67 m (Olaria) e 73 metros (Cambaí), o que segundo Cas-

tro Jr. (2001), confere características típicas de altitudes baixas, onde a temperatura é mais elevada e quase toda a energia absorvida é utilizada para evaporação da água.

Os parâmetros estatísticos obtidos no SPRING para as grades de altimetria e declividade de cada microbacia aparecem na Tabela 2. O arroio Olaria apresenta maior declividade média com menor coeficiente de variação, embora apresente menor altura média. A microbacia do Cambaí apresenta superior variância na altitude, já que possui áreas de banhado, mas também atinge regiões mais altas. A maior declividade do Olaria acentua a possibilidade de uma maior velocidade de escoamento das águas de chuva, ou de uma rápida penetração de uma onda de enchente.

Tabela 2 – Estatísticas das grades de hipsometria e de declividade das microbacias estudadas.

ESTATÍSTICAS	ALTIMETRIA OLARIA	ALTIMETRIA CAMBAI	DECLIVIDADE OLARIA	DECLIVIDADE CAMBAI
Número de Pontos	1960	20921	1960	20851
Número de Pontos Válidos	1960	20921	1960	20851
Média	67.17	72.77	1.57	1.47
Variância	95.88	207.15	1.15	1.27
Desvio Padrão	9.79	14.39	1.07	1.13
Coefficiente de Variação	0.15	0.20	0.68	0.77
Coefficiente de Assimetria	0.25	0.37	1.49	2.52
Coefficiente de Curtose	2.73	2.33	5.81	15.12
Valor Mínimo	40.00	46.00	0.00	0.00
Quartil Inferior	60.00	61.00	0.79	0.69
Mediana	67.00	71.00	1.35	1.21
Quartil Superior	74.00	83.00	2.03	1.91
Valor Máximo	97.00	114.00	7.62	13.36

De maneira geral, os resultados estatísticos indicam que se trata de microbacias cuja variação de alturas e declividades é gradativa e suave. Este fator favorece a utilização da máxima resolução vertical dos dados SRTM na construção das grades, já que o pixel tem uma resolução espacial de 90 m, e uma resolução altimétrica máxima de 1 m, que pode ser aproveitada muito favoravelmente em condições de terrenos planos que ocupam vários pixels da imagem para mudar a declividade, e nos quais as interpolações respondem bem à linearidade.

A baixa declividade favorece a irrigação das lavouras de arroz da região pelo sistema de cultivo em taipas, onde a água é bombeada para patamares mais altos e escoada por gravidade (SOSBAI, 2010). Como existem drenagens das lavouras para os cursos de água, pode acontecer fuga de solutos e eventuais sedimentos das mesmas. Por estes motivos, os cursos de água pertencentes às microbacias estudadas recebem influência

importante das lavouras de arroz e das áreas de campo dedicadas à pecuária.

A maior tendência à acumulação de água da microbacia do Cambaí relativa à do Olaria sugerida pelos parâmetros morfométricos analisados foi confirmada através da observação de imagens da região obtidas pelo satélite Landsat 5, sensor TM, em situação de enchente, disponíveis no site do INPE, correspondentes às datas indicadas na metodologia. A área relativa inundada foi o critério observado na comparação. Também foi utilizada a imagem do sensor PAN5M, com 5 m de resolução, do satélite sino-brasileiro CBERS4, apresentada na Figura 5. Nesta imagem é possível observar uma grande área alagada na microbacia do Cambaí, na porção leste da imagem, confirmando sua maior capacidade de retenção de água. Também pode ser observada a área alagada próxima ao canal do Arroio Olaria (porção oeste). Moradores da região confirmam que as ondas de enchente e alagamento penetram rapidamente pelo canal do Arroio Olaria.

As outras imagens consultadas também apontaram as mesmas características.

