



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**
– Mestrado –

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE EM REDES DE
DRENAGEM PROCESSADAS A PARTIR DE MODELOS DIGITAIS
DE ELEVAÇÃO**

Por

Thâmara Martins Ismael de Sousa

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Março de 2016

Thâmara Martins Ismael de Sousa

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE EM REDES DE
DRENAGEM PROCESSADAS A PARTIR DE MODELOS
DIGITAIS DE ELEVAÇÃO**

*Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da
Paraíba como requisito parcial para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.*

Orientador: Dr. Adriano Rolim da Paz

João Pessoa – Paraíba

Março de 2016

S725a Sousa, Thâmara Martins Ismael de.
 Avaliação da qualidade em redes de drenagem
 processadas a partir de modelos digitais de elevação /
 Thâmara Martins Ismael de Sousa.- João Pessoa, 2016.
 109f.
 Orientador: Adriano Rolim da Paz
 Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
 1. Engenharia civil e ambiental. 2. Rede de drenagem.
 3. MDE. 4. Técnicas de avaliação.

UFPB/BC

CDU: 624:504(043)

Thâmara Martins Ismael de Sousa

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE EM REDES DE
DRENAGEM PROCESSADAS A PARTIR DE MODELOS
DIGITAIS DE ELEVAÇÃO**

Banca examinadora

Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz – UFPB
Orientador

Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos – UFPB
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Iana Alexandra Alves Rufino – UFCG
(Examinadora Externa)

Agradecimentos

A Deus pelo dom da vida, pela luz que sempre guiou os meus passos e por todas as bênçãos que recebi em toda minha trajetória.

Aos meus pais, por todo amor e dedicação, em especial à minha mãe Nara e a minha filha Maria Clara pela compreensão em todos os momentos em que me fiz ausente, ao meu irmão Thomas e minha cunhada Dalina Jara, por estarem sempre dispostos a ajudar.

Ao meu esposo, Rodrigo, por todo amor e compreensão, por ser o grande incentivador dos meus projetos de vida e por me fazer tão feliz.

Ao Prof. Dr. Adriano Rolim da Paz, pela orientação, confiança, conselhos, por ouvir, atenciosamente, os meus anseios, por todo aprendizado e incentivo constantes durante todos os momentos de nossa convivência.

À Alzira Gabrielle por sempre estar disposta a ajudar e por ser sempre tão adorável e prestativa.

Aos grandes amigos do PPGECA, Luara, Hozana Raquel, Jerônimo, Antônio Henrique, Aline e Jobson pelos muitos momentos compartilhados e por sempre ouvirem meus desabafos. Vocês me fortaleceram nos momentos difíceis desta caminhada!

Aos examinadores, professores, Dra. Iana Alexandra Alves Rufino – UFCG e Dr. Celso Augusto Guimarães Santos – UFPB, por terem aceitado o convite para serem membros da banca de avaliação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFPB.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro fornecido no desenvolvimento desta pesquisa.

E a todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

Muito obrigada!

Resumo

Em muitos estudos ambientais é importante saber a qualidade da rede de drenagem gerada pelo processamento de MDE, como em estudos que trabalham com redes de drenagem derivadas de diferentes procedimentos, obtidas de diferentes fontes ou mesmo para testar novos algoritmos de obtenção de direções de fluxo. Nesses e em outros casos é preciso avaliar a qualidade da rede de drenagem, julgando o quão próximo está à rede de drenagem gerada automaticamente de uma rede de drenagem de qualidade conhecida, tomada como referência. Para tanto, são citadas na literatura diferentes técnicas de avaliação da qualidade de redes de drenagem. Ocorre que, na maioria das vezes, estas técnicas são utilizadas com pouco ou nenhum critério, comprometendo os resultados. Esta pesquisa teve por objetivo a avaliação de técnicas utilizadas para a análise de redes de drenagem, realizando um levantamento das principais técnicas e métricas citadas na literatura identificando as principais limitações e potencialidades para aplicação destas técnicas em redes de drenagem de alta e baixa resolução espacial. A bacia hidrográfica do rio Uruguai foi tomada como estudo de caso. As redes de drenagem foram obtidas a partir do processamento de MDE em alta resolução espacial e em baixa resolução espacial por traçado manual, processadas de MDE por reamostragem e por *upsampling* de direções de fluxo. A qualidade das redes de drenagem foi avaliada de forma qualitativa e quantitativa a partir de vários critérios e métricas, tomando como referência, na maioria dos casos, uma rede vetorizada das imagens LANDSAT, mas em alguns casos a comparação ou avaliação foi feita tomando a rede de baixa resolução construída manualmente como a rede de referência. Verificou-se que a inspeção visual das redes de drenagem foi fundamental para avaliação das redes de drenagem, pois permitiram avaliar criticamente o desempenho das diferentes técnicas de avaliação da qualidade das redes de drenagem. Pode-se constatar que as técnicas que se baseiam na comparação de características da rede de drenagem não conseguiram expressar quantitativamente o real desempenho dos traçados da rede de drenagem e que os erros são maiores para os rios pertencentes às bacias de maior área de drenagem. As técnicas que quantificam a área formada entre as redes de drenagem não fornecem resultados adequados para indicação da qualidade das redes de drenagem, sem que seja levado em consideração o comprimento da drenagem. As técnicas de comparação espacial de quantificação de áreas fora de concordância com a bacia hidrográfica de alta resolução e distância média entre as delimitações das bacias hidrográficas apontaram resultados adequados para avaliação da qualidade das redes de drenagem. A quantificação do percentual da rede de drenagem dentro do *buffer* conseguiu identificar o padrão de qualidade verificado na inspeção visual. Espera-se que este estudo tenha fornecido resultados que funcionem como guia para o desenvolvimento de futuros trabalhos que utilizem MDE para obtenção de rede de drenagem e tenham como etapa intermediária a qualidade da rede de drenagem processada.

Palavras-chave: Rede de drenagem; MDE; Técnicas de avaliação.

Abstract

In many environmental studies it is important to know the quality of drainage network generated by digital elevation model (DEM) processing, as studies that works with drainage networks derived from different procedures obtained from different sources or test new algorithms of obtaining flow directions. In these and in other cases it is necessary evaluate drainage network quality, judging how close it is to the automatically generated drainage system of quality drainage system known, taken as reference. Therefore, the are cited in the literature different evaluation techniques for assessing the quality of drainage network. In most cases, these techniques are utilized with little or no discretion. The present research aims at the assessment of techniques used for the analysis of drainage networks, conducting a survey of the main techniques and metrics cited in the literature identifying the main limitations and potential for the application of these techniques in high and low drainage networks resolution. The Uruguay river basin. Was taken as a case study. It was generated drainage networks obtained from DEM processing in high-resolution spatial and low spatial resolution by manual tracing, processed from DEM for resampling and upscaling of flow directions. The evaluation of drainage networks was evaluated in qualitative and quantitative form from various criteria and metrics, taking as reference, in the most cases, the network vector of LANDSAT imagens, but in some cases, the comparison or evaluation was done taking the low resolution done manually as the reference network. It was verified that the visual inspection of drainage systems was essential for evaluation of drainage networks, as allowed critically evaluate the performance of different techniques for assessing the quality of drainage networks. It can be seen that the techniques are based on the comparison of drainage network characteristics failed to quantitatively express the actual performance of the traces of the drainage network and the errors are larger for the rivers belonging to the largest drainage basins area. The techniques to quantify the area formed between the drainage systems without having to take into consideration the length of the drain. The spatial comparison techniques to quantify areas out of agreement with the watershed high resolution and average distance between the boundaries of river basins showed adequate results for assessing the quality of drainage networks. The quantification of the percentage of drainage networks inside the buffer could identify the standard of quality seen in visual inspection. It is expected that this study has provided results that work as a guide for the development of future work using DEM to obtain drainage network and as intermediate step the quality of drainage network processed.

Key-words: Drainage network; DEM; Evaluation techniques.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Algoritmos de direção de fluxo. Fonte: Pelletier (2008).....	23
Figura 2 – (a) Escolha da direção de fluxo pela maior declividade indicando em qual sentido ocorre a drenagem e (b) possíveis direções de fluxo para um dos oito <i>pixels</i> . Fonte: Buarque et al. (2009).....	23
Figura 3. (a) Geração de linhas irreais na determinação da rede de drenagem em áreas planas pelo algoritmo D8. (b) Minimização de erros gerados na extração da rede de drenagem em áreas planas com método D8 utilizando um fator de aleatoriedade. Fonte: Paz e Collischonn (2008).....	24
Figura 4 - Exemplo de grades de (a) alta resolução (<i>pixels</i>) do Modelo Numérico do Terreno disponível e (b) de baixa resolução (<i>células</i>) empregada em um modelo hidrológico aplicado a grandes bacias (Fonte: Paz et al., 2005).....	27
Figura 5 – Métodos de obtenção de redes de drenagem de baixa resolução (a) exemplo de procedimento de reamostragem de MDE; (b) exemplo de procedimento de <i>upscaling</i> de direções de fluxo. Fonte: Adaptado de Saraiva e Paz (2014).....	29
Figura 6. Comparação entre duas redes de drenagem, a de referência (linha contínua) e a extraída do MDE do SRTM (linha tracejada). Fonte: Buarque et al. (2009).....	32
Figura 7 – Exemplo de comparação visual entre duas redes de drenagem de baixa resolução obtidas por diferentes métodos. As letras marcam os erros na atribuição de direções de fluxo entre o método de (a) método direto e (b) o <i>upscaling</i> gradual. Fonte: Saraiva e Paz (2014).....	33
Figura 8 - Critérios de avaliação de similaridade entre rede de drenagem: área de drenagem e delimitação de bacia hidrográfica. Fonte: Adaptado de Davies e Bell (2008).....	35
Figura 9 - Critérios de avaliação de similaridade entre rede de drenagem por distância média. Fonte: Adaptado de Davies e Bell (2008).....	35
Figura 10 – (a) Área de deslocamento entre duas linhas de drenagem (McMaster, 1986) e (b) área de deslocamento entre duas linhas de drenagem com abordagem proposta por Reinoso (2010). Fonte: Reinoso (2010).....	36
Figura 11 - Critérios de avaliação de similaridade entre rede de drenagem porcentagem dentro do <i>buffer</i> . Fonte: Adaptado de Davies e Bell (2008).....	37
Figura 12 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai com indicação dos principais trechos de rios.....	39
Figura 13 – Fluxograma de etapas metodológicas da pesquisa.....	41
Figura 14 – Exemplo de construção de rede manual de referência em um trecho do rio Quaraí na resolução de 5 km (em azul a rede vetorizada oriunda de imagens LANDSAT e em vermelho a indicação do caminho pixel a pixel estabelecido manualmente na resolução degradada de 5 km – cujos pixels são indicados pela grade em linhas pretas).....	43

Figura 15. Determinação do <i>pixel</i> exutório no algoritmo COTAT+. (a): Célula de baixa resolução. (b): Zoom em uma célula do modelo hidrológico. O <i>pixel</i> I possui maior área de drenagem acumulada, mas por ter comprimento do curso d'água dentro da célula menor do que CMM é rejeitado para <i>pixel</i> exutório; pelo mesmo motivo o <i>pixel</i> III é rejeitado; o <i>pixel</i> IV é então testado e aceito para <i>pixel</i> exutório da célula. Fonte: Paz (2008).....	46
Figura 16. Definição da direção de fluxo nas células (baixa resolução) pelo algoritmo COTAT+, com base nas informações dos <i>pixels</i> (alta resolução). Na célula 2: (a) O <i>Pixel</i> Exutório (PE2) drenará para a célula 3 se a diferença das áreas de drenagem acumuladas do PE2 (<i>pixel</i> inicial) e o PE3 (<i>pixel</i> testado) for maior que o valor pré-estabelecido da AIM (b); A célula 2 só drenará para célula 4, caso a condição anterior não seja atendida encontrando o <i>pixel</i> PE4 como exutório (c). Fonte: Paz (2008).....	47
Figura 17. Comparação espacial entre duas delimitações de uma bacia hidrográfica. Fonte: Adaptado de Freitas et al. (2012).....	51
Figura 18. Distância média entre duas delimitações de uma bacia hidrográfica. Fonte: Adaptado de Freitas et al. (2012).....	51
Figura 19 – Inspeção visual da rede de drenagem de alta resolução espacial (em preto) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT, tomada como referência (em azul), com destaque para trechos do rio Quaraí.....	55
Figura 20 – Inspeção visual da rede de drenagem de alta resolução espacial (em preto) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT, tomada como referência, com destaque para trechos dos rios Içamaquã, Piratinim e Ijuí.....	56
Figura 21 – Inspeção visual da rede de drenagem de alta resolução espacial (em preto) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT, tomada como referência (em azul), com destaque para trechos do rio Peixe e rio Uruguai no trecho alto.....	57
Figura 22 – Inspeção visual da rede de drenagem de alta resolução espacial (em preto) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT, tomada como referência (em azul), com destaque para trechos do rio Uruguai nos trechos médio e baixo.....	58
Figura 23 – Valores de diferença percentual entre os comprimentos (a) sinuosidade (b) da rede de drenagem extraída de MDE em alta resolução espacial e a rede vetorizada de imagens LANDSAT.....	60
Figura 24 – Valores de área (a) e distância média (b) entre a rede de drenagem de alta resolução e a rede vetorizada de imagens LANDSAT.....	61
Figura 25 – Traçado do rio Quaraí obtido por traçado manual, por reamostragem e por <i>upscaling</i> em diferentes resoluções espaciais.....	64
Figura 26 – Traçado do rio Içamaquã obtido por traçado manual, por reamostragem e por <i>upscaling</i> em diferentes resoluções espaciais.....	65
Figura 27 – Traçado do rio Piratinim obtido por traçado manual, por reamostragem e por <i>upscaling</i> em diferentes resoluções espaciais.....	66

Figura 28 – Traçado do rio Ijuí obtido por traçado manual, por reamostragem e por <i>upscaling</i> em diferentes resoluções espaciais.....	67
Figura 29 – Traçado do rio Peixe obtido por traçado manual, por reamostragem e por <i>upscaling</i> em diferentes resoluções espaciais.....	68
Figura 30 – Traçado do rio Uruguai trecho alto obtido por traçado manual, por reamostragem e por <i>upscaling</i> em diferentes resoluções espaciais.....	69
Figura 31 – Traçado do rio Uruguai trecho médio obtido por traçado manual, por reamostragem e por <i>upscaling</i> em diferentes resoluções espaciais.....	70
Figura 32 – Traçado do rio Uruguai trecho baixo obtido por traçado manual, por reamostragem e por <i>upscaling</i> em diferentes resoluções espaciais.....	72
Figura 33 – Percentual de células com direção de fluxo errada entre os métodos de <i>upscaling</i> de direções de fluxo e reamostragem do MDE em relação à rede de referência.....	74
Figura 34 – Valores de diferença percentual entre as áreas (a) e perímetros (b) das bacias hidrográficas obtidas por reamostragem e <i>upscaling</i> em relação à bacia extraída do MDE em alta resolução.....	76
Figura 35 – Valores de diferença percentual entre os coeficientes Kc (a) e Kf (b) das bacias hidrográficas obtidas por reamostragem e <i>upscaling</i> em relação à bacia extraída de MDE em alta resolução espacial.....	77
Figura 36 – Valores de diferença percentual entre os comprimentos das redes de drenagem obtidas por traçado manual (a), reamostragem (b) e <i>upscaling</i> (c) em relação à rede vetorizada das imagens LANDSAT.....	79
Figura 37 – Valores de diferença percentual entre os valores de sinuosidade das redes de drenagem obtidas por traçado manual (a), reamostragem (b) e <i>upscaling</i> (c) e em relação à rede vetorizada das imagens LANDSAT.....	82
Figura 38 – Delimitações da bacia do rio Uruguai com base nas redes de drenagem obtidas por reamostragem (em vermelho), por <i>upscaling</i> (em verde) e de alta resolução espacial – 100m (em preto).....	84
Figura 39 – Valores de área fora de concordância e diferença percentual entre as delimitações das bacias de alta resolução espacial e as obtidas por reamostragem e <i>upscaling</i> em diferentes resoluções espaciais.....	85
Figura 40 – Valores de área relativa fora de concordância e distância média entre as delimitações das bacias de alta resolução espacial e as obtidas por reamostragem e <i>upscaling</i> em diferentes resoluções espaciais.....	87
Figura 41 - Valores de área entre a rede de drenagem por traçado manual (a), por reamostragem (b) e <i>upscaling</i> (c) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT.....	88
Figura 42 - Área entre a rede de drenagem por reamostragem (em preto) (a) e <i>upscaling</i> (em preto) (b) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT (em azul) no trecho alto do rio Uruguai.....	88

Figura 43 - Área entre a rede de drenagem obtida por <i>upsampling</i> (em preto) e a rede a partir de imagens LANDSAT (em azul) com destaque no rio Icamaquã.....	89
Figura 44 - Valores de área entre as redes de drenagem por reamostragem (a) e <i>upsampling</i> (b) em relação à rede por traçado manual.....	90
Figura 45 - Distâncias médias entre a rede de drenagem por traçado manual (a), por reamostragem (b) e por <i>upsampling</i> (c) e a rede de drenagem vetorizada de imagens LANDSAT em diferentes resoluções espaciais.....	90
Figura 46 - Distância média entre rede por traçado manual (em verde) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT (em azul) com destaque para o trecho baixo do rio Uruguai na resolução de 30 km.....	91
Figura 47 - Distância média entre as redes de drenagem de baixa resolução espacial, por reamostragem (a) e <i>upsampling</i> (b) e as rede de drenagem por traçado manual em diferentes resoluções.....	92
Figura 48 - Distância média relativa entre a rede de drenagem por traçado manual (a), por reamostragem (b) e <i>upsampling</i> (c) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT.....	93
Figura 49 - Distância média relativa entre as redes de drenagem de baixa resolução espacial, por <i>upsampling</i> (a) e reamostragem (b) e a rede obtida por traçado manual.....	94
Figura 50 – Resultados para a percentual dentro do <i>buffer</i> para as redes obtidas por traçado manual, reamostragem e <i>upsampling</i> para <i>buffer</i> de 1 <i>pixel</i> , 1/2 <i>pixel</i> e 1/5 <i>pixel</i> em diferentes resoluções espaciais.....	96
Figura 51 – Trechos do rio Uruguai na parte baixa na rede por traçado manual (em preto), por reamostragem (em vermelho) e por <i>upsampling</i> (em laranja) com largura de <i>buffer</i> (em cinza) de 1 <i>pixel</i> , 1/2 <i>pixel</i> e 1/5 de <i>pixel</i> na resolução de 20 km.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do rio Uruguai e dos principais afluentes da bacia do rio Uruguai.....	40
Tabela 2. Imagens LANDSAT utilizadas na vetorização das redes de drenagem de referência realizada em pesquisas anteriores de Paz e Collischonn (2008) e Saraiva e Paz (2014).....	42
Tabela 3 – Valores dos parâmetros Área Incremental Mínima (AIM) e Caminho Mínimo de Montante (CMM) adotados nesta pesquisa.....	48
Tabela 4 – Valores de <i>buffers</i> aplicados à rede de drenagem tomada como referência.....	52
Tabela 5 – Síntese dos métodos e métricas empregados para avaliação da qualidade das redes de drenagem nesta pesquisa.....	54
Tabela 6 – Valores das características da bacia hidrográfica do rio Uruguai extraída em alta resolução espacial.....	59
Tabela 7 – Valores dos comprimentos para a rede de drenagem de alta resolução comparados à rede vetorizada de imagens LANDSAT.....	60
Tabela 8 – Número de células em que a atribuição da direção de fluxo foi errada para os métodos de reamostragem e <i>upscaling</i>	73
Tabela 9 – Valores de área e perímetro da bacia hidrográfica do rio Uruguai extraída por reamostragem e <i>upscaling</i> em diferentes resoluções espaciais.....	75
Tabela 10 – Valores de coeficiente de compacidade (Kc) e fator de forma (Kf) das bacias hidrográficas extraídas por reamostragem e <i>upscaling</i> em diferentes resoluções espaciais.....	76
Tabela 11 – Valores dos comprimentos para a rede de drenagem de baixa resolução obtida por reamostragem.....	78
Tabela 12 – Valores dos comprimentos para a rede de drenagem de baixa resolução obtida por <i>upscaling</i>	79
Tabela 13 – Valores de sinuosidade para a rede de drenagem de baixa resolução obtida por reamostragem.....	81
Tabela 14 – Valores de sinuosidade para a rede de drenagem de baixa resolução obtida por <i>upscaling</i>	81
Tabela 15 – Áreas fora de concordância entre as delimitações das bacias extraídas de MDE por reamostragem e <i>upscaling</i> em relação à bacia extraída de MDE em alta resolução espacial – 100m.....	85

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Coeficiente de Compacidade (K_c)	49
Equação 2 : Fator de Forma (K_f)	49

LISTA DE SIGLAS

AIM - Área Incremental Mínima

CMM - Caminho Mínimo de Montante

GPS - *Global Positioning System*

Kc - Coeficiente de Compacidade

Kf - Fator de Forma

LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite

MDE - Modelos Digitais de Elevação

MNT - Modelo Numérico do Terreno

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

Sumário

Resumo.....	iv
Abstract.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xi
LISTA DE SIGLAS.....	xii
1.INTRODUÇÃO.....	17
2.OBJETIVOS.....	20
Objetivo Geral.....	20
Objetivos Específicos.....	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1 Modelo digital de elevação (MDE).....	21
3.1.1 Definição e conceitos.....	21
3.1.2 Aplicações do MDE na área ambiental.....	22
3.2 Processamento do MDE para análise da rede de drenagem.....	22
3.2.1 Direções de fluxo.....	22
3.2.2 Áreas acumuladas de drenagem.....	24
3.2.3 Rede de drenagem.....	25
3.2.4 Mudança de escala.....	27
Abordagem via reamostragem do MDE.....	28
Abordagem via <i>upscaling</i> de direções de fluxo.....	28
3.2.5 Erros e incertezas.....	30
3.3.6 Técnicas de avaliação.....	31
Visão geral.....	31
Comparação visual.....	32
Comparação de características da rede de drenagem e da bacia hidrográfica.....	33
Delimitação da bacia hidrográfica.....	34
Área e distância média entre as redes de drenagem.....	35
Porcentagem dentro do <i>buffer</i>	36
4. METODOLOGIA.....	39
4.1 Área de estudo.....	39
4.2 Etapas de aplicação e resoluções espaciais trabalhadas.....	40
4.3 Redes de drenagem de referência.....	41

4.4 Redes de drenagem derivadas do MDE.....	43
4.4.1 Resolução espacial alta (0.001° ou 100 m)	43
Direções de fluxo.....	44
Áreas acumuladas de drenagem.....	44
Rede de drenagem.....	44
4.4.2 Resolução espacial degradada (> 1 km)	44
Procedimento de reamostragem do MDE.....	45
Procedimento de <i>upscaling</i> de direções de fluxo.....	45
4.5 Avaliação das redes de drenagem.....	48
4.5.1 Método da inspeção visual.....	48
Inspeção visual.....	48
Quantificação de erros.....	48
4.5.2 Métricas de comparação integrada.....	49
Características da bacia hidrográfica.....	49
Características do rio.....	50
4.5.3 Métricas de comparação espacial.....	50
Área entre as delimitações da bacia hidrográfica.....	50
Área relativa entre as delimitações da bacia hidrográfica.....	50
Distância média entre as delimitações da bacia hidrográfica.....	50
Percentual do traçado dentro de <i>buffer</i>	52
Área entre os traçados das redes de drenagem.....	52
Distância média entre os traçados da drenagem.....	53
Distância média relativa entre os traçados da drenagem.....	53
4.5.4 Síntese das métricas.....	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
5.1 Avaliação da rede de drenagem de alta resolução espacial.....	55
5.1.1 Inspeção visual da rede de alta resolução espacial.....	55
5.1.2 Métodos de comparação integrada.....	58
Características da bacia hidrográfica.....	58
Características do rio.....	59
5.1.2 Métodos de comparação espacial.....	61
Área entre os traçados da rede de drenagem / Distância média.....	61
5.2 Avaliação das redes de drenagem de baixa resolução espacial.....	62
5.2.1 Método de inspeção visual.....	62

Quantificação de erros.....	73
5.2.1 Métodos de comparação integrada.....	74
Características da bacia hidrográfica.....	74
Características do rio.....	78
5.2.2 Métodos de comparação espacial.....	83
Área entre as delimitações da bacia hidrográfica.....	83
Área entre os traçados das redes de drenagem.....	87
Distância média entre os traçados da drenagem– referência à rede vetorizada de imagens LANDSAT.....	90
Distância média entre os traçados da drenagem – referência à rede por traçado manual.....	92
Distância média relativa entre os traçados da drenagem – referência à rede vetorizada de imagens LANDSAT.....	93
Distância média relativa entre os traçados da drenagem – referência rede por traçado manual.....	93
Percentual do traçado dentro de <i>buffer</i>	94
6. CONCLUSÕES.....	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102

1. INTRODUÇÃO

Os avanços na área de sensoriamento remoto têm permitido a obtenção de informações importantes para o desenvolvimento de diversos estudos, a exemplo dos que necessitem de informações acerca da caracterização física de bacias hidrográficas.

A caracterização física de bacias hidrográficas e a determinação da rede de drenagem são amplamente reconhecidas como parâmetros importantes na elaboração de estudos ambientais, em escalas que podem ir desde micro bacias até grandes áreas. O levantamento destes parâmetros era realizado, tradicionalmente, de forma manual a partir de mapas topográficos impressos. No entanto, atualmente estas e outras informações têm sido cada vez mais obtidas a partir da utilização de ferramentas relacionadas ao geoprocessamento e sistemas de informação geográfica (SIG) (BUARQUE *et al.*, 2009).

Neste contexto, a maior oferta de dados obtidos por sensoriamento remoto aliado ao aprimoramento de ferramentas de geoprocessamento representa uma alternativa para a caracterização de áreas desprovidas de levantamentos cartográficos adequados, fornecendo resultados de forma bastante rápida e prática, a partir do processamento automático de dados digitais de elevação do terreno (MIRANDA, 2005; MENDES e CIRILO, 2001; BURROUGH e MCDONNEL, 1998).

Atualmente, a principal fonte de dados de elevação do terreno em escala global é a base de dados obtida pelo projeto *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM (FARR *et al.*, 2007), disponibilizada gratuitamente na Internet. Os dados são estruturados em Modelos Digitais de Elevação (MDE) e deles podem ser extraídas uma gama de informações, a serem aplicadas, por exemplo, na caracterização de bacias hidrográficas para a modelagem hidrológica (ZEILHOFER, 2001).

Um dos principais produtos provenientes do processamento de MDE é a rede de drenagem. Segundo Fernández (2011), o processamento de MDE para extração automática de redes de drenagem tem muitas aplicações práticas, e, assim, tem sido desenvolvido por uma grande quantidade de cientistas (TARBOTON e AMES, 2001). Entretanto, sabe-se que no MDE não são representadas todas as variações topográficas que ocorrem na superfície, especialmente características mais detalhadas, devido às próprias limitações do sensor remoto ou à interferência da informação gerada no momento da aquisição da imagem como, por exemplo, a influência da vegetação na obtenção da altimetria do terreno, à resolução espacial da imagem, às limitações na

representação de áreas planas, esses e outros fatores ocasionam diferenças entre a rede de drenagem obtida por procedimentos automáticos e a que ocorre na paisagem (GARBRECHT *et al.*, 2001).

Nesse sentido, em muitos estudos é importante saber o quanto a rede de drenagem gerada pelo processamento de MDE é diferente de uma rede de drenagem tomada como referência, esta mais próxima possível da rede de drenagem real, representaria uma medida de qualidade da rede de drenagem gerada por procedimentos automáticos.

Um exemplo que pode ser citado se refere à análise de redes de drenagem derivadas de diferentes procedimentos, tendo em vista que, algoritmos continuam sendo desenvolvidos para incrementar o processo de elaboração de um MDE. Além disso, um MDE pode ser modificado, seja quanto ao processo de interpolação utilizando diferentes técnicas (PEREIRA e FICHER, 2015; PIRES *et al.*, 2005), seja por meio da adoção de técnicas de pré-processamento de MDE, como *stream burning*, com a incorporação de informações provenientes de uma rede de drenagem vetorial já existente (LINDSAY, 2016; PAZ e COLLISCHON, 2008).

Novas formas de modificar o MDE vêm sendo cada vez mais testadas. Em Brochado (2015), foi desenvolvido um método no qual o efeito do desflorestamento é atenuado, reduzindo-se a diferença de elevação entre as coberturas de floresta e desflorestamento. A redução é realizada ou elevando-se cada *pixel* do MDE no interior das áreas desflorestadas ou rebaixando-se os *pixels* dentro das áreas de floresta, usando valores variáveis para tais correções.

Alguns estudos avaliam a qualidade da rede de drenagem como medida indireta de desempenho de algoritmos, de reamostragem e *upscaling*, na atribuição de direções de fluxo (SARAIVA e PAZ, 2015), bem como, teste de novos algoritmos (BARNES *et al.*, 2013).

Do mesmo modo, a comparação entre redes de drenagem pode ser utilizada para avaliar diferentes fontes de dados, a exemplo, avaliação de redes de drenagem que serviria para refletir a qualidade dos dados disponibilizados por novos satélites ou sensores remotos, a exemplo dos dados LIDAR (HODGES, 2015) ou ainda para avaliar novos métodos de tratamento, a exemplo dos novos algoritmos que visam melhorar questões como, remoção de depressões, outros para tratar, especificamente de áreas planas (BARNES *et al.*, 2014) ou ainda quando se quer, simplesmente, avaliar o grau de similaridade entre as redes geradas.

Em todos esses e em outros casos, se faz necessária e oportuna a avaliação da qualidade das redes de drenagem geradas automaticamente por processamento de MDE. Nesse sentido, diversos pesquisadores vêm desenvolvendo e aperfeiçoando técnicas de identificação/avaliação de erros inseridos no traçado da rede de drenagem provenientes de MDE. Essas técnicas podem ser de cunho, apenas, qualitativo, aplicadas isoladas ou realizadas juntamente com o levantamento de características pertinentes a avaliação da bacia hidrográfica (CHEN *et al.*, 2010), sendo estas

características analisadas de forma integrada ou considerando a variabilidade espacial dos seus resultados. As principais técnicas consistem na adoção de critérios relacionados à determinação de área, distância média entre os trechos de rio e porcentagem de rede de drenagem inserida dentro da largura do *buffer* (DAVIES e BELL 2008; TATSCH *et al.*, 2009; MCMASTER, 2002; ANDRADES FILHO *et al.*, 2009)

Na literatura são citadas algumas técnicas que utilizam diferentes critérios para avaliar a qualidade das redes de drenagem. Ocorre que, na maioria das vezes, estas técnicas são utilizadas com pouco ou nenhum critério, seja no que se refere a escolha da técnica mais adequada ao objetivo da análise, seja na aplicação da mesma. Assim, em muitos estudos que avaliam a qualidade das redes de drenagem por meio dessas técnicas, conclusões equivocadas podem ser tomadas e os resultados e análises finais podem ser comprometidos.

Diante do exposto, esta pesquisa visa a avaliação de técnicas e métricas utilizadas para a análise de redes de drenagem, realizando um levantamento das principais técnicas e métricas utilizadas identificando as principais limitações e potencialidades para aplicação destas técnicas em redes de drenagem de alta e baixa resolução espacial. Desta forma, este estudo pretende fornecer resultados que servirão como guia para o desenvolvimento de futuros trabalhos que utilizem MDE para obtenção de rede de drenagem e tenham como etapa intermediária a qualidade da rede de drenagem processada. Como estudo de caso, é tomada a bacia hidrográfica do rio Uruguai que possui área de drenagem cerca de 207.000 km². Essa característica permite a possibilidade de análise em diferentes resoluções espaciais a partir da resolução original do SRTM. Serão avaliadas redes de drenagem provenientes de MDE obtidas por diferentes métodos de extração e em diferentes resoluções espaciais.

2. OBJETIVOS

Objetivo Geral:

Avaliar técnicas e métricas utilizadas para qualificar redes de drenagem obtidas por processamento de modelos digitais de elevação.

Objetivos Específicos:

- Caracterizar as principais técnicas de avaliação de redes de drenagem;
- Identificar a relação entre o efeito de escala e o método de avaliação para diferentes redes de drenagem;
- Identificar a relação entre diferentes métodos de geração de redes de drenagem e a técnica de avaliação para diferentes redes de drenagem;
- Delimitar as principais limitações e potencialidades das diferentes técnicas existentes.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Modelo digital de elevação (MDE)

3.1.1 Definição e conceitos

Segundo Felgueiras e Câmara (2001), um Modelo Numérico do Terreno (MNT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial, que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre. Dados de relevo, informação geológica, levantamento de profundidades do mar ou de um rio, informação meteorológica e dados geofísicos e geoquímicos são exemplos típicos de fenômenos representados por um MNT.

A geração de um MNT envolve a aquisição de dados, edição de dados e geração do MNT. Quando os dados expressos no Modelo Numérico representam dados topográficos, pode-se denominá-lo de MDE. Walker e Willgoose (1999) fazem uma comparação entre diferentes métodos de obtenção de MDE.

De acordo com Valeriano (2008), o MDE é um arquivo que contém registros altimétricos estruturados em linhas e colunas georreferenciadas, como uma imagem digital, com valores de elevação em cada célula ou em cada *pixel* da imagem. A estrutura em grade retangular é naturalmente adaptada aos recursos de tratamento e análise de imagens digitais, o que também simplifica opções variadas de visualização (WILSON e GALLANT, 2000).

Um MDE pode ser gerado a partir de diferentes fontes: medidas de campo com *Global Positioning System* - GPS em modo diferencial, cartas topográficas, sensoriamento óptico (técnicas de fotogrametria) e com dados de radar obtidos de plataformas aéreas ou orbitais. As imagens de radar para a produção de MDE podem ser obtidas por meio de interferometria, que é o processo pelo qual as imagens de radar de um mesmo local no terreno são registradas por antenas em diferentes localizações ou tempos diferentes, o que permite medidas muito precisas sobre o deslocamento de qualquer ponto específico na imagem (JENSEN, 2009).

Em SIG's, é possível operar o MDE para extrair grande quantidade de informações, incluindo o grau e a direção de declividade, a partir da relação entre as cotas de células vizinhas, em uma relação mais imediata (WILSON e GALLANT, 2000; VALERIANO e ALBUQUERQUE, 2010).

Oguchi (2006) resume as aplicações do MDE principalmente em: (1) análises geomorfométricas básicas, relacionadas à descrição de altura, declividade e curvaturas; (2) análises de redes de drenagem e microbacias; (3) classificação semiautomática das formas do relevo; (4)

modelagem da erosão de solos; (5) modelagem da susceptibilidade a deslizamentos; e (6) avaliação de mudanças frente a análises topográficas.

3.1.2 Aplicações do MDE na área ambiental

A demanda por MDE's, para subsidiar estudos em várias áreas da pesquisa ambiental, tem aumentado significativamente (CHAGAS *et al.*, 2010). A maior utilização de dados topográficos digitais em pesquisas apresenta muitas vantagens, como velocidade, repetibilidade, integração com outras bases de dados, a redução de intervenções manuais, subjetividade e a possibilidade de representação paramétrica (VALERIANO *et al.*, 2006).

Os produtos provenientes do processamento de MDE's vêm sendo aplicados em pesquisas e trabalhos técnicos de diversas áreas, como análise tectônica (ROSSETTI *et al.*, 2013), mapeamentos de unidades sedimentares (ANDRADES FILHO *et al.*, 2013), identificação e delimitação de áreas de preservação permanente (APP) (CORDEIRO, 2013; GASPARINI, 2011; LOUZADA *et al.*, 2009), recursos hídricos, cálculo de declividade, altitude, verificação da direção de fluxo do escoamento superficial e como parte integrante de modelos hidrológicos (RIBEIRO *et al.*, 2008; FAIRFIELD e LEYMARIE, 1991; JENSON e DOMINGUE, 1988).

3.2 Processamento do MDE para análise da rede de drenagem

3.2.1 Direções de fluxo

A direção de fluxo define as relações hidrológicas entre pontos diferentes dentro de uma bacia hidrográfica (RENNÓ *et al.*, 2008). Corresponde a um dos principais planos de informação necessários aos estudos hidrológicos, pois a partir deste pode-se obter, dentre outros, as áreas acumuladas de drenagem e o traçado das redes de drenagem.

As direções de fluxo consistem um plano de informações do tipo *raster*, cujo atributo de cada *pixel* da imagem corresponde à indicação de para qual *pixel* vizinho drena o escoamento do *pixel* em questão.

Existem diferentes métodos para obtenção das direções de fluxo provenientes de MDE. Os algoritmos de fluxo se agrupam, principalmente, em dois grandes grupos: os de fluxo simples (Figura 1. a), onde o fluxo é dirigido em uma única direção, a mais íngreme; e os de fluxo múltiplo (Figura 1. b), em que se considera a dispersão do fluxo sobre a complexidade apresentada pela superfície do relevo.

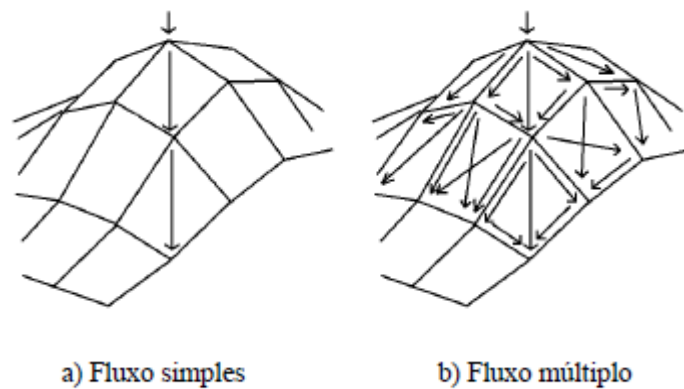


Figura 1 – Algoritmos de direção de fluxo. Fonte: Pelletier (2008)

A abordagem mais comum pertence ao grupo de algoritmos de fluxo simples, denominado de *Deterministic Eight Neighbours* (D8) proposta inicialmente por Jenson e Domingue (1988). Tal abordagem estabelece que cada *pixel* possui uma única direção de fluxo, ou seja, cada *pixel* drena exclusivamente para um de seus oito vizinhos (WANG *et al.*, 2000; SHAW *et al.*, 2005), sendo selecionado o *pixel* que proporcione a maior declividade, tomada o quociente entre a diferença de cota e a distância entre os pixels (Figura 2).

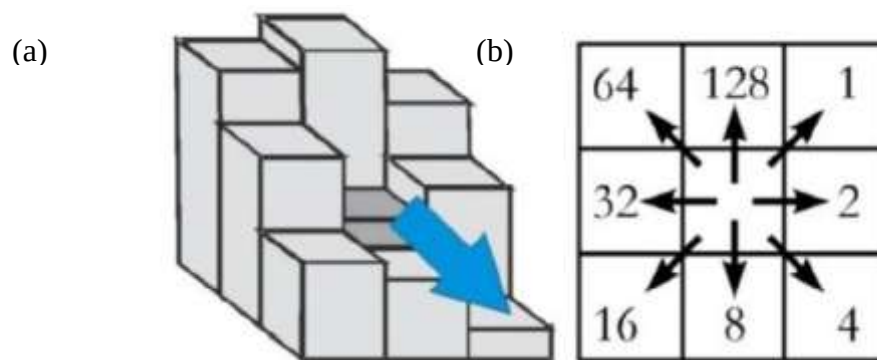


Figura 2 – (a) Escolha da direção de fluxo pela maior declividade indicando em qual sentido ocorre a drenagem e (b) possíveis direções de fluxo para um dos oito *pixels*. Fonte: Buarque *et al.* (2009)

No entanto, Fairfield e Leymarie (1991) apontam a tendência de geração de linhas de drenagem paralelas como uma das falhas encontradas na utilização desse método, como mostra a Figura 3. Os referidos autores propuseram a introdução de uma aleatoriedade na geração de direções de fluxo em áreas planas e satisfatoriamente conseguiram evitar as drenagens paralelas excessivas.

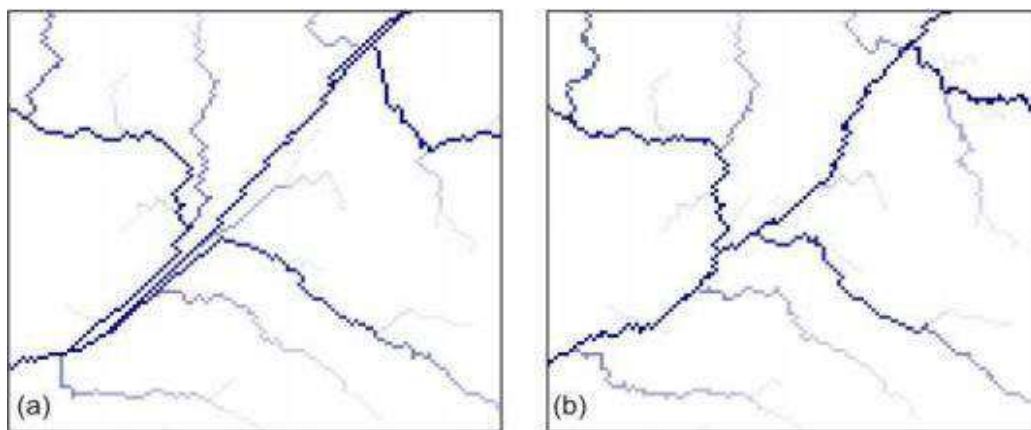


Figura 3. (a) Geração de linhas irreais na determinação da rede de drenagem em áreas planas pelo algoritmo D8. (b) Minimização de erros gerados na extração da rede de drenagem em áreas planas com método D8 utilizando um fator de aleatoriedade.

Fonte: Paz e Collischonn (2008).

A direção de fluxo é representada por uma matriz de números onde cada número representa uma direção. Cruz e Aragão (2010) ressaltam que pequenas alterações em valores das células podem provocar alterações significativas nas direções de fluxo. Estas alterações podem ocorrer em MDE's produzidos a partir de sensoriamento remoto, principalmente pela interferência da vegetação que se localiza próxima aos caminhos de drenagem.

Davies e Bell (2009) destacam a importância da precisão na obtenção desse plano de informação. Segundo os autores, como as direções de fluxo constituem um plano de informação sobre o qual são derivados outros produtos, se estas forem mal especificadas, a área acumulada de drenagem estará comprometida, podendo levar a erros em todo o restante da análise.

3.2.2 Áreas acumuladas de drenagem

A área acumulada de drenagem se refere ao somatório das áreas de todos os *pixels* cujo escoamento contribui para o *pixel* analisado (JENSON e DOMINGUE, 1988). Este plano de informação é determinado com base nas direções de fluxo.

Quando se trabalha com grandes áreas, frequentemente adota-se um sistema de coordenadas geográficas (latitude-longitude) em graus, no entanto para análise de determinadas características da área se faz necessário proceder com a projeção para unidades planas. Nesse processo, podem ocorrer erros devidos, principalmente, aos critérios que são adotados no momento da conversão. Saraiva *et al.* (2015), analisando diferentes métodos de conversão de áreas acumuladas para unidades planas constataram que a adoção de simplificações, muitas vezes grosseiras, como a regra

de equivalência de que 1° corresponde a 100 km, provocam variação significativa no resultado de áreas acumuladas de drenagem.

Paz e Collischonn (2008) ressaltam que em grandes bacias, deve-se considerar a área de cada *pixel* como função da sua posição geográfica, fazendo-se a devida projeção das coordenadas dos seus vértices, devido a distorções que ocorrem na área superficial plana dos *pixels* à medida que se distancia do equador e se aproxima dos polos, fazendo com que cada *pixel* tenha uma área superficial diferente dos demais.

3.2.3 Rede de drenagem

A disposição e as características gerais das redes de drenagem refletem a combinação de propriedades do terreno (topografia, solo, litologia, estruturas geológicas), cobertura vegetal e a atuação do clima ao longo de sua evolução (LOPEZ e CAMARASA, 1999). A análise de suas características traz elementos importantes para a compreensão de questões geomorfológicas, dado que a evolução dos cursos de água constitui um dos processos geomorfológicos de maior expressão na esculturação da paisagem terrestre (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A extração automática de redes de drenagem a partir de MDE tem muitas aplicações úteis, por permitir a caracterização dos sistemas de drenagem onde não se têm estes dados mapeados (FERN *et al.*, 1998) e, por isso, tem sido desenvolvida em uma grande quantidade de pesquisas (TARBOTON e AMES, 2001).

Atualmente, as funções disponíveis nos SIG's para o traçado das redes de drenagem a partir de MDE se baseiam na adoção de um limiar de área mínima de drenagem para denotar o início da rede de drenagem, de forma que os *pixels* com área contribuinte igual ou maior ao valor adotado são considerados integrantes da rede de drenagem e os *pixels* com área inferior são desconsiderados. O limiar define a área mínima requerida para que o fluxo difuso, em vertentes, seja concentrado e forme um canal de escoamento. Quanto menor o limiar escolhido, mais complexa e densa será a rede de drenagem obtida (TRIBE, 1990; LI *et al.*, 2008). No entanto, o detalhamento obtido com limiares progressivamente menores apresenta, entre suas limitações, a produção de linhas de drenagem artificiais paralelas nas áreas de menor declividade. Estas estruturas se assemelham a ampliações microscópicas de penas de aves, referido em toda a literatura sobre extração automática da drenagem como *feathering* (FERNÁNDEZ, 2011).

Frequentemente, o valor do parâmetro área mínima para extração de redes de drenagem é escolhido por avaliação visual da rede extraída, ocasionalmente assistida por dados observados em mapas topográficos (MONTGOMERY e GEORGIOU, 1993) ou vetorizados. Nesse caso, o usuário

tem a possibilidade de interagir empiricamente, determinando o valor de fluxo acumulado acima do qual a drenagem pode se estabelecer. Assim, não são consideradas informações climáticas ou de solos. Pressupõe-se um regime hídrico e uma condição hidrológica do solo uniformes, permitindo o estabelecimento de uma relação única entre área de captação, volume infiltrado, volume escoado e, portanto, a possibilidade de fluxo canalizado.

Estudos recentes têm sido desenvolvidos na tentativa de estabelecer 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. Segundo Fan *et al.* (2013), o valor limite de área de drenagem pode variar em diferentes regiões, dependendo das características físicas locais e dos objetivos do mapeamento. Tais autores buscaram 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 em vinte e oito regiões diferentes no Brasil. Como resultado, foram identificadas relações gerais para o valor da área de drenagem mínima em função do tipo de geologia (porosa ou fissural), declividade média da bacia e relação Q90/Q50. Desta forma, os autores defendem a observação destes parâmetros na escolha do valor de área mínima, além da adoção de diferentes valores de áreas mínimas para bacias heterogêneas.

Outros autores buscaram identificar a relação da área mínima de drenagem para formação de cursos d'água em função das características físicas da bacia, como geologia, solo, vegetação, relevo, etc (MCNAMARA *et al.*, 2006; MONTGOMERY e DIETRICH 1988). Vogt *et al.* (2003) utilizaram uma abordagem baseada em um limiar variável de área mínima de drenagem ao derivar redes de drenagem provenientes de MDE para cinco categorias de paisagens distintas na Itália. Tal estudo concluiu que esta abordagem se mostrou mais adequada que a abordagem tradicional, especialmente ao se trabalhar com grandes áreas.

No MDE, é comum a ocorrência de depressões (*sinks*), que são células ou conjunto de células com drenagem endorréica, como artefato resultante de efeitos na criação dos MDE, embora possam ocorrer depressões na paisagem (sumidouros) que têm o mesmo efeito quando expressas no MDE (TEMME *et al.*, 2006). Esta singularidade representa um bloqueio no cômputo da área de captação acumulada ao longo dos canais de drenagem, constituindo um ponto final na linha de canalização. Os métodos numéricos para a correção deste problema foram alvo de desenvolvimentos sucessivos (WALLIS *et al.*, 2009; PLANCHON e DARBOUX, 2001) e integram os recursos atuais de extração automática da drenagem. O procedimento comumente usado é o desenvolvido por Jenson e Domingue (1988), no qual é criado um MDE ajustado sem depressões, de tal forma que as células que contêm depressões são modificadas para o valor mínimo de elevação da borda da depressão.

Além disso, o efeito da resolução espacial do MDE do SRTM na obtenção automática de redes de drenagem e outros parâmetros hidrológicos têm sido alvo de recentes pesquisas (RAHMAN, 2010; PAZ e COLLISCHONN, 2008; COLOMBO *et al.*, 2007; CURKENDALL *et al.*, 2003; MCMASTER, 2002). Os resultados destas pesquisas mostraram principalmente que, as redes de drenagem obtidas em áreas de relevo plano apresentam diferenças significativas em relação às reais, enquanto em áreas com relevo de montanha e em relevo de colinas, as diferenças são menores (CURKENDALL *et al.*, 2003); a qualidade da drenagem extraída varia conforme a resolução de trabalho das imagens e característica dos rios, levando à impossibilidade de se representarem meandros do rio menores do que o tamanho de *pixel*, além de ocorrer o efeito de sinuosidade artificial quando a largura do rio é superior ao tamanho do *pixel* (PAZ e COLLISCHONN, 2008).

3.2.4 Mudança de escala

Modelos hidrológicos de grandes bacias são, em geral, discretizados em células com dimensões em torno de 10 X 10 km, às quais devem ser atribuídas direções de fluxo para o estabelecimento da conectividade dos caminhos de fluxo. Entretanto, existem MDEs disponíveis com resolução muito mais refinada do que essa discretização do modelo hidrológico (Figura 4), como por exemplo, o MDE proveniente de dados SRTM ou *Global Digital Elevation Map Announcement* - ASTER. Isso tem motivado o desenvolvimento de métodos de extração de redes de drenagem de baixa resolução a partir de um conjunto de dados de alta resolução (DAVIES e BELL, 2009).

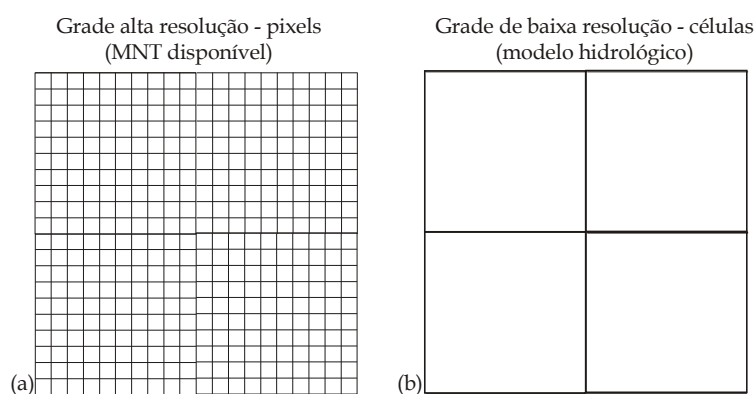


Figura 4 - Exemplo de grades de (a) alta resolução (*pixels*) do modelo numérico do terreno disponível e (b) de baixa resolução (células) empregada em um modelo hidrológico aplicado a grandes bacias (Fonte: Paz *et al.*, 2005).

- Abordagem via reamostragem do MDE

Um dos métodos mais utilizados para obtenção de direções de fluxo de baixa resolução consiste na mudança de resolução espacial do MDE, pelo procedimento de reamostragem. Nessa abordagem, com base em uma média das células vizinhas do conjunto de dados do MDE de alta resolução gera-se um novo MDE com dados de baixa resolução, e tal MDE de baixa resolução é processado por algoritmos como o D8 para obter as direções de fluxo correspondentes (LI, 2008; KIENZLE, 2004; WOLOCK e PRICE, 1994).

A reamostragem do MDE pode ser realizada com diversos objetivos, diminuição do tempo de processamento computacional, principalmente quando se trabalha com grandes áreas, para compatibilizar o MDE com outros planos de informação disponíveis, aplicação em modelos hidrológicos distribuídos, entre outros. Alguns pesquisadores (SHAW *et al.*, 2005; REED, 2003) afirmam que a mudança de resolução espacial por esse método pode produzir resultados bastante incoerentes quando utilizado para posterior derivação das redes de drenagem.

Chen *et al.* (2012) afirmam que, quando o MDE original é modificado para um novo MDE com resolução diferente, ao mesmo tempo, os produtos derivados dele, tais como declividade, sinuosidade, rede de drenagem, podem posteriormente ser alterados levando a erros na representação dessas características (TAY *et al.*, 2005; ZHOU e LIU, 2004; WILSON e GALLANT, 2000; ZHANG *et al.*, 1999).

- Abordagem via *upsampling* de direções de fluxo

Diante dos problemas encontrados ao se utilizar a reamostragem, vários procedimentos de *upsampling* de direções de fluxo foram propostos na literatura (PAZ *et al.*, 2006; SHAW *et al.*, 2005; REED, 2003; OLIVERA *et al.*, 2002). Diversos algoritmos têm sido desenvolvidos com este objetivo (PAZ *et al.*, 2006; SHAW *et al.*, 2005; REED, 2003; OLIVEIRA *et al.*, 2002; FEKETE *et al.*, 2001; WANG *et al.*, 2000).

O *upsampling* de direções de fluxo é um procedimento de derivação da rede de drenagem de baixa resolução a partir de planos de informação de alta resolução, como mostra a Figura 5 que apresenta o detalhamento dos procedimentos de reamostragem e *upsampling* de direções de fluxo.

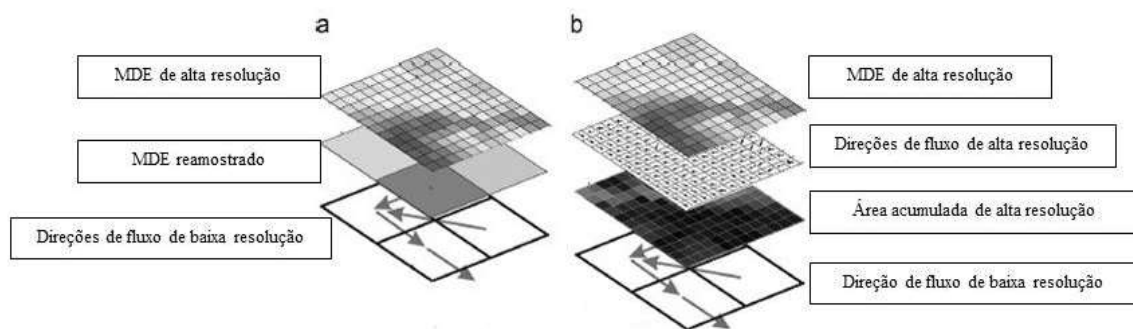


Figura 5 – Métodos de obtenção de redes de drenagem de baixa resolução (a) exemplo de procedimento de reamostragem de MDE; (b) exemplo de procedimento de *upscaling* de direções de fluxo. Fonte: Adaptado de Saraiva e Paz (2014)

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com a adoção de métodos de *upscaling*, a exemplo de Olivera *et al.* (2002) e Fekete *et al.* (2001) que utilizaram dados de alta resolução espacial provenientes de MDE's para em seguida gerar dados de redes de drenagem de baixa resolução.

Segundo Arora e Harrison (2007), os algoritmos de *upscaling* podem ser divididos, de modo geral, em dois grupos: o primeiro grupo de algoritmos corresponde aos que utilizam a área acumulada de drenagem de alta resolução para posterior derivação de redes de drenagem de baixa resolução (O'DONNELL *et al.*, 1999; FEKETE *et al.*, 2001; OLIVERA *et al.*, 2002). O segundo grupo refere-se aos que utilizam as direções de fluxo de alta resolução para determinar redes de drenagem de baixa resolução. Arora e Boer (1999) implementaram pela primeira vez este algoritmo utilizando direções de fluxo de alta resolução para encontrar resultados de baixa resolução. Doll e Lehner (2002) aperfeiçoaram o método proposto por Arora e Boer (1999) adicionando a análise das áreas acumulada de drenagem para uma observação combinada entre elas e as direções de fluxo para obtenção de redes de baixa resolução.

Estudos indicam que o *upscaling* tende a preservar melhor as características da rede de drenagem, do que quando é utilizado o processo de reamostragem do MDE (TATSCH *et al.*, 2009; PAZ *et al.*, 2006). Arora e Harrison (2007) afirmam que, os resultados gerados por esses algoritmos apresentam a tendência de entre as células de baixa resolução ser atribuídas mais direções de fluxo no sentido horizontal ou vertical em detrimento de caminhos diagonais.

Estudo realizado por Davies e Bell (2009) avaliou o desempenho de quatro algoritmos de *upscaling* de direções de fluxo propostos na literatura, os resultados obtidos indicaram que o algoritmo COTAT+ de Paz *et al.* (2006) e NTM de Olivera *et al.* (2002) apresentaram os melhores desempenhos, considerando as redes de drenagem geradas em todas as escalas e características topográficas da área de estudo. Os resultados do COTAT+ são melhores, especialmente, quando se

trabalha com dados raster e o NTM se mostrou mais adequado quando redes de drenagem vetoriais são utilizadas para fazer a mudança de escala.

A partir dos resultados de Davies e Bell (2009), estudo recente de Saraiva e Paz (2014) propõe uma abordagem de *upscaling* por etapas, em que a mudança de escala é feita gradualmente, com geração de direções de fluxo em escalas intermediárias entre a escala mais refinada de origem e a escala mais grosseira final. Foi utilizado o algoritmo COTAT+ de Paz *et al.* (2006) e os resultados indicaram a abordagem de *upscaling* por etapas apresentou melhor desempenho quando comparada à abordagem direta no que se refere à reprodução dos padrões da rede de alta resolução espacial. A melhoria afetou um pequeno número de células (5 - 7% do total), mas proporcionou um efeito considerável na representação do traçado da drenagem, importante, principalmente quando considerados como dado de entrada para modelos hidrológicos.

3.2.5 Erros e incertezas

A maior utilização de técnicas e produtos advindos de sensoriamento remoto e ferramentas relacionadas ao geoprocessamento têm proporcionado agilidade e praticidade aos estudos ambientais. No entanto, a forte disseminação destas práticas tem ocasionado a desconsideração pelos usuários de erros sistemáticos inclusos nos procedimentos e rotinas internas dos *softwares*.

Usuários e pesquisadores devem cada vez mais atentar para os erros e incertezas associados aos procedimentos de obtenção de informações de forma automática, especialmente, nos procedimentos para extração de redes de drenagem provenientes de MDE. Paz *et al.* (2007) e Paz e Collischonn (2008) identificaram erros típicos quando a resolução espacial do MDE não é capaz de representar os meandros da rede de drenagem, ou quando a resolução espacial do MDE tem dimensão inferior à largura do rio.

Ainda há pouca compreensão acerca do efeito de erros e incertezas sobre os produtos derivados de MDE. Nestas circunstâncias, torna-se fundamental, portanto, melhorar a identificação de erros que usualmente ocorrem ao derivar uma rede de drenagem a partir do MDE do SRTM, para que os procedimentos que venham a utilizar tal rede de drenagem, como plano de informação de entrada possam considerar as incertezas existentes.

Recentes esforços têm sido desenvolvidos no sentido de melhor compreender os erros e incertezas associados a esse processo; a exemplo, McMaster (2002) afirma que a extração automática de redes de drenagem por análise topográfica é limitada, principalmente, pelo relevo da paisagem e pela resolução dos dados. Vários autores, incluindo Zhang e Montgomery

(1994) e Wolock e Price (1994), analisaram o efeito de resolução dos dados sobre a distribuição de um índice topográfico desenvolvido por Beven e Kirkby (1979).

Garbrecht e Martz (1994) examinaram a sensibilidade da rede de drenagem derivada em relação à resolução espacial do MDE, área mínima de drenagem, e comprimento mínimo da rede. Fekete e Lammers (2001) destacam que, infelizmente, as redes de drenagem derivadas de MDE's disponíveis são, muitas vezes, imprecisas, uma vez que, a maioria dos MDE's não foram concebidos com a intenção de representar fielmente padrões de fluxo.

No entanto, ainda faltam considerações mais concretas no sentido de analisar possíveis erros de posição na rede de drenagem derivada em relação à resolução espacial do MDE, ou mesmo, buscar estabelecer um determinado limiar para o qual o MDE é inadequado para derivação de rede de drenagem (MCMASTER, 2002).

Segundo Davies e Bell (2009), a precisão da rede de drenagem derivada é altamente dependente da resolução do MDE, particularmente em áreas planas ou quando os vales dos rios são muito estreitos. Os autores afirmam ainda que estas redes de drenagem não tão precisas podem ser corrigidas manualmente utilizando redes de drenagem observadas como referência.

Diferentes estudos destacam a influência da resolução espacial do MDE na precisão da rede de drenagem extraída (VOGT *et al.*, 2003; WANG e YIN, 1998; QUINN *et al.*, 1995; ZHANG e MONTGOMERY, 1994). Recentes pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de analisar e disseminar os métodos para identificação/avaliação de erros e incertezas no traçado da rede de drenagem derivadas de MDE (CHEN *et al.*, 2012; ZHOU e CHEN, 2011; REINOSO, 2010; SHAW e PIETRONIRO, 2005; VOGT e BERTOLO, 2003).

3.2.6 Técnicas de avaliação

- Visão geral

Em diferentes situações, pode-se ter o objetivo de determinar a qualidade da rede de drenagem gerada pelo MDE, como por exemplo: (a) estudos que trabalham com redes de drenagem derivadas de diferentes procedimentos; (b) estudos que comparam redes de drenagem obtidas de diferentes fontes (novos sensores orbitais); (c) estudos que testem novos algoritmos de obtenção de direção de fluxo; (d) avaliar novos métodos de tratamento dos dados, geração, interpolação, remoção de interferência da vegetação de um MDE. Nesses e em outros casos, é preciso avaliar a qualidade da rede de drenagem obtida com o procedimento/método/algoritmo que foi proposto.

Na literatura, existem diversas abordagens utilizadas para avaliar a qualidade de uma rede de drenagem derivada de MDE, dentre elas, destacam-se a comparação ou inspeção visual, a comparação de características da rede de drenagem e da bacia hidrográfica, a delimitação da bacia hidrográfica, determinação de área e distância média entre as redes de drenagem, porcentagem do traçado da drenagem dentro do *buffer*, conforme descrito a seguir.

- Comparação visual

No método da comparação ou inspeção visual é realizada a observação do grau de similaridade entre a rede de drenagem processada e uma rede de referência (Figura 6). Esse procedimento, realizado manualmente, permite um maior cuidado e atenção com trechos mais críticos que, de modo geral, os procedimentos automáticos não possuem. Segundo Tatsch *et al.* (2009), esse tipo de análise permite identificar situações em que um método obteve aperfeiçoamentos ou falhas em relação ao outro.

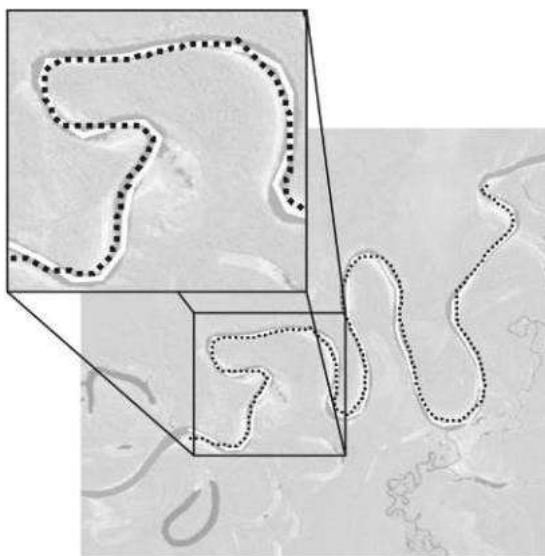


Figura 6. Comparação entre duas redes de drenagem, a de referência (linha contínua) e a extraída do MDE do SRTM (linha tracejada).

Fonte: Buarque *et al.* (2009)

Uma das principais desvantagens do método de análise visual se refere a subjetividade, no entanto, esta limitação pode ser contornada à medida que esta observação pode ser revertida em dados quantitativos. Saraiva e Paz (2014), em recente pesquisa comparando métodos de obtenção de redes de drenagem de baixa resolução, utilizaram a comparação visual como um dos métodos de avaliação convertendo a análise visual de cunho qualitativo em número de células em discordância

com a rede de referência, a Figura 7 exemplifica parte dos resultados obtidos nessa pesquisa para a bacia hidrográfica do rio Uruguai. Nessa Figura, há cinco células com direções de fluxo distintas entre os dois métodos, a exemplo da célula C, ao observar a rede tomada como referência em branco, por baixo da rede de baixa resolução espacial, percebe-se que a célula C não deveria ter drenado para a célula B como aconteceu no método de *upscaling* direto (Figura 7a) e sim para a célula A como corretamente o método de *upscaling* gradual identificou (Figura 7b).

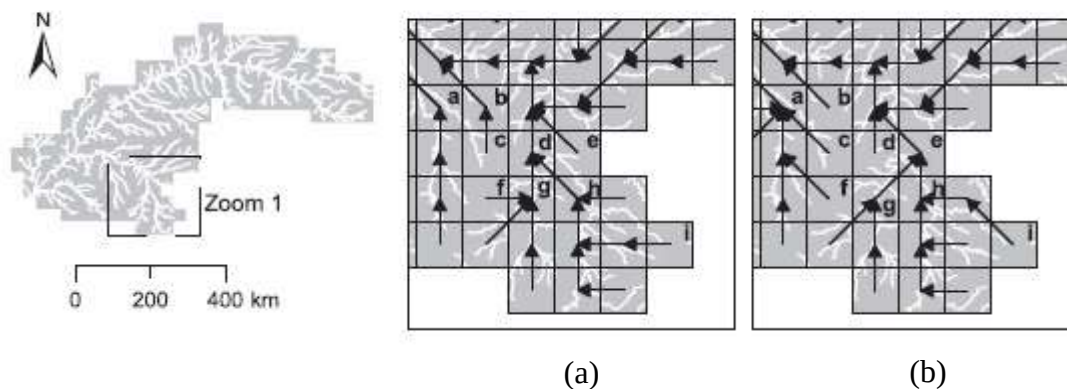


Figura 7 – Exemplo de comparação visual entre duas redes de drenagem de baixa resolução obtidas por diferentes métodos. As letras marcam os erros na atribuição de direções de fluxo entre o método de (a) método direto e (b) o *upscaling* gradual. Fonte: Saraiva e Paz (2014)

McMaster (2002) realizou a comparação visual entre redes de drenagem ao comparar o desempenho entre dois algoritmos de obtenção de direções de fluxo, quais sejam, o algoritmo D8 mais tradicionalmente utilizado e um algoritmo que possibilita se trabalhar com direções em qualquer ângulo (e não apenas as oito direções possíveis), denominado D-infinity (D_{∞}).

Segundo Arora e Harrison (2007), a comparação visual como método de avaliação forneceu resultados aceitáveis ao avaliar o desempenho de vários algoritmos de *upscaling*, dada a natureza complexa das redes de drenagem e também à ausência de um método mais abrangente de comparação quantitativa.

- Comparação de características da rede de drenagem e da bacia hidrográfica

No método de comparação entre características geomorfológicas da bacia ou rio principal, como o próprio nome diz, é realizada a extração de características da bacia ou do rio principal como área de drenagem, comprimento e sinuosidade do rio principal, densidade de drenagem, entre outros, a partir dos diferentes produtos de direções de fluxo ou rede de drenagem sendo avaliados.

A ideia é julgar a qualidade desses produtos em função da coerência das características físicas extraídas da bacia hidrográfica ou do rio.

Fekete e Lammers (2001) utilizaram características geomorfológicas para avaliar redes de drenagem provenientes de MDE's com várias resoluções espaciais na Europa, entre elas, ordem dos rios e o índice de forma. Estes parâmetros foram calculados e comparados em cada resolução. Relações de escala foram encontradas, como a relação segundo a qual os comprimentos dos rios diminuem quanto mais grosseira for a resolução espacial dos dados. Essas e outras relações foram analisadas com objetivo de determinar o número mínimo de células da grade de baixa resolução necessárias para manter as principais características geomorfológicas das redes de drenagem dentro de um nível de precisão aceitável. Os resultados sugeriram que é necessário no mínimo de 200 - 300 células na grade de resolução espacial adotada.

Davies e Bell (2009) usaram, dentre outros métodos, a comparação do valor das áreas de drenagem para avaliar a qualidade de redes de drenagem derivadas por diferentes métodos de *upsaling* de direções de fluxo e em diferentes escalas.

Fernandez (2011), com objetivo de verificar a interação de diferentes variáveis no processo de extração de redes de drenagem utilizando MDE, fez uso de características geomorfológicas, como, área, perímetro, coeficiente de compacidade (Kc) e fator de forma (Kf), dentre outras, para avaliar as redes de drenagem geradas.

Outros exemplos do uso de características da rede de drenagem ou da bacia como forma de avaliar a qualidade das direções de fluxo ou da rede de drenagem são os trabalhos de Endreny *et al.* (2000), Heine *et al.* (2004), Lin *et al.* (2006) e Ludwig *et al.* (2006).

- Delimitação da bacia hidrográfica

Nesta abordagem de avaliação de redes de drenagem, é realizada a comparação entre as formas das bacias extraídas da rede de drenagem analisada e uma rede de drenagem de referência (Figura 8). Esta métrica consegue detectar especificamente as áreas fora de concordância entre as bacias delimitadas na rede de drenagem analisada e na rede de referência. Este tipo de avaliação de redes de drenagem foi utilizado por Freitas *et al.* (2012), por exemplo.

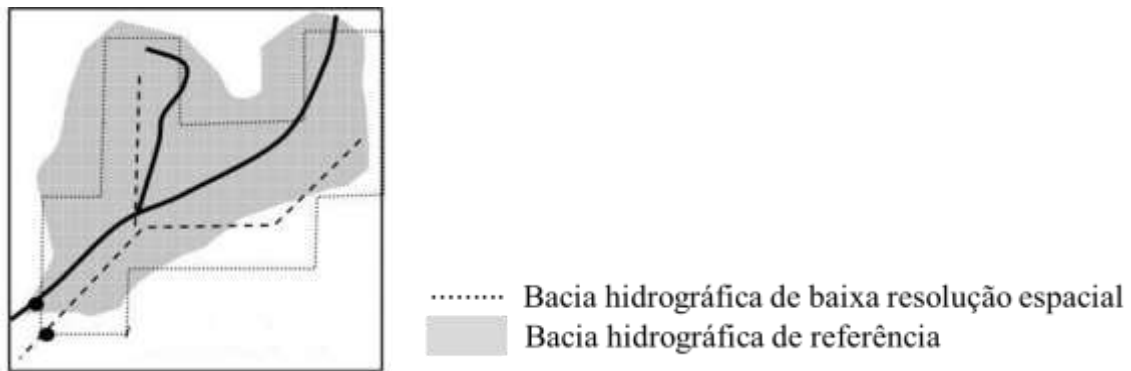


Figura 8 - Critérios de avaliação de similaridade entre rede de drenagem: área de drenagem e delimitação de bacia hidrográfica. Fonte: Adaptado de Davies e Bell (2009)

- Área e distância média entre as redes de drenagem

A avaliação da área entre as redes de drenagem consiste em quantificar a área dos polígonos formados pelas diferenças entre os traçados da rede de drenagem sob avaliação e a tomada como referência. A análise de quantificação da área entre as redes de drenagem foi utilizada em Chen *et al.* (2012) que realizou comparação entre diferentes redes de drenagem obtidas de MDE.

Esta metodologia foi inicialmente proposta por McMaster (1986). Reinoso (2010) sugeriu uma adaptação ao método original com fechamento diferente nas extremidades, e ainda divisão do somatório das áreas pelo comprimento médio das linhas (Figura 9), resultando em uma largura média de erro entre as duas drenagens, o que fisicamente representa a distância média entre os traços das drenagens derivada e a tomada como referência.

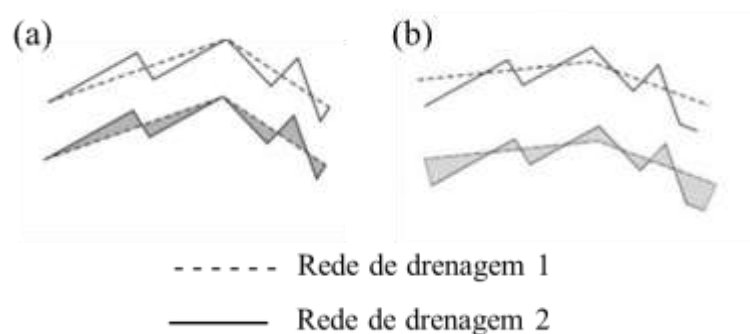


Figura 9 – (a) Área de deslocamento entre duas linhas de drenagem (McMaster, 1986) e (b) área de deslocamento entre duas linhas de drenagem com abordagem proposta por Reinoso (2010). Fonte: Reinoso (2010)

No método da distância média, é calculada a distância média perpendicular entre a rede de drenagem sob avaliação e uma rede de drenagem tomada como referência, ao longo de todo o traçado da rede de drenagem (Figura 10). Deste modo, a distância média aumenta à medida que a rede de drenagem em análise se afasta da rede tomada como referência. Uma rede de drenagem totalmente ajustada à rede tomada como referência teria uma distância média igual a zero (DAVIES e BELL, 2009).



Figura 10 - Critérios de avaliação de similaridade entre rede de drenagem por distância média.

Fonte: Adaptado de Davies e Bell (2009)

A abordagem de avaliar a formação de área e distância média entre duas redes de drenagem foi usada, por exemplo, por Buarque *et al.* (2009) em comparação entre cinco métodos de geração de direções de fluxo a partir do MDE quanto ao desempenho na definição da rede de drenagem em áreas planas.

Outros estudos que quantificaram a área e a distância média entre duas redes de drenagem como forma de avaliação de qualidade são os trabalhos de Zhou e Chen (2011), Davies e Bell (2009), MacMaster (2002) e Endreny *et al.* (2000).

- Porcentagem dentro do *buffer*

No método que analisa a porcentagem dentro do *buffer*, é determinado o percentual do traçado da rede de drenagem sob avaliação que se encontra inserida dentro de uma determinada faixa de distância (*buffer*) a partir da drenagem considerada como verdadeira ou de referência (Figura 11). Ou seja, este método estima a porcentagem de rede de drenagem avaliada que se encontra presente em um determinado *buffer* colocado de forma uniforme ao redor da rede tomada como referência.

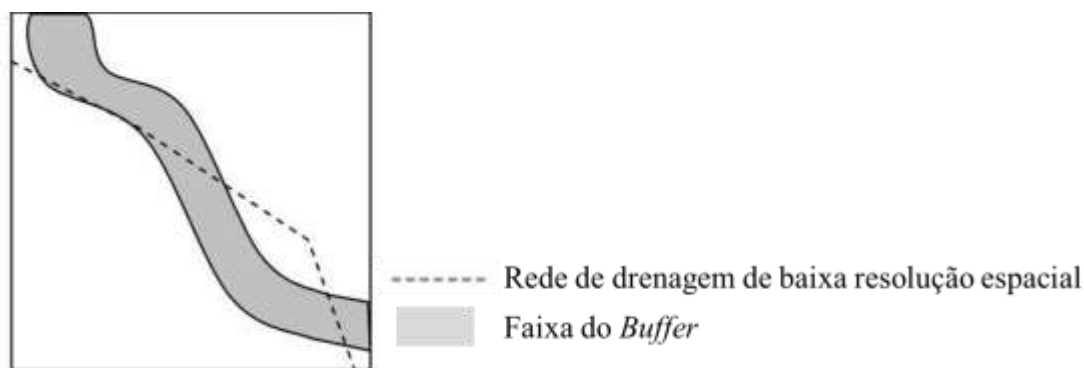


Figura 11 - Critérios de avaliação de similaridade entre rede de drenagem porcentagem dentro do *buffer*. Fonte: Adaptado de Davies e Bell (2009)

De acordo com Davies e Bell (2009), para estudos que avaliem redes de drenagem derivadas por procedimentos de *upscaling*, o tamanho do *buffer* deve depender da resolução da rede de drenagem mais grosseira, que deve ser definido como um quinto da célula de baixa resolução. Por exemplo, ao fazer *upscaling* de direções de fluxo da resolução de 50 m para a resolução mais grosseira de 5 km, foi adotado por tais autores um *buffer* de 1 km para a análise.

O estudo mencionado no parágrafo anterior recomenda ainda que a escolha da largura da faixa ou *buffer* deve ser feita tomando-se o devido cuidado para assegurar que aproximadamente 50% da rede de drenagem de baixa resolução se encontrem dentro da área do *buffer*. Um *buffer* muito pequeno pode excluir grande porcentagem de rede de baixa resolução e um *buffer* muito grande tenderia a enquadrar quase que a totalidade da rede de baixa resolução.

Chen *et al.* (2012) avaliaram a precisão de três métodos de processamento de MDE's sobre as características do terreno e seus derivados, tais como a rede de drenagem. Para tanto, a comparação foi composta de três partes, a determinação de erro quadrático médio calculado entre os comprimentos da drenagem, comparação entre os valores de inclinação média e rugosidade da superfície, porcentagem de rede de drenagem dentro do *buffer* com largura correspondente à resolução espacial do MDE original e distância média à rede de drenagem.

McMaster (2002) utilizou *buffer* de 100 e 250 m ao avaliar dois métodos de geração de direções de fluxo com MDE's de diferentes resoluções entre 30 m a 3 km.

Vogt *et al.* (2003) ao trabalhar com MDE com resolução espacial de 250 m, utilizaram diferentes tamanhos de *buffers*, 250, 500 e 1000 m, para comparar a rede de drenagem gerada, tais valores de *buffer* equivalem a 1 *pixel*, 2 *pixels* e 4 *pixels*, respectivamente. Tais autores concluíram que, em média, quase 75% da rede de drenagem gerada estava inserida no *buffer* de 1000 m, esse valor cai para 58% no *buffer* de 500 m e para 38% no *buffer* de 250 m.

Kenny e Matthews (2005), ao avaliar várias abordagens para delimitação de bacias hidrográficas a partir de dados com resolução inicial de 25 m, utilizaram *buffers* 12,5, 25 e 50 m, equivalendo a 1/2, 1 e 2 *pixels*, respectivamente.

Buarque *et al.* (2009) aplicaram esse tipo de análise para rios da região Amazônica visando avaliar diferentes algoritmos de geração de direções de fluxo, e a largura do *buffer* foi considerada como 300 m para o rio principal e 120 m para um afluente, em função da largura média dos trechos em estudo.

4. METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

Como estudo de caso para a presente pesquisa, foi selecionada a bacia hidrográfica do rio Uruguai, localizada no Sul do Brasil. A escolha da referida bacia como área de estudo para a presente pesquisa se deu pelos seguintes motivos: (i) o fato de o grupo de pesquisa já ter realizado pesquisas anteriores na área, estando assim, disponíveis alguns dos planos de informações necessários ao desenvolvimento deste estudo; (ii) características da bacia permitirem a possibilidade de análise em diferentes resoluções espaciais a partir da alta resolução do MDE-SRTM.

O principal rio da bacia é o rio Uruguai formado entre os Estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul, a partir da confluência dos rios Canoas e Pelotas. O rio Uruguai possui 2.200 km de extensão (MMA, 2006).

O rio Uruguai pode ser dividido em três partes (Figura 12): alto rio Uruguai, onde se caracteriza por um forte gradiente topográfico, o que propicia alto potencial de geração hidrelétrica; médio rio Uruguai e baixo rio Uruguai que vai até a sua foz no estuário do rio da Prata (Silva, 2014). Os principais afluentes da bacia são os rios do Peixe, localizado no alto curso do rio principal, Icamaquã, Piratinim, Ijuí, esses três últimos situados no médio curso do rio, e o Quaraí, afluente pertencente a parte baixa da bacia do rio Uruguai, as principais características do rio principal e de seus principais afluentes estão na Tabela 1.

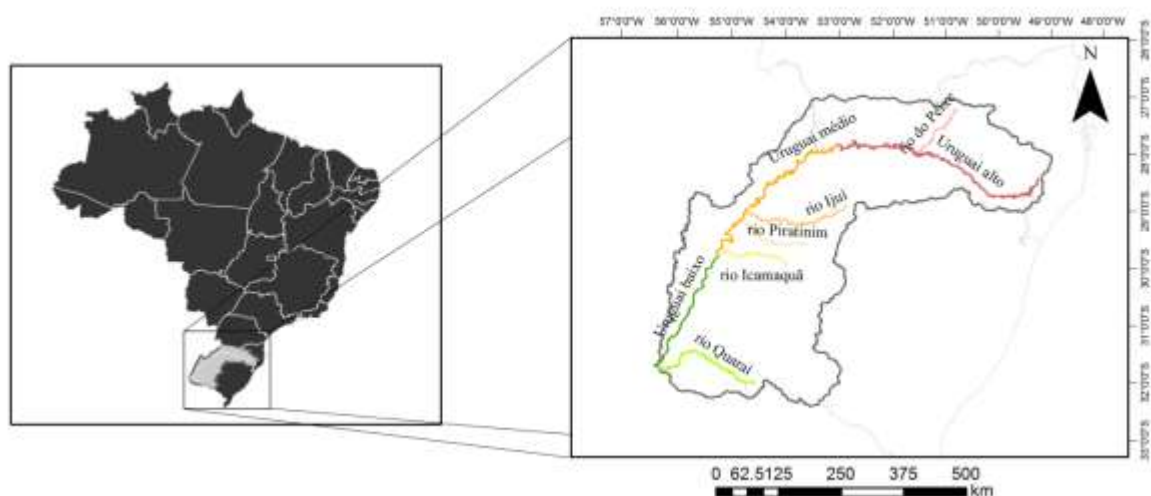


Figura 12 – Localização da Bacia Hidrográfica do rio Uruguai com indicação dos principais trechos de rios.

Tabela 1 - Características do rio Uruguai e dos seus principais afluentes.

	Comprimento (km)	Sinuosidade (m/m)	Largura (m)	Área de drenagem (km²)
Rio QUARAI	345,4	1,82	60 - 180	14750
Rio ICAMAQUÃ	250,6	1,93	60	5044
Rio PIRATINIM	337,6	2,58	60	5621
Rio IJUÍ	532,5	2,78	60 - 90	10724
Rio do PEIXE	254,8	2,21	90	5277
Alto URUGUAI	973,0	2,17	100 - 400	64720
Médio URUGUAI	475,9	1,63	500 - 800	113542
Baixo URUGUAI	223,0	1,14	1000 - 1300	206295

A bacia do rio Uruguai possui, em território brasileiro, 174.533 km² de área, o equivalente a 2% do território nacional. O clima da região é temperado, apresentando uma regular distribuição interanual de chuvas, porém com alguma elevação no período de maio a setembro, coincidindo com o inverno. A precipitação média anual é de 1.784 mm, com temperatura média anual variando entre 16 e 20°C e evapotranspiração média anual de 1.041 mm (MMA, 2006).

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da bacia é classificado como Cfa e Cfb. Em ambos os casos, comporta-se como uma região de clima temperado, onde a temperatura do mês mais frio oscila entre -3° e 18°C, apresentando chuvas em todas as estações (MATTIUZI, 2013).

A composição da diversidade biológica da bacia é formada pelos principais biomas do sul da América Latina: a Mata Atlântica e seus ecossistemas associados (Floresta Ombrófila Mista, Floresta Estacional Decidual, Floresta Estacional Semidecidual e campos naturais) e o Pampa (MMA, 2006).

4.2 Etapas de aplicação e resoluções espaciais trabalhadas

Os procedimentos metodológicos adotados neste estudo foram organizados em seis etapas principais agrupadas em duas fases de trabalho. A primeira fase compreendeu as etapas de 1 a 4 e a segunda, fase as etapas 5 e 6 (Figura 13).

Na primeira etapa, foi obtida a partir de trabalhos anteriores e verificada a rede de drenagem vetorizada manualmente a partir de imagens LANDSAT. Essa vetorização foi tomada como verdadeira e comparada com as drenagens extraídas das imagens SRTM. A segunda etapa compreendeu a construção de uma rede de drenagem obtida por traçado manual para as resoluções espaciais degradadas de 1 km, 5 km, 10 km, 20 km e 30 km. A etapa posterior consistiu em caracterizar a rede de drenagem de resolução espacial alta (100 m) a partir do MDE do SRTM. Na quarta etapa, os mesmos procedimentos da etapa 3 são utilizados, mas para obtenção de redes de

drenagem de baixa resolução espacial (1, 5, 10, 20 e 30 km) obtidas por duas abordagens distintas, a reamostragem do MDE e o *upscaling* de direções de fluxo. Na quinta etapa foram selecionadas técnicas para a avaliação da qualidade das redes de drenagem geradas, a partir de levantamento bibliográfico. Por fim, na sexta etapa, as técnicas selecionadas foram aplicadas e os resultados encontrados foram analisados.

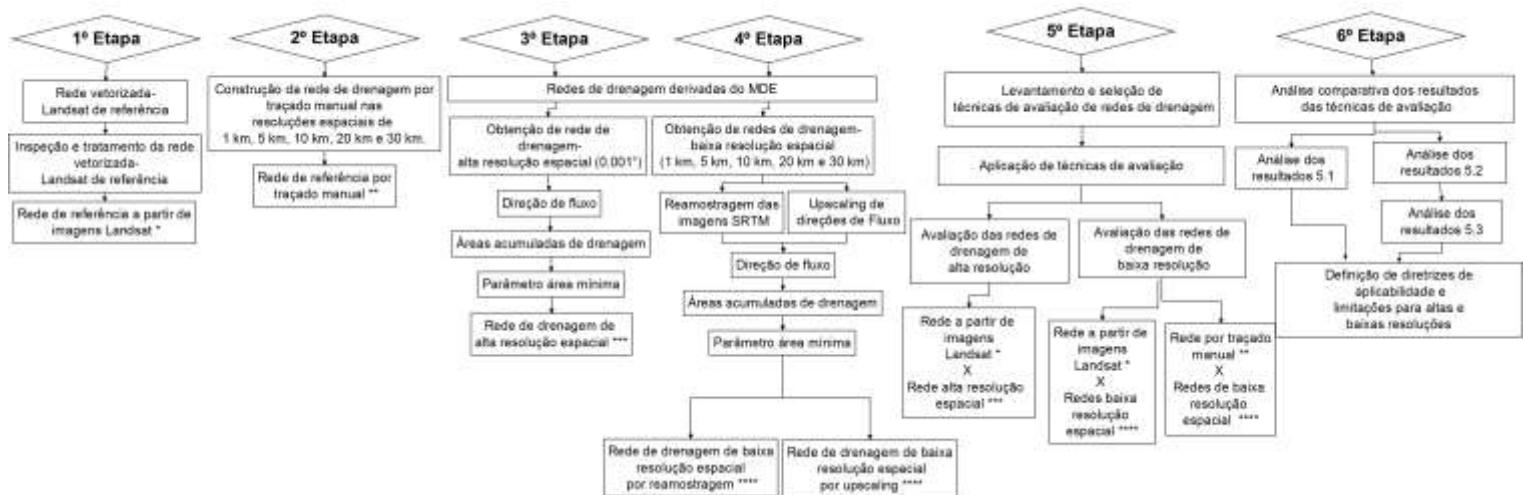


Figura 13 – Fluxograma de etapas metodológicas da pesquisa.

4.3 Redes de drenagem de referência

4.3.1 Rede de drenagem a partir de imagens LANDSAT

Foi obtida uma rede drenagem vetorial elaborada em pesquisa anterior (Saraiva e Paz, 2014; Paz e Collischonn, 2008) a partir de imagens LANDSAT. Tal rede foi manualmente digitalizada a partir de imagens LANDSAT 7/ ETM+ selecionadas entre os anos de 1999 e 2002 (Tabela 2), conforme a disponibilidade de imagens georreferenciadas e com baixa cobertura de nuvens.

Neste estudo, a rede vetorizada a partir de imagens LANDSAT foi, primeiramente, inspecionada e verificada em toda sua extensão e eventuais falhas foram corrigidas. Essa rede vetorizada foi tomada como referência e comparada às redes de drenagem provenientes do processamento de MDE do SRTM, segundo diferentes procedimentos, reamostragem e *upscaling*, como relatado em itens posteriores.

Tabela 2. Imagens LANDSAT utilizadas na vetorização das redes de drenagem de referência realizada em pesquisas anteriores de Paz e Collischonn (2008) e Saraiva e Paz (2015).

Órbita/Ponto (P/ R)	Data
P225/ R81	24 de abril de 2000
P224 / R81	28 de janeiro de 2000
P225/ R80	24 de abril de 2000
P224/ R80	28 de janeiro de 2000
P224/ R79	06 de julho de 2000
P223/ R80	15 de março de 2002
P223/ R79	15 de março de 2002
P222/ R79	24 de setembro de 1999
P221/ R79	12 de novembro de 2002
P221/ R80	15 de junho de 2000
P220/ R80	07 de maio de 2000

4.3.2 Rede de drenagem obtida por traçado manual

Nesta etapa, buscou-se construir uma rede de drenagem de referência obtida por traçado manual para cada resolução espacial degradada, alternativa à rede vetorizada a partir de imagens LANDSAT. Ou seja, duas redes de drenagem de referência existem neste trabalho: a rede vetorizada oriunda das imagens LANDSAT e a rede obtida no procedimento descrito neste item.

Visualizando-se a rede vetorizada LANDSAT, foi identificado e estabelecido qual seria o melhor caminho *pixel a pixel* que representasse cada rio na resolução espacial degradada. Dessa forma, foi criada manualmente uma rede de drenagem nas resoluções de 0,01° (ou ~1 km), 0,05° (ou ~5 km), 0,1° (ou ~10 km), 0,2° (ou ~20 km) e 0,3° (ou ~30 km), de forma a seguir o mais fielmente possível a rede vetorial LANDSAT, como mostra a Figura 14. Considera-se, portanto, neste estudo, que essa rede traçada manualmente é a melhor possível de se obter para as resoluções degradadas.

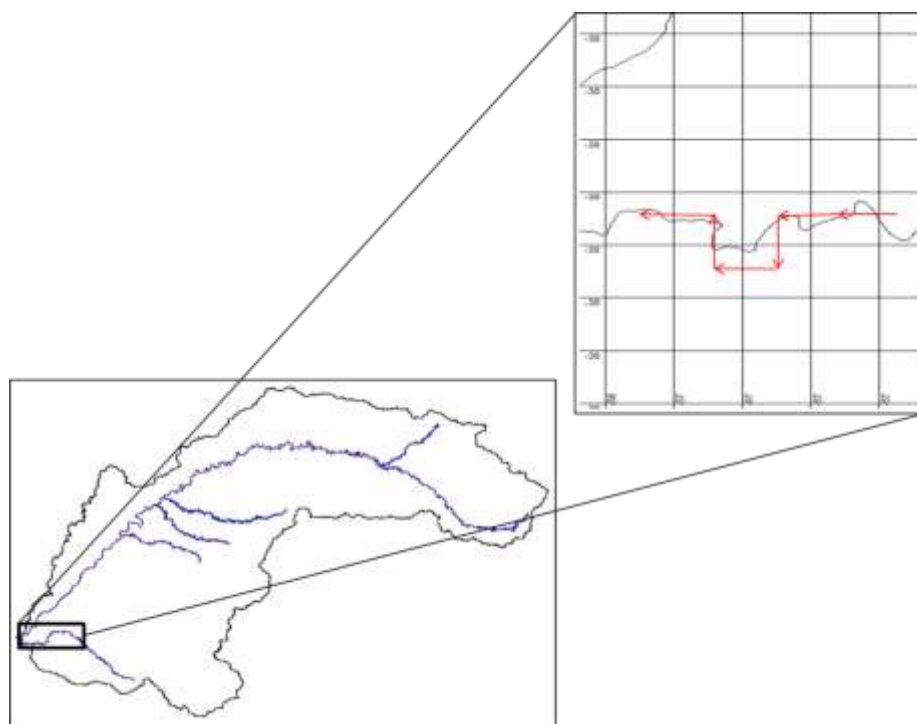


Figura 14 – Exemplo de construção de rede manual de referência em um trecho do rio Quaraí na resolução de 5 km (em azul a rede vetorizada oriunda de imagens LANDSAT e em vermelho a indicação do caminho *pixel a pixel* estabelecido manualmente na resolução degradada de 5 km – cujos *pixels* são indicados pela grade em linhas pretas).

4.4 Redes de drenagem derivadas do MDE

4.4.1 Resolução espacial alta (0.001° ou 100 m)

A rede de drenagem considerada como de alta resolução nesta pesquisa foi obtida por meio do processamento do MDE do SRTM. Primeiramente, foi realizado o procedimento de reamostragem do MDE da sua resolução original (0,0008333° ou ~90 m) para 0,001° (ou ~100 m). Esta foi a resolução espacial adotada para análises de alta resolução, tendo em vista, o maior grau de detalhamento possível das características da rede de drenagem com escalas múltiplas entre as redes de alta e baixa resolução.

Utilizando o MDE no formato *raster*, pôde-se gerar os planos de informação necessários à obtenção da rede de drenagem de alta resolução. Para tanto, utilizou-se rotinas computacionais em linguagem Fortran desenvolvidas em pesquisas anteriores, conforme detalhado a seguir.

- Direções de fluxo

O primeiro plano de informação a ser gerado se refere às direções de fluxo que foram determinadas por meio da rotina MNTAlta4A, cujo algoritmo de cálculo segue o algoritmo D8, mas inserindo um fator de aleatoriedade na busca por direções de fluxo em áreas planas, visando evitar a formação de drenagem paralela (BUARQUE *et al.*, 2009). Como produto, é gerado um *raster* que contém as direções de fluxo referentes ao MDE de alta resolução espacial.

- Áreas acumuladas de drenagem

A partir do *raster* de direções de fluxo de alta resolução foram obtidas as áreas acumuladas de drenagem com a utilização de outra rotina denominada AreaAcu. Esta rotina gera como produto um *raster* que contém a indicação da área de drenagem de cada *pixel* da imagem. O produto é gerado na mesma resolução espacial dos dados de entrada, determinando a área superficial de cada pixel em unidades planas levando-se em conta sua posição geográfica, a fim de corretamente contabilizar a equivalência entre unidades geográficas e planas conforme a latitude.

- Rede de drenagem

Com as áreas acumuladas de drenagem e a definição do valor de área mínima, obteve-se a rede de drenagem de alta resolução. O valor de área mínima foi determinado a partir da sobreposição do *raster* de áreas acumuladas de drenagem com o arquivo de rede vetorizada LANDSAT observando qual a área mínima mais próxima do início da rede vetorizada de referência. Nesse procedimento, foi encontrado o valor de 100 km² de área mínima, de forma que apenas os *pixels* com área igual ou superior a este valor foram considerados como pertencentes à rede de drenagem.

Posteriormente, a rede de drenagem no formato *raster* foi convertida para vetor por meio de reclassificação, sendo que no vetor resultante, os *pixels* com área acumulada inferior ao valor estipulado receberam valor zero e os de valor maior ou igual receberam valor um.

4.4.2 Resolução espacial degradada (≥ 1 km)

As redes de drenagem de baixa resolução foram geradas por dois métodos: reamostragem do MDE e *upsampling* de direções de fluxo.

- Procedimento de reamostragem do MDE

O MDE do SRTM foi reamostrado da sua resolução original para 1 km, 5 km, 10 km, 20 km e 30 km. Para tanto, utilizou-se o algoritmo do tipo agregação que gera como produto um novo MDE onde cada *pixel* da grade de resolução mais grosseira contém atributo igual à média dos valores dos *pixels* correspondentes na resolução mais detalhada.

Os procedimentos para obtenção das direções de fluxo, áreas acumuladas de drenagem e redes de drenagem foram executados para o MDE reamostrado de modo semelhante aos procedimentos descritos no item 4.4.1, isto é, os procedimentos usados para obter os produtos derivados do MDE de alta resolução espacial.

- Procedimento de *upscaling* de direções de fluxo

No processo de *upscaling* de direções de fluxo, as direções de fluxo e áreas acumuladas de alta resolução servem como base para a geração de direções de fluxo de baixa resolução.

Para aplicação do método de *upscaling*, foi realizada a derivação de redes de drenagem de baixa resolução a partir da grade de direções de fluxo e de áreas acumuladas de alta resolução já obtidas no item 4.4.1.

Os procedimentos foram executados para as resoluções degradadas de 1 km, 5 km, 10 km, 20 km e 30 km. Para tanto, utilizou-se o algoritmo COTAT+ descrito em Paz *et al.* (2006) e implementado na rotina computacional DirFluxo4. Trata-se de algoritmo consolidado, já utilizado em outros estudos, e de qualidade avaliada positivamente (DAVIES e BELL, 2009).

Para fins de entendimento, convencionou-se tratar os elementos da grade de alta resolução espacial como *pixels* e os elementos de baixa resolução espacial como células. O algoritmo da rotina DirFluxo4 executa, primeiramente, a identificação do *pixel* exutório para cada célula de baixa resolução, posteriormente segue o caminho de fluxo de *pixel* em *pixel* partindo do *pixel* exutório selecionado para a célula vizinha e conforme o caminho traçado determina para qual célula vizinha a célula analisada drena. Os procedimentos internos do algoritmo podem ser resumidamente descritos em três etapas principais (PAZ *et al.*, 2006):

1. Determinação do *pixel* exutório de cada célula: para uma determinada célula, o algoritmo seleciona inicialmente como *pixel* exutório aquele que apresenta a maior área de drenagem acumulada dentre todos os *pixels* contidos na célula; verifica-se o comprimento do curso d'água principal a montante desse *pixel* dentro da célula; caso esse comprimento seja superior a um

valor mínimo pré-definido, o *pixel* testado é aceito como *pixel* exutório; tal valor mínimo corresponde ao parâmetro denominado de Caminho Mínimo de Montante ou CMM, cujo valor recomendado é igual a 1/5 da dimensão da célula; caso não seja atendido o critério do CMM, verifica-se se o *pixel* testado é o que drena a maior porção da célula e, em caso positivo, tal *pixel* é aceito para *pixel* exutório; caso contrário, escolhe-se novo *pixel* para ser testado dentre os demais de acordo com a maior área de drenagem acumulada e repetem-se as verificações subsequentes (Figura 15);

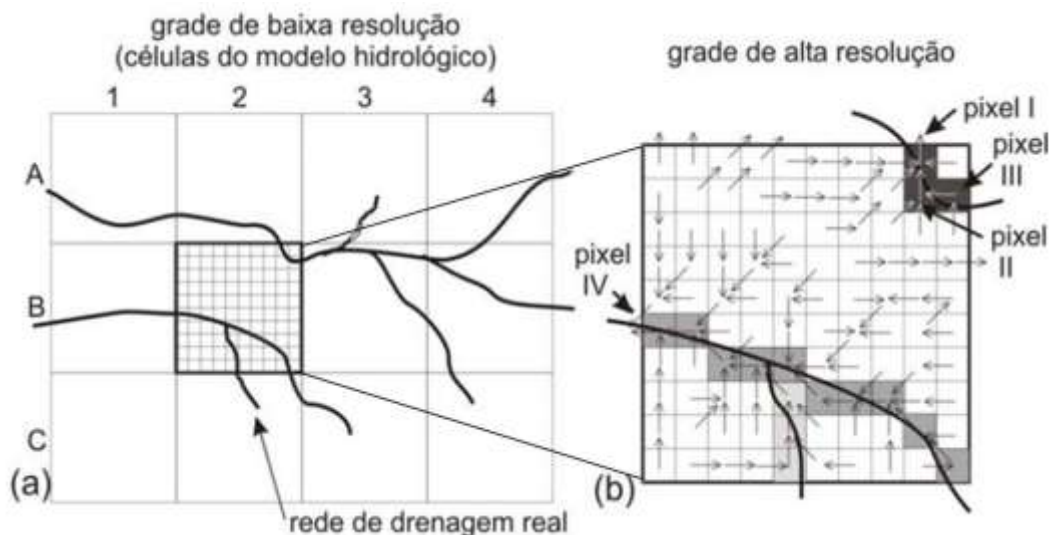


Figura 15. Determinação do *pixel* exutório no algoritmo COTAT+. (a): Célula de baixa resolução.

(b): Zoom em uma célula do modelo hidrológico. O *pixel* I possui maior área de drenagem acumulada, mas por ter comprimento do curso d'água dentro da célula menor do que CMM é rejeitado para *pixel* exutório; pelo mesmo motivo o *pixel* III é rejeitado; o *pixel* IV é então testado e aceito para *pixel* exutório da célula.

Fonte: Paz (2008).

2. Atribuição das direções de fluxo: a atribuição da direção de fluxo para cada uma das células é realizada percorrendo-se o caminho do escoamento desde seu *pixel* exutório; a cada *pixel* exutório de uma célula vizinha encontrado, verifica-se o incremento na área de drenagem; caso seja superior a um valor mínimo pré-definido, a célula analisada drena para essa célula vizinha; tal valor mínimo constitui um parâmetro denominado Área Incremental Mínima ou AIM, e tem valor recomendado igual à área da célula; caso não atenda ao critério da AIM, continua-se a percorrer o caminho do escoamento, até encontrar o *pixel* exutório de uma célula vizinha que satisfaça o critério mencionado ou que saia da vizinhança; nesse último caso, atribui-se a

direção para a última célula visitada (Figura 16); situações particulares são tratadas especificamente, como descrito em Paz *et al.* (2006);

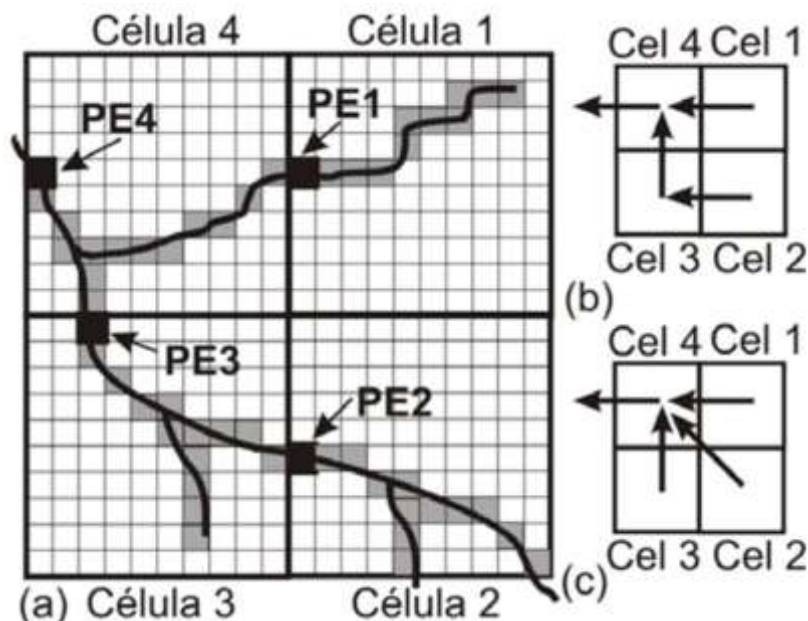


Figura 16. Definição da direção de fluxo nas células (baixa resolução) pelo algoritmo COTAT+, com base nas informações dos *pixels* (alta resolução). Na célula 2: (a) O *Pixel* Exutório (PE2) drenará para a célula 3 se a diferença das áreas de drenagem acumuladas do PE2 (*pixel* inicial) e o PE3 (*pixel* testado) for maior que o valor pré-estabelecido da AIM (b); A célula 2 só drenará para célula 4, caso a condição anterior não seja atendida encontrando o *pixel* PE4 como exutório (c).

Fonte: Paz (2008).

3. Correção de cruzamentos: esporadicamente podem ocorrer cruzamentos entre direções de fluxo de duas células, o que é desfeito com a correção da direção da célula cujo *pixel* exutório apresenta a menor área de drenagem acumulada dentre as duas células envolvidas.

Os valores dos parâmetros Área Incremental Mínima (AIM) e Caminho Mínimo de Montante (CMM) adotados nesta pesquisa são apresentados na Tabela 3. O valor dos parâmetros foi selecionado com base nas recomendações de Paz *et al.* (2006) e também utilizadas por Saraiva e Paz (2014), segundo as quais o valor usual de AIM é igual à área da célula e para o parâmetro CMM o valor recomendado é igual a 1/5 da dimensão da célula.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros Área Incremental Mínima (AIM) e Caminho Mínimo de Montante (CMM) adotados nesta pesquisa.

Parâmetro	Resolução espacial				
	1 km	5 km	10 km	20 km	30 km
AIM (km ²)	1	25	100	400	900
CMM (km)	0,2	1,0	2,0	4,0	6,0

4.5 Avaliação das redes de drenagem

A avaliação das redes de drenagem de diferentes resoluções e geradas pelos diferentes métodos, reamostragem do MDE e *upsampling* de direções de fluxo, foi realizada de forma qualitativa e quantitativa a partir de vários critérios e métricas.

A maior parte das avaliações foi realizada tomando como referência a rede vetorizada das imagens LANDSAT, mas em alguns casos a comparação ou avaliação foi feita tomando a rede de baixa resolução construída manualmente como a rede de referência. Na descrição a seguir de cada técnica de avaliação ou métrica, é informada explicitamente qual rede de referência é considerada.

4.5.1 Método da inspeção visual

Procedeu-se com a inspeção visual das redes de drenagem geradas pelos diferentes métodos e nas diferentes resoluções espaciais. Nesta abordagem qualitativa, realizou-se uma análise comparativa entre os traçados das redes de alta e baixa resolução espacial e a rede vetorizada de imagens LANDSAT, tomada como referência, julgando visualmente a coerência da rede de baixa resolução em reproduzir o traçado da drenagem de referência, observando o nível de similaridade entre elas.

- Quantificação de erros

Para uma análise quantitativa, o método de inspeção visual foi aperfeiçoado para expressar valores de discordância entre as redes de drenagem, realizando a contagem do número de *pixels* ou células que apresentaram direções de fluxo diferentes da rede de drenagem de referência. A rede analisada, para ter uma boa qualidade, deve seguir tão próximo quanto possível a rede de drenagem tomada como referência.

4.5.2 Métricas de comparação integrada

- Características da bacia hidrográfica (área, perímetro, índices morfológicos)

Foram obtidas as áreas e perímetros das bacias delimitadas para as redes de drenagem de alta resolução espacial (100 m) e as redes de drenagem de baixa resolução espacial (> 1 km) geradas pelos métodos de reamostragem do MDE e *uspcaling* de direções de fluxo, nas resoluções de 1 km, 5 km, 10 km, 20 km e 30 km. Os valores de área e perímetro obtidos para as redes de baixa resolução espacial foram comparados àqueles obtidos para a rede de alta resolução espacial.

Entre os índices propostos para caracterizar a forma da bacia estão o coeficiente de compacidade (Kc) e o fator de forma (Kf). Estes índices são utilizados para comparar bacias e para comporem parâmetros das equações empíricas de correlações entre vazões e características físicas das bacias.

O coeficiente de compacidade é obtido pela relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia, como mostra a Equação 1. Esse coeficiente é adimensional e varia de acordo com a forma da bacia, independente de seu tamanho, sendo que quanto mais irregular for a bacia, tanto maior será o coeficiente de compacidade.

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

onde P é o perímetro (km) e A é a área da bacia (km²).

O fator de forma corresponde à relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia (Equação 2). Mede-se o comprimento da bacia quando se segue o curso d'água mais longo desde a desembocadura até a cabeceira mais distante na bacia.

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (2)$$

onde L é o comprimento axial da bacia (km).

O fator de forma constitui outro índice indicativo de maior ou menor tendência para enchentes em uma bacia hidrográfica. Uma bacia com um fator de forma baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho, porém com maior fator de forma.

- Características do rio (comprimento, sinuosidade)

Foram medidos os comprimentos dos trechos de rios delimitados neste estudo e comparados os valores com os comprimentos obtidos na rede tomada como referência. Com isso, obtiveram-se os erros quantitativos do comprimento para os trechos de rio, os quais foram utilizados como indicadores do grau de qualidade das redes de drenagem analisadas.

Neste estudo, a sinuosidade foi obtida pela razão entre os comprimentos dos trechos de rios medidos em cada resolução espacial e obtidos em cada procedimento e os correspondentes comprimentos em linha reta, conforme Buarque *et al.* (2009).

4.5.3 Métricas de comparação espacial

- Área entre as delimitações da bacia hidrográfica

Nesta pesquisa, foi analisada quantitativamente a diferença entre as delimitações das bacias obtidas pelos métodos de reamostragem do MDE e *upscaling* de direções de fluxo, nas resoluções de 1, 5, 10, 20 e 30 km, e a delimitação da bacia de referência. Como delimitação de referência, foi tomada aquela obtida a partir do processamento do MDE de alta resolução espacial (100 m).

Os polígonos referentes às delimitações das bacias em análise e à delimitação da bacia de referência são cruzados e as áreas não coincidentes entre as delimitações são contabilizadas; essas áreas são exemplificadas no detalhe da Figura 17 pelos polígonos em cinza.

- Área relativa entre as delimitações da bacia hidrográfica

Esta métrica se refere a tomar a quantificação de área entre duas delimitações da bacia, como feito no item anterior, porém dividindo os valores pelas resoluções espaciais de 1, 5, 10, 20 e 30 km. Assim, os resultados desta métrica permitem analisar o quanto os valores de áreas entre as delimitações da bacia podem ser comparáveis entre as baixas resoluções espaciais adotadas.

- Distância média entre as delimitações da bacia hidrográfica

Esta métrica representa o quanto a delimitação de uma bacia hidrográfica está distante de outra tomada como referência (Figura 18). Esta métrica foi obtida dividindo-se o valor do somatório das áreas fora de concordância entre as bacias analisadas (métrica descrita no item anterior) pelo

perímetro da bacia de alta resolução espacial, tomada como referência. O resultado representa uma distância média em linha reta existente entre as delimitações das bacias analisadas.

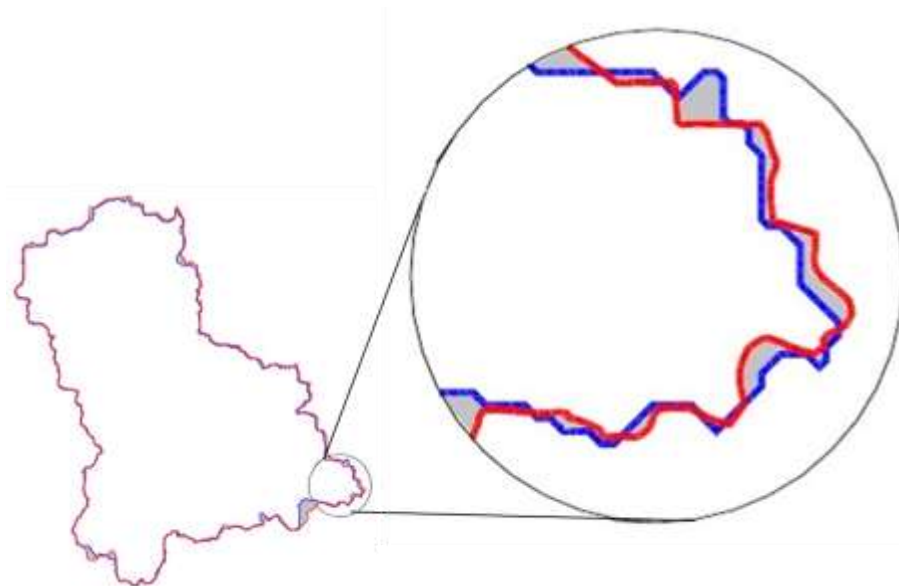


Figura 17. Comparação espacial entre duas delimitações de uma bacia hidrográfica. Fonte: Adaptado de Freitas *et al.* (2012)

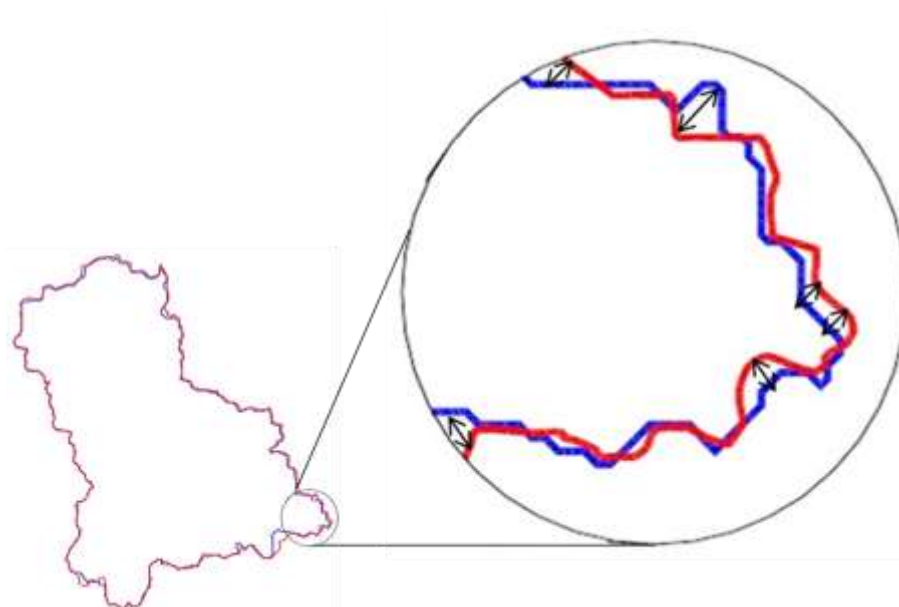


Figura 18. Distância média entre duas delimitações de uma bacia hidrográfica. Fonte: Adaptado de Freitas *et al.* (2012)

- Percentual do traçado da rede de drenagem dentro de *buffer*

A determinação do traçado dentro do *buffer* fornece o percentual da rede de drenagem em análise que se encontra inserida dentro de uma faixa (*buffer*) em torno da rede de drenagem tomada como referência (Figura 11). Neste estudo, utilizaram-se diferentes *buffers* (Tabela 4) para avaliar a possível influência da determinação do *buffer* na caracterização da qualidade de uma rede de drenagem. Com base na revisão de literatura, foram selecionadas larguras de *buffer* atreladas à dimensão do *pixel* da resolução espacial da rede em análise: 1 *pixel*, 1/2 *pixel* e 1/5 *pixel*.

Os diferentes *buffers* adotados foram aplicados à rede de drenagem de referência que foi aquela obtida a partir de imagens LANDSAT. Posteriormente, foram quantificados os trechos das redes de drenagem em análise, derivadas do MDE por reamostragem e *upscaling* nas resoluções degradadas de 1, 5, 10, 20 e 30 km, que estariam inseridos dentro de cada *buffer*.

Tabela 4 – Valores de *buffers* aplicados à rede de drenagem tomada como referência.

Resolução espacial da rede de drenagem em análise	Largura do buffer		
	1 <i>pixel</i>	1/2 <i>pixel</i>	1/5 <i>pixel</i>
1 km	1 km	0,5 km	0,2 km
5 km	5 km	2,5 km	1 km
10 km	10 km	5 km	2 km
20 km	20 km	10 km	4 km
30 km	30 km	15 km	6 km

- Área entre os traçados das redes de drenagem

Este procedimento de analisar a qualidade de uma rede drenagem consiste na quantificação da formação de áreas entre as redes de drenagem sob análise e a rede de drenagem de referência. Este procedimento foi aplicado às redes de alta resolução e às de baixa resolução geradas pelos procedimentos de reamostragem do MDE e *upscaling* de direções de fluxo nas resoluções degradadas de 1, 5, 10, 20 e 30 km. O levantamento de áreas entre duas redes de drenagem significa que quanto maior for esse valor, maior será a discordância entre os traçados das redes analisadas.

Este método de análise foi aplicado em alguns casos, considerando como referência a rede de drenagem obtida das imagens LANDSAT, que é o procedimento relatado na literatura. Em

alguns casos, testou-se a aplicação desse método de forma inovadora, considerando como referência a rede de drenagem de baixa resolução traçada manualmente.

- Distância média entre os traçados da drenagem

A distância média entre duas drenagens representa, em termos médios, o quanto uma rede de drenagem está distante em linha reta de outra rede de drenagem tomada como referência.

A distância média entre as redes de drenagem analisadas foi encontrada pela razão entre o somatório das áreas formadas entre as redes de drenagem geradas (que é a métrica descrita no item anterior) e o comprimento do rio tomado como referência para o trecho analisado, conforme apresentado em Chen *et al.* (2012).

Com o objetivo de realizar diferentes análises em relação à distância média das redes de drenagem, procedeu-se com a organização das avaliações desta forma: para a rede de drenagem de alta resolução espacial derivada do MDE e para a rede de drenagem de baixa resolução obtida por traçado manual, foi tomada como referência a rede de drenagem obtida de imagens LANDSAT; e para as redes de drenagem de baixa resolução espacial obtidas por reamostragem do MDE e *upscaling* de direções de fluxo, a rede tomada como referência foi, em primeiro momento, a rede de drenagem a partir de imagens LANDSAT, posteriormente, foi utilizada a rede de drenagem obtida por traçado manual na mesma resolução espacial.

- Distância média relativa entre os traçados da drenagem

A distância média relativa entre as redes de drenagem analisadas foi encontrada pela razão entre o valor de distância média entre as redes de drenagem (métrica descrita no item anterior) e a resolução espacial degradada analisada. Por exemplo, a distância média relativa entre a rede de drenagem obtida por reamostragem do MDE na resolução de 1 km é obtida dividindo-se o valor de distância média entre ela e a rede de referência (seja ela a partir de imagens LANDSAT ou obtida por traçado manual) e o tamanho do pixel na resolução espacial analisada, neste caso 1 km.

O resultado desta métrica corresponde a um valor adimensional que representa o quanto os resultados de distância média das redes de drenagem de baixa resolução (> 1 km) são maiores ou menores do que o próprio tamanho do pixel.

4.5.4 Síntese dos métodos e métricas de avaliação das redes de drenagem

Um resumo dos métodos e métricas utilizados nesta pesquisa para avaliar a qualidade das redes de drenagem é apresentado na Tabela 5. Lista-se para cada forma de avaliação, quais redes foram avaliadas e quais redes foram tomadas como referência na avaliação.

Tabela 5 – Síntese dos métodos e métricas empregados para avaliação da qualidade das redes de drenagem nesta pesquisa.

Identificador Método ou métrica de análise da qualidade da rede de drenagem		Rede de drenagem (RD) avaliada: resolução espacial (Δx) e forma de obtenção	Rede de drenagem de referência
N.	Descrição		
1	Inspeção visual – avaliação qualitativa	RD de $\Delta x = 100\text{m}$ derivada do MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD via LANDSAT
2	Inspeção visual – quantificação de erros	RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD via LANDSAT
3	Características da bacia (área, perímetro, índices morfológicos)	RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD de $\Delta x = 100\text{m}$ derivada do MDE
4	Características do rio (comprimento e sinuosidade)	RD de $\Delta x = 100\text{m}$ derivada do MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ manual RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD via LANDSAT
5	Área entre as delimitações da bacia hidrográfica	RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD de $\Delta x = 100\text{m}$ derivada do MDE
6	Área relativa entre as delimitações da bacia hidrográfica	RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD de $\Delta x = 100\text{m}$ derivada do MDE
7	Distância média entre as delimitações da bacia hidrográfica	RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD de $\Delta x = 100\text{m}$ derivada do MDE
8	Percentual da rede de drenagem dentro de buffer (1, 1/2 e 1/5 pixels)	RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ manual RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD via LANDSAT
9	Área entre os traçados da rede de drenagem	RD de $\Delta x = 100\text{m}$ derivada do MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ manual RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD via LANDSAT
		RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ manual
10	Distância média entre os traçados da rede de drenagem	RD de $\Delta x = 100\text{m}$ derivada do MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ manual RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD via LANDSAT
		RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ manual
11	Distância média relativa entre os traçados da rede de drenagem	RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ manual RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD via LANDSAT
		RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via reamostr. MDE RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ via ups. dir. fluxo	RD de $\Delta x > 1\text{ km}$ manual

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor compreensão, as análises desta pesquisa foram organizadas em avaliações da rede de drenagem de alta resolução espacial (100 m) e avaliação das redes de drenagem de baixa resolução espacial (> 100 m), essas obtidas por traçado manual, por reamostragem do MDE e por *upscaling* de direções de fluxo, os resultados foram ainda organizados de acordo com a natureza do método de avaliação, em métodos de comparação integrada e de comparação espacial.

5.1 Avaliação da rede de drenagem de alta resolução espacial

5.1.1 Inspeção visual da rede de alta resolução espacial (100 m)

A análise visual da rede de drenagem de alta resolução espacial permitiu observar o quanto esta rede conseguiu representar o traçado da rede de drenagem tomada como referência, neste caso, a rede vetorizada de imagens LANDSAT. Os resultados são apresentados separadamente por trechos de rios, na Figura 19, para melhor visualização. Na Figura está apresentada apenas uma parte de cada trecho de estudo.

Para o rio Quaraí, verifica-se que alguns trechos não foram adequadamente representados pela rede de alta resolução espacial, especialmente nas partes sinuosas do rio. Em algumas situações a rede de alta resolução esteve, consideravelmente, distante da rede de referência (Figura 19). Alguns trechos do rio Quaraí menos curvilíneos foram mais bem representados na rede de alta resolução espacial.

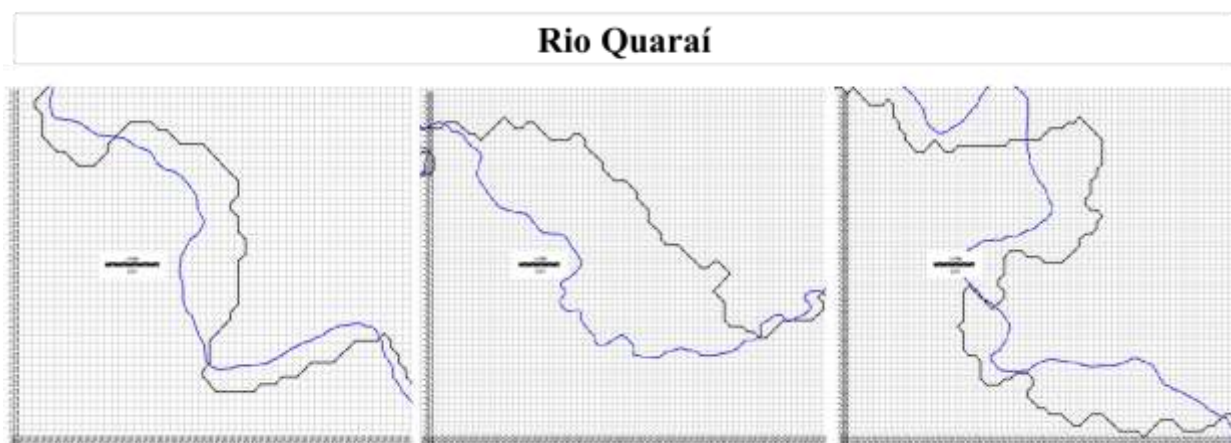


Figura 19 – Inspeção visual da rede de drenagem de alta resolução espacial (em preto) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT, tomada como referência (em azul), com destaque para trechos do rio Quaraí.

Nos rios Icamaquã, Piratinim e Ijuí, perceberam-se trechos que não foram coerentes com a rede de referência. Na maior parte de sua extensão, a rede de alta resolução esteve próxima à rede de referência, especialmente em trechos menos sinuosos; no entanto, em alguns trechos como nos que são mostrados Figura 20, a rede de alta resolução espacial não representou de forma adequada o traçado da rede de referência.

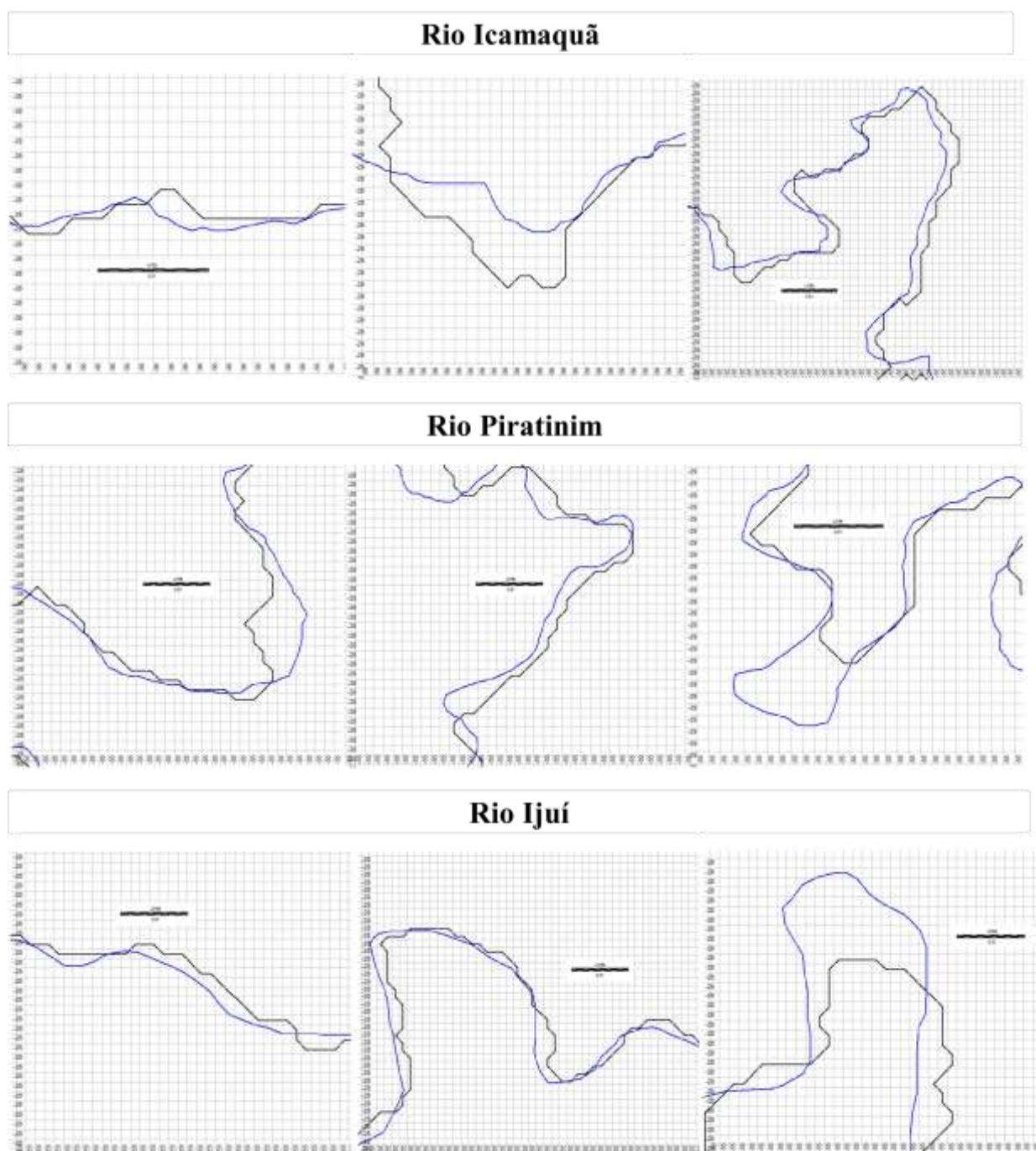


Figura 20 – Inspeção visual da rede de drenagem de alta resolução espacial (em preto) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT, tomada como referência, com destaque para trechos dos rios Icamaquã, Piratinim e Ijuí.

O rio do Peixe foi especialmente bem representado na rede de alta resolução espacial, como mostra a Figura 21. Percorrendo toda a extensão do rio do Peixe não foi identificado, praticamente, nenhum trecho com diferenças significativas entre os traçados da rede de drenagem de alta resolução espacial e a rede vetorizada de imagens LANDSAT, diferentemente do ocorrido com os rios Quaraí, Icamaquã e Piratinim, principalmente.

O rio Uruguai no trecho alto foi, de modo geral, bem representado pela rede de alta resolução espacial. Diferentemente do que foi observado em outros rios, no rio Uruguai alto não foi constatada a formação de grandes espaços entre as redes de drenagem de alta resolução espacial e de referência, no entanto, em vários trechos ocorreram a formação de pequenas diferenças entre as redes de drenagem (Figura 21).

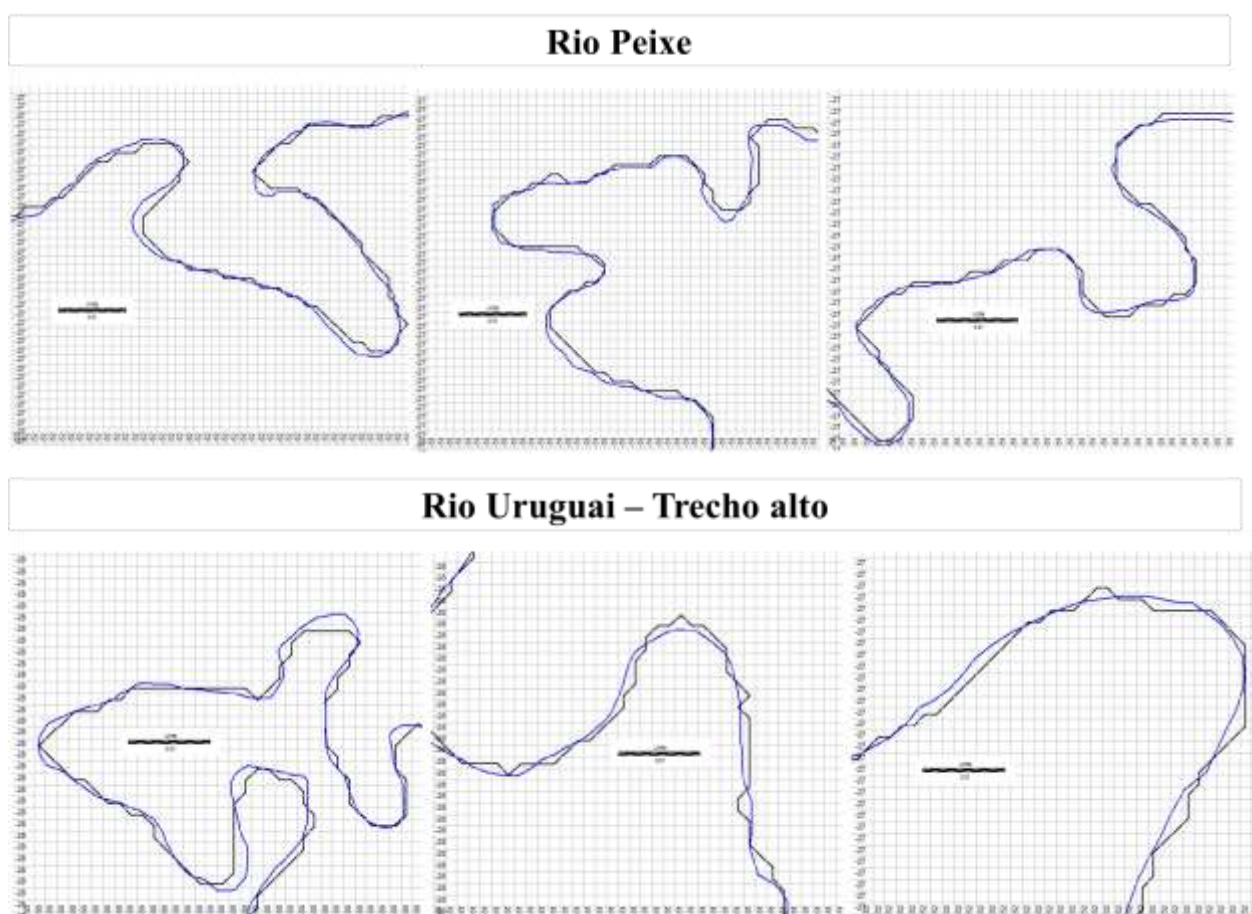


Figura 21 – Inspeção visual da rede de drenagem de alta resolução espacial (em preto) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT, tomada como referência (em azul), com destaque para trechos do rio Peixe e rio Uruguai no trecho alto.

De modo geral, o rio Uruguai nos trechos médio e baixo na rede de alta resolução espacial não seguiram adequadamente o traçado da rede de drenagem de referência. Na Figura 22, verifica-se que em alguns trechos a rede de alta resolução esteve, consideravelmente, distante da rede de referência. O rio Uruguai baixo foi um dos rios mais mal representados nesta resolução espacial.

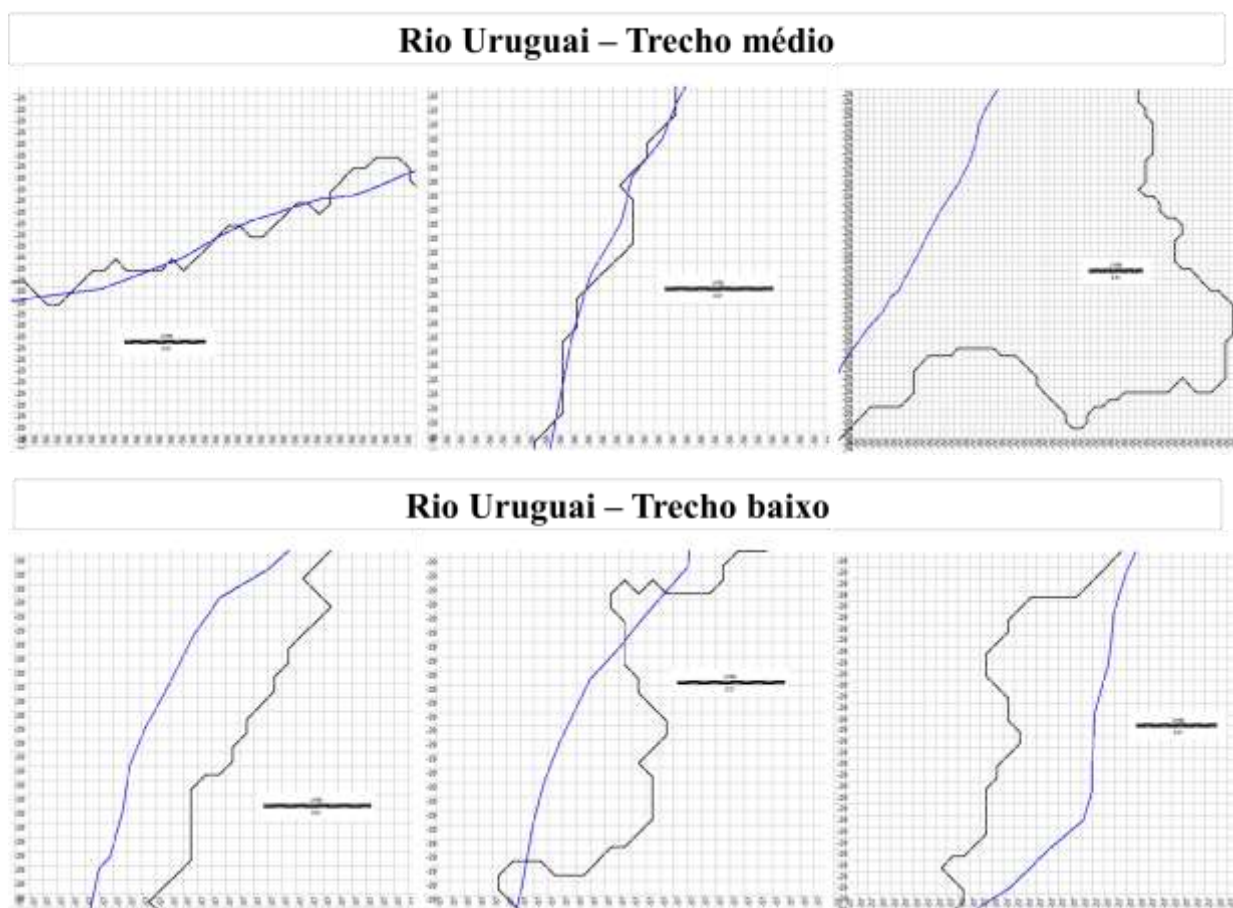


Figura 22 – Inspeção visual da rede de drenagem de alta resolução espacial (em preto) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT, tomada como referência (em azul), com destaque para trechos do rio Uruguai nos trechos médio e baixo.

5.1.2 Métodos de comparação integrada

- Características da bacia hidrográfica (área, perímetro, índices morfológicos)

Os resultados encontrados para as características da bacia hidrográfica do rio Uruguai, a área de drenagem, perímetro, coeficiente de compacidade e fator de forma, tomando como base a rede de drenagem gerada pelo processamento do MDE em alta resolução espacial estão na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores das características da bacia hidrográfica do rio Uruguai extraída em alta resolução espacial.

Característica	Valor
Área (km ²)	206316,4
Perímetro (km)	4856,1
Coeficiente de Compacidade (Kc)	2,99
Fator de Forma (Kf)	0,07

Esses resultados foram utilizados, posteriormente, como referência na avaliação das características das bacias hidrográficas extraídas das redes de baixa resolução espacial, por reamostragem e *upscaling*, nas resoluções de 1, 5, 10, 20 e 30 km.

- Características do rio (comprimento, sinuosidade)

Os valores de comprimentos e sinuosidade da rede de drenagem podem ser observados na Tabela 7, onde estão detalhados os resultados encontrados para a rede de drenagem de alta resolução espacial e da rede de drenagem a partir de imagens LANDSAT, tomada como referência, para os oito trechos de rios analisados.

Os comprimentos variaram de 236,8 km para o rio do Peixe a 846,3 km para o rio Uruguai no trecho alto. Constata-se que os valores de comprimento e sinuosidade encontrados para a rede de alta resolução espacial foram, de modo geral, próximos aos valores da rede tomada como referência, como esperado.

Os erros em relação à rede de referência, no que se refere à superestimava dos comprimentos variaram de 3,89% para o rio Quaraí a 20,2% no baixo rio Uruguai, os comprimentos foram subestimados em 5% para o rio Ijuí e em 13% para o alto trecho do rio Uruguai. Este resultado indica que o rio Quaraí estaria mais coerente com a rede de drenagem de referência quando comparado aos demais rios, no entanto, na inspeção visual observou-se que o traçado do rio Quaraí não foi, de modo geral, próximo à rede de referência. Entretanto, o resultado atribuído ao rio Uruguai baixo confirma o que foi identificado na inspeção visual.

A diferença percentual entre os valores de comprimentos e sinuosidade obtidos para a rede de alta resolução espacial e os valores da rede tomada como referência para os oito trechos de rios analisados pode ser observada na Figura 23.

Tabela 7 – Valores dos comprimentos e sinuosidade para a rede de drenagem de alta resolução comparados à rede vetorizada de imagens LANDSAT.

	Comprimento (km)		Sinuosidade (m/m)	
	Rede vetorizada de imagens LANDSAT	Rede extraída do MDE em alta resolução	Rede vetorizada de imagens LANDSAT	Rede extraída do MDE em alta resolução
Rio QUARAI	345,4	358,9	1,82	1,94
Rio ICAMAQUÃ	250,6	261,1	1,93	2,05
Rio PIRATINIM	337,6	298,3	2,58	2,25
Rio IJUÍ	532,5	501,3	2,78	2,61
Rio do PEIXE	254,8	236,8	2,21	2,01
Alto URUGUAI	973,0	846,3	2,17	2,14
Médio URUGUAI	475,9	561,5	1,63	1,91
Baixo URUGUAI	223,0	268,3	1,14	1,40

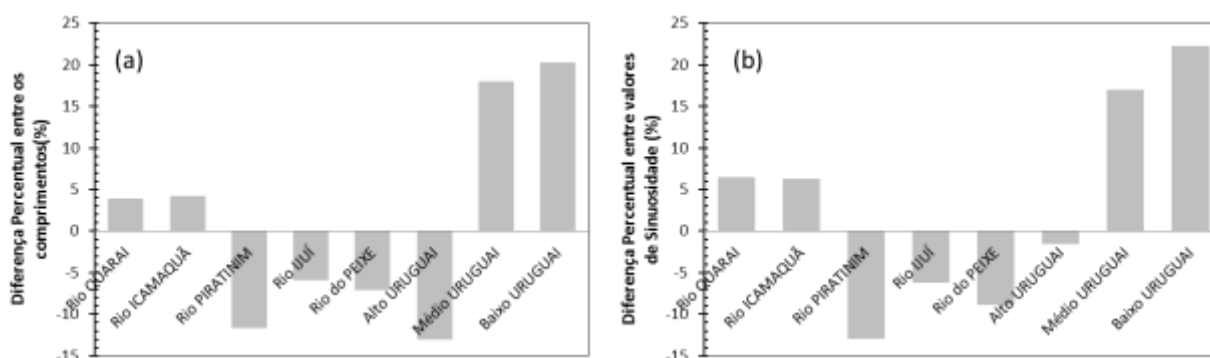


Figura 23 – Valores de diferença percentual entre os (a) comprimentos e (b) sinuosidade da rede de drenagem extraída de MDE em alta resolução espacial e a rede vetorizada de imagens LANDSAT.

Os resultados dos comprimentos obtidos para a rede de drenagem de alta resolução espacial mostram um padrão de subestimativas dos valores para os rios Piratinim, Ijuí, Peixe, e Uruguai no trecho alto, e superestimativas dos valores dos rios com maior área de drenagem, Quaraí, Icamaguã e Uruguai nos trechos médio e baixo. Esse resultado indica que os valores de comprimento são superestimados em relação à rede vetorizada de imagens LANDSAT, tomada como referência, à medida que a área de drenagem aumenta. Pode-se relacionar essa afirmação a uma tendência pautada na formação de uma falsa sinuosidade no interior do rio. Esse efeito pode ser percebido em trechos de rios mais largos, a exemplo, o rio Uruguai, em seu trecho baixo, nessa ocasião, o tamanho do *pixel*, na resolução espacial analisada, é menor que a largura do rio, criando um efeito de sinuosidade artificial, então ocorre a superestimativa dos valores de comprimentos dos rios. Quando o trecho do rio é estreito, porém bastante sinuoso, predomina o erro de não representar os

meandros, devido a largura nessa parte do rio ser menor que o tamanho do *pixel*, levando ao encurtamento dos traçados, subestimando os comprimentos, como no caso do rio Uruguai em seu trecho alto.

5.1.3 Métodos de comparação espacial

- Área entre os traçados da rede de drenagem / Distância média

Os resultados para a área entre os traçados da rede de drenagem e distância média entre as redes de drenagem para a rede de alta resolução espacial foram analisados tomando como referência a rede de drenagem vetorizada a partir de imagens LANDSAT (Figura 24). Essa avaliação consistiu em averiguar a formação de áreas entre as duas redes de drenagem e realizar o cálculo de distância média entre elas.

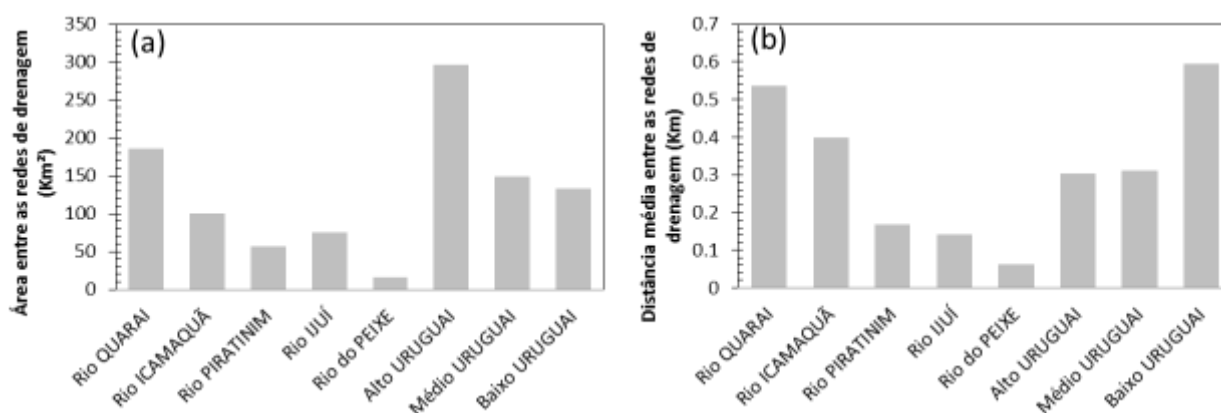


Figura 24 – Valores de (a) área e (b) distância média entre a rede de drenagem de alta resolução e a rede vetorizada de imagens LANDSAT.

Os valores de área formados entre as redes de drenagem variaram entre 16 km² para o rio do Peixe a aproximadamente 295 km² para o rio Uruguai em seu trecho alto, o que implica dizer que, por esta técnica, a rede de alta resolução mais próxima da rede de referência seria o rio do Peixe. Este resultado confirma o que foi mostrado na inspeção visual da rede de drenagem de alta resolução espacial (Figura 21), enquanto que, o rio Uruguai alto seria a rede de drenagem mais incoerente com a rede a partir de imagens LANDSAT. Na inspeção visual verificou-se que o rio Uruguai alto não foi a rede de drenagem mais incoerente com a rede de referência, no entanto, este resultado se deve a formação de áreas, mesmo que em pequenas proporções, em toda extensão do rio e como nesse trecho o rio Uruguai apresenta o maior comprimento entre os oito rios analisados

(Tabela 7), a formação de pequenas áreas numa extensão muito grande quando somadas fornecem um valor elevado, porém, este resultado não deve ser analisado isoladamente, deve ser levado em consideração o comprimento total do trecho de rio.

Em relação à distância média, os valores variaram de 0,06 km para o rio do Peixe a 0,59 km para o trecho baixo do rio Uruguai. Este resultado representa que rio do Peixe está, em média, 60 m distante da rede tomada como referência, bem como, o trecho baixo do rio Uruguai está a 595 m. Relacionando estes resultados ao tamanho do *pixel* adotado para a alta resolução espacial, vemos que o erro inserido no traçado do rio do Peixe se refere, em média, a menos de 1 *pixel* da resolução espacial adotada e quase 6 *pixels* de distância média para o baixo Uruguai.

Em termos de formação de área, o maior resultado foi encontrado para o rio Uruguai no trecho alto, indicando, pela análise desta métrica, erros graves na representação da drenagem nesse trecho, o que não condiz com a análise realizada na inspeção visual; no entanto, quando se analisa a distância média entre as redes de drenagem, o maior resultado foi apresentado pelo rio Uruguai em trecho baixo, e não pelo rio Uruguai no trecho alto. Percebe-se uma discordância entre os resultados encontrados pelas métricas, no caso do rio Uruguai no trecho alto por este ser um rio de maior comprimento, o valor de área formada entre as redes de drenagem distribuído em seu comprimento, em termos de distância média, não representa erros tão graves quando comparado ao valor encontrado para a formação de área entre as redes de drenagem, mostrando que, sem levar em consideração o comprimento do rio, o valor da área, isoladamente, não fornece resultados adequados para indicação de qualidade das redes de drenagem de alta resolução espacial.

5.2 Avaliação das redes de drenagem de baixa resolução espacial

5.2.1 Método de inspeção visual

A análise visual das redes de drenagem permitiu observar que as redes geradas por traçado manual são melhores em representar o traçado da rede de drenagem tomada como referência, quando comparadas ao método de *upscaling*, que por sua vez mostrou resultados, na maioria das vezes, melhores que no método de reamostragem, principalmente no que se refere à preservação das principais características da rede tomada como referência, neste caso, a rede vetorizada de imagens LANDSAT. Em alguns casos, as redes de drenagem apresentaram traçados coincidentes entre os métodos.

Os resultados são apresentados separadamente por trechos de rios, para cada um dos métodos de geração de redes de drenagem de baixa resolução, por traçado manual, extraída de

MDE por reamostragem e por *upscaling*, respectivamente, para as resoluções degradadas de 1, 5, 10, 20 e 30 km (Figuras 25 a 32).

- Rio Quaraí

Para o rio Quaraí, afluente da parte baixa da bacia hidrográfica do rio Uruguai (Figura 12), os melhores resultados foram encontrados pelo método por traçado manual (Figura 25). Dentre os métodos de reamostragem e *upscaling*, os melhores resultados, em termos de representação do traçado foram encontrados para o método de *upscaling*, com exceção da resolução de 30 km. Verifica-se que na resolução de 30 km, o procedimento de reamostragem apresentou traçado igual ao da rede obtida por traçado manual, ou seja, nesse caso específico, o método conseguiu representar o traçado da rede de drenagem da melhor forma possível. Já no método de *upscaling*, nesta mesma resolução espacial, percebe-se uma diferença na célula que identifica o encontro entre o afluente e o rio principal.

O método de *upscaling* seguiu, em quase todos os casos, o traçado da rede de drenagem por traçado manual. Nas resoluções mais detalhadas, a exemplo de 1 e 5 km, as diferenças entre os métodos ocorrem com mais frequência em todo o comprimento do rio. Nas resoluções mais degradadas os traçados obtidos pelos métodos se aproximam.

Na resolução de 1 km, o traçado da drenagem no método de reamostragem diferiu, consideravelmente, do traçado de referência, predominando o erro de não representar os trechos mais sinuosos. Na resolução de 20 km, também no método de reamostragem, constata-se um erro grave de representação da rede de referência quando este atribui a foz do rio Quaraí a outra célula que não a indicada na drenagem de referência.

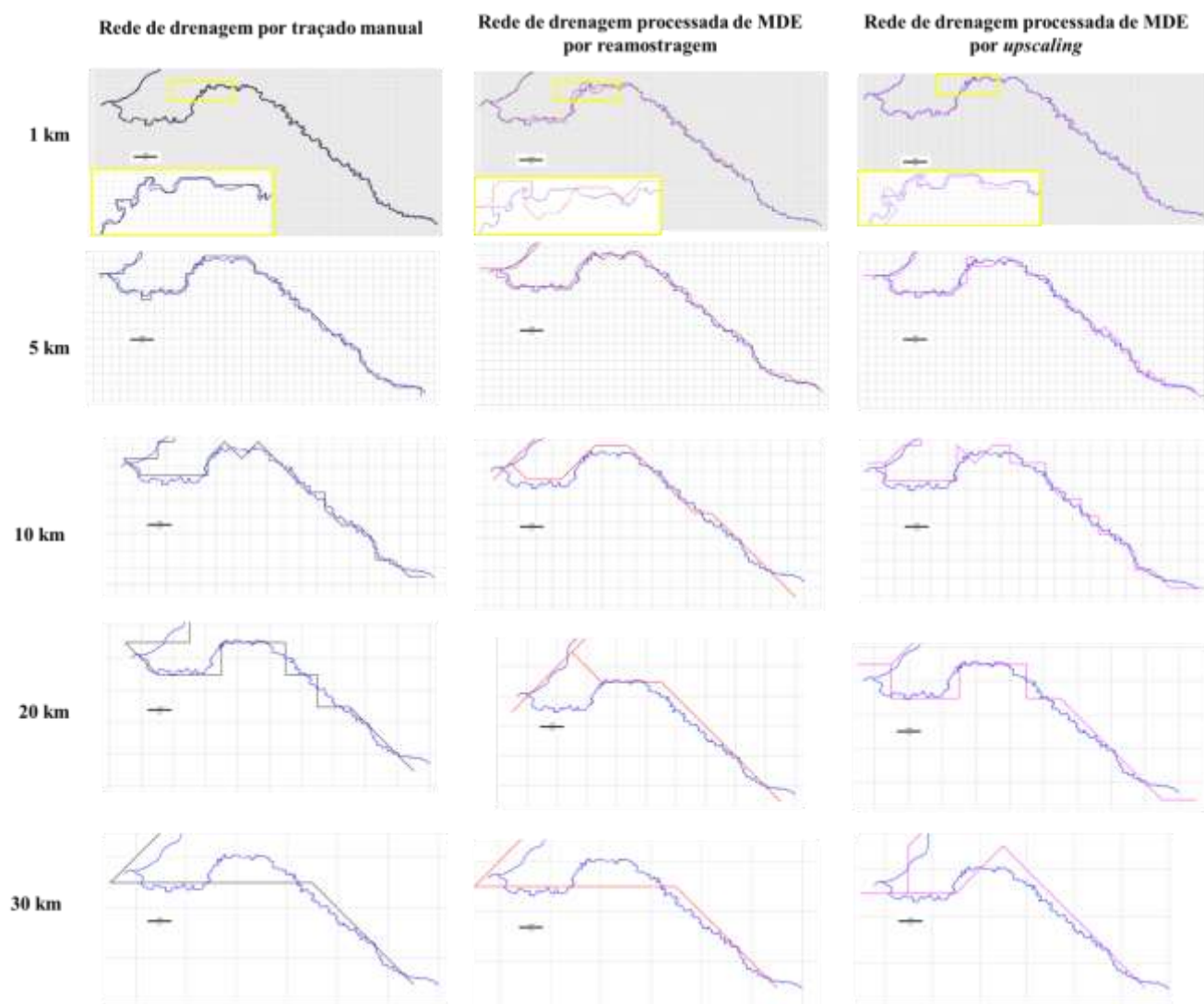


Figura 25 – Traçado do rio Quaraí obtido por traçado manual, por reamostragem e por *upsampling* em diferentes resoluções espaciais.

- Rio Içamaquã

Diferentemente do rio Quaraí, nas resoluções mais detalhadas, as diferenças entre os métodos reamostragem e *upsampling* para o rio Içamaquã não são tão grandes, como mostra a Figura 26.

Na resolução de 10 km, o método de reamostragem conseguiu seguir quase que, totalmente, o traçado gerado no método por traçado manual. Nessa resolução, no método de *upsampling*, ocorreu um erro considerado grave de representação na foz do rio Içamaquã. Na resolução de 20 km, o método de reamostragem apresentou traçado mais próximo da rede de referência quando comparado ao método de *upsampling*, que teve dificuldade de representar a foz do rio.

As maiores diferenças entre os métodos de geração de redes de drenagem de baixa resolução espacial são encontradas na resolução de 30 km, sendo o por traçado manual o que mais se aproxima da rede de referência; os demais métodos apresentam representações bastante limitadas do traçado do rio Icamaguã.

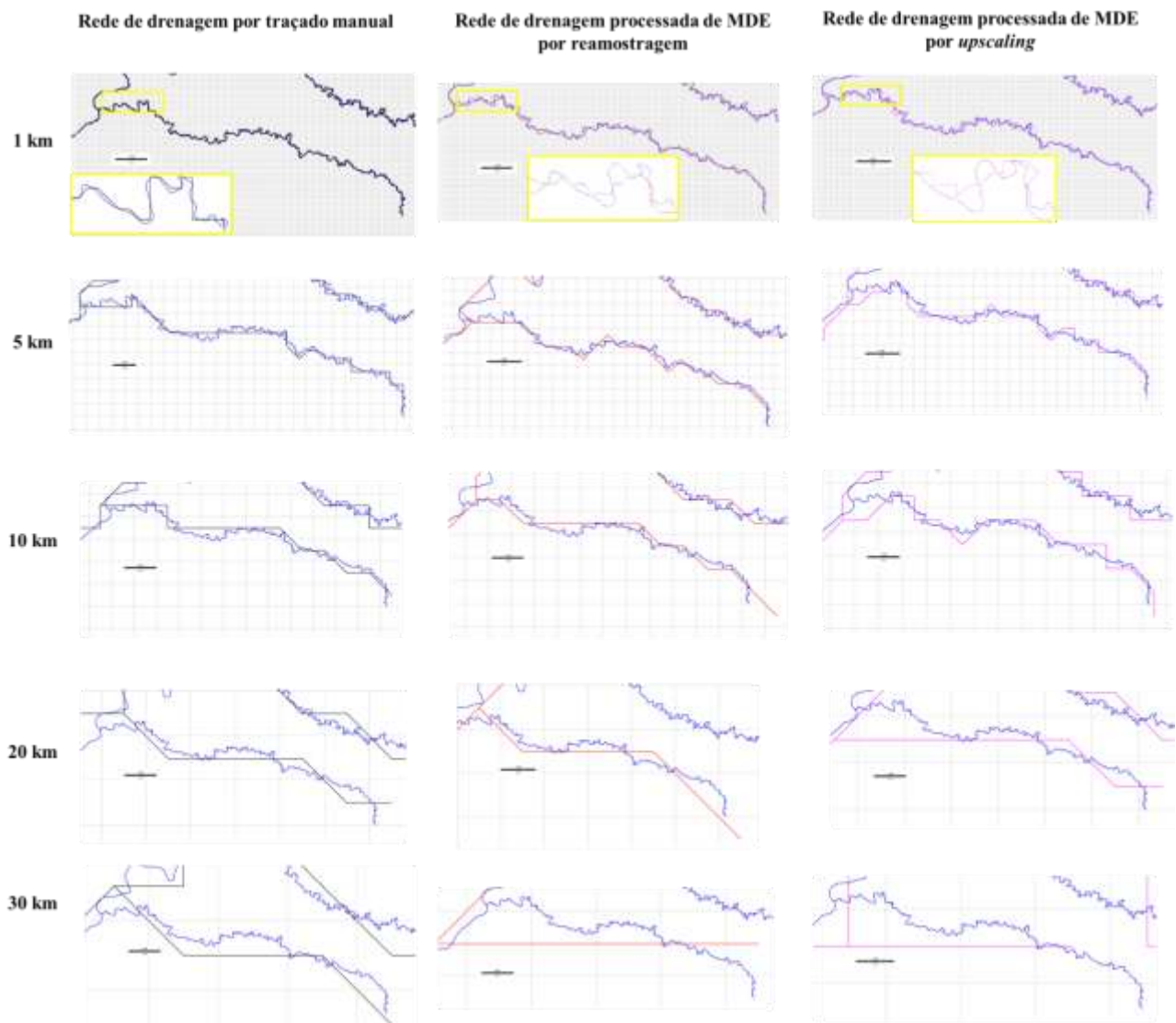


Figura 26 – Traçado do rio Icamaguã obtido por traçado manual, por reamostragem e por *upsampling* em diferentes resoluções espaciais.

- Rio Piratinim

O rio Piratinim é um dos rios mais sinuosos da bacia do rio Uruguai, desta forma, existe uma dificuldade natural em representar trechos de rios tão sinuosos, isso pode ser visualizado na Figura

27 que mostra a dificuldade do método de reamostragem em representar adequadamente os meandros menores do rio, mesmo na resolução de 1 km.

Na resolução de 20 km, o rio praticamente não conseguiu ser representado pelo método de reamostragem, sendo identificado apenas um pequeno trecho do mesmo, enquanto que pelo método de *upsampling* não ocorreu este problema, sendo o traçado praticamente igual ao da rede por traçado manual. Na resolução de 30 km, a maior parte das feições e formas do rio é perdida, especialmente no método de reamostragem.

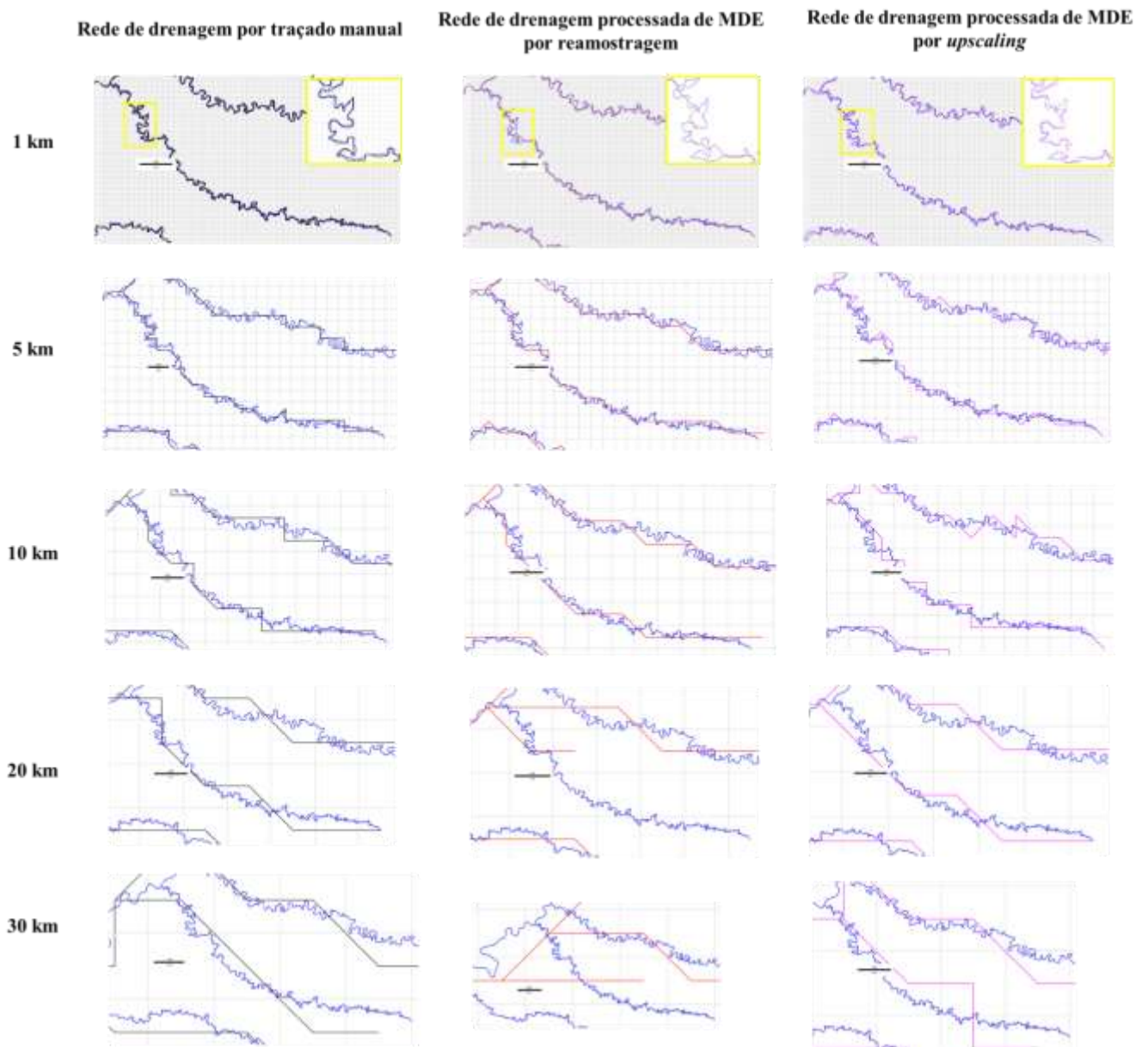


Figura 27 – Traçado do rio Piratinim obtido por traçado manual, por reamostragem e por *upsampling* em diferentes resoluções espaciais.

- Rio Ijuí

O rio Ijuí é o rio mais sinuoso da bacia hidrográfica do rio Uruguai e o segundo maior comprimento dos oito rios analisados. Novamente, existe a dificuldade, principalmente, pelo método de reamostragem de representar os trechos mais sinuosos do rio, por negligenciar a forma dos meandros do rio.

A rede por traçado manual consegue acompanhar até mesmo os meandros menores do rio na resolução de 1 km (Figura 28). Na resolução de 10 km, o método de reamostragem e por traçado manual apresentaram traçados muito próximos entre si, com maior parte das células corretas no método de reamostragem. Nas resoluções de 20 e 30 km, o rio foi bem representado pelos métodos de reamostragem e *upscaling*, com traçados muito próximos ao da drenagem obtida por traçado manual.

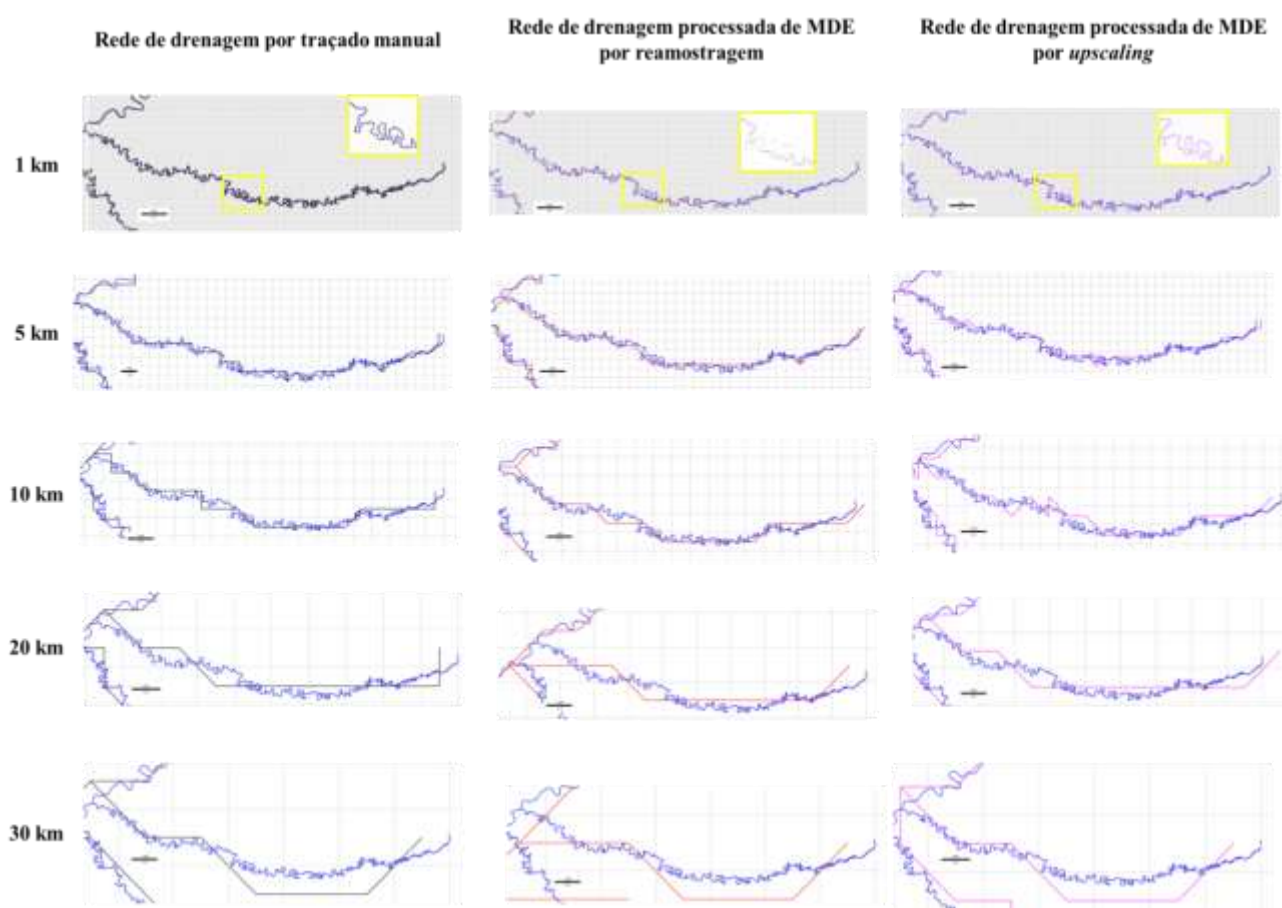


Figura 28 – Traçado do rio Ijuí obtido por traçado manual, por reamostragem e por *upscaling* em diferentes resoluções espaciais.

- Rio do Peixe

Como pode se observar na Figura 29, na resolução de 1 km, o método de *upscaling* conseguiu representar melhor a rede de drenagem quando comparada ao método de reamostragem. Na resolução de 5 km, as diferenças entre os métodos por traçado manual, por reamostragem e por *upscaling* não são consideradas significativas. Já nas resoluções de 20 e 30 km, é perceptível que o método de reamostragem apresentou o traçado mais incoerente com a rede de drenagem tomada como referência, sendo comprometidas suas características de comprimento e sinuosidade.

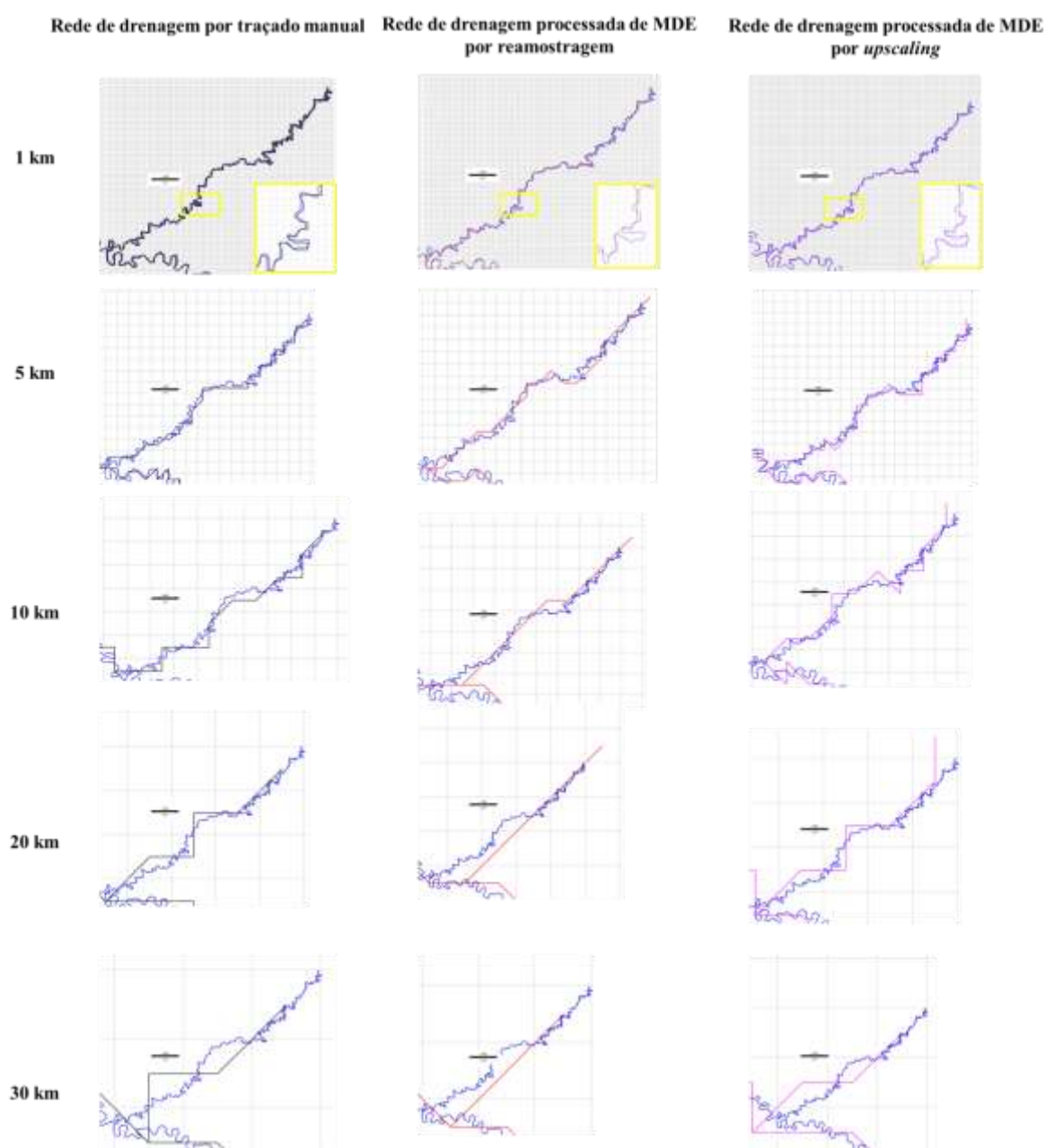


Figura 29 – Traçado do rio do Peixe obtido por traçado manual, por reamostragem e por *upscaling* em diferentes resoluções espaciais.

- Rio Uruguai trecho alto

Na resolução de 1 km, as diferenças entre as redes de drenagem nos métodos por traçado manual, por reamostragem e por *upscaling* podem ser consideradas pequenas, quando consideradas a outros rios (Figura 30), sendo a melhor representação a obtida por traçado manual, seguido do método de *upscaling*. No entanto, na resolução de 5 km, já é possível observar erros graves de representação pelo método de reamostragem.

Nas resoluções mais degradadas de 20 e 30 km, são verificados erros graves na rede de drenagem processada por reamostragem. O método de *upscaling* representou bem o rio mesmo nas resoluções mais degradadas.

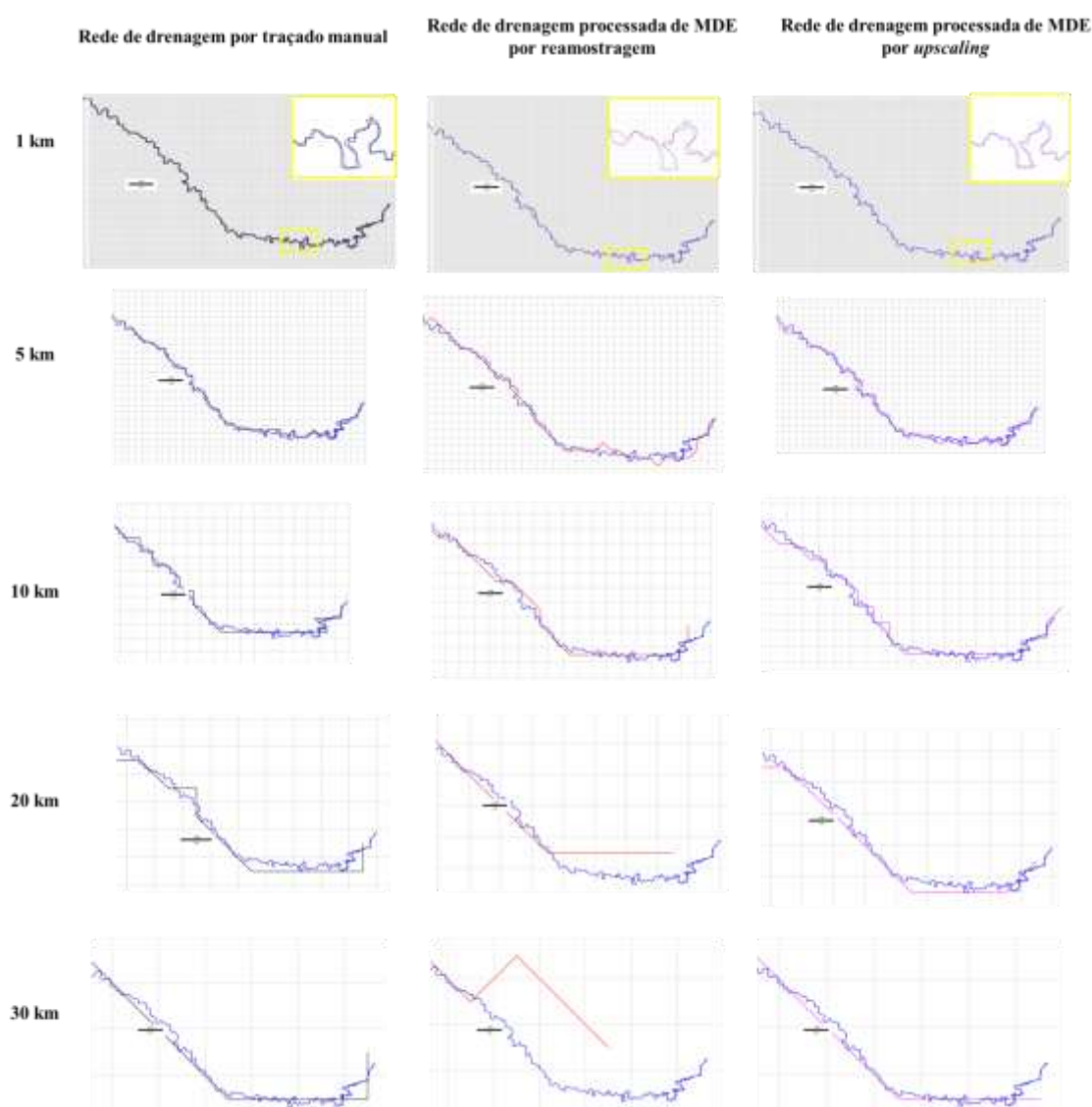


Figura 30 – Traçado do rio Uruguai trecho alto obtido por traçado manual, por reamostragem e por *upscaling* em diferentes resoluções espaciais.

- Rio Uruguai trecho médio

Percebe-se desde a resolução mais detalhada que o método de reamostragem apresenta incoerência em seu traçado para o trecho médio do rio Uruguai, como mostra a Figura 31. Na resolução de 5 km, os erros são agravados no método de *upsampling*, seguido pelo método de reamostragem.

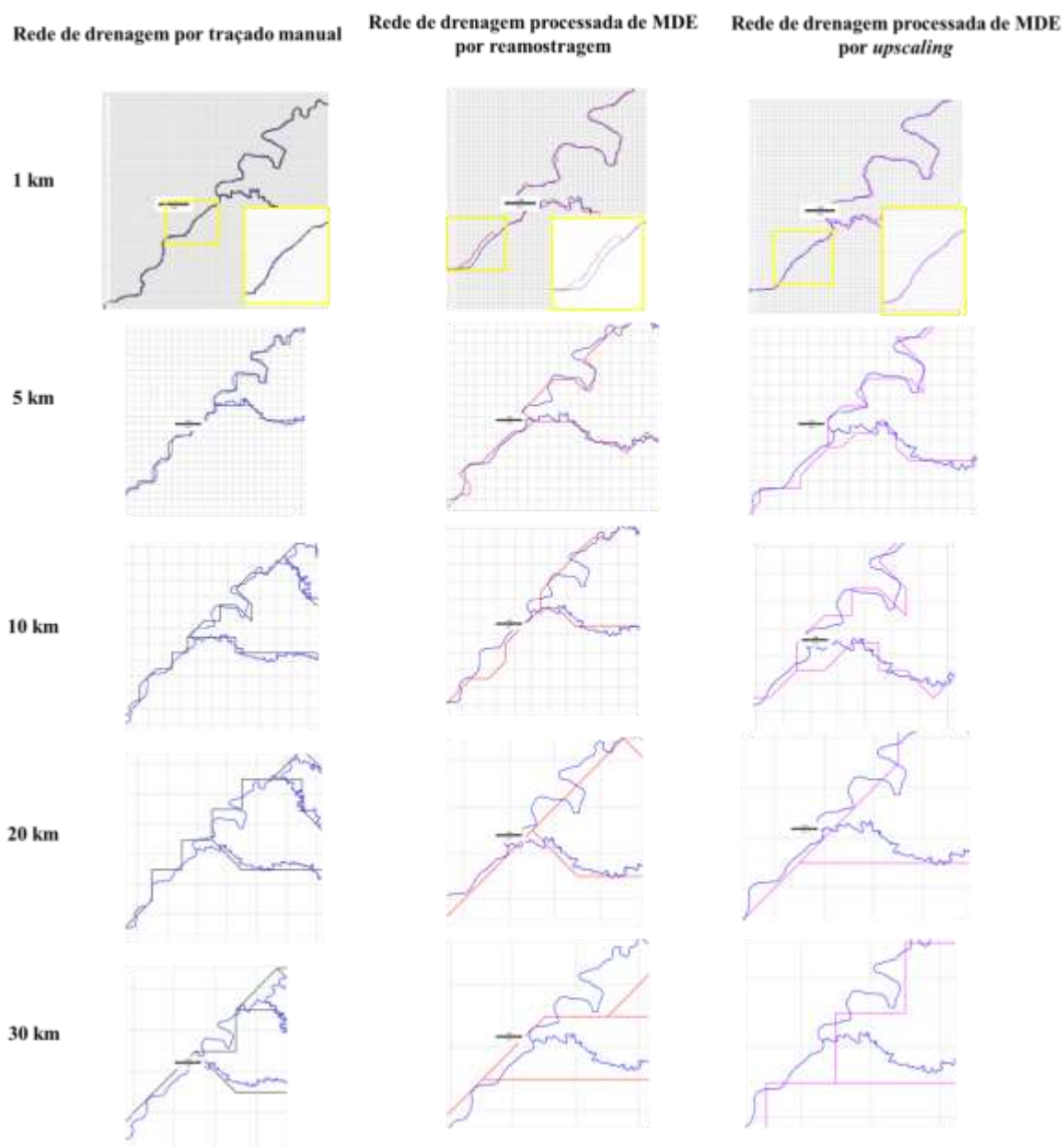


Figura 31 – Traçado do rio Uruguai trecho médio obtido por traçado manual, por reamostragem e por *upsampling* em diferentes resoluções espaciais.

Na resolução de 10 km, os erros aumentam para os três métodos; no entanto, no método de reamostragem, a representação da rede de drenagem é mais limitada. Já na resolução de 20 km, os traçados das redes de drenagem nos métodos de reamostragem e *upscaling* são praticamente iguais, diferindo da rede de drenagem por traçado manual que melhor representou o rio nessa resolução.

Por fim, na resolução espacial de 30 km, o método de *upscaling* aproximou-se mais da rede obtida por traçado manual; desta forma, a rede de drenagem nessa resolução espacial foi mais mal representada pelo método de reamostragem.

- Rio Uruguai trecho baixo

Para o rio Uruguai trecho baixo na resolução de 1 km, a rede de drenagem que se apresenta coerente aos traçados da rede de drenagem tomada como referência foi a obtida por traçado manual. Nessa resolução não são tão grandes as diferenças entre os métodos (Figura 32). No entanto, na resolução de 5 km, já é perceptível certa distância entre a rede por reamostragem e a rede de referência, menor que nas redes por traçado manual e por *upscaling*.

Na resolução de 10 km, o método de reamostragem apresentou a pior representação da rede de drenagem de referência, seguido pelo método de *upscaling*. O rio Uruguai trecho baixo teve praticamente a mesma representação, nas resoluções de 20 e 30 km, pelo método de reamostragem. Para essas resoluções, o método de *upscaling* apresentou traçado semelhante ao do método por traçado manual.

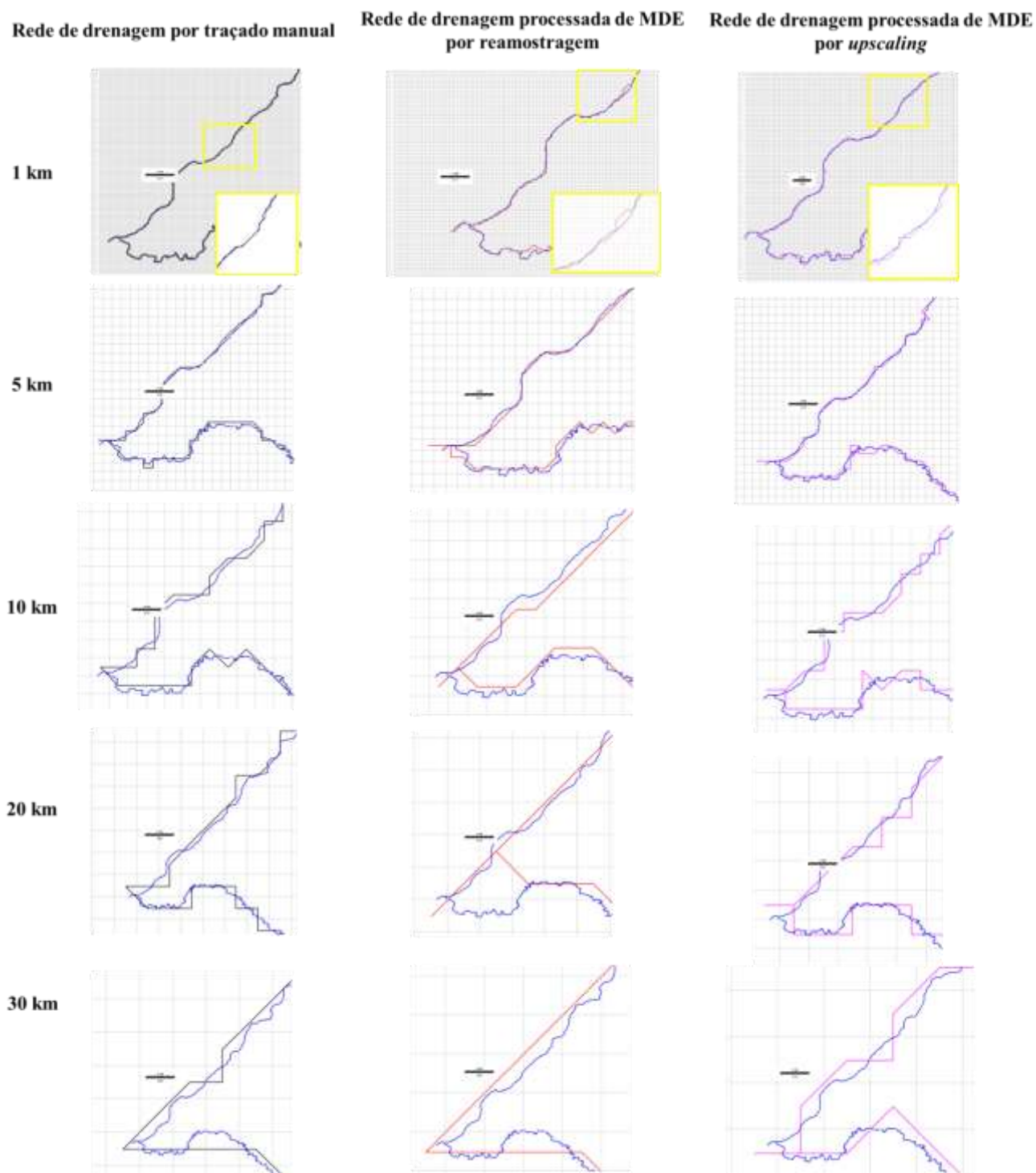


Figura 32 – Traçado do rio Uruguai trecho baixo obtido por traçado manual, por reamostragem e por *upsampling* em diferentes resoluções espaciais.

Para os três métodos, por traçado manual, processados de MDE por reamostragem e por *upsampling*, constata-se uma perda constante de detalhamento e clareza com a proporcional degradação da resolução espacial, sendo que, entre os métodos analisados, o método de

reamostragem apresentou mais incoerências ao traçar redes de drenagem de baixa resolução espacial, principalmente, quando a mudança de escala foi maior. Importante ressaltar que, em alguns trechos de rios em mudanças de escala menores, foram identificados graves erros de representação.

- Quantificação de erros

Foi realizada a contagem do número de células em que o traçado da rede de drenagem na baixa resolução espacial não foi coincidente com o traçado da drenagem a partir de imagens LANDSAT, tomada como referência. Realizada para as redes obtidas pelos métodos de reamostragem e *upscaling* de direções de fluxo, os resultados expressam valores de discordância entre as redes de drenagem.

Desta forma, mede-se o quanto a rede de drenagem analisada se aproxima da rede tomada como referência, em termos de qualidade de drenagem, verificando a contagem de erros na atribuição de direções de fluxo. Lembrando que, a rede analisada, para ter uma boa qualidade, deve seguir tão próximo quanto possível a rede de drenagem tomada como referência.

Os resultados são apresentados na Tabela 8. Percebe-se, claramente, que o método de *upscaling* apresentou menor número absoluto de células com direção de fluxo em discordância com a rede de referência, em todas as resoluções espaciais analisadas, quando comparado ao método de reamostragem.

Tabela 8 – Número de células em que a atribuição da direção de fluxo não coincidiu com a rede de referência para os métodos de reamostragem e *upscaling*.

		1 km	5 km	10 km	20 km	30 km
Número de células com direção de fluxo em discordância com a rede de drenagem LANDSAT	Reamostragem	1.186	146	51	27	15
	<i>Upscaling</i>	516	72	24	11	7

Em termos percentuais, os resultados de quantificação de células onde o traçado da rede de drenagem não coincidiu entre as redes de drenagem de baixa resolução espacial e a rede de referência pode ser observada na Figura 33. Verifica-se que o valor percentual do número de células para o método de reamostragem vai diminuindo à medida que se degrada a resolução espacial, a

exceção da resolução de 20 km onde os valores de números de células foram maiores. Os valores variaram de 52,43% para a resolução espacial de 1 km, ou seja, nesta resolução espacial, praticamente metade do número total de células que compõe a rede de drenagem foram atribuídas direções de fluxo diferentes da rede de referência, e 31,25% para a resolução espacial de 30 km.

Para o método de *upsampling*, os valores percentuais foram consideravelmente menores em relação aos encontrados para o método de reamostragem. Os valores não excederam 18,30% na resolução espacial de 1 km. Os valores diminuem da resolução de 1 km a resolução de 10 km; no entanto, nas resoluções de 20 e 30 km, o número de células volta a subir.

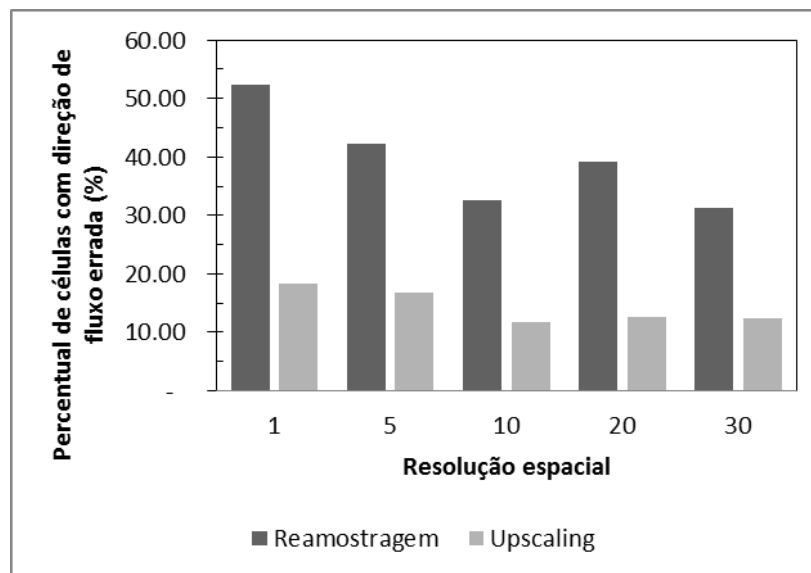


Figura 33 – Percentual de células com direção de fluxo errada entre os métodos de *upsampling* de direções de fluxo e reamostragem do MDE em relação à rede de referência.

5.2.2 Métodos de comparação integrada

- Características da bacia hidrográfica (área, perímetro, índices morfológicos)

Foram analisados quantitativamente as áreas e os perímetros da bacia do rio Uruguai obtidos pelos métodos de reamostragem e *upsampling*, nas resoluções de 1, 5, 10, 20 e 30 km (Tabela 9).

Os valores da Tabela 9 foram comparados aos valores da área e perímetro encontrados para a bacia de alta resolução espacial (Tabela 6). Quantificando as diferenças entre as áreas das bacias, verificou-se que no procedimento de reamostragem ocorreram os maiores erros em relação à bacia hidrográfica de referência, chegando a subestimar o valor da área em mais de 18% na resolução de

30 km (Figura 34). Para o método de *upscaling*, em todas as resoluções analisadas ocorreu a superestimativa dos valores de área em relação ao valor de área da bacia extraída da rede de alta resolução espacial, com valores entre 4,5 e 6,5% (Figura 34). Percebe-se que para o método de *upscaling* ocorreu uma pequena variação nos valores entre as resoluções espaciais, o menor valor ocorreu na resolução de 20 km e o maior na resolução de 30 km, para as demais resoluções espaciais os valores praticamente não variaram, com base nesses resultados não se pode inferir sobre a qualidade da rede drenagem, uma vez que, estes resultados não representam corretamente os padrões de perda de feições e representação encontrados na inspeção visual. Enquanto que, no método de reamostragem ocorreram significativas mudanças nos resultados entre as resoluções espaciais, mas que ainda não refletem o verdadeiro traçado da rede de drenagem visto na inspeção visual, a rede de 10 km na reamostragem não teve traçado melhor que na rede de 1 km como pode ser entendido pelo resultado desta métrica.

Tabela 9 – Valores de área e perímetro da bacia hidrográfica do rio Uruguai extraída por reamostragem e *upscaling* em diferentes resoluções espaciais.

		Resoluções espaciais				
		1 km	5 km	10 km	20 km	30 km
Área (km ²)	Reamostragem	218631	195100,4	203401,1	197343,9	169173,1
	<i>Upscaling</i>	218104,3	218273,9	219073	215654,9	219757,7
Perímetro (km)	Reamostragem	4005,2	3487,9	3371,2	3045,9	2719,3
	<i>Upscaling</i>	4364,6	3811,9	3497,004	3347,7	3150,3

Diante do que foi dito, a análise do valor de área parece não identificar corretamente as diferenças entre as redes de drenagem, não sendo possível inferir sobre a qualidade das redes de drenagem em estudo quando se analisa, isoladamente, os resultados desta técnica. Ademais, uma boa correlação entre valores de áreas pode existir entre duas bacias completamente diferentes, erros em diferentes partes da bacia podem se compensar de forma que o valor total da área parecer muito próximo mesmo não havendo concordância entre as delimitações.

O valor do perímetro da bacia hidrográfica do rio Uruguai foi subestimado em todas as resoluções espaciais, pelos dois métodos, reamostragem e *upscaling*, sendo as maiores diferenças encontradas no método de reamostragem, chegando a subestimar em, aproximadamente, 45% o valor do perímetro da bacia hidrográfica de alta resolução espacial, como mostra a Figura 34.

O valor do perímetro foi mais afetado pelo processo de degradação da resolução espacial, uma vez que, neste ocorre a perda de feições e formas mais complexas da bacia, e como consequência

disso tem-se a diminuição do valor do perímetro. Sendo possível afirmar que, quanto maior a diferença negativa entre os valores de perímetro, mais formas e curvas foram perdidas pela bacia hidrográfica no processo de mudança de escala.

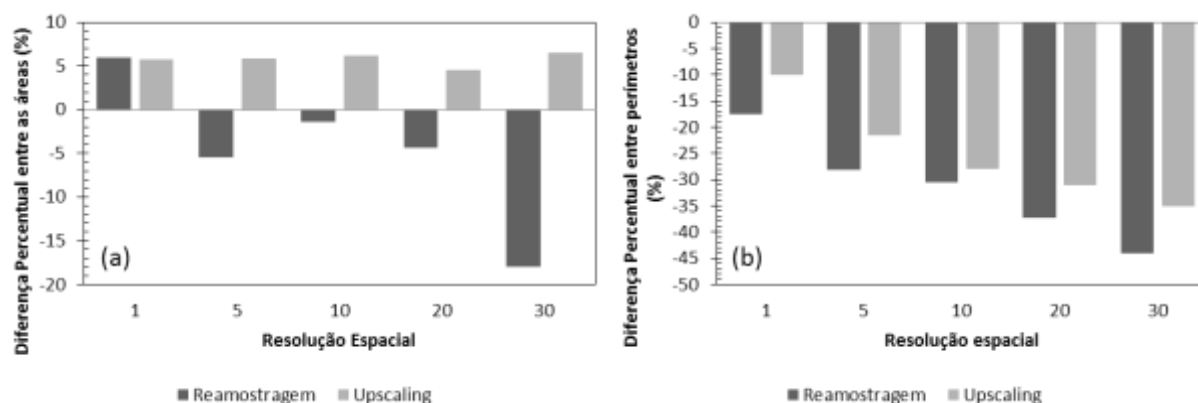


Figura 34 – Valores de diferença percentual entre as (a) áreas e (b) perímetros das bacias hidrográficas obtidas por reamostragem e *upscaling* em relação à bacia extraída do MDE em alta resolução.

Os valores para os índices morfológicos, coeficiente de compacidade (K_c) e fator de forma (K_f), para a bacia do rio Uruguai obtidos pelos métodos de reamostragem e *upscaling*, nas resoluções de 1, 5, 10, 20 e 30 km se encontram na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de coeficiente de compacidade (K_c) e fator de forma (K_f) das bacias hidrográficas extraídas por reamostragem e *upscaling* em diferentes resoluções espaciais.

		Resoluções espaciais				
		1 km	5 km	10 km	20 km	30 km
K_c	Reamostragem	2.40	2.21	2.09	1.92	1.85
	<i>Upscaling</i>	2.62	2.28	2.09	2.02	1.88
K_f	Reamostragem	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06
	<i>Upscaling</i>	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

Em relação aos valores encontrados, pode-se inferir, em termos geomorfológicos, que o valor do K_c , principalmente nas resoluções espaciais mais detalhadas, indicam a forma mais alongada da bacia do rio Uruguai. Os baixos valores de K_f , típicos de bacias hidrográficas que possuem grande

comprimento, representam uma provável baixa tendência a enchentes, corroborando com Melati e Marcuzzo (2015).

Analisando os efeitos da mudança de resolução espacial sobre os índices geomorfológicos analisados, pode-se constatar que para as bacias de drenagem obtidas por reamostragem, entre as resoluções espaciais analisadas, o valor dos coeficientes K_c e K_f diminuem à medida que se degrada a resolução espacial (Tabela 10).

Assim como para o método de reamostragem, no método de *upscaling* os valores de K_c são subestimados à medida que se degrada a resolução espacial (Tabela 10), podendo-se inferir acerca da mudança de forma da bacia à medida que se aumenta a degradação da resolução espacial, o valor de K_c se aproxima de 1, indicando, consequentemente que a forma da bacia se aproximaria de um círculo.

Para o método de reamostragem, o valor de K_f variou de 0.08 na resolução de 1 km e 0.06 na resolução de 30 km. Para o método de *upscaling*, o valor do K_f não se alterou com a degradação da resolução espacial, indicando que a análise dessa característica pode camuflar a avaliação da qualidade da rede de drenagem, uma vez que ela não conseguiu identificar as mudanças sofridas pela rede de drenagem ao longo da degradação da resolução espacial.

A diferença percentual entre os valores obtidos para K_c e K_f (Tabela 10) e os valores dos mesmos coeficientes obtidos para a rede de alta resolução espacial (Tabela 6), tomada como referência, para os oito trechos de rios analisados, pode ser observada na Figura 35.

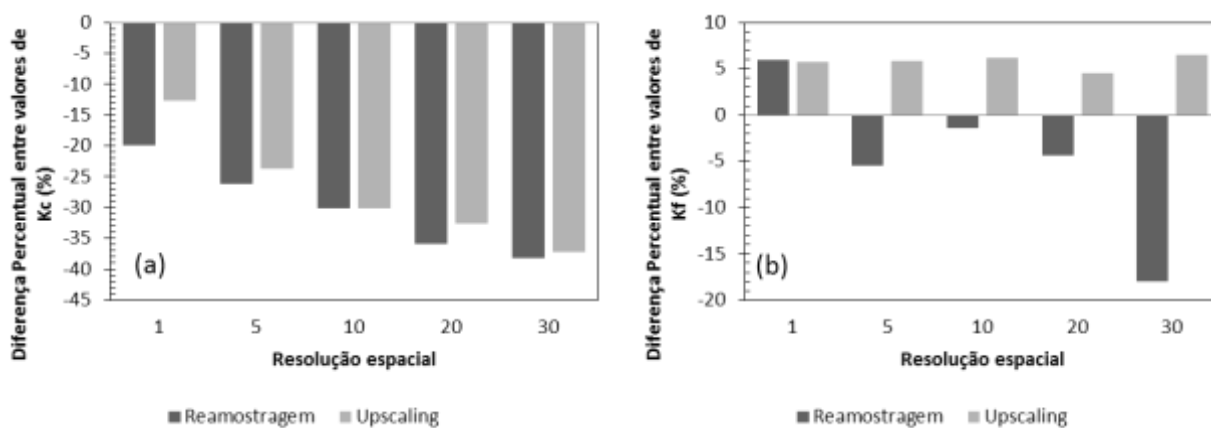


Figura 35 – Valores de diferença percentual entre os coeficientes K_c (a) e K_f (b) das bacias hidrográficas obtidas por reamostragem e *upscaling* em relação à bacia extraída de MDE em alta resolução espacial.

Percebe-se que a diferença percentual entre os valores de Kc aumenta à medida que aumenta o nível de degradação da resolução espacial, sendo os maiores valores de subestimativa encontrados para o método de reamostragem. O Kc é muito influenciado pelos valores de perímetros, enquanto que o Kf é mais influenciado pelos valores de área.

Em relação ao Kf na resolução de 1 km, os valores de diferença percentual são praticamente os mesmos para o método de reamostragem e *upscaling*, aproximadamente 6%. Neste último método, os valores variaram de 4,5 a 6,5% entre as resoluções espaciais, enquanto que no método de reamostragem, os valores variaram de - 18% na resolução de 30 km a 6% na resolução de 1 km.

- Características do rio (comprimento, sinuosidade)

Os valores encontrados para os comprimentos e sinuosidade das redes de drenagem obtidas por reamostragem e *upscaling*, nas resoluções de 1, 5, 10, 20 e 30 km, podem ser observados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Valores dos comprimentos para a rede de drenagem de baixa resolução obtida por reamostragem.

		Comprimento (km)				
		1 km	5 km	10 km	20 km	30 km
	Rede vetorizada de imagens LANDSAT					
Rio QUARAI	345,4	294,6	255,6	224,1	185,2	203,4
Rio ICAMAQUÃ	250,6	186,6	155,3	152,0	147,2	146,5
Rio PIRATINIM	337,6	176,7	154,7	153,5	49,2	88,2
Rio IJUÍ	532,5	283,2	223,9	210,7	205,9	206,6
Rio do PEIXE	254,8	157,4	134,9	114,0	118,9	89,1
Alto URUGUAI	973,0	815,8	558,2	507,2	467,7	460,1
Médio URUGUAI	475,9	472,7	373,1	315,6	293,2	281,3
Baixo URUGUAI	223,0	236,6	215,4	207,0	206,0	207,0

A comparação dos comprimentos para as redes de drenagem geradas pelos métodos de reamostragem e *upscaling*, nas resoluções de 1, 5, 10, 20 e 30 km foi realizada com a rede vetorizada das imagens LANDSAT, considerada como referência. Desta forma, a diferença percentual entre os valores obtidos para os oito trechos de rios analisados pode ser observada na Figura 36.

Tabela 12 – Valores dos comprimentos para a rede de drenagem de baixa resolução obtida por *upsaling*.

		Comprimento (km)				
	Rede vetorizada de imagens LANDSAT	1 km	5 km	10 km	20 km	30 km
Rio QUARAI	345,4	343,7	290,7	286,9	269,8	204,9
Rio ICAMAQUÃ	250,6	249,0	180,4	185,3	146,8	87,9
Rio PIRATINIM	337,6	268,0	189,9	176,8	147,4	136,4
Rio IJUÍ	532,5	455,2	258,9	237,0	215,7	202,4
Rio do PEIXE	254,8	231,3	170,5	148,3	143,4	118,8
Alto URUGUAI	973,0	1009,9	729,9	676,5	551,8	522,0
Médio URUGUAI	475,9	512,0	440,6	394,4	320,7	375,0
Baixo URUGUAI	223,0	261,4	240,9	238,7	219,8	241,9

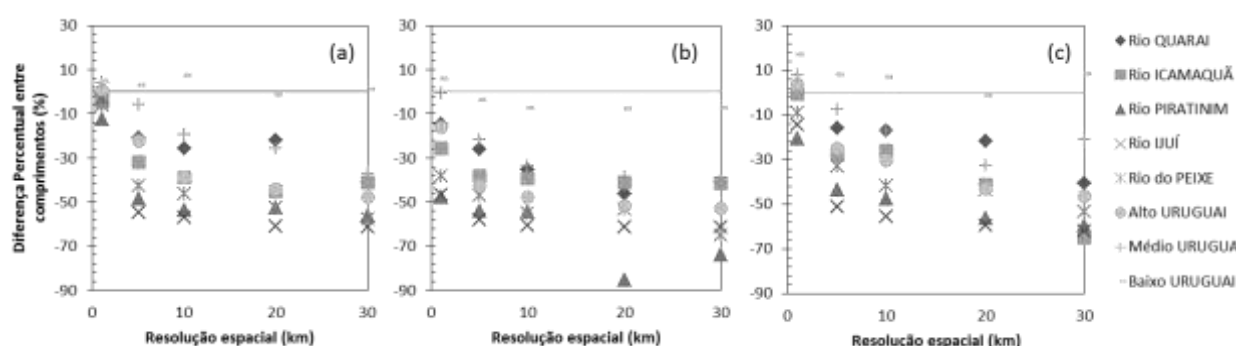


Figura 36 – Valores de diferença percentual entre os comprimentos das redes de drenagem obtidas por (a) traçado manual, (b) reamostragem e (c) *upsaling* em relação à rede vetorizada das imagens LANDSAT.

As menores diferenças são encontradas para o método por traçado manual variando de, aproximadamente, 7% para o rio Uruguai trecho baixo na resolução de 10 km a - 61% para o rio Ijuí na resolução de 30 km. Próximos a esses valores, nesses mesmos trechos, estão os encontrados para o método de *upsaling* variando de 7,2% a - 62%.

Entre as resoluções espaciais, as maiores diferenças entre os métodos são identificadas para a resolução mais detalhada de 1 km. Nas demais resoluções espaciais não são percebidas grandes diferenças entre os valores, ou seja, nas resoluções mais detalhadas são mais perceptíveis os erros atribuídos aos métodos de geração de redes de drenagem.

A técnica não identifica de forma concreta mudanças na rede de drenagem entre os métodos, por traçado manual, por reamostragem e por *upscaling* nas resoluções muito degradadas. Com exceção do rio Piratinim, no método de reamostragem na resolução de 20 km, onde na inspeção visual constatou-se, claramente, que apenas uma pequena parte do rio foi representada corroborando com o resultado encontrado de - 85% de diferença percentual entre o comprimento desse rio e o comprimento do mesmo trecho medido na rede vetorizada de imagens LANDSAT.

Percebe-se que os resultados apresentados pelo método de *upscaling* se apresentaram mais coerentes do que os apresentados pelo método de reamostragem, quando comparados aos valores da rede vetorizada de imagens LANDSAT.

Vale salientar que, em todos os métodos, na maioria das vezes ocorreu a subestimativa dos valores de comprimentos. No método de *upscaling*, a diferença percentual não ultrapassou 70% de subestimativa do valor, enquanto que, no método de reamostragem a diferença chegou a 85,4%. Em ambos os casos, os maiores valores de erros percentuais foram encontrados para os rios Icamã, Piratinim e Ijuí.

No rio Uruguai, em seus trechos médio e, principalmente, baixo, para o método por traçado manual e *upscaling*, nas resoluções de 1, 5 e 10 km, ocorreu a superestimativa dos valores de comprimento, fugindo ao padrão de subestimativa dos valores, citado anteriormente. Já no método de reamostragem, a superestimativa dos valores ocorreu somente para o rio Uruguai em seu trecho baixo, na resolução menos degradada de 1 km. Os valores encontrados indicam a relação existente entre a largura e o comprimento deste rio quando representado em dados matriciais.

Existe a tendência que nos rios mais estreitos os comprimentos dos rios sejam subestimados e nos trechos dos rios mais largos esses são superestimados. Essa padrão de resultados faz parte de alguns erros típicos provenientes da limitação da resolução espacial do MDE que são citados em Paz *et al.* (2007), Paz e Collischonn (2008) e Rennó e Soares (2001).

- Sinuosidade

Os valores de sinuosidade para as redes obtidas por reamostragem e *upscaling*, nas resoluções de 1, 5, 10, 20 e 30 km, podem ser observados nas Tabelas 13 e 14, onde estão detalhados os resultados para os oito trechos de rios analisados.

Tabela 13 – Valores de sinuosidade para a rede de drenagem de baixa resolução obtida por reamostragem.

		Sinuosidade				
	Rede vetorizada de imagens LANDSAT	1 km	5 km	10 km	20 km	30 km
Rio QUARAI	1,82	1,57	1,32	1,21	1,06	1,10
Rio ICAMAQUÃ	1,93	1,45	1,24	1,10	1,09	1,00
Rio PIRATINIM	2,58	1,35	1,18	1,14	1,09	1,00
Rio IJUÍ	2,78	1,41	1,11	1,09	1,07	1,06
Rio do PEIXE	2,21	1,38	1,14	1,03	1,00	1,00
Alto URUGUAI	2,17	1,81	1,26	1,17	1,11	1,16
Médio URUGUAI	1,63	1,61	1,26	1,12	1,06	1,06
Baixo URUGUAI	1,14	1,20	1,09	1,05	1,00	1,00

Tabela 14 – Valores de sinuosidade para a rede de drenagem de baixa resolução obtida por *upsampling*.

		Sinuosidade				
	Rede vetorizada de imagens LANDSAT	1 km	5 km	10 km	20 km	30 km
Rio QUARAI	1,82	1,83	1,50	1,52	1,39	1,29
Rio ICAMAQUÃ	1,93	1,93	1,39	1,38	1,06	1,00
Rio PIRATINIM	2,58	2,04	1,42	1,25	1,09	1,23
Rio IJUÍ	2,78	2,26	1,34	1,23	1,09	1,12
Rio do PEIXE	2,21	1,99	1,44	1,34	1,21	1,07
Alto URUGUAI	2,17	2,25	1,62	1,49	1,25	1,20
Médio URUGUAI	1,63	1,75	1,52	1,72	1,15	1,35
Baixo URUGUAI	1,14	1,33	1,22	1,25	1,16	1,23

Na Figura 37, é possível observar a comparação entre os valores de sinuosidade para as redes de drenagem geradas pelos métodos por traçado manual, por reamostragem e *upsampling*, nas resoluções de 1, 5, 10, 20 e 30 km, para os oito trechos de rios analisados.

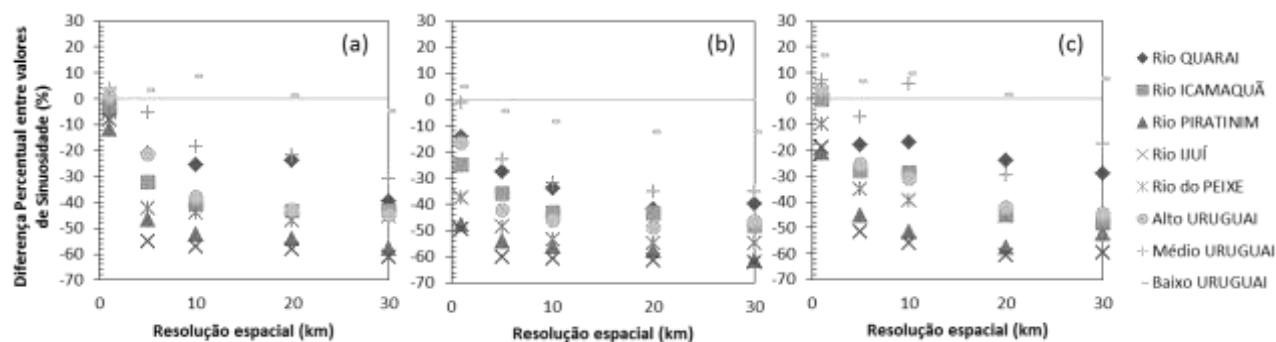


Figura 37 – Valores de diferença percentual entre os valores de sinuosidade das redes de drenagem obtidas por (a) traçado manual, (b) reamostragem e (c) *upsampling* e em relação à rede vetorizada das imagens LANDSAT.

É possível observar que os valores mais próximos da rede vetorizada foram obtidos pelos rios na resolução espacial de 1 km, obtido pelo método de traçado manual, e que os resultados das redes de drenagem de baixa resolução, por traçado manual e por *upsampling*, foram próximos entre si, para a mesma resolução espacial degradada, a exemplo, 8% para o rio Uruguai trecho baixo na resolução de 10 km e - 61% no rio Ijuí na resolução de 30 km na rede por traçado manual e no método de *upsampling*, para o mesmo trecho e resolução espacial, os resultados foram de 9% e - 59%, aproximadamente. No método de reamostragem foram encontrados os maiores valores de erros percentuais, principalmente, nas resoluções de 10, 20 e 30 km.

Na resolução de 1 km, são encontradas as maiores variações de valores de erros percentuais entre os métodos por traçado manual, *upsampling* e reamostragem. No entanto, na resolução de 30 km os valores de erros percentuais se aproximam, independentemente, do método de obtenção da rede de drenagem, principalmente para os rios Piratinim, Ijuí, Peixe e Uruguai no trecho alto.

Podemos verificar que esses são os rios mais sinuosos da bacia. Este resultado pode indicar que, possivelmente, adotar resoluções espaciais tão grosseiras em rios com características de elevada sinuosidade compromete a análise final, uma vez que, a técnica de comparação entre valores de sinuosidade pode não identificar com precisão a melhor ou pior qualidade da rede de drenagem gerada. Pois, existe uma limitação na representação dos meandros dos rios obtidos por meio dos procedimentos do MDE.

Isso é mais bem visualizado comparando todos os rios dessa bacia segundo uma tendência, tomando o rio do Peixe e o baixo Uruguai como os extremos: observa-se que o baixo Uruguai apresenta sinuosidade com maior aproximação com a rede de referência, em todas as resoluções espaciais.

No entanto, o rio do Peixe que se encontra na parte alta da bacia, apresentando característica de ser mais sinuoso que o baixo curso do rio Uruguai, apresentou maior erro na sinuosidade quando equiparado à rede vetorizada, isso indica que quanto maior a sinuosidade do rio maiores serão os erros, devido às limitações decorrentes da resolução espacial do MDE.

5.2.3 Métodos de comparação espacial

- Área entre as delimitações da bacia hidrográfica

Além da diferença quantitativa entre os valores da área de drenagem das bacias (item anterior), foi analisada qualitativamente e quantitativamente a correta delimitação da bacia hidrográfica gerada a partir das redes de drenagem obtidas por reamostragem e *upscaling*, nas resoluções de 1, 5, 10, 20 e 30 km, em relação à bacia de alta resolução espacial (Figura 38).

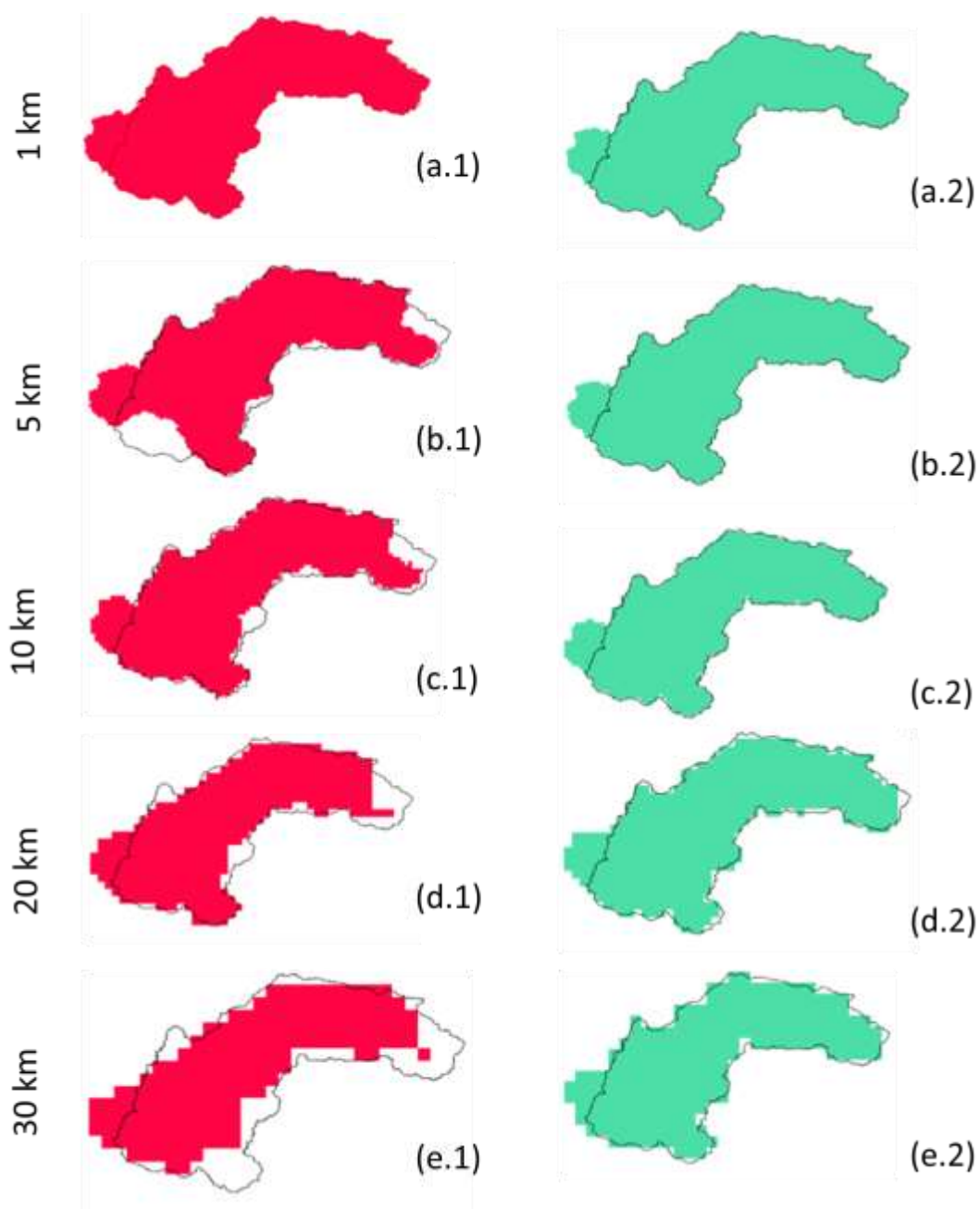


Figura 38 – Delimitações da bacia do rio Uruguai com base nas redes de drenagem obtidas por reamostragem (em vermelho), por *upsampling* (em verde) e de alta resolução espacial – 100 m (em preto).

Os valores de diferenças entre as áreas da bacia hidrográfica de alta resolução espacial e as bacias hidrográficas delimitadas a partir das redes de drenagem, por reamostragem e *upsampling*, nas resoluções de 1, 5, 10, 20 e 30 km, estão expostos na Tabela 15. Os resultados podem ainda ser analisados em termos percentuais como mostra a Figura 39.

Tabela 15 – Áreas fora de concordância entre as delimitações das bacias extraídas de MDE por reamostragem e *upsampling* em relação à bacia extraída de MDE em alta resolução espacial – 100 m.

		Resoluções espaciais				
		1 km	5 km	10 km	20 km	30 km
Área fora de concordância com a bacia de alta resolução espacial (km ²)	Reamostragem	14295,1	38881,4	32198,3	45181,1	61557,9
	Upscaling	13033,6	17327,2	22826,3	46882,4	36144,1

Os resultados da Figura 39 mostram que na resolução de 1 km as formas da bacia não diferiram significativamente entre os métodos de reamostragem e *upsampling*, com valores de diferença percentual de 6,9% e 6,3%, respectivamente. No entanto, nas resoluções mais degradadas, como 20 e 30 km, feições importantes da delimitação da bacia hidrográfica são perdidas, especialmente no método de reamostragem, chegando a valores de diferença de 29,8% para o método de reamostragem. Concluindo-se, dessa forma, que a bacia foi mais bem representada pelo método de *upsampling* em todas as resoluções analisadas.

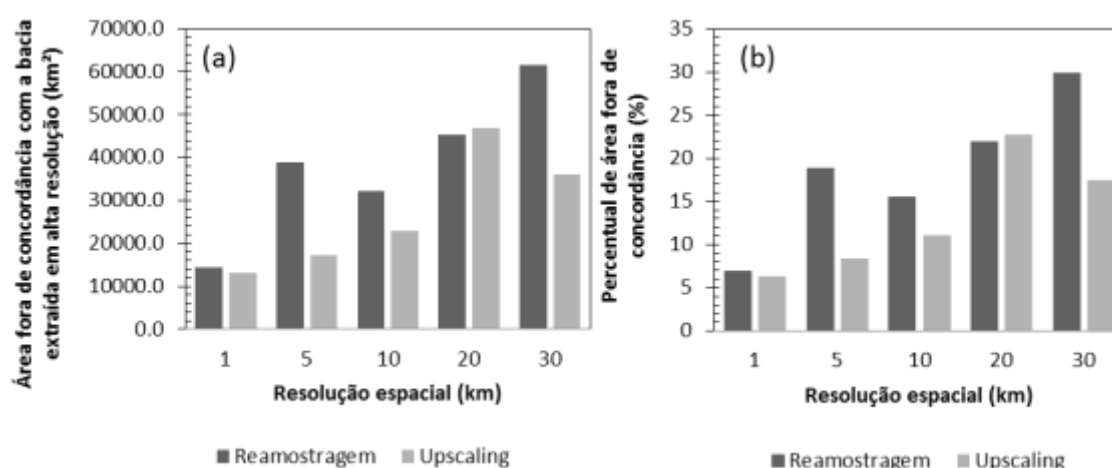


Figura 39 – Valores de (a) área fora de concordância e (b) diferença percentual entre as delimitações das bacias de alta resolução espacial e as obtidas por reamostragem e *upsampling* em diferentes resoluções espaciais.

Os maiores valores de áreas fora de concordância com a bacia de alta resolução foram encontrados para o método de reamostragem, especialmente, nas resoluções de 5, 10 e 30 km com

difículdade de representação das partes leste e sul da bacia hidrográfica. Na resolução de 20 km os valores encontrados (Figura 39) não expressaram as diferenças significativas existentes entre as delimitações das bacias nos métodos reamostragem e *upsampling* (Figura 38 d.1 e d.2).

Diferentemente da técnica de comparação dos valores de área de drenagem, a técnica de análise de áreas fora de concordância consegue contornar as limitações da técnica anterior no que se refere à compensação de erros localizados em diferentes partes da bacia. Esses erros são balanceados de modo que os valores finais de área de drenagem sejam semelhantes, resultando em valores de diferença percentual bem pequenos, quando na verdade as diferenças entre as bacias hidrográficas são grandes, como pode-se notar na Figura 38 c1, que mostra a bacia hidrográfica delimitada na resolução 10 km para o método de reamostragem. Pela técnica de comparação do valor de área, o erro encontrado nesse caso foi pequeno (Figura 34), mas pela Figura 38 c1 nota-se grande diferença entre as delimitações da bacia analisada e da rede de referência.

Quando se analisa a formação de área entre as delimitações em relação à resolução espacial adotada (Figura 40 a), percebe-se que, embora o valor absoluto de área seja bem maior para as resoluções mais degradadas, a exemplo, o método de reamostragem na resolução de 30 km, em relação ao tamanho do *pixel* nessa grade a área formada é, consideravelmente, menor do que a área formada na resolução de 1 km. Percebe-se então que, o valor de área formada entre as delimitações na resolução de 1 km é muito grande quando se refere ao tamanho do pixel nessa resolução.

A distância média entre as delimitações das bacias hidrográficas (Figura 40 b) variou de 2,7 km, para o método de *upsampling* na resolução de 1 km, a 12,7 km, para o método de reamostragem na resolução de 30 km. Isso significa dizer que no método de *upsampling* a delimitação da bacia na resolução de 1 km estaria distante, em linha reta, da delimitação da bacia de referência 2,7 km, da mesma forma, para o método de reamostragem na resolução de 30 km, a delimitação da bacia analisada estaria 12,7 km distante da delimitação da bacia hidrográfica tomada como referência.

Os valores aumentaram linearmente com a degradação da resolução espacial, a exceção do valor de distância média para reamostragem na resolução de 5 km que foi maior que o valor para a resolução de 10 km. Na Figura 38 (b.1) verifica-se que na resolução de 5 km não foi representada uma porção da bacia localizada ao sul, enquanto que, na Figura 38 (c.1) a parte sul da bacia hidrográfica foi mais bem representada pelo método de reamostragem na resolução de 10 km. Para o método de *upsampling* na resolução de 20 km, o valor de distância média também foi maior que o valor encontrado para a resolução de 30 km. Pode atribuir este resultado a maior área fora da delimitação da bacia de alta resolução vista na Figura 38 (d.2).

De modo geral, os maiores valores foram encontrados para o método de reamostragem, e na resolução de 1 e 20 km foram encontradas as menores diferenças entre os métodos reamostragem e *upsampling*.

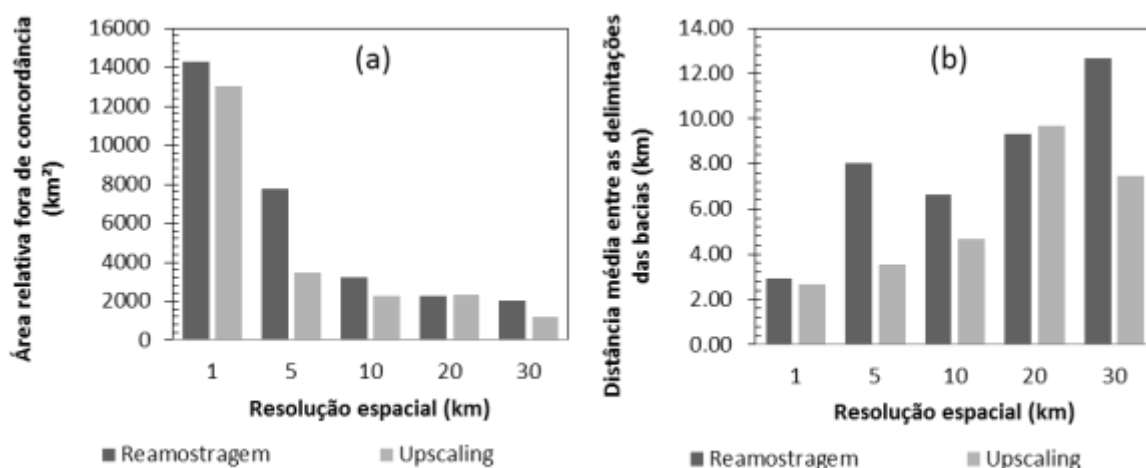


Figura 40 – Valores de (a) área relativa fora de concordância e (b) distância média entre as delimitações das bacias de alta resolução espacial e as obtidas por reamostragem e *upsampling* em diferentes resoluções espaciais.

- Área entre os traçados das redes de drenagem

A formação de área entre as redes de drenagem de baixa resolução espacial, por reamostragem e *upsampling*, foi dividida em duas análises, primeiramente, em relação à rede vetorizada de imagens LANDSAT e, posteriormente, em relação à rede de drenagem a partir de traçado manual.

A análise de formação de área entre a rede de drenagem por traçado manual e a rede vetorizada de imagens LANDSAT (Figura 41 a) teve por objetivo avaliar o erro que estaria presente na rede de drenagem, inerente ao processo de representação matricial das formas que os rios possuem na natureza.

A formação de área entre as redes de drenagem foi maior para as redes de drenagem obtidas por reamostragem. Como esperado, os valores de área entre as redes de drenagem aumentam à medida que se aumenta o nível de degradação da resolução espacial. Assim sendo, os maiores valores são encontrados na resolução de 30 km.

Analisando os oito trechos de rios, os maiores valores foram encontrados para o rio Uruguai no trecho alto no método de reamostragem, com valores de área que vão de 287 km² para a

resolução espacial de 1 km, a 7570 km² na resolução de 30 km. Como pôde ser verificado na inspeção visual no método de reamostragem, o rio Uruguai trecho alto não foi adequadamente representado; nas resoluções mais detalhadas predominava o erro de não representar de forma coerente os trechos mais sinuosos do rio, enquanto que, nas resoluções mais degradadas de 20 e 30 km, o método não conseguiu representar o padrão geral da rede de drenagem de referência, direcionando a rede de drenagem para outras células.

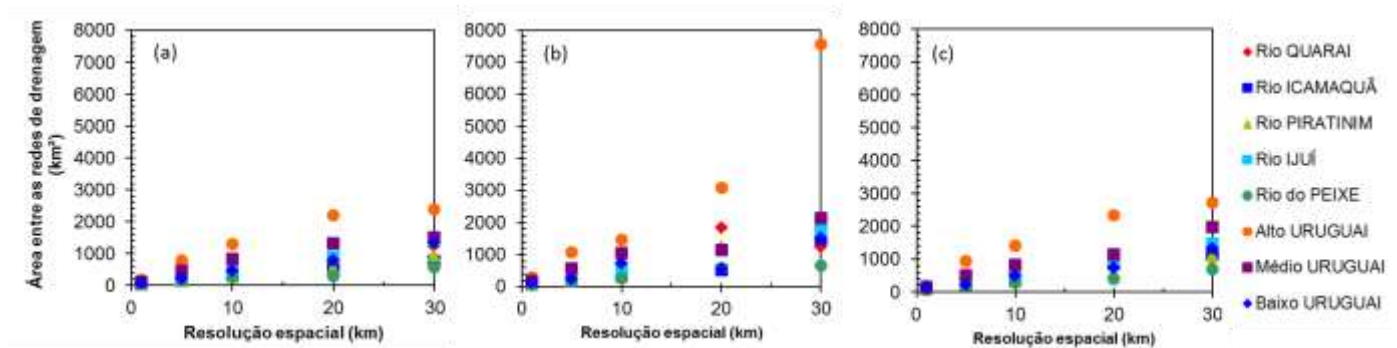


Figura 41 - Valores de área entre a rede de drenagem por traçado manual (a), por reamostragem (b) e *upsampling* (c) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT.

Para o método de *upsampling*, os resultados encontrados foram, consideravelmente, menores quando comparados aos do método anterior. Da maneira semelhante ao método de reamostragem, os maiores valores foram encontrados para o rio Uruguai no trecho alto, variando de 196 km² para a resolução espacial de 1 km, a 2731 km² na resolução de 30 km. Nesse sentido, a técnica de quantificação de área entre as redes de drenagem identificou o padrão de melhor representação da rede de drenagem pelo método de *upsampling*, observado na inspeção visual e mostrado na Figura 42.

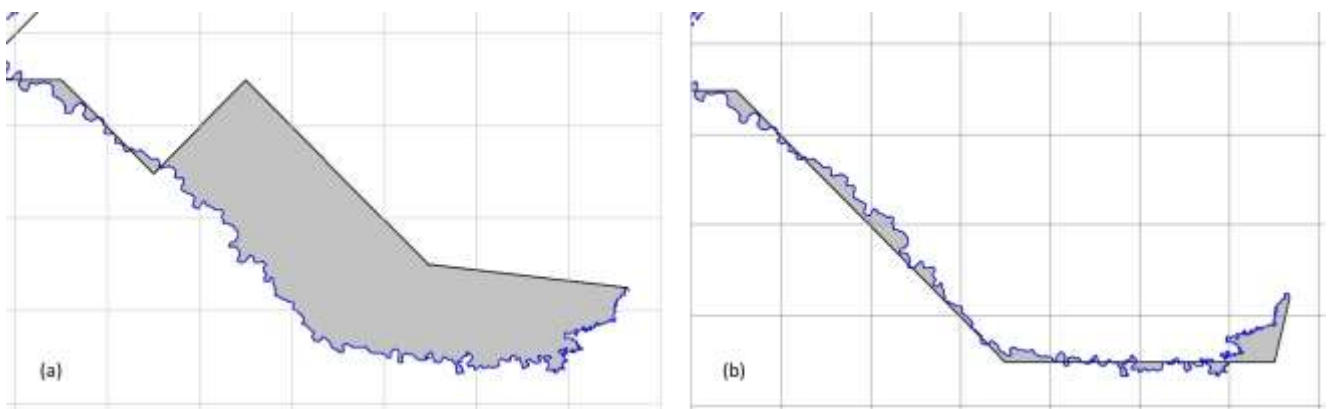


Figura 42 - Área entre a rede de drenagem por (a) reamostragem (em preto) e (b) *upsampling* (em preto) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT (em azul) no trecho alto do rio Uruguai.

Em alguns trechos, houve maior formação de área pelo método *upscaling*, quando comparado ao método reamostragem, no entanto, essas diferenças não foram grandes. A exceção do rio Icamaquã, na resolução de 20 km, que apresentou formação de área entre as redes de drenagem 38% maior do que o valor encontrado para a mesma resolução no método de reamostragem. Atribui-se esse valor de área entre a rede de drenagem obtida por *upscaling* e a rede a partir de imagens LANDSAT ao erro de representação ocorrido na foz do rio Icamaquã, como mostrado na Figura 43.

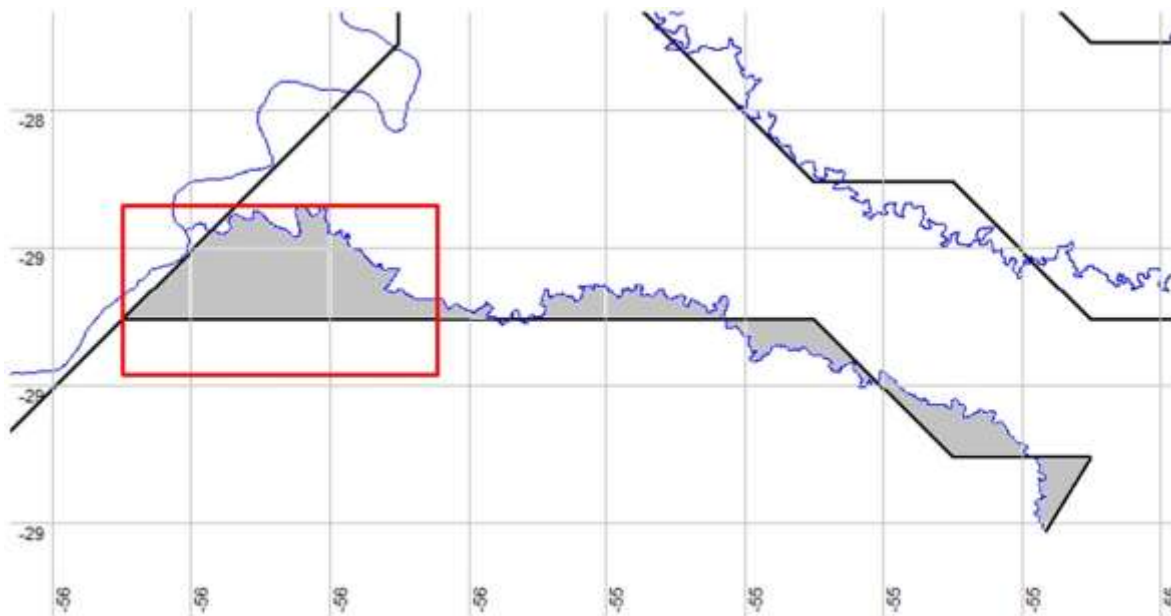


Figura 43 - Área entre a rede de drenagem obtida por *upscaling* (em preto) e a rede a partir de imagens LANDSAT (em azul) com destaque no rio Icamaquã.

A formação de área entre as redes obtidas por reamostragem e por *upscaling* em relação à rede por traçado manual nas resoluções de 1, 5, 10, 20 e 30 km é apresentada na Figura 44.

Os maiores valores de área foram encontrados para as resoluções mais degradadas, 20 e 30 km, especialmente, para o método de reamostragem. Os valores para a rede de drenagem por *upscaling* foram, consideravelmente, menores em relação ao método de reamostragem.

Nas resoluções menos degradadas, 1, 5 e 10 km, a técnica não identificou diferenças significativas entre os métodos de reamostragem e *upscaling*.

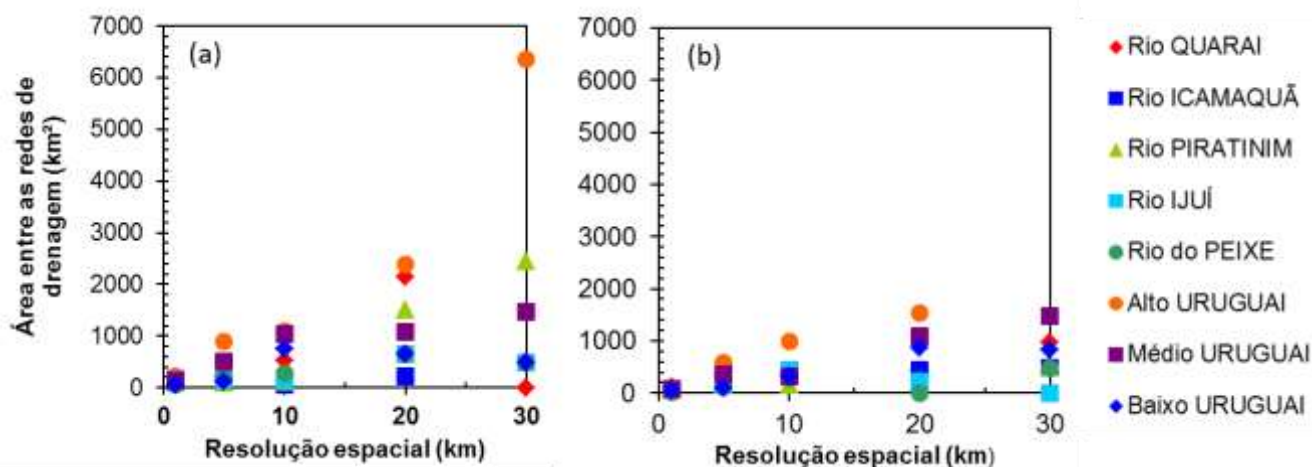


Figura 44 - Valores de área entre as redes de drenagem por (a) reamostragem e (b) *upsampling* em relação à rede por traçado manual.

- Distância média entre os traçados da drenagem – referência rede vetorizada de imagens LANDSAT

Os resultados referentes às distâncias médias entre a rede de drenagem por traçado manual e a rede de drenagem vetorizada de imagens LANDSAT são apresentados na Figura 45 (a).

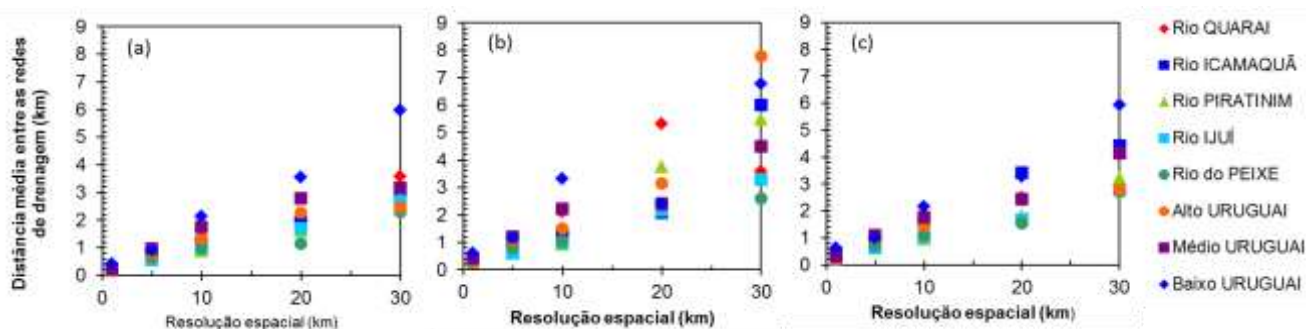


Figura 45 - Distâncias médias entre a rede de drenagem (a) por traçado manual, (b) por reamostragem e (c) por *upsampling* e a rede de drenagem vetorizada de imagens LANDSAT em diferentes resoluções espaciais.

A determinação da distância média entre a rede de drenagem por traçado manual e a rede vetorizada de imagens LANDSAT (Figura 45 a) tem a finalidade, assim como na determinação das áreas entre as redes de drenagem, de evidenciar as diferenças inseridas no processo de representação matricial dos rios. Os maiores valores de distância média foram encontrados para o rio Uruguai em seu trecho baixo, em quase todas as resoluções espaciais analisadas, com valores de

2 km na resolução de 10 km, 3,5 km na resolução de 20 km, e 5,9 km na resolução de 30 km (Figura 46).

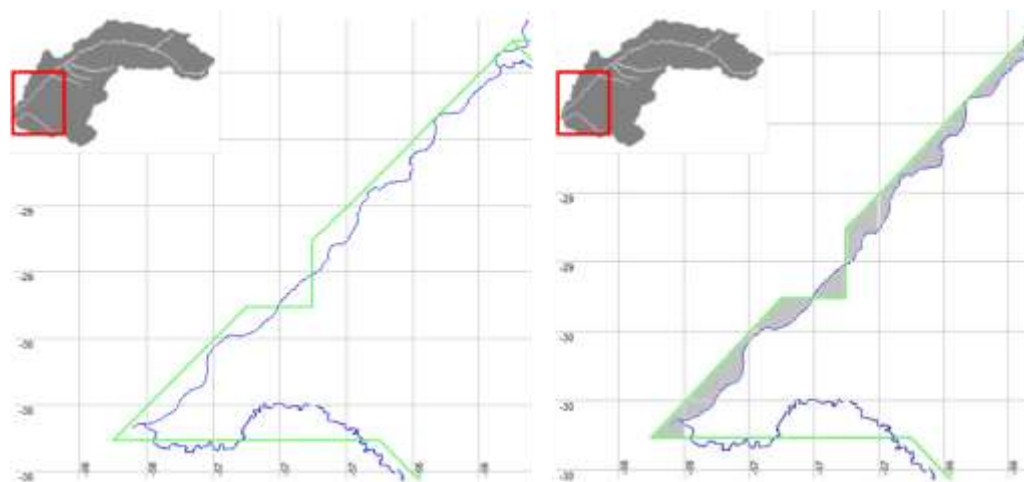


Figura 46 - Distância média entre rede por traçado manual (em verde) e a rede vetorizada de imagens LANDSAT (em azul) com destaque para o trecho baixo do rio Uruguai na resolução de 30 km.

O resultado citado anteriormente, se deve ao fato do rio Uruguai nesse trecho apresentar um caminho predominantemente diagonal o que dificulta o adequado processo de representação desta rede, uma vez que, o traçado manual caminha, necessariamente, de centro a centro dos *pixels*, enquanto a rede de drenagem vetorizada de imagens LANDSAT pode estar localizada em toda a extensão do *pixel*. Desta forma, o traçado da rede de drenagem pode não estar necessariamente, diferente do traçado da rede de drenagem tomada como referência, na verdade esta é uma limitação desta técnica, o traçado da rede para este trecho do rio Uruguai na grade de resolução de 30 km se encontra correto, mas a técnica identifica toda a distância existente entre as duas redes mesmo estando as duas, na maioria das vezes dentro do mesmo *pixel*.

Assim, a análise dos resultados de distância média, sem que seja realizada uma inspeção visual para constatação do resultado, pode não refletir a verdadeira qualidade da rede de drenagem analisada.

Os resultados de distância média entre as redes de drenagem obtidas por reamostragem (Figura 45 b) e por *upscaling* (Figura 45 c) em relação à rede de drenagem vetorizada de imagens LANDSAT mostram que as diferenças entre as redes de baixa resolução espacial e a rede de drenagem vetorizada de imagens LANDSAT aumentam à medida que se degrada a resolução espacial. No método de reamostragem, para as resoluções mais degradadas de 10, 20 e 30 km, os

maiores valores de distância média foram para os rios Uruguai trecho baixo, Quaraí e Uruguai trecho alto, respectivamente. Como identificado na inspeção visual, nesses trechos ocorreram erros graves de representação da drenagem.

Percebe-se que as redes de drenagem por *upscaling* apresentam, praticamente, o mesmo padrão de resultados identificado para a rede por traçado manual, em todas as resoluções espaciais analisadas (Figura 45 c). Em relação aos trechos de rios analisados, para as redes de drenagem por *upscaling*, quase não se pode observar diferenças significativas entre os resultados encontrados para os diferentes trechos de rios, diferentemente do observado na inspeção visual.

- Distância média entre os traçados da drenagem – referência a rede por traçado manual

A distância média entre as redes de drenagem de baixa resolução espacial, por reamostragem e *upscaling*, e as rede de drenagem por traçado manual nas resoluções espaciais de 1, 5, 10, 20 e 30 km podem ser observadas na Figura 47.

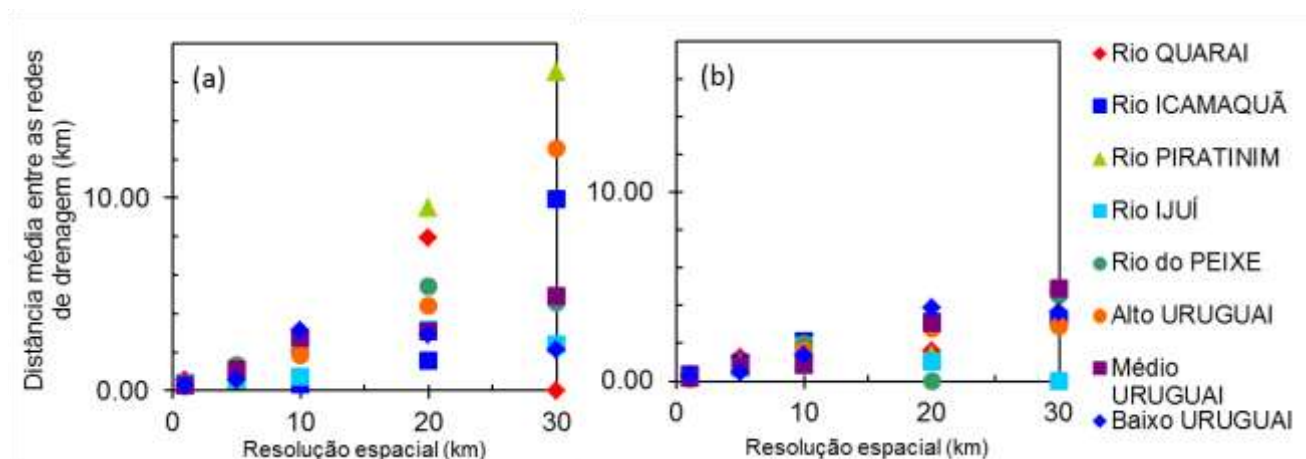


Figura 47 - Distância média entre as redes de drenagem de baixa resolução espacial, por (a) reamostragem e (b) *upscaling* e as rede de drenagem por traçado manual em diferentes resoluções.

Os resultados indicam, claramente, que a rede de drenagem por *upscaling* se manteve mais próxima da rede de drenagem tomada como referência, nesse caso, a obtida por traçado manual (Figura 47), enquanto que as redes de drenagem por reamostragem apresentaram erros grosseiros de representação do traçado. A técnica de determinação de distâncias médias identificou o padrão verificado na inspeção visual.

- Distância média relativa entre os traçados da drenagem – referência a rede vetorizada de imagens LANDSAT

A distância média relativa entre a rede de drenagem por traçado manual, por reamostragem e *upsampling* e a rede vetorizada de imagens LANDSAT pode ser observada na Figura 48.

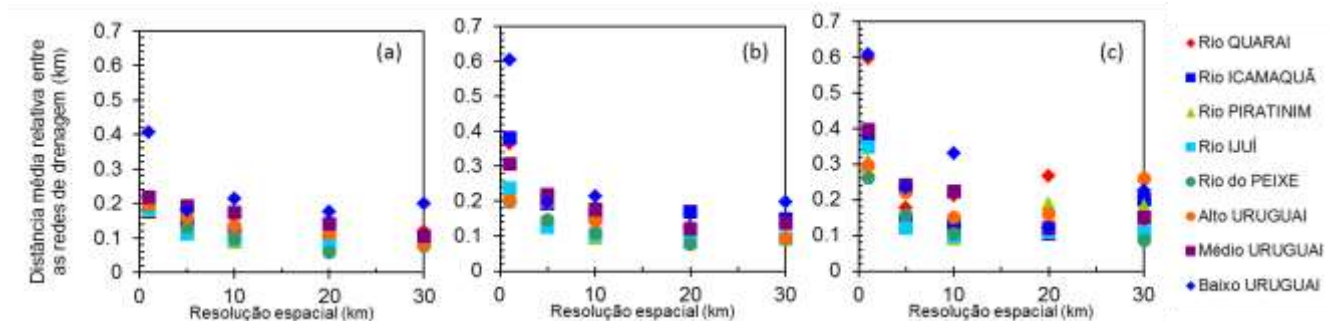


Figura 48 - Distância média relativa entre a rede de drenagem por (a) traçado manual, (b) reamostragem e (c) *upsampling* e a rede vetorizada de imagens LANDSAT.

Este resultado reflete os resultados de distância média apresentados anteriormente, mas ponderados pela resolução espacial adotada. Assim, pode-se analisar o quanto esses valores podem ser comparados entre si, independentemente da resolução espacial. Percebe-se que os maiores valores são encontrados para as resoluções mais detalhadas, especialmente a de 1 km. Quanto mais se degrada a resolução espacial, menores são as diferenças entre as redes de drenagem analisadas. No entanto, deve-se atentar ao tamanho do pixel dentro da grade de resolução espacial analisada, pois se na inspeção visual verifica-se um erro em uma rede de drenagem por uma célula na resolução de 1 km, isso implica em errar, em termos de distância, por 1 km, porém se o mesmo erro ocorrer na grade de 30 km, o erro, em termos de distância, agora será de 30 km. Consequentemente, vemos que os valores absolutos devem ser analisados com maior cuidado, visto que se deve atentar para o quanto esses valores são comparáveis entre si em diferentes resoluções espaciais.

- Distância média relativa entre os traçados da drenagem – referência rede por traçado manual

Na distância média relativa entre a rede de drenagem, por reamostragem e por *upsampling*, e as redes de drenagem obtidas por traçado manual, os valores para a rede de drenagem por reamostragem apresentaram valores maiores de distância média nas resoluções de 20 e 30 km, não obstante dos valores encontrados para a rede de drenagem de 1 km (Figura 49 b). Diferentemente do padrão identificado na distancia média relativa em relação à rede vetorizada de imagens

LANDSAT que os maiores valores foram encontrados para a resolução de 1 km, enquanto que os menores valores foram para as resoluções de 20 e 30 km, tendo em vista que ao ser adotado um tamanho de *pixel* de 20 ou 30 km o efeito da distância média entre as redes de drenagem é, muitas vezes, atenuado.

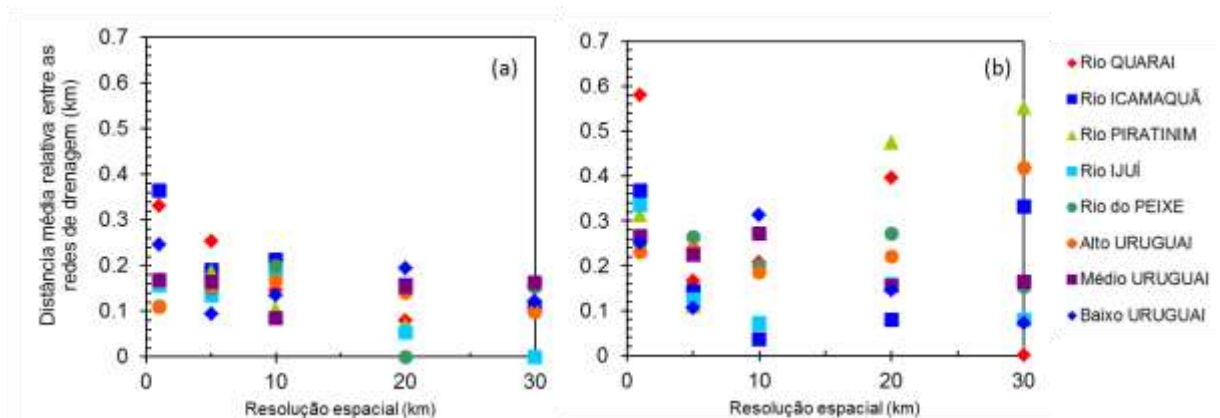


Figura 49 - Distância média relativa entre as redes de drenagem de baixa resolução espacial, por (a) *upscaling* e (b) reamostragem e a rede obtida por traçado manual.

No método de *upscaling*, foi observado o padrão de resultados citado anteriormente. Não foram identificadas diferenças muito significativas entre os trechos de rios, em todas as resoluções analisadas (Figura 49 a), enquanto que no método de reamostragem, verifica-se uma grande variação de resultados quando analisados os diferentes trechos de rios.

- Percentual do traçado dentro de *buffer*

As redes de drenagem de baixa resolução espacial, obtidas por reamostragem e *upscaling*, foram inseridas em faixas de *buffers* determinadas para a largura de 1 *pixel*, 1/2 *pixel* e 1/5 *pixel* para cada resolução espacial selecionada, quais sejam, 1, 5, 10, 20 e 30 km, conforme detalhado na Tabela 4.

É importante ressaltar que nesta métrica, diferentemente da determinação de áreas e distância média entre as redes de drenagem, quanto maior o valor encontrado mais adequada está a rede de drenagem à rede tomada como referência, valores maiores levam a concluir características de boa qualidade a rede analisada.

Os resultados para o *buffer* com largura de 1 *pixel* são expostos na Figura 50. Verifica-se que na adoção dessa largura de *buffer*, as redes de drenagem estão quase que totalmente inseridas na faixa de largura do *buffer*, com percentuais menores na resolução de 1 km.

Os percentuais variaram de 42% no rio Uruguai no trecho baixo a 98%, aproximadamente, no rio do Peixe, para a rede de drenagem por *upscaling*. Em outras palavras, nesse último caso, apenas 2% da rede de drenagem esteve fora da largura do *buffer*. Para a rede de drenagem por reamostragem, os percentuais variaram de 46% no rio Uruguai no trecho baixo a 93% no rio do Peixe.

Como esperado, a rede de drenagem por traçado manual se encontrou quase que totalmente inserida na zona do *buffer* (Figura 50), com percentuais de 65% no rio Uruguai em trecho baixo a 99% no rio do Peixe, na resolução de 1 km, com a rede de drenagem totalmente inserida na largura do *buffer* em vários trechos nas resoluções de 5 km, e praticamente todos os trechos nas resoluções de 10, 20 e 30 km.

Para ambos os métodos, à medida que a degradação da resolução espacial aumenta, os índices de inserção de rede de drenagem na largura do *buffer* vão aumentando, chegando à totalidade 100% em vários trechos, a exemplo, dos rios Piratinim, Ijuí e médio Uruguai na resolução de 20 km e rio do Peixe na resolução de 30 km. É importante ressaltar que nesses casos a largura do *buffer* correspondeu a 20 e 30 km, respectivamente. Sendo assim, admite-se que estes valores correspondem a faixas de distância muito grandes, além do fato de a rede de drenagem de baixa resolução espacial poder passar por qualquer ponto dentro do *buffer* que será a ela atribuída resultado positivo, não estando em avaliação se a rede de drenagem de baixa resolução passou mais perto ou mais longe da rede de referência dentro do *buffer*.

De modo geral, os menores valores de percentuais foram encontrados para a rede reamostrada, em todas as resoluções espaciais, seguidos pela rede de drenagem por *upscaling*.

No que se refere aos resultados para a largura de 1/2 e 1/5 *pixel* (Figura 50), percebe-se claramente a influência do valor de largura do *buffer* como um fator determinante para a resposta, em termos de qualidade, da rede de drenagem analisada.

Para o *buffer* com largura de 1/2 *pixel*, os resultados variaram de 28% no rio Uruguai trecho baixo na resolução de 1 km, a 99.9% para o rio Uruguai trecho médio na resolução de 30 km, para a rede obtida por traçado manual. Para a rede obtida por *upscaling*, variaram de 17% para rio Uruguai trecho baixo na resolução de 1 km, a 89% para o rio Uruguai trecho médio na resolução de 20 km e para a rede de reamostragem, no mesmo trecho, de 20% a 92%. Para o rio Uruguai em seu trecho baixo, foram encontrados os piores resultados especialmente na resolução mais detalhada de 1 km. Importante destacar que, esses resultados de porcentagem dentro do *buffer*, apresentados para o trecho baixo do rio Uruguai, podem ser atribuídos à característica citada anteriormente referente à dificuldade na representação matricial desse trecho.

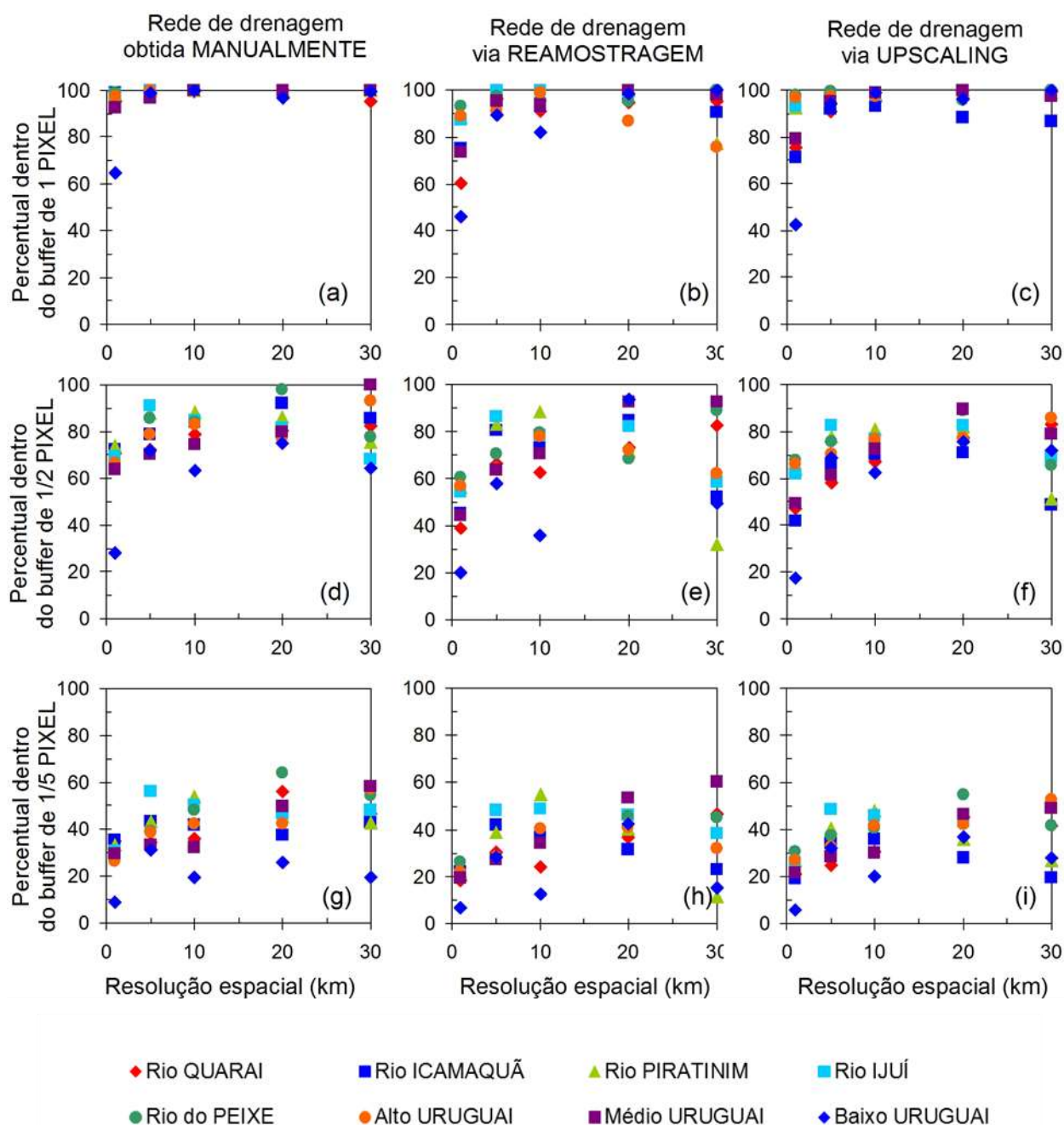


Figura 50 – Resultados para a percentual dentro do *buffer* para as redes obtidas por traçado manual, reamostragem e *upscaling* para *buffer* de 1 *pixel*, 1/2 *pixel* e 1/5 *pixel* em diferentes resoluções espaciais.

Para o *buffer* com largura de 1/5 *pixel*, os resultados variaram de 9% no rio Uruguai trecho baixo na resolução de 1 km, a 64% para o rio Peixe na resolução de 20 km para a rede obtida por traçado manual. Para a rede obtida por *upscaling*, variaram de 5,8% para rio Uruguai no trecho baixo na resolução de 1 km, a 54% para o rio do Peixe na resolução de 20 km. Para a rede de reamostragem, o menor valor de 6,5% também foi encontrado para o rio Uruguai no trecho baixo a

60% no rio Uruguai trecho médio. Tendo em vista os resultados encontrados para o rio Uruguai no trecho baixo, a Figura 51 mostra uma comparação entre as redes por traçado manual, a partir do processamento de MDE por reamostragem e por *upsampling* de direções de fluxo com *buffers* de 1 *pixel*, 1/2 *pixel* e 1/5 *pixel* para esse trecho.

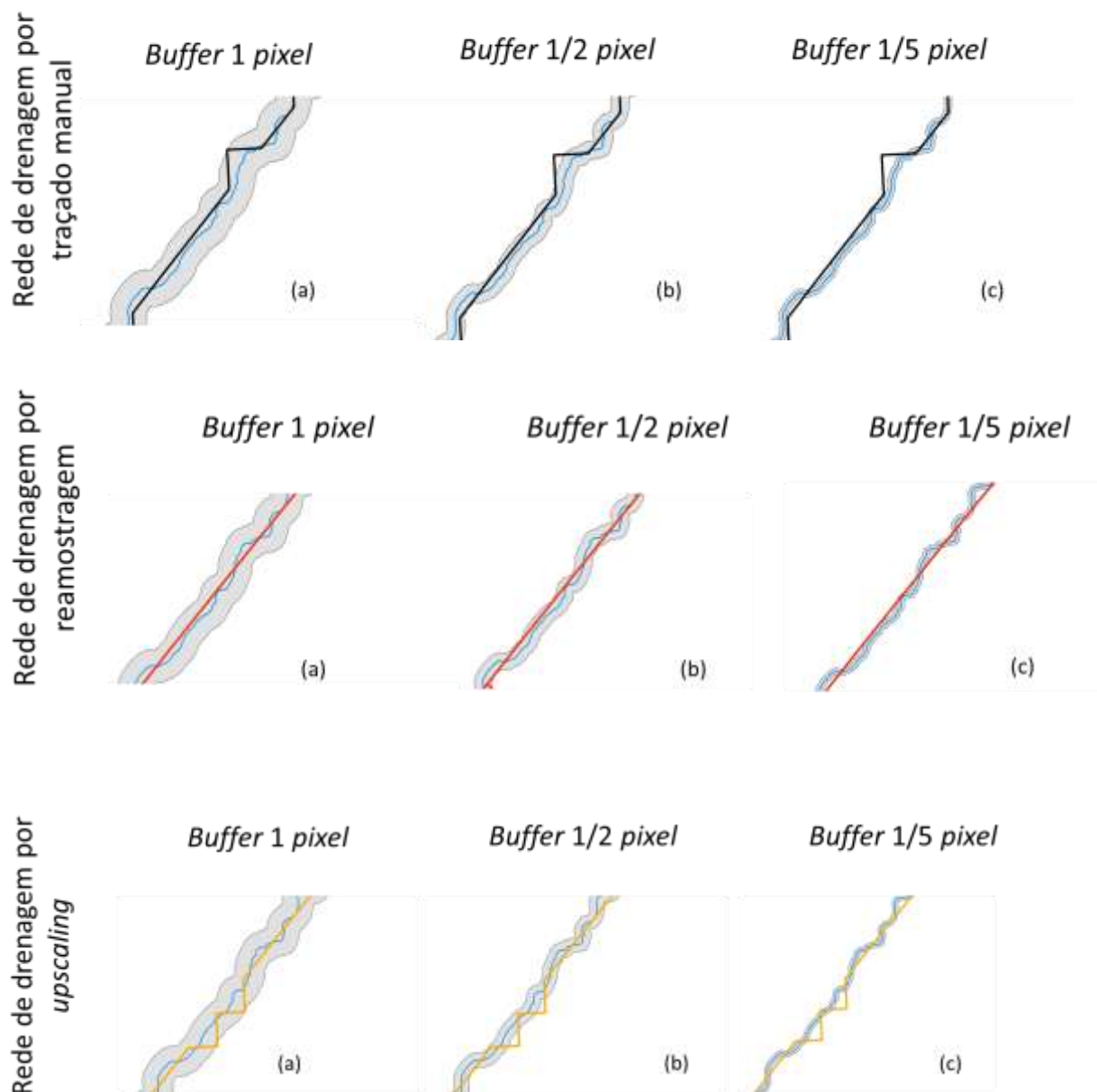


Figura 51 – Trechos do rio Uruguai na parte baixa na rede por traçado manual (em preto), por reamostragem (em vermelho) e por *upsampling* (em laranja) com largura de *buffer* (em cinza) de 1 *pixel*, 1/2 *pixel* e 1/5 de *pixel* na resolução de 20 km.

De modo geral, a técnica conseguiu refletir o quanto o traçado da rede manual esteve próximo da rede de referência, além de evidenciar o quanto a rede reamostrada foi a mais distante da rede de drenagem de referência, como verificado na inspeção visual.

Analisando a influência da determinação da largura do *buffer* sobre resultados encontrados, percebe-se que enquanto a determinação do *buffer* com largura de 1 *pixel* parece ser muito complacente, estando as redes de drenagem quase que totalmente inseridas dentro da largura do *buffer*, a determinação do *buffer* com largura de 1/5 *pixel* parece ser uma medida um tanto quanto rigorosa. Essa afirmação pode ser confirmada quando se analisa os resultados encontrados para a rede obtida por traçado manual. Essa que seria a representação mais próxima da rede de drenagem vetorizada de imagens LANDSAT. Teve resultados que indicam características pouco favoráveis, em termos de qualidade da rede de drenagem.

Nesse contexto, a largura de 1/2 *pixel* parece ser a largura ideal para analisar a qualidade das redes de drenagens analisadas. De acordo com Davies e Bell (2009), a largura do *buffer* deve ser selecionada de forma a garantir que aproximadamente 50% da rede de drenagem de baixa resolução estejam inseridas no *buffer*. Um *buffer* muito estreito excluiria grande parte da rede de drenagem de baixa resolução, enquanto que um *buffer* com dimensões muito maiores resultaria na inserção de quase 100% da rede de drenagem de baixa resolução.

Vale ressaltar que a determinação de um *buffer* com largura de 1/2 *pixel* se mostrou adequado para o estudo em questão, devendo ser analisado em cada caso na adoção desta técnica para avaliar a qualidade de redes de drenagem em outros estudos, dependendo, principalmente, da resolução espacial tomada. Ressalva-se então, a adoção de critérios rigorosos na determinação da largura do *buffer* e, em muitos casos, a adoção de mais de um valor de *buffer*.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As análises qualitativas das redes de drenagem, de alta e de baixa resolução espacial, por meio da inspeção visual das redes de drenagem foram fundamentais para avaliação das redes de drenagem, pois permitiram avaliar criticamente o desempenho das diferentes técnicas de avaliação da qualidade das redes de drenagem.

As análises realizadas acerca das técnicas de avaliação da qualidade das redes de drenagem em alta resolução espacial, ou seja, aquelas geradas pelo processamento do MDE em resolução espacial de 100 m, permitiram constatar que as técnicas que comparam características da rede de drenagem como, comprimento e sinuosidade, não conseguiram expressar quantitativamente o real desempenho dos traçados da rede de drenagem, principalmente para alguns rios pertencentes às bacias de maior área de drenagem. Tanto os resultados de comprimento quanto os de sinuosidade refletiram as limitações encontradas ao utilizar procedimentos fundamentados em MDE para obtenção dessas características físicas. Nessas situações, ocorre a superestimativa dessas características físicas dos rios localizados na parte baixa da bacia e subestimativa nos rios presentes no alto curso em relação à rede de drenagem de referência.

A técnica de quantificação de área entre as redes de drenagem de alta resolução espacial e a rede de drenagem de referência não fornece resultados adequados para indicação de qualidade das redes de drenagem de alta resolução espacial, enquanto que, ao levar em consideração o comprimento do rio, a métrica de distância média apresentou resultados coerentes com a qualidade das redes de drenagem identificadas na inspeção visual.

As apreciações referentes à aplicação das técnicas de avaliação da qualidade das redes de drenagem em redes de drenagem obtidas por traçado manual, por reamostragem do MDE e por *upscaling* de direções de fluxo, em baixa resolução espacial (>100 m), comparadas à rede de referência a partir de imagens LANDSAT, permitiram observar que as técnicas de avaliação analisadas neste trabalho confirmaram que as redes geradas por traçado manual são melhores em representar o traçado da rede de drenagem tomada como referência, quando comparadas ao método de *upscaling* de direções de fluxo, que por sua vez mostrou resultados, na maioria das vezes, melhores que no método de reamostragem do MDE, principalmente no que se refere à preservação das principais características da rede tomada como referência.

Em relação às técnicas que comparam características da rede de drenagem, neste caso, comprimento e sinuosidade da rede de drenagem, não conseguiram representar a real condição do traçado do rio, sendo incoerente com os resultados encontrados na análise visual da rede de drenagem. Em relação à comparação dos comprimentos da rede de drenagem comprovou-se a

tendência que nos rios mais estreitos, esses sejam subestimados e nos trechos dos rios mais largos, esses são superestimados. Em relação à comparação de valores de sinuosidade verifica-se uma limitação na representação dos meandros dos rios obtidos por meio dos procedimentos do MDE. Isso indica que quanto maior a sinuosidade do rio, maiores serão os erros, devido às limitações decorrentes da resolução espacial do MDE. Além disso, uma boa correlação entre as características físicas da rede de drenagem pode existir entre redes de drenagem completamente diferentes.

As técnicas que realizam a comparação entre características da bacia hidrográfica, área de drenagem e coeficiente geomorfológico K_f não identificaram corretamente as diferenças entre as redes de drenagem, não sendo possível inferir sobre a qualidade das mesmas quando se analisa, isoladamente, os resultados destas técnicas.

No entanto, a comparação entre valores de perímetros das bacias hidrográficas mostrou resultados em conformidade com o identificado na inspeção visual das redes de drenagem. Os resultados apontaram que o perímetro é, significativamente, afetado pelo processo de degradação da resolução espacial, sendo possível afirmar que, quanto maior a diferença negativa entre os valores de perímetro, mais formas e curvas foram perdidas pela bacia hidrográfica no processo de mudança de escala.

Da mesma forma, a comparação entre valores do coeficiente geomorfológico K_c apresentou resultados coerentes com a inspeção visual das redes de drenagem. Pode-se relacionar os resultados de K_c à mudança de forma da bacia, visto que, à medida que se degrada a resolução espacial o valor de K_c se aproxima de 1, indicando, conseqüentemente que a forma da bacia se aproximaria de um círculo.

As técnicas de comparação espacial de quantificação de áreas fora de concordância com a bacia hidrográfica de alta resolução e distância média entre as delimitações das bacias hidrográficas apontaram resultados adequados para avaliação da qualidade das redes de drenagem. Importante ressaltar que, a métrica de quantificação de áreas fora de concordância contorna as limitações da técnica de comparação integrada de comparação entre valores de área de drenagem da bacia hidrográfica, no que se refere à compensação de erros localizados em diferentes partes da bacia.

As técnicas de quantificação de área e distância média entre as redes de drenagem de baixa resolução espacial e a rede tomada como referência mostraram-se adequadas à correta identificação da qualidade das redes de drenagem. Embora, tenha se constatado, mais claramente, a identificação de diferenças bruscas entre as redes de drenagem, apresentando pouca sensibilidade para diferenças mais sutis entre as redes de drenagem.

A técnica de quantificação do percentual da rede de drenagem dentro do *buffer* conseguiu identificar o padrão de qualidade verificado na inspeção visual. Evidenciou o quanto o traçado da

rede manual esteve próximo da rede de referência, além de, confirmar o quanto a rede de drenagem por reamostragem do MDE foi a mais distante da rede de drenagem de referência, conforme verificado na inspeção visual.

Com o desenvolvimento deste estudo, pôde-se verificar que as métricas de comparação entre características físicas da rede de drenagem, comprimento e sinuosidade, bem como, comparação entre características da bacia hidrográfica, área de drenagem e coeficiente geomorfológico K_c citadas na literatura não são adequadas para avaliar a qualidade de redes de drenagem, desta forma, ressalta-se que ao utilizar estes métodos análises equivocadas podem ser realizadas, assim aspectos importantes podem ser negligenciados. Desta forma, recomenda-se a adoção das técnicas e métricas julgadas adequadas neste estudo para avaliar a qualidade de redes de drenagem processadas de MDE em relação a uma rede de referência, sempre associada à análise visual das redes de drenagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADES FILHO, C. O.; ZANI, H. ; GRADELLA, F. S. Extração automática das redes de drenagem no Pantanal de Aquidauana: estudo comparativo com dados SRTM, ASTER e Carta Topográfica DSG. **Geografia** (Rio Claro. Impresso), v. 34, p. 731-743, 2009.
- ANDRADES FILHO, C. de O. *et al.* Geomorfometria e geofísica aplicadas à discriminação de unidades sedimentares na Bacia Paraíba, nordeste do Brasil. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, 2835-2842. **Anais ...** CD-ROM.
- ARORA, V. K., & HARRISON, S. Upscaling river networks for use in climate models. **Geophysical Research Letters**, 2007. 34(21), 1–6. doi:10.1029/2007GL031865
- BARNES, R.; LEHMAN, C.; MULLA, D. An efficient assignment of drainage direction over flat surfasses in raster digital elevation models. **Computers & Geosciences** 62(2014)128–135.
- BEVEN KJ, KIRKBY MJ. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Science Bulletin** 24: 43–69. 1979.
- BROCHADO, G. T. **Atenuação do efeito do desflorestamento em dados srtm por meio de diferentes técnicas de interpolação.** Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, INPE. 2015.
- 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** 14:91-103, 2009.
- BURROUGH, P.A., MCDONNEL, R.A. Principles of Geographical Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics. **Oxford University Press.** Oxford, 333 p. 1998.
- Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006.
- CHAGAS, C. S.; FILHO, E. I. F.; ROCHA, M. F.; JÚNIOR, W. C.; NETO, N. C. S. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira Engenharia agrícola e ambiental** vol.14 no.2 Campina Grande Feb. 2010.
- CHEN, Y., WILSON, J. P., ZHU, Q., & ZHOU, Q. Comparison of drainage-constrained methods for DEM generalization. **Computers & Geosciences**, 48, 41–49. doi:10.1016/j.cageo.2012.05.002. 2012.
- CRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia.** São Paulo, Edgard Blücher, 2ed. 1980.
- CRUZ, M.; ARAGÃO, R. Aplicação de Modelos Digitais de Elevação SRTM e GDEM/ASTER para a Delimitação de Bacias Hidrográficas: O Caso da Bacia do Rio Japarutuba em Sergipe. In: X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, **Anais...** Fortaleza – CE, 2010.

- COLOMBO, R. VOGT, J.V. SOILLE, P. PARACCHINI, M.L. DEJAGER, A. Deriving river networks and catchments at the European scale from medium resolution digital elevation data. **Catena**, v.70, p. 296–305, 2007.
- CORDEIRO, L. L.; SANTOS, A. P.; MEDEIROS, N. G.; ABREU, M. V. S. Influência Da Resolução Espacial De Modelos Digitais De Elevação Na Delimitação Automática De Áreas De Preservação Permanente Em Topos De Morros. **Anais XVI Simpósio Brasileiro e Sensoriamento Remoto** - Sbsr, Foz Do Iguaçu, Pr, Brasil. 2013.
- CURKENDALL, D. W.; FIELDING, E. J.; CHENG, T.; POHL, J. M. A Computational- Grid Based System for Continental Drainage Network Extraction Using SRTM Digital Elevation Models, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PARALLEL PROCESSING WORKSHOPS (ICPPW'03), 2003, Kaohsiung, Taiwan. **Proceedings...** [S.l]: IEEE, p.181, 2003.
- DAVIES, H. N., & BELL, V. A. Assessment of methods for extracting low-resolution river networks from high-resolution digital data. **Hydrological Sciences Journal**, 54(1), 17–28. 2009.
- DOLL, P., & LEHNER, B. Validation of a new global 30-min drainage direction map. **Journal of Hydrology**, 258, 214–231. 2002.
- ENDRENY, T. A.; WOOD, E. F. Maximizing spatial congruence of observed and DEM-delineated overland flow networks. **International Journal of Geographical Information Science**, v.17, n. 7, p. 699-713, 2003.
- ENDRENY, T. A., WOOD, E. F., & LETTENMAIER, D. P. (2000). Satellite-derived digital elevation model accuracy : hydrogeomorphological analysis requirements. **Hydrological Processes**, 14(2000), 1–20.
- FAIRFIELD, J., LEYMARIE, P. Drainage networks from grid digital elevation models. **Water Resources Research**, 27(5), 709-717, doi:0043-1397/91/90WR02658,1991.
- FELGUEIRAS, C.A.; CÂMARA, G. Modelagem Numérica de Terreno, In Introdução à ciência da Geoinformação (ed) INPE, 2001. São José dos Campos – SP. pp. 07-36.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; SORRIBAS, M. V.; PONTES, P. R. M. Sobre o Início da Rede de Drenagem Definida a Partir dos Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** Volume 18 n.3 –Jul/Set 2013,241-257. 2013.
- FARR, T. G., *et al.* The Shuttle Radar Topography Mission. **Rev. Geophys.**, 45, RG2004, doi:10.1029/200 5RG000183. 2007.
- FAIRFIELD, J., LEYMARIE, P. 1991. Drainage networks from grid digital elevation models. **Water Resources Research**, 27(5), 709-717, 1991.
- FEKETE, M., VO, C. J., & LAMMERS, R. B. Scaling gridded river networks for macroscale hydrology : Development , analysis , and control of error. **Water Resources Research**, 37(7), 1955–1967. 2001.
- FERN, A. MUSAVI, M. T. MIRANDA, J. Automatic Extraction of Drainage Network from Digital Terrain Elevation Data: A Local Network Approach. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 3, p. 1007-1011, 1998.

- FERNÁNDEZ, D. C. J. Avaliação de algoritmos e modelos digitais de elevação para extração automática da drenagem. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, 2011.
- FILHO, L. M. B. Análise da acurácia da ferramenta de altimetria do laboratório de agricultura e floresta.. Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Itajubá. 2013
- FREITAS, E. P.; KLOSS, D.; SILVA, I. R. Delimitação de bacia hidrográfica no ambiente google earth. Irriga, Botucatu, Edição Especial, p. 97 - 104, ISSN 1808-3765. 2012
- GARBRECHT, J., OGDEN, F.L., DEBARRY, P.A.; MAIDMENT, D.R. GIS and distributed watershed models: I, Data coverages and sources. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.6, n.6, p. 506–514, 2001.
- GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models, **Journal of Hydrology**, 193, p. 204-213, 1997.
- GASPARINI, K. A. C. Delimitação Das Áreas De Preservação Permanente Do Município De Seropédica, RJ. Monografia Apresentada Ao Curso De Engenharia Florestal - Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro. 2011.
- HEINE, R.A.; LANT, C.L.; SENGUPTA, R. R. (2004). Development and Comparison of Approaches for Automated Mapping of Stream Channel Networks. *Annals of the American Geographers*, 94(August 2003), 477–490.
- HODGES, B. R.. Representing hydrodynamically important blocking features in coastal or riverine lidar topography. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1011–1023, 2015.
- JENSON, S.K., DOMINGUE, J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogramm. Eng. Remote Sens.**, 54(11), 1593-1600, 1988.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. John R. Jensen; tradução: José Carlos Neves Epiphany, *et al.* São José dos Campos - SP: Parêntese, 2009.
- KENNY, F., & MATTHEWS, B. A methodology for aligning raster flow direction data with photogrammetrically mapped hydrology. **Computers & Geosciences**. 2005.
- KIENZLE, S. The Effect of DEM Raster Resolution on First Order, Second Order and Compound Terrain Derivatives. *Transactions in GIS* 8 (1), 83–111. 2004.
- LI, L.; WANG, J.; HAO, Z.C. Appropriate contributing area threshold of a digital river network extracted from DEM for hydrological simulation. *Hydrological Research in China: Process Studies, Modelling Approaches and Applications (Proceedings of Chinese PUB International Symposium, Beijing, September 2006)*. **IAHS Publ.** 322, 2008.
- Lin, W.-T., Chou, W.-C., Lin, C.-Y., Huang, P.-H., & Tsai, J.-S. (). Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds. **Hydrological Processes**. 2006.

- LINDSAY, J. B. The practice of DEM stream burning revisited. *Earth Surf. Process. Landforms*, (2016).
- LOPEZ, M. J. G. CAMARASA, A. M. Use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a DEM. Comparison between automated extraction and photointerpretation methods in the Carraixet catchment (Valencia, Spain). *JAG I*, v. 1, n. 3/4, 1999.
- LOUZADA, F. L. R. O.; PELUZIO, T. M. O.; SAITO, N. S.; SOUZA, S. M.; VIEIRA, M. V. M.; SANTOS, A. R. Determinação De Áreas De Preservação Permanente Em Topos De Morros Na Microrregião De Planejamento Do Caparaó, Es. *Anais Do Xiii Encontro Latino Americano De Iniciação Científica E Ix Encontro Latino Americano De Pós-Graduação – Universidade Do Vale Do Paraíba*. 2009.
- LUDWIG, R., & SCHNEIDER, P. Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(5), 339–358. doi:10.1016/j.isprsjprs.2006.05.003. 2006.
- MCMASTER, K. J. Effects of digital elevation model resolution on derived stream network positions. *Water Resources Research*, v.38, n. 4, p.1-8, 2002.
- MCNAMARA, J., *et al.* 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, pp. 147-156. 2006.
- MENDES, C.A.B, CIRILO, J.A. Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 536 p. 2001.
- MIRANDA, J. I. Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 425 p. 2005.
- MONTGOMERY D. R.; DIETRICH W. E. Where do channels begin? *Nature* 336: 232–234. 1988.
- 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.
- O'DONNELL, G.; NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D.P. A simple algorithm for generating streamflow networks for grid-based, macroscale hydrological models. *Hydrological*.1999.
- OGUCHI, T. SIG applications in geomorphology – a review. In: REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 6., 2006, Goiânia -Brazil. *Proceedings...* [S.l]: UGB, 2006.
- OLIVERA, F.; LEAR, M. S.; FAMIGLIETTI, J. S.; ASANTE, K. Extracting low-resolution river networks from highresolution digital elevation models, *Water Resources Research*, 38(11), 1231, 2002.
- ORLANDINI, S., MORETII, G., FRANCