

## Sobre o Início da Rede de Drenagem Definida a Partir dos Modelos Digitais de Elevação

Fernando Mainardi Fan\*, Walter Collischonn\*, Mino Viana Sorribas\*, Paulo Rógenes Monteiro Pontes\*  
fernando.fan@ufrgs.br, collischonn@iph.ufrgs.br, mino\_vs@hotmail.com, paulo.pontes@ufrgs.br

Recebido: 28/01/13 - revisado: 07/03/13 - aceito: 25/03/13

### RESUMO

Atualmente é comum determinar a rede de drenagem, os divisores de água e a delimitação de bacias hidrográficas de forma automática, a partir de informações de relevo, representadas na forma de uma matriz de altitudes, os chamados modelos digitais de elevação (MDE). Uma etapa fundamental desta metodologia é a obtenção da hidrografia arbitrando um limite inferior de área de drenagem a partir do qual um pixel do MDE é considerado como parte da rede de drenagem. O valor deste limite, no entanto, pode variar em diferentes regiões, dependendo das características físicas locais e dos objetivos do mapeamento. Neste artigo são propostos alguns critérios que podem servir para definir a área de drenagem mínima necessária para a melhor representação das nascentes, ou do início da rede de drenagem, a partir do processamento de um MDE. Os critérios foram desenvolvidos a partir da análise de 28 bacias em diferentes regiões do Brasil, onde o valor da melhor área de drenagem limite foi estimado com base na comparação entre a rede de drenagem derivada do MDE e as nascentes identificadas em imagens de satélite de alta resolução. Nas mesmas regiões foram obtidos dados de características geológicas, declividade média, precipitação média anual e vazões. Como resultado foram identificadas relações gerais para o valor da área de drenagem mínima (ou limiar de área de drenagem) em função do tipo de geologia (porosa ou fissural), declividade média da bacia e relação Q90/Q50, de tal forma que os valores determinados podem servir como fundamento inicial para definição da área limite para início da rede de drenagem. Além disso, verificou-se que o uso de um único valor de área mínima para bacias com características físicas variadas pode ser inapropriado. Dessa forma foi sugerido uma metodologia para a delimitação da rede de drenagem para áreas compostas por regiões físicas distintas. Espera-se que este método seja utilizado como uma função de geoprocessamento para bacias heterogêneas.

**Palavras-chave:** Modelo Digital de Elevação. Rede de Drenagem. Geoprocessamento. SIG.

### INTRODUÇÃO

A representação do relevo em computadores é cada vez mais utilizada em hidrologia. Sua aplicação vai desde a simples delimitação de bacia até a extração de informações necessárias de caracterização das bacias para a modelagem hidrológica (ZEILHOFER, 2001).

A representação matricial do relevo nos chamados Modelos Digitais de Elevação (MDE) é a forma mais utilizada para as análises de geomorfometria em Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Em um MDE cada elemento ou pixel tem como atributo o valor de elevação do terreno em relação a um determinado referencial (BURROUGH; MCDONNELL, 1998).

Com os Modelos Digitais de Elevação é possível definir os caminhos de fluxo, delimitar as bacias e calcular as áreas de contribuição, utilizando técnicas de geoprocessamento (BERTOLO, 2000; BURROUGH; MCDONNELL, 1998; JENSON; DOMINGUE, 1988).

Uma das primeiras etapas na análise de um MDE para estas aplicações é a definição de uma matriz de direções de escoamento a partir da matriz de elevações. Nesta etapa normalmente é utilizado um algoritmo conhecido como D8, em que para cada célula do MDE é definida uma entre oito direções de escoamento, o que significa que cada célula pode escoar para uma de suas oito vizinhas mais próximas, definidas numa janela de 3 x 3 células (BURROUGH; MCDONNELL, 1998; JENSON; DOMINGUE, 1988).

A partir da matriz com direções de fluxo definidas, normalmente a etapa seguinte é o cálculo de uma matriz de área de drenagem acumulada. Nesta etapa, é gerado um novo plano de informação ma-

\*Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

tricial em que cada célula tem como atributo o valor correspondente ao somatório das áreas superficiais de todos os pixels cujo escoamento contribui para o pixel em questão (JENSON; DOMINGUE, 1988).

Numa terceira etapa, a matriz de áreas acumuladas é reclassificada com a especificação de uma área de drenagem mínima (ou limiar de área de drenagem), que caracteriza a área de drenagem mínima necessária para iniciar um canal (BAND, 1986; BUARQUE et al., 2009; BURROUGH; MCDONNELL, 1998; JENSON; DOMINGUE, 1988; MARK, 1984; SORRIBAS; PONTES; COLLISCHONN, 2011). O produto desta terceira etapa é uma nova matriz em que cada célula pode ter o valor 1, quando pertence à rede de drenagem, ou zero, quando não pertence à rede de drenagem.

O resultado desta terceira etapa é fortemente dependente da escolha do valor da área de drenagem limite (Amin). A adoção de um valor de Amin baixo resulta na criação de uma rede de drenagem com muito mais cursos de água. A adoção de um valor de Amin alto resulta na definição de uma rede de drenagem em que apenas os maiores rios são incluídos. Assim, a escolha do valor de Amin tem um grande impacto na subsequente extração de propriedades morfométricas da bacia, como a densidade de drenagem, o comprimento dos rios, a ordem dos cursos d'água, e propriedades de escala como as razões de bifurcação e de área (BERTOLO 2000; DAROS; BORGA, 1997; HELMLINGER; KUMAR; FOUFOULA-GEORGIU, 1993; MOUSSA; BOCQUILLON, 1996).

Existem duas abordagens para definir o valor de Amin. Na primeira abordagem o valor de Amin é arbitrado, de forma a resultar na rede de drenagem mais conveniente para uma determinada aplicação. Um exemplo desta abordagem é utilizado pelo conjunto de ferramentas ArcHydro, em que se sugere que o valor de Amin deve ser equivalente a 1% da área total que está sendo analisada (FAN et al., 2010; MAIDMENT, 2002). Neste caso, não existe o interesse de reproduzir exatamente a rede de drenagem efetivamente existente, desde o ponto de origem de cada um dos cursos d'água.

Na segunda abordagem o valor de Amin é definido de forma a reproduzir, com a maior exatidão possível, a rede de drenagem real da bacia. Neste caso, idealmente cada ponto de origem de cada curso d'água na matriz gerada pela análise no SIG coincide com um início de rede de drenagem identificável na realidade.

Nesta segunda abordagem, portanto, a terceira etapa do processamento deveria ser repetida várias vezes, e a rede de drenagem resultante deveria

ser comparada visualmente com a rede de drenagem real, até que o valor adequado de Amin tenha sido encontrado (SORRIBAS; PONTES; COLLISCHONN, 2011). Para isto podem ser utilizadas imagens de satélite de alta resolução ou fotografias aéreas.

Outra possibilidade, contudo, é relacionar o valor de Amin em uma determinada região com suas características físicas. Diversos estudos mostram que a área de drenagem mínima está relacionada com características físicas da bacia hidrográfica, como declividade, relevo, tipos de solos, vegetação e geologia (BERTOLO, 2000; IJASZ-VASQUEZ; BRAS, 1995; MCNAMARA et al., 2006; MARTZ; GARBRECHT, 1995; MONTGOMERY; DIETRICH, 1988; STANBULLUOGLU et al., 2002).

Horton (1945) sugeriu que um curso d'água inicia quando a força do escoamento acumulado é suficiente para vencer a resistência à erosão do solo. Assim, existiria uma transição entre o escoamento difuso (fora da rede de drenagem) e o escoamento concentrado (dentro da rede de drenagem). O mesmo autor também observou que a declividade de cursos d'água de maior ordem, ou seja, com maior área de drenagem, tende a ser menor do que a declividade de cursos d'água de menor ordem.

Com base nesta ideia Tarboton, Bras e Rodriguez-Iturbe (1991, 1992) e Tarboton (1989) propuseram um método em que a área de drenagem limite é identificada a partir do ponto de máximo de uma curva que relaciona área de drenagem e declividade de trechos da rede de drenagem. A hipótese é que os cursos de água, onde o escoamento é concentrado, normalmente apresentam uma relação em que a declividade do rio decresce à medida que cresce a área de drenagem. Partindo de jusante para montante, considera-se que o início da rede de drenagem é o local em que esta tendência deixa de ser respeitada. Uma abordagem semelhante foi adotada por Montgomery e Dietrich (1988, 1989, 1992) e por Montgomery e Foufoula-Georgiou (1993).

O método de Tarboton, Bras e Rodriguez-Iturbe (1991, 1992), embora seja elegante e tenha uma base física plausível, não é muito adequado quando o MDE tem baixa resolução espacial, ou quando tem erros aleatórios significativos. Este é o caso do MDE do SRTM (FARR et al., 2007), bastante utilizado no Brasil (PAZ; COLLISCHONN, 2008; PAZ et al., 2008; WEBER; HASENACK; FERREIRA, 2004).

Por outro lado, acredita-se que a área de drenagem mínima pode ser relacionada com as características físicas da bacia através de relações

empíricas.

No presente trabalho é apresentada uma pesquisa exploratória em busca da definição de critérios de área de drenagem mínima para diferentes bacias hidrográficas brasileiras, colocando esses critérios em função de suas características físicas e de coeficientes baseados na vazão superficial medida nos cursos de água da bacia.

Além disso, na medida em que se verificou a importância da variabilidade das características físicas para definição da área de drenagem mínima em uma bacia hidrográfica, o trabalho também apresenta uma metodologia para a delimitação da rede de drenagem para áreas compostas por regiões físicas distintas.

## OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é a definição de critérios simplificados e apresentação de uma ferramenta SIG para a definição da área de drenagem mínima de bacias hidrográficas com base em suas características físicas regionais ou informações de vazão de postos fluviométricos.

## METODOLOGIA

Foram selecionadas algumas regiões no Brasil com características físicas bastante diferenciadas entre si, e com disponibilidade de dados de vazão em postos fluviométricos (Figura 1). Em cada uma destas regiões foram realizadas as etapas tradicionais de geoprocessamento para obtenção da rede de drenagem, usando o MDE do SRTM (PAZ; COLLISCHONN, 2008).

Em cada região ou bacia analisada, o valor de Amin foi modificado várias vezes até que a rede de drenagem calculada ficasse o mais próxima possível da rede de drenagem identificada em imagens de satélite de alta resolução disponíveis no Google Earth®, ArcGIS® (ferramenta *Add Basemap*) e MapWindow GIS® (extensão *Tiles*), onde nestes dois últimos foram utilizadas as imagens disponibilizadas pela base *Bing Aerial Maps* (SORRIBAS; PONTES; COLLISCHONN, 2011).

Para cada uma das bacias foram obtidos valores de declividade média, domínios hidrogeológicos predominantes, tipos de solos predominantes e pluviometria média anual, e foram buscadas relações entre os valores destas variáveis e o valor de Amin.

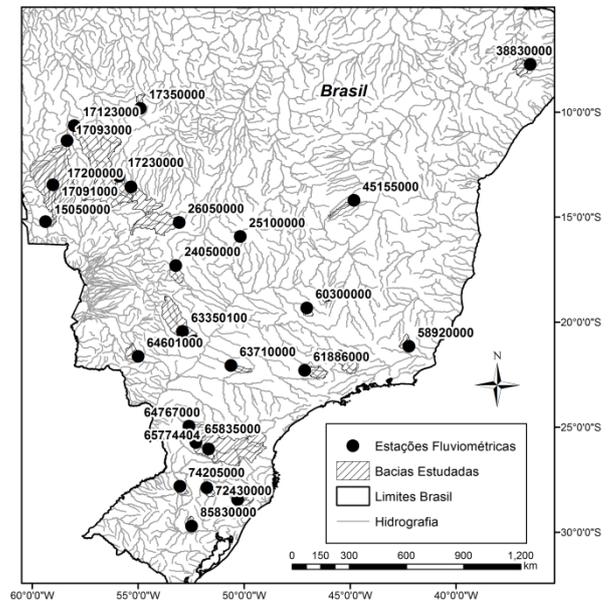


Figura 1 - Localização das áreas de estudo selecionadas

## Identificação de Nascentes e Análise Comparativa

Para a definição do critério de área de drenagem mínima de uma bacia hidrográfica foi realizada uma análise comparativa entre a hidrografia obtida através do MDE e a hidrografia identificada em imagens de satélite e fotografias aéreas onde é possível verificar a existência de nascentes de cursos de água.

Os mapas de hidrografia com base no MDE foram gerados sistematicamente para todos os locais de interesse com diferentes áreas de drenagem mínima, variando de 0,1km<sup>2</sup> em 0,1km<sup>2</sup>, e comparadas com as nascentes visualizadas nas imagens de satélite e fotos aéreas. Os valores da maior área de drenagem necessária para representar todas as nascentes de cada região de interesse foram computados como a melhor estimativa para a região definida.

Uma vez que o modelo digital de elevação utilizado possui resolução espacial de quadrícula de 90m, a área de cada pixel é de cerca de 0,0081 km<sup>2</sup>. Dessa forma, o valor de Amin de 0,1km<sup>2</sup> foi adotado por corresponder a aproximadamente 10 pixels. Esta estimativa é também um indicador dos na metodologia aplicada. Ensaios preliminares demonstraram que a adoção de áreas menores não trouxeram muitos benefícios aos resultados de interpretação visual.

Identificação das Nascentes



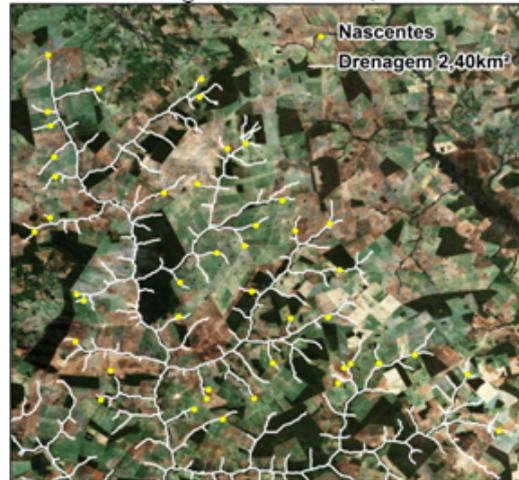
Área de Drenagem Mínima = 1,20km<sup>2</sup>



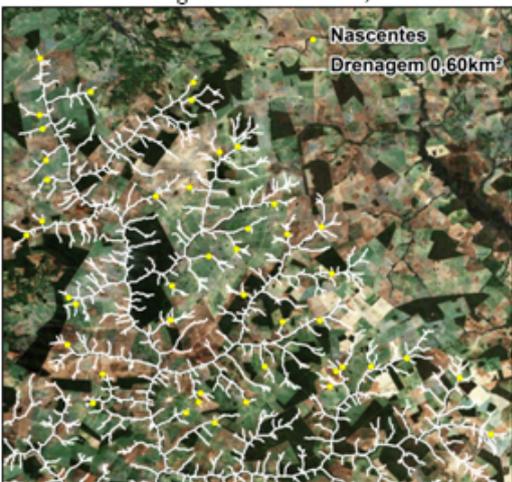
Área de Drenagem Mínima = 0,30km<sup>2</sup>



Área de Drenagem Mínima = 2,40km<sup>2</sup>



Área de Drenagem Mínima = 0,60km<sup>2</sup>



Área de Drenagem Mínima = 4,20km<sup>2</sup>



Figura 2 - Sequência de passos de estimativa de área de drenagem mínima para uma região

Como as comparações entre as nascentes visualizadas nas imagens e as extraídas do MDE foram feitas visualmente, é possível que dois avaliadores distintos chegassem a conclusões ligeiramente diferentes sobre a área de drenagem mínima necessária para uma bacia. Contudo, também é esperado que o erro do procedimento não seja muito maior que 0,1km<sup>2</sup>, já que os testes foram feitos com esta variação, onde nesta faixa foram observadas as dúvidas sobre a escolha entre uma ou outra área de drenagem mínima.

A amostragem dos possíveis pontos que caracterizam o início da rede de drenagem nas imagens de satélite e fotos aéreas foi realizada considerando a disponibilidade de imagens e dando prioridade para aquelas que apresentam melhor resolução espacial, conforme descrito em Sorribas, Pontes e Collischonn (2011). A identificação visual do início da rede de drenagem nem sempre foi trivial, principalmente em regiões em que a vegetação é muito densa. Fatores associados à rede de drenagem, como a existência de mata ciliar, estradas, pequenos reservatórios e solo saturado contribuíram de forma positiva para o processo.

A figura 2 apresenta um exemplo da análise realizada. As imagens de satélite e fotos aéreas utilizadas para a identificação de nascentes foram as disponibilizadas pelos softwares anteriormente citados.

### Cálculo da Rede de Drenagem

Os mapas de área de drenagem acumulada e de rede de drenagem para cada valor limite de área acumulada foram extraídos a partir de um MDE com a utilização do pacote de ferramentas *ArcHydro Tools* (MAIDMENT, 2002) presente no software ArcGIS®.

Neste pacote de ferramentas, o cálculo de área de drenagem consiste no terceiro passo dos procedimentos de delineamento de bacias hidrográficas a partir de MDEs e a definição da rede de drenagem no quarto passo. O primeiro passo se dá pelo preenchimento de depressões espúrias presentes no MDE, e o segundo passo consiste na definição das direções de fluxo através de um método chamado de D8 (Eight Direction Pour Point Model) que define para cada célula da matriz um valor que representa a direção mais provável do escoamento com base na maior diferença de cotas.

Após estes dois primeiros passos, a área acumulada de cada célula é calculada e a rede de drenagem é obtida por reclassificação do mapa de área acumuladas a partir da definição da área de

drenagem mínima: todas as células com valor de área acumulada maior que a mínima são definidas como drenagem.

Tabela 1 - Estações fluviométricas utilizadas

Código Estação	Nome da Estação	Rio	Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )
15050000	Pontes e Lacerda	Guaporé	2990
17091000	Fazenda Tucunaré	Juruena	4360
17093000	Fontanilhas	Juruena	55900
17123000	Porto roncadour	Teles Pires	10800
17200000	Rio Arinos	Arinos	57100
17230000	Lucas do Rio Verde	Verde	5635
17350000	Cachimbo	Braço Sul	1010
24500000	Alto araguaia	das Garças	2070
26050000	Toriquaje	das Mortes	17160
70200000	Invernada Velha	Pelotas	2841
72430000	Passo Do Granzotto	Forquilha	1604
74205000	Linha Cescon	Arroio Caturete	454
86100000	Passo Do Gabriel	das Antas	1820
38830000	Caraubas	Paraíba	5030
60300000	Ponte da Antinha	Capivara	1270
61537000	Porto dos Buenos	Verde	6300
61886000	Pádua Sales	Mogi-Guaçu	4670
63350100	Água Clara	Verde	14500
63390000	Estrada Queiroz	Verde	20100
63710000	Estrada Do Quata	do Peixe	2910
64601000	Brilhante	Brilhante	3870
64767000	Porto Carriel	Piquiri	3540
65835000	Porto Santa Maria	Iguaçu	39600
58920000	Patrocínio do Muriaé	Muriaé	2660
41050000	Major Porto	Ribeirão Arcado	1190
25100000	B.Cach. Grande	Vermelho	229
45155000	Fazenda Velha	Itaguari	3230

No trabalho de Buarque et al. (2009) é mostrado que o algoritmo de traçado de drenagem utilizado no *ArcHydro Tools* é inferior a outros algoritmos, principalmente para o traçado em áreas planas, onde pode apresentar problemas como drena-

gens paralelas e corte de meandros, prejudicando o comprimento final do rio. Contudo, para a definição de nascentes na forma realizada neste trabalho não são relevantes as diferenças entre os diferentes algoritmos existentes, uma vez que o processo se caracteriza pela reclassificação do mapa de áreas acumuladas em regiões de nascentes.

### Regiões de Estudo

Para a realização deste estudo exploratório foram selecionadas 27 bacias hidrográficas em diferentes regiões do Brasil onde as condições geomorfológicas foram verificadas como homogêneas com base na informação geológica e de relevo regional e onde existem dados fluviométricos disponibilizados pela Agência Nacional de água (ANA). Este pressuposto foi assumido visando isolar o efeito das características físicas das bacias para as análises de área de drenagem mínima. Os locais analisados foram apresentados na figura 1 e são listados na tabela 1.

### Mapas e Dados Utilizados

O modelo digital de elevação utilizado foi o SRTM (FARR et al, 2007), com resolução da quadrícula de 90m, apresentado na figura 3.

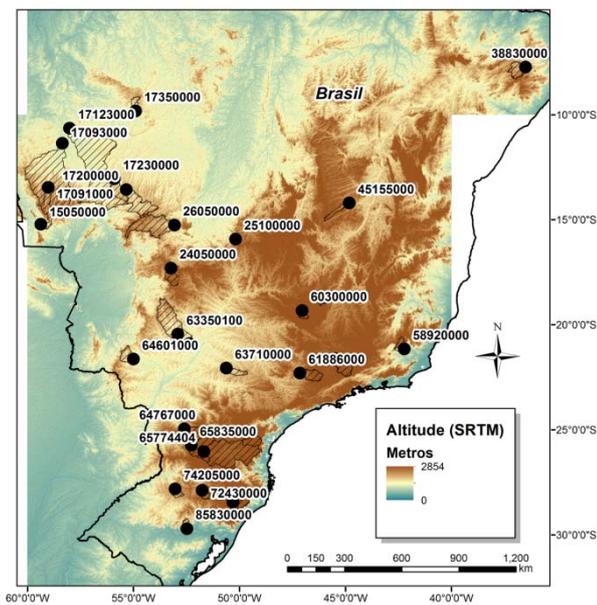


Figura 3 - Relevo das regiões de estudo obtido do SRTM

A partir do MDE foi extraída a informação de declividade média de cada bacia hidrográfica de estudo. Para o cálculo da declividade média da bacia

foi calculada inicialmente a declividade de cada pixel dentro da bacia e posteriormente feita a média aritmética dos dados. O mapa de declividades é apresentado na figura 4. A hipótese assumida na verificação da influência da declividade média da bacia é que áreas mais acidentadas relacionam-se com um escoamento com mais energia, resultando em um maior número de nascentes a partir da maior formação de canais por erosão (HORTON, 1945).

Para este trabalho foi adotado o uso da declividade média da bacia. Outras medidas como a moda, mediana, ou declividade dos rios principais também poderiam ter sido investigadas, ficando este ponto como alvo para pesquisas relacionadas.

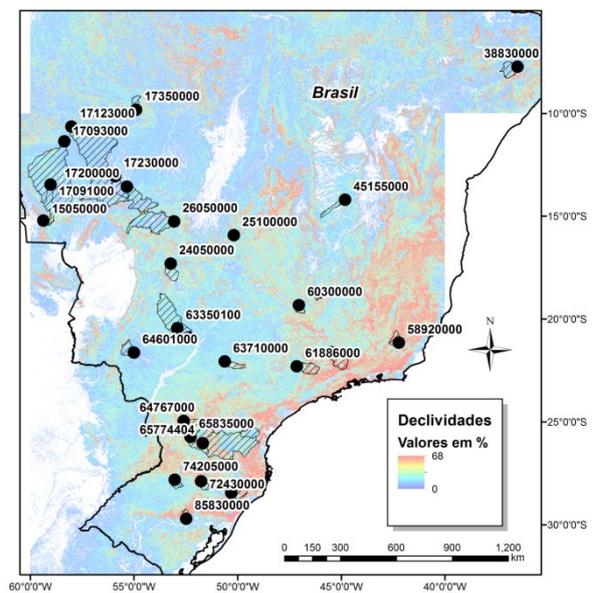


Figura 4 - Mapa de declividades da região de estudo derivado a partir do SRTM

Para a obtenção da informação de geologia das bacias hidrográficas estudadas foi utilizado o mapa de domínios hidrogeológicos do Brasil, apresentado por Bomfim (2010). Como no mapa a hidrogeologia é subdividida em diversas classes, e o objetivo do presente trabalho é a derivação de critérios simples para a definição da área de drenagem mínima, foi adotada a classificação de domínios hidrogeológicos em duas grandes classes: hidrogeologia de porosidade secundária (fissural), e hidrogeologia de porosidade primária (porosa), seguindo as diretrizes apresentadas por Bomfim (2010), com a simplificação de não serem utilizadas as áreas de interface com a existência de geologia mista poro-

sa/fissural. O mapa de geologia reclassificado é apresentado na figura 5.

A hipótese associada à influência da geologia das bacias é que regiões com rochas com grande transmissividade tendem a ter mais recarga do aquífero, e menos escoamento superficial, resultando em menos nascentes. Regiões com rochas impermeáveis, por outro lado, tendem a favorecer a formação do escoamento superficial, o que acaba formando canais por erosão (DINGMAN, 2002). Esta hipótese também é baseada em sugestões de Horton (1945) em dados apresentados por Strahler (1957), que mostram que a densidade de drenagem depende fortemente da litologia da bacia.

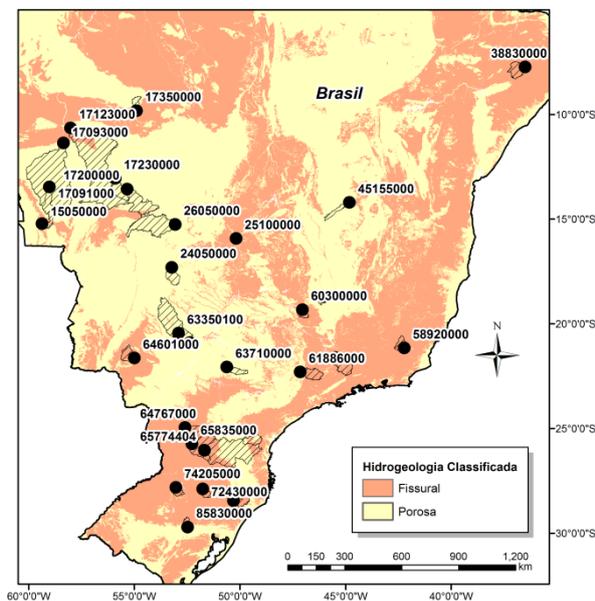


Figura 5 - Mapa de domínios hidrogeológicos utilizados

A informação de solos existentes nas bacias hidrográficas analisadas foi obtida através do mapa digitalizado do projeto RadamBrasil (BRASIL, 1982) em escala 1:1.000.000 e do mapa de solos da América do Sul disponibilizado pela Food and Agriculture Organization (2003). Novamente, como o número de classes de solos é excessivo para os objetivos deste trabalho, o mapa foi reclassificado segundo critérios hidrológicos de armazenamento de água e geração de escoamento, seguindo as descrições de tipos de solo segundo Lepsch (2002), em duas classes distintas: solos rasos e solos profundos, além de áreas de várzea e água, que apareceram em porcentagem muito pequena nas bacias de interesse. A figura 6 apresenta o mapa de solos final utilizado no estudo.

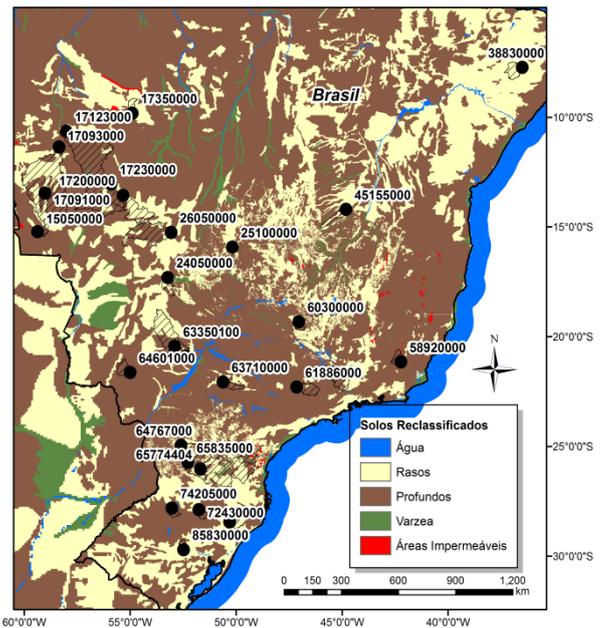


Figura 6 - Mapa de solos utilizado

A hipótese assumida na verificação da influência do tipo de solo das bacias é que se espera que regiões com solos mais rasos ou impermeáveis armazenem menos água, e então um maior número de nascentes surge a partir da saturação mais rápida.

Outra variável explorada para cada bacia hidrográfica foi a chuva média anual. Esta variável foi escolhida porque o trabalho de Montgomery e Dietrich (1988) sugere que em regiões mais secas o início da rede de drenagem ocorre apenas para bacias de drenagem com área maior, enquanto bacias mais úmidas tem um menor limite de área de drenagem a partir do qual inicia o escoamento concentrado em canais.

Para caracterizar a chuva média anual foi utilizado o mapeamento de isoietas anuais, disponibilizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2010) Este mapa de isoietas foi interpolado para uma grade de mesma resolução que o modelo digital de elevação para a realização dos cálculos de chuva média na bacia.

O mapa final de chuva utilizado é apresentado na figura 7. Neste caso, procurou-se verificar se a maior quantidade de água que entra na bacia não resulta em um maior número de nascentes, devido a maior disponibilidade de água.

Por fim, também se espera que o escoamento de base em rios esteja intimamente relacionado com as propriedades geomorfológicas de uma bacia

hidrográfica, podendo ele ser considerado uma assinatura da variabilidade de características da bacia (COSTA; BACELLAR, 2010). Ou seja, espera-se que ele também possua uma relação com a área de drenagem mínima. Esta hipótese foi analisada já na década de 1960, com a sugestão que a vazão de base de um rio varia inversamente com o quadrado da densidade de drenagem (CARLSTON, 1963).

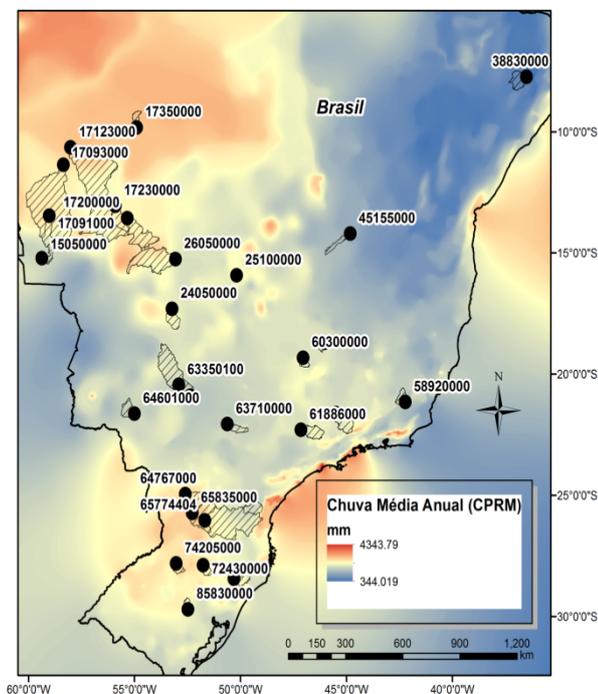


Figura 7 - Mapa de chuva média anual interpolada a partir das isoietas

Desta forma, foram analisadas duas variáveis relacionadas à vazão de base dos postos fluviométricos das bacias de estudo: o Índice de Vazão de Base (BFI ou *Base Flow Index*) e a relação  $Q_{90}/Q_{50}$ .

O Índice de Vazão de Base é uma medida da parcela de água subterrânea do hidrograma no exutório de uma bacia hidrográfica. Para a sua estimativa inicialmente deve ser aplicado um método de separação de escoamento para a obtenção da informação da vazão de base local. Posteriormente, o BFI é calculado através da divisão do volume de água estimada como subterrânea pelo volume total do hidrograma. Desta forma, valores mais altos de BFI estão relacionados com uma maior contribuição da água subterrânea para a vazão do rio, e valores mais baixos com uma menor contribuição da água subterrânea. O valor do BFI foi calculado para cada

posto através da aplicação de um filtro inverso apresentado em Collischonn e Fan (2012).

A vazão  $Q_{90}$  é o valor de vazão com probabilidade de ser superada ou igualada em 90% do tempo em um determinado local. Da mesma forma, a  $Q_{50}$  é a vazão com probabilidade de ser superada ou igualada em 50% do tempo. Elas são estimadas para locais de interesse através da construção da curva de permanência com dados fluviométricos. A relação  $Q_{90}/Q_{50}$  resulta em um parâmetro relacionado com a estimativa do índice de vazão de base que passa no exutório de uma bacia (COLLISCHONN; FAN, 2012). Da mesma forma que o BFI, valores mais altos de  $Q_{90}/Q_{50}$  estão relacionados com uma maior contribuição da água subterrânea, e valores mais baixos com uma menor contribuição da água subterrânea para a vazão do rio.

Os valores de porcentagem de área da bacia coberta por um tipo de geologia, declividade média (em porcentagem), tipo de solo e chuva média anual foram calculados para cada bacia hidrográfica de interesse com base no cruzamento dos mapas utilizados. O valor dos parâmetros  $Q_{90}/Q_{50}$  e índice de vazão de base (BFI) foram calculados com os dados dos postos fluviométricos correspondentes de cada bacia.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Estimativa da Área de Drenagem Mínima

Os resultados finais de área de drenagem mínima encontrados para cada uma das regiões de estudo são apresentados na tabela 2. As áreas de drenagem mínimas variaram entre 0,1 e 10 km<sup>2</sup>, sendo a maioria encontrada entre 0,1 e 0,8 km<sup>2</sup>, e a mediana em 0,5 km<sup>2</sup>.

### Estimativa Das Características Físicas de Cada Bacia

A tabela 3 apresenta um sumário dos resultados encontrados com este procedimento. É possível verificar que a geologia das bacias é uniforme, com dominância porosa ou fissural. Sendo assim, a amostragem de regiões adotada se apresentou adequada para caracterização pelo critério hidrogeológico e, portanto, possível de ser isolado o efeito desta característica sobre o valor de área de drenagem mínima esperado.

**Tabela 2 - Área de drenagem mínima estimada para cada bacia**

Estação	Rio	Ad_Min (km <sup>2</sup> )
15050000	Guaporé	0,50
17091000	Juruena	8,00
17093000	Juruena	10,00
17123000	Teles Pires	0,80
17200000	Arinos	0,60
17230000	Verde	1,10
17350000	Braço Sul	0,30
24500000	das Garças	0,80
26050000	das Mortes	0,70
70200000	Pelotas	0,10
72430000	Forquilha	0,20
74205000	Arroio Caturete	0,10
86100000	das Antas	0,10
38830000	Paraíba	0,10
60300000	Capivara	0,10
61537000	Verde	0,20
61886000	Mogi-Guaçu	0,30
63350100	Verde	4,20
63390000	Verde	0,40
63710000	do Peixe	0,30
64601000	Brilhante	1,00
64767000	Piquiri	0,10
65835000	Iguaçu	0,20
58920000	Muriaç	0,10
41050000	Ribeirão Arcado	0,20
25100000	Vermelho	0,10
45155000	Itaguari	4,00

### Elaboração das Relações Simplificadas

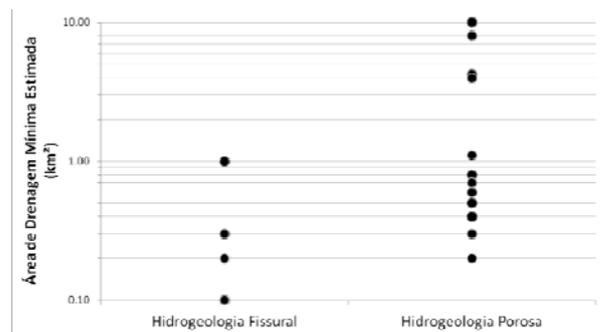
Para identificar a possível existência de associações entre os diferentes parâmetros físicos e a área de drenagem mínima, foi utilizada a correlação por ordenamento de Spearman (WILKS, 2005).

A partir da matriz de correlações (Tabela 4), podemos observar que a precipitação média anual e o tipo de solo, na classificação adotada, não apresentaram correlação significativa com a área de drenagem mínima calculada. Por outro lado, a área de drenagem mínima apresentou forte correlação com o BFI ( $r = +0,77$ ;  $p < 0,01$ ),  $Q_{90}/Q_{50}$  ( $r = +0,82$ ;

$p < 0,01$ ), % Geologia ( $r = +0,75$ ;  $p < 0,01$ ) e declividade média ( $r = -0,78$ ;  $p < 0,01$ ). Isso indica que esses parâmetros hidrológicos e características físicas, aqui propostas, devem contribuir para determinação de modelos, gráficos e critérios para estimativa do limiar de área de drenagem.

É possível verificar ainda a correlação elevada entre o índice de vazão de base (BFI) e a relação  $Q_{90}/Q_{50}$  dos postos analisados. Para reduzir o número de variáveis explicativas para a área de drenagem mínima, deste ponto em diante desconsideramos o BFI, por apresentar correlação mais fraca do que a  $Q_{90}/Q_{50}$ .

Tomando-se como ponto de partida a classificação em hidrogeologia fissural e porosa das bacias, nota-se que existe uma diferença na magnitude e na amplitude dos valores encontrados entre as duas classes assumidas. Isto é evidenciado na figura 8 e na tabela 5.



**Figura 8 - Relação entre hidrogeologia e área de drenagem mínima estimada**

Estes resultados indicam que o tipo de geologia da bacia já pode ser utilizado como guia para a estimativa dos valores de área de drenagem mínima a serem adotados, onde os valores encontrados para geologias fissurais são em geral menores (na ordem de  $0,2 \text{ km}^2$ ) que os valores encontrados em regiões de geologia predominantemente porosa (podendo variar de  $0,2$  até  $10 \text{ km}^2$ ). A correlação positiva do percentual de área de geologia porosa é um bom indicador de que a maior capacidade de armazenamento de água abaixo da superfície e sua influência nos caminhos preferenciais de escoamento, por exemplo, sub-superficial pode, de fato, explicar maiores limiares de área de drenagem para formação de nascentes e rede de canais.

**Tabela 3 - Sumário das características físicas das bacias analisadas**

Estação	BFI	Q90/Q50	% Geologia Porosa	% Geologia Fissural	Chuva Média Anual (mm)	Declividade Média %	Solo Profundo %	Solo Raso %
15050000	0,74	0,74	78	22	1411	2,7	49,9	50,1
17091000	0,94	0,9	100	0	1681	1,6	35,7	64,3
17093000	0,84	0,82	100	0	1814	1,6	52,9	47,1
17123000	0,61	0,53	88	12	1813	1,5	84,1	14,4
17200000	0,39	0,36	92	8	1844	1,9	17,1	82,9
17230000	0,72	0,65	100	0	1817	0,9	96,0	4,0
17350000	0,4	0,2	86	14	2119	2,2	18,9	81,1
24500000	0,83	0,7	90	10	1760	2,1	0,0	100,0
26050000	0,7	0,63	100	0	1802	1,6	70,4	29,6
70200000	0,45	0,34	0	100	1657	6,0	0,0	100,0
72430000	0,44	0,28	0	100	1809	2,7	100,0	0,0
74205000	0,33	0,11	2	98	1909	2,5	100,0	0,0
86100000	0,24	0,12	8	92	1728	8,0	46,7	53,3
38830000	0,03	0,00	0	100	596	2,2	0,0	100,0
60300000	0,70	0,51	0	100	1552	3,3	94,4	5,6
61537000	0,65	0,56	2	98	1552	7,1	73,4	26,6
61886000	0,56	0,50	15	85	1581	5,4	93,9	6,1
63350100	0,86	0,80	98	2	1481	2,1	34,0	66,0
63390000	0,84	0,74	100	0	1340	1,9	78,6	21,4
63710000	0,71	0,57	100	0	1424	3,3	91,3	8,7
64601000	0,66	0,56	4	96	1345	1,5	100,0	0,0
64767000	0,38	0,33	0	100	1900	4,5	49,4	50,6
65835000	0,52	0,35	0	100	1940	4,3	49,1	50,9
58920000	0,57	0,49	0	100	1321	7,2	95,0	0,6
41050000	0,36	0,42	100	0	1499	3,8	63,7	36,3
25100000	0,37	0,25	20	80	1731	6,2	7,6	92,4
45155000	0,87	0,82	100	0	1117	2,3	27,7	72,0

**Tabela 4 - Matriz dos coeficientes de correlação de Spearman entre as variáveis analisadas**

Variável	Ad_Min (km <sup>2</sup> )	BFI	Q90/Q50	% Geologia	Chuva Média Anual (mm)	Declividade Média %	% Solo
Ad_Min (km <sup>2</sup> )	1,00	-	-	-	-	-	-
BFI	0,77 <sup>a</sup>	1,00	-	-	-	-	-
Q90/Q50	0,82 <sup>a</sup>	0,96 <sup>a</sup>	1,00	-	-	-	-
% Geologia <sup>b</sup>	0,75 <sup>a</sup>	0,57 <sup>a</sup>	0,67 <sup>a</sup>	1,00	-	-	-
Chuva Média Anual (mm)	-0,01	0,29	-0,32	-0,06	1,00	-	-
Declividade Média %	-0,78 <sup>a</sup>	-0,48	-0,50	-0,56 <sup>a</sup>	-0,14	1,00	-
% Solo <sup>c</sup>	-0,01	0,07	0,06	-0,07	-0,03	-0,09	1,00

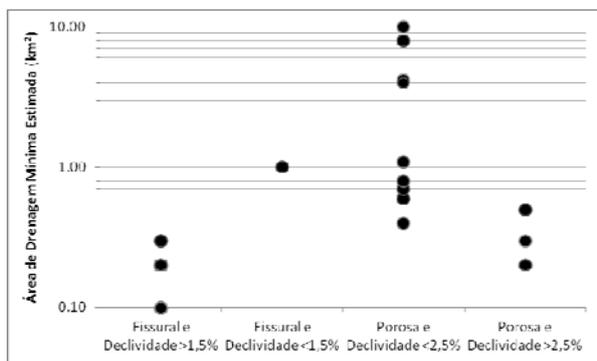
<sup>a</sup> Valores significativos para p<0,01<sup>b</sup> Valores para geologia porosa. Sendo a geologia fissural complementar em área, as correlações tem mesmo valor, mas sinal invertido.<sup>c</sup> Valores para solo profundo. Sendo o solo raso complementar em área, as correlações tem mesmo valor, mas sinal invertido.

**Tabela 5 - Área de drenagem mínima estimada em função da hidrogeologia classificada**

Variável	Admin Média (km <sup>2</sup> )	Desvio Padrão (km <sup>2</sup> )	Faixa de Variação (km <sup>2</sup> )
Hidrogeologia Fissural	0,21	0,24	0,10 - 1,00
Hidrogeologia Porosa	2,43	3,22	0,20 - 10,00

Contudo, apesar da relação identificada entre a classe de hidrogeologia predominante na bacia e a área de drenagem mínima esperada para a região apresentar uma separação de valores e faixas de variação razoável, a análise em conjunto desta característica com a declividade e a relação Q90/Q50 deve permitir um melhor agrupamento de classes, frente à heterogeneidade dos mecanismos que atuam no escoamento e formação da rede de drenagem.

Analisando a declividade, verifica-se que o maior valor encontrado para a área de drenagem mínima nas bacias de hidrogeologia predominantemente fissural (1,0km<sup>2</sup>) ocorre na bacia com menor declividade dentre as regiões de estudo. Da mesma forma, verifica-se que a maioria dos menores valores encontrados para a área mínima nas bacias de hidrogeologia predominantemente porosa (0,20 à 0,5km<sup>2</sup>) ocorrem nas bacias com declividade mais elevada. Adicionando estes fatores às análises, é encontrado o diagrama apresentado na figura 9 e os valores médios encontrados na tabela 6.



**Figura 9 - Relação entre hidrogeologia, declividade média da bacia e área de drenagem mínima estimada**

Os resultados encontrados com a inclusão da declividade média da bacia na análise dão uma indicação mais detalhada de valores a serem assumi-

dos em bacias de hidrogeologia predominante fissural, com diferentes declividades, além de serem úteis para a diferenciação dos valores a serem utilizados em regiões de hidrogeologia predominante porosa e declividades mais elevadas. Em regiões com declividade mais baixa e geologia porosa os resultados não parecem ser indicativos de uma relação precisa, onde, apesar de evidenciarem que os valores a serem utilizados são geralmente mais altos, a amplitude dos valores também é alta dentro desta classe definida. No entanto, a forte correlação negativa ( $r = -0,78$ ) da declividade com a área de drenagem mínima pode estar associada com o balanço dos processos de formação de canais erosional e de vertente. Em áreas mais planas, o escoamento possui menos energia, exigindo uma maior área de drenagem para formação distinguível da rede de drenagem.

**Tabela 6 - Área de drenagem mínima estimada em função da hidrogeologia e da declividade**

Variável	Ad Média (km <sup>2</sup> )	Desvio Padrão	Faixa de Variação
Fissural e Declividade <1,5%	0,15	0,08	0,10 - 0,30
Fissural e Declividade >1,5%	1,00	0,00	1,00 - 1,00
Porosa e Declividade <2,5%	3,06	3,46	0,40 - 10,0
Porosa e Declividade >2,5%	0,33	0,15	0,20 - 0,50

A terceira variável a ser utilizada na análise proposta é a relação Q90/Q50, que é um indicativo da porcentagem total da vazão que passa por um posto e que corresponde à vazão subterrânea (COLLISCHONN; FAN, 2012). O alto coeficiente de correlação obtido para Q90/Q50 ( $r = +0,82$ ,  $p < 0,01$ ), indica que o mesmo pode, sozinho, ser um bom indicador da área de drenagem mínima como demonstrado, por exemplo, na figura 10. A correlação positiva corrobora com os maiores valores de área de drenagem mínima em regiões onde a contribuição relativa de escoamento de base é maior. A estimativa desta variável depende da disponibilidade de dados de vazão, ao contrário da hidrogeologia da bacia e da declividade média, que depende de mapas de altitude e litologia. Dessa forma, em regiões com boa disponibilidade de dados fluviométricos, uma estimativa da área de drenagem mínima pode ser realizada rapidamente.

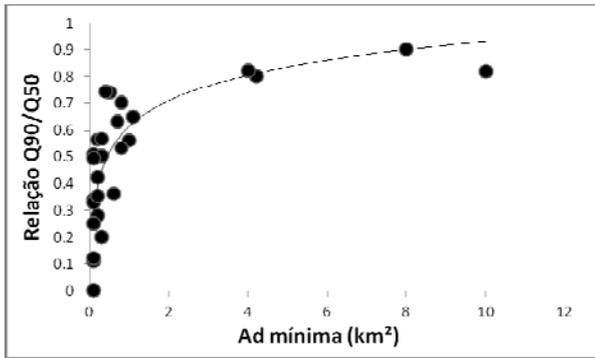


Figura 10 - Relação entre Q90/Q50 e área de drenagem mínima estimada

Esta relação também pode ser incluída dentro da análise realizada com a geologia e as declividades, para diferenciar os valores encontrados em regiões com geologia porosa e declividades mais baixas, obtendo o diagrama encontrado na figura 11. A tabela 7 apresenta um sumário dos resultados obtidos com a utilização da relação Q90/Q50.

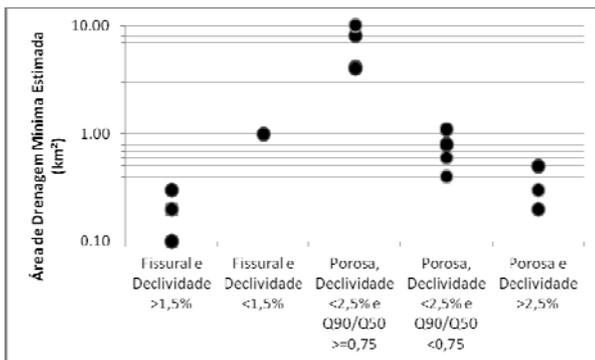


Figura 11 - Inclusão da relação Q90/Q50 com a área de drenagem mínima estimada

Tabela 7 - Área de drenagem mínima (km²) estimada em função da hidrogeologia, da declividade e da razão Q90/Q50

Variável	Média	Desvio	Faixa de Variação
Fissural e Declividade >1,5%	0,15	0,08	0,1 - 0,3
Fissural e Declividade <1,5%	1,00	-	1,0 - 1,0
Porosa, Declividade <2,5% e Q90/Q50 >=0,75	6,55	2,9	4 - 10
Porosa, Declividade <2,5% e Q90/Q50 <0,7	0,73	0,23	0,4 - 1,1
Porosa e Declividade >2,5%	0,33	0,15	0,2 - 0,5

Na ausência de informações sobre a declividade média da região de estudo, pode ser construída uma relação do tipo apresentada na figura 12, com os dados de geologia e relação Q90/Q50. A tabela 8 resume os valores encontrados para esta parametrização do valor de área de drenagem mínima em função apenas da geologia e da razão Q90/Q50.

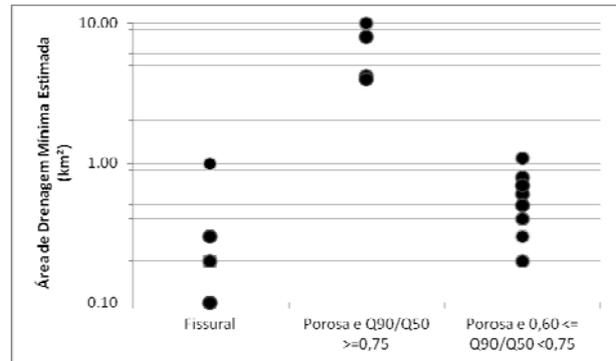


Figura 12 - Relação da razão Q90/Q50 e geologia da bacia com a área de drenagem mínima estimada

Tabela 8 - Área de drenagem mínima estimada em função da hidrogeologia e da razão Q90/Q50

Variável	Média	Desvio	Faixa de Variação
Fissural	0,15	0,07	0,1-0,3
Porosa e Q90/Q50 >=0,75	6,55	2,94	4,0-10,0
Porosa e Q90/Q50 <0,75	0,60	0,28	0,2-1,1

### Uso de Valores de Área de Drenagem Mínima para Bacias Heterogêneas

Um resultado relevante da análise exploratória realizada reside no fato de que foram encontradas relações gerais entre a área de drenagem mínima que pode ser utilizada para a definição da rede de drenagem e as características geológicas, de declividade e de vazão de base das bacias estudadas. E, no estudo, foram utilizadas bacias com configuração física homogênea.

Desta forma, pode-se esperar que, para bacias que não sejam homogêneas nas características exploradas, a área de drenagem mínima também não seja igual em toda a área da bacia, ao contrário do que é usualmente adotado em estudos hidrológicos e em programas de SIG para a definição automática da rede de drenagem.

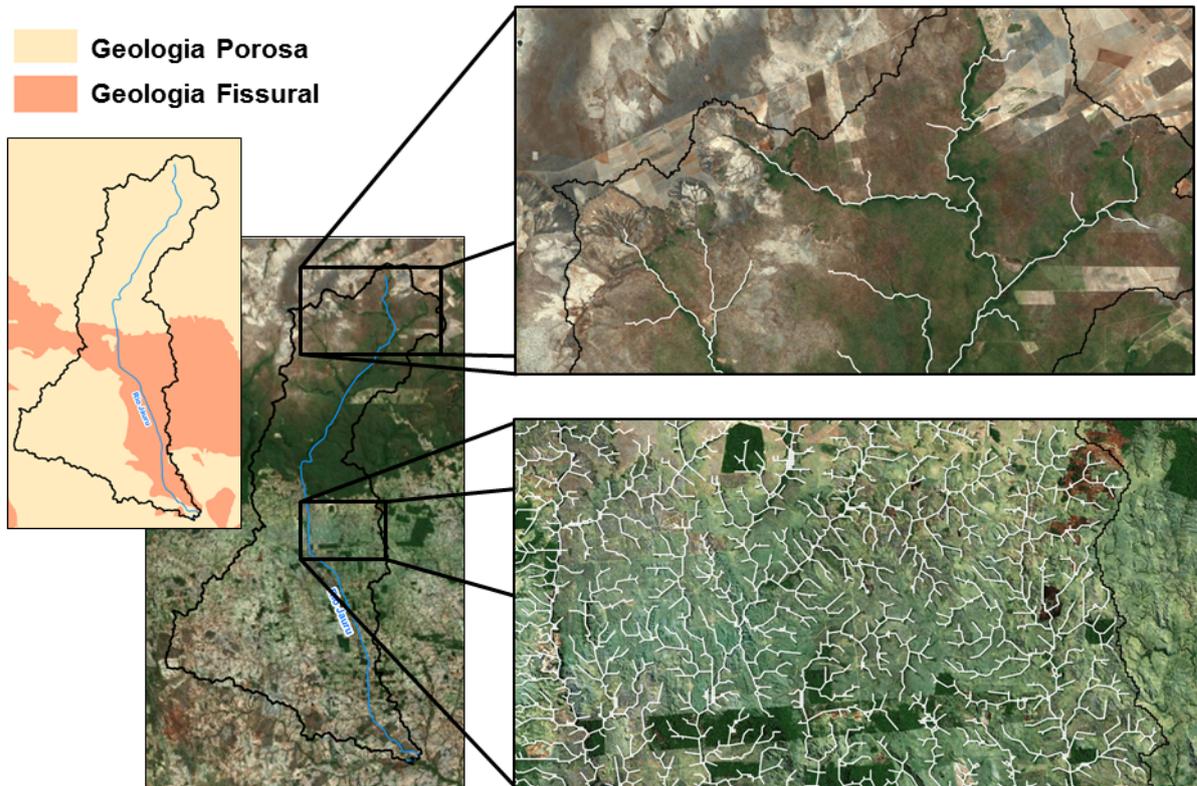


Figura 13 - Bacia do Rio Jauru e a relação de sua densidade de drenagem com a hidrogeologia da região. As redes de drenagem em branco foram obtidas automaticamente como aproximação da drenagem real visualizada nas imagens para facilitar a compreensão das diferenças observadas

Ou seja, quando as características físicas da bacia diferem dentro da sua área, também devem ser utilizados diferentes valores de área de drenagem mínima para a melhor representação da hidrografia da região.

Esta constatação pode ser exemplificada através do observado na bacia do Rio Jauru (região norte do Pantanal Brasileiro), apresentada na figura 13. Nota-se que toda a porção norte da bacia é dominada por uma geologia de característica porosa, enquanto que na região sul da bacia existe uma grande área com predomínio de geologia fissural.

É possível observar que a região da cabeceira da bacia possui uma quantidade pequena de cursos de água, com pequeno número de nascentes. Já na região de jusante da bacia, onde a geologia predominante é fissural, existe uma elevada densidade de drenagem, com a presença de várias nascentes.

Portanto, como resultado deste estudo, é ressaltada a necessidade de utilização de diferentes valores de área de drenagem mínima para bacias com diferenças nas características físicas relaciona-

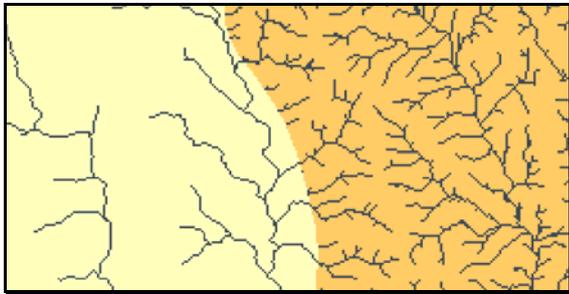
das à definição deste valor, como no exemplo da bacia do rio Jauru.

Contudo, esta definição diferencial do valor da área de drenagem mínima para regiões heterogêneas é um procedimento que dificilmente pode ser aplicado na prática, uma vez que implica na necessidade de um grande número de combinações de ferramentas de processamento de MDEs.

Assim, recomenda-se que, para a melhor definição da rede de drenagem dentro de bacias heterogêneas, seja utilizada uma função de geoprocessamento de definição de rede de drenagem por regiões, a seguir sugerida e apresentada.

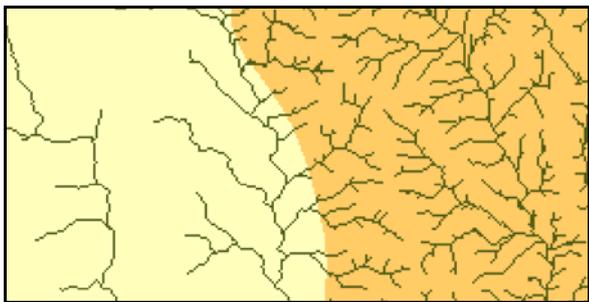
Primeiramente, partindo do princípio que uma bacia hidrográfica heterogênea em suas características físicas seja formada por um número finito de regiões homogêneas, é possível identificar as nascentes de forma diferenciada em cada uma destas regiões homogêneas através da classificação da imagem de áreas acumuladas da bacia com diferentes áreas de drenagem mínima para cada região homogênea.

Este procedimento tende a gerar uma rede de drenagem para cada região definida. Contudo, como as regiões possuem diferentes áreas de drenagem mínima, a hidrografia gerada pode conter descontinuidades (conforme a figura 14, para uma região exemplo).



**Figura 14 - Rede de drenagem gerada com a utilização de uma área de drenagem mínima diferencial para duas regiões diferentes de uma mesma bacia, gerando descontinuidades**

Com a existência das descontinuidades, se faz necessária a aplicação de um segundo passo no processamento de definição da rede de drenagem a partir das nascentes identificadas no primeiro momento. Esta definição pode ser feita através do mapa de direções de fluxo, e consiste basicamente na definição dos rios da bacia a partir de todas as células que tiverem a sua nascente identificada no primeiro passo. O resultado desta operação pode ser visualizado na figura 15 para a região exemplo.



**Figura 15 - Rede de drenagem gerada após o segundo passo do procedimento sugerido para duas regiões diferentes de uma mesma bacia**

O procedimento sugerido pode ser utilizado, portanto, para a geração de mapas de rede de drenagem com valores de área de drenagem mínima em diferentes regiões de uma mesma bacia.

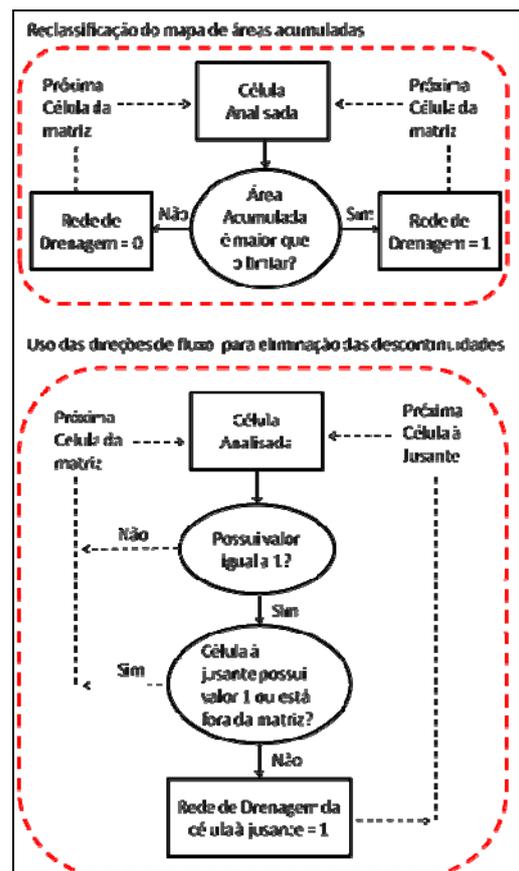
A sequência de passos pode ser resumida por: 1) Definição das nascentes por reclassificação

do mapa de áreas acumuladas nas diferentes regiões homogêneas, gerando o mapa temporário de rede de drenagem; 2) Eliminação das descontinuidades da rede de drenagem com o mapa de direções de fluxo.

Estas operações podem facilmente ser programadas como uma função de geoprocessamento em ferramentas de SIG, onde na figura 16 é dada uma sugestão de algoritmo.

Para a aplicação da sequência de passos são necessárias três informações de entrada: mapa de direções de fluxo, mapa de áreas acumuladas e mapa de regiões homogêneas. Destes, os dois primeiros são resultados naturais dos procedimentos tradicionais de delimitação de bacias hidrográficas a partir de MDEs, e o terceiro seria definido a partir de mapas geológicos, de declividades e/ou informações de estações fluviométricas.

Para a definição dos valores de área de drenagem mínima de diferentes regiões, sugere-se a estimativa inicial dada pelas tabelas e gráficos apresentados anteriormente.



**Figura 16 - Fluxograma do algoritmo para o procedimento sugerido**

## CONCLUSÕES

Neste artigo é apresentado um trabalho exploratório de busca por relação entre o valor de área de drenagem mínima necessário para a melhor representação das nascentes e diferentes características físicas de bacias hidrográficas, como geologia, declividade média, tipo de solo, chuva média anual, índice de vazão de base e relação Q90/Q50. As informações físicas das bacias foram calculadas a partir de mapas e dados de estações fluviométricas, e o valor da melhor área de drenagem mínima necessária foi estimada com base na comparação entre a hidrografia derivada de um MDE e nascentes identificadas em imagens de satélite e fotos aéreas.

Como resultado do estudo exploratório, foram identificadas relações gerais para o valor da área de drenagem mínima em função do tipo de geologia (porosa ou fissural), declividade média e relação Q90/Q50 das bacias hidrográficas. O valor da área de drenagem mínima média, nas regiões analisadas, variou desde 0,15 km<sup>2</sup> (hidrogeologia fissural e declividades > 1,5%) até 6,55 km<sup>2</sup> (hidrogeologia porosa, declividades > 2,5% e relação Q90/Q50 >= a 0,75). Espera-se que estes valores possam ser utilizados como indicadores simples para a definição deste parâmetro durante o processo de delimitação de redes de drenagem. Vale destacar que o uso dos critérios ou relações simplificadas e a comparação visual pode afetar a definição da área de drenagem mínima. Uma solução para possíveis problemas consiste em testar outras relações. Como exemplo disso pode-se analisar outras relações entre vazões de referência e outras estatísticas para definir a declividade.

É importante destacar que a hipótese de homogeneidade das bacias pode ser limitada, por exemplo, pela escala espacial da fonte de dados em relação à escala dos processos hidrológicos. Outro resultado importante do estudo é relacionado a ser inapropriado o uso de um único valor de área de drenagem mínima para bacias com características físicas variadas. Como foi verificada uma relação entre a área de drenagem mínima e características físicas das bacias, é identificada a necessidade da utilização de valores diferentes para as diferentes regiões que compõem uma bacia hidrográfica heterogênea.

Neste sentido, também foi sugerido um método (incluindo o algoritmo) para a delimitação da rede de drenagem a partir de um MDE para uma área composta por diferentes regiões com características físicas distintas, onde pode ser definido um

valor de área de drenagem mínima para cada região desejada. Para a aplicação do método basta a definição do mapa de regiões com mesma área de drenagem mínima e a utilização dos mapas normalmente calculados de área acumulada e direção de fluxo da bacia. Espera-se que este método sirva como referência e seja utilizado como uma função de geoprocessamento para bacias heterogêneas.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao CNPQ pela bolsa de Mestrado concedida durante a pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- BAND, E. L. Topographic partition of watershed with Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, v. 22, n. 1, p. 15-24, 1986.
- BERTOLO, F. *Catchment delineation and characterization: a review*. Ispra (VA), Itália: Space Applications Institute, Joint Research Centre, 2000.
- BOMFIM L. F. C. Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em ambiente SIG: concepção e metodologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., 2010, São Luís. *Anais...* São Luís: [s.n.], 2010.
- BUARQUE, D. C.; FAN, F. M.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 2, 91-103, 2009.
- BURROUGH P. A.; MCDONNELL R. A. *Principles of Geographical Information Systems*. USA: Oxford University Press, 1998. Spatial Information Systems.
- CARLSTON, C. W. *Drainage density and streamflow*. USGS Professional Paper 422-C. Cornell: U.S. Govt. Print. Off, 1963
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. *Hydrological Processes*, v. 27, n. 18, p. 2614-2622, 2012. doi: 10.1002/hyp.9391.

- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. *Atlas pluviométrico do Brasil*: levantamento da geodiversidade. Brasília: CPRM, 2010. Primeiros resultados. (Programa Geologia do Brasil).
- COSTA, F. M.; BACELLAR, L. A. P. Caracterização hidrogeológica de aquíferos a partir do fluxo de base. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, p. 173-183, 2010.
- DAROS, D.; BORGA, M. Use of digital elevation model data for the derivation of the geomorphological instantaneous unit hydrograph. *Hydrological Processes*, v. 11, n. 1, p. 13-33, 1997.
- DINGMAN, S. L. *Physical hydrology*. Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall, 2002.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D. *Projeto Amazônia*. IPH – UFRGS. Manual Arc-HYDRO para aplicação do modelo MGB-IPH. Versão 1.2. Agosto de 2010. 65 p.
- FARR, T. G.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROSEN, P.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; BURBANK, D.; OSKIN, M.; ALSDORF, D. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, v. 45, n. 2, 2007.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. *The Digital Soil Map of The World*. USA: FAO, 2003. Version 3.6.
- HEMLINGER, K. R.; KUMAR, P.; FOUFOULA-GEORGIOU, E. On the use of digital elevation model data for hortonian and fractal analyses of channel networks. *Water Resources Research*, v. 29, n. 8, p. 2599-2613.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.
- IJJASZ-VASQUEZ, E. J.; BRAS, R. L. Scaling regimes of local slope versus contributing area in digital elevation models. *Geomorphology*, v. 12, n. 4, p. 299-311, 1995.
- ISTANBULLOGLU, E., TARBOTON, D.G., PACK, R.T., LUCE, C. 2002. A probabilistic approach for channel initiation. *Water Resources Research*, 38 (12), 1325.
- JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.
- LEPSCH, I. F. *Formação e conservação dos solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- MCNAMARA, J.P., ZIEGLER, A.D., WOOD, S.H., VOGLER, J.B. 2006. Channel head locations with respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand. *Forest Ecology and Management* 224, 147-156.
- MAIDMENT, D. (Ed.). *Arc Hydro - GIS for water resources*. Redlands, CA.: ESRI Press, 2002.
- MARK, D. M. Automatic detection of drainage network from digital elevation models. *Cartographica*, v. 21, n. 2-3, p. 168-178, 1984.
- MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. Automated recognition of valley line and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology*, v. 167, n. 1-4, p. 393-396, 1995.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Where do channels begin?. *Nature*, v. 336, n. 6196, p. 232-234, 1988.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Source areas, drainage density and channel initiation. *Water Resources Research*, v. 25, n. 8, p. 1907-1918, 1989.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Channel initiation and the problem of landscape scale. *Science*, v. 255, n. 5046, p. 826-830, 1992.
- MONTGOMERY, D. R.; FOUFOULA-GEORGIOU, E. Channel network source representation using digital elevation models. *Water Resources Research*, v. 29, n. 12, p. 3925-3934, 1993.
- MOUSSA, R.; BOCQUILLON, C. Fractal analyses of tree-like channel networks from digital elevation model data. *Journal of Hydrology*, v. 187, n. 1-2, p. 157-172, 1996.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. *Revista*

Geográfica Acadêmica, v. 2, n. 2, p. 84-95, 2008

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; RISSO, A.; MENDES, C. A. Errors in river lengths derived from raster digital elevation models. *Computers & Geosciences*, v. 34, n. 11, p. 1584-1596, 2008.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL. *Folha SD. 23* Brasília. Rio de Janeiro, 1982. 1 CD-ROM. (Levantamento de recursos naturais, v. 29).

SORRIBAS, M. V.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN W. Buscando áreas de drenagem mínima para definição da rede de drenagem a partir da litologia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. *Anais...* Maceió: [s.l.], 2011.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions American Geophysical Union*, v. 38, n. 6, p. 913-920, 1957.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrologic Processes*, v. 5, n. 1, p. 81-100, 1991.

TARBOTON, D. G., BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. A Physical basis for drainage density. *Geomorphology*, v. 5, n. 1/2, p. 59-76, 1992.

TARBOTON, D. G. The analysis of River Basins and channel networks using digital terrain data. Massachusetts: Institute of Technology, 1989.

WEBER, E.; HASENACK, H.; FERREIRA, C. J. S. *Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação*. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia, 2004. Disponível em: <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

WILKS, D. S. *Statistical Method in the Atmospheric Sciences*. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2005. 648 p. (International geophysics series, v. 91).

ZEILHOFER, P. 2001 Modelação de Relevo e Obtenção de Parâmetros Fisiográficos na Bacia do Rio Cuiabá RBRH - VOLUME. 6 - Nº. 3 - JUL/SET - 2001.

## On The Definition Of A Drainage Network From Digital Elevation Models

### ABSTRACT

This paper presents an exploratory study of the relationship between the minimum drainage area necessary for the best representation of headwaters obtained from processing Digital Elevation Models (DEMs) and the different physical characteristics of watersheds. Physical information was calculated from maps and flow data, and the value of the best minimum drainage area was estimated based on the comparison of the DEM derived drainage to headwaters identified in satellite images and aerial photos. As a result, relationships were identified for the general value of the minimum drainage area depending on the type of geology (porous or hard rock), average slope of the basin and  $Q_{90}/Q_{50}$  relationship. It is expected that these values can be used as indicators for simple definition of this parameter. Another important result of this study involves the inappropriate use of a single value of minimum drainage area in basins with varying physical characteristics, where a method is suggested (including the algorithm) for the delimitation of the drainage network of areas composed of regions with various physical characteristics. This method is expected to be used as a function for geoprocessing heterogeneous basins.

**Keywords:** Digital Elevation Model; Drainage Network; Geoprocessing; GIS