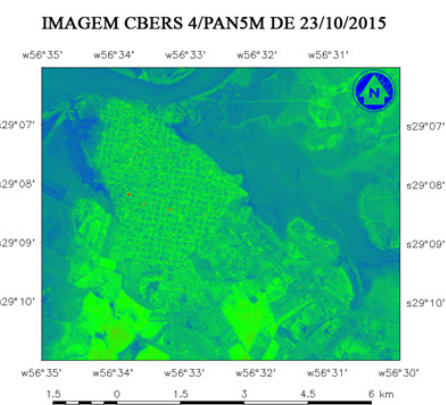


Figura 5 - Imagem do satélite CBERS4, sensor PAN5M, mostrando a cidade de Itaqui e a enchente nas microbacias do Cambaí (leste) e do Olaria (oeste).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de dados SRTM, processados no Sistema de Informação Geográfica SPRING, em conjunto com imagens de cartas topográficas e imagens de satélite da região sob estudo, permitiu a criação de mapas contendo a rede de drenagem com maior confiabilidade que o uso isolado de cartas do exército, e sem necessidade de envolvimento de equipes de levantamentos planialtimétricos, com as onerosas saídas a campo. No

banco de dados geográfico criado, foi possível delimitar as microbacias que incluem a cidade de Itaqui, RS, e realizar a caracterização morfométrica das mesmas. Os resultados apontaram para uma maior tendência a permanecer inundada da microbacia do Cambaí, ao leste da cidade, o que de fato é verificado pelas imagens de satélite analisadas. A microbacia do Olaria apresenta melhores índices com relação ao escoamento, com tendência a menor tempo de concentração. Mas ao mesmo tempo, é canal de entrada rápido para os pulsos de enchentes, que desta forma podem atingir rapidamente as áreas ocupadas por moradias. As mudanças no regime natural de escoamento devidas à impermeabilização e à criação da rede de drenagem urbana são fatores que afetam mais fortemente as características da bacia do Olaria, que capta as águas da maior parte da área urbana. As estatísticas de hipsometria e declividade geradas pelo programa SPRING se mostraram úteis para avaliar o caráter plano da região, com suaves variações de declividade, condições estas favoráveis para justificar o uso da máxima resolução altimétrica dos dados SRTM, considerada de 1 a 5 m). A densidade de drenagem encontrada nas microbacias indica baixa capacidade de drenagem para a microbacia do Cambaí, e a situação oposta para a microbacia do Olaria que apresentou o índice de densidade de drenagem maior a 3,5, considerado para microbacias bem drenadas. Sugere-se a organização de medidas preventivas municipais especiais para a microbacia do Arroio Olaria, devido à maior velocidade de chegada das ondas de enchente e de situações de alagamento por precipitações intensas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADES FILHO, C.O; ROSSETTI, D.F; ZANI, H. Hipsometria derivada de MDE-SRTM aplicada na distinção entre a Formação Barreiras e os Sedimentos Pós-Barreiras na Bacia Paraíba. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. **Anais**. 2011. p. 3443-3443.
- BARIANI, C.J.M.V.; PEREIRA FILHO, W.; VICTORIA, N. M. Análise Integrada de Variáveis de Uso, Cobertura do Solo e Limnológicas em Itaqui, RS. **Revista Geográfica Acadêmica**. v. 7, p. 48-57, 2013a.
- BARIANI, C.J.M.V.; VICTORIA, N. M. Distribuição Espacial Mensal de Variáveis Físicoquímicas em Cursos Hídricos de Itaqui, RS. **Geografia Ensino & Pesquisa**. v. 17, p. 167-181, 2013b.
- BARIANI, C. J. M. V.; VICTORIA, N. M. B.; PAZZDI-ORA, P.; CARLESSO, R. Utilização de SIG para avaliação e monitoramento da água em uma propriedade rural. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu. **Anais**. 2013c. p. 1-8.
- BOCKHEIM, J.G.; GENNADIYEV, A.N.; HAMMER, R.D.; TANDARICH, J.P. Historical development of key concepts in pedology. **Geoderma**. 2005, v. 124, p. 23-36.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. C. P. Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**. 1996, v. 20, n. 3, p.395-403.
- CARDOSO, C.A.; DIAS, H.C.T.; SOARES, C.P.B; MARTINS, S.V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, n.2, p. 241-248. 2006.
- CASTRO JR., E. **O papel da fauna endopedônica na estruturação física dos solos e o seu significado para a hidrologia de superfície**. 2001. 150 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- DIKAU, R. Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v.80, p. 45-55, 1990.
- EMBRAPA. **Brasil em Relevô**. Download SRTM. Rio Grande do Sul. Carta sh-21-x-c. 2012. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br/download/rs/sh-21-x-c.htm>>. Acessado em 26 jun. 2012.
- EMBRAPA. Clima Temperado. Cultivo do Arroz Irrigado no Brasil. Solos Cultivados com Arroz Irrigado na Região Subtropical do RS e SC. **Sistemas de Produção**, v 3; ISSN 1806-9207 Versão Eletrônica. 2005.
- FARR, T.G.; ROSEN, P.A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; KOBRICK, S.H.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.;

UMLAND, J.J. The Shuttle Radar Topography Mission. **Review of Geophysics**, v. 42, p. 2-53. 2007.

CARVALHO, T. M. Parâmetros geomorfométricos para descrição do relevo da Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Tupé, Manaus, Amazonas. In: SANTOS-SILVA, E. N.; SCUDELLER, V. V. **Biotupé: Meio Físico. Diversidade Biológica e Sociocultural do Baixo Rio Negro, Amazônia Central**, v. 2. Manaus, UEA Edições, 2009. p. 1 - 18.

SOSBAI. Arroz Irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. In: XXVIII Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado. **Boletim Técnico**. Bento Gonçalves/RS: Brasil. 2010.

STRAHLER, A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **American Geophysical Union**, v.38. p.913-920. 1957.

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E.; GOMES, T. C.; RUTHES, J. M. Utilização do SPRING na caracterização automática da rede de drenagem, com base em modelos digitais de elevação gerados pelo ASTER e SRTM. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu. **Anais**. 2013. p. 5697-5704.

TONELLO, K. C. DIAS, H.C.T.; SOUZA, A.L.; RIBEIRO, C.A.A.A.R.; LEITE, F.P. Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhanês - MG. **Revista Árvore**, Viçosa, 2006. v.30, n.5, p.849-857.

VALERIANO, M.M; ALBUQUERQUE, P.C.G. **Topodata: Processamento dos Dados SRTM**. INPE-16702-RPQ/854. São José dos Campos/SP. 2010.

VALERIANO, M.M; ROSSETTI, D.F. **Topodata: Seleção de Coeficientes Geoestatísticos para o Refinamento Unificado de Dados SRTM**. INPE-16701-RPQ/853. São José dos Campos/SP. 2010.

VALERIANO, M.M. **Topodata: Guia para Utilização de Dados Geomorfológicos Locais**. INPE-15318-RPQ/818. São José dos Campos/SP. 2008.

VILLELA, S.M; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**.

São Paulo: McGraw - Hill do Brasil, 1975.

WAIKAR, M.L.; NILAWAR, A. P. Morphometric Analysis of a Drainage Basin Using Geographical Information System: A Case study. **International Journal of Multidisciplinary and Current Research**. 2014. v. 2, p. 179-184

. Agradecimentos

À Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA - Campus Itaqui - Laboratório Interdisciplinar Integrado - LABii. Ao CNPq, Projetos 56348/2010, 455281/2011-4 e 350480/2011-7. Ao PROEXT MEC 2012, projetos SIMA-FO e MAPA.

Correspondência dos autores:

Cassiane Jayj de Melo Victoria Bariani
e-mail: cassiane.victoria@gmail.com

Nelson Mario Victoria Bariani
e-mail: vbariani@gmail.com

Artigo recebido em: 27/10/2015

Revisado pelos autores em: 17/08/2016

Aceito para publicação em: 18/08/2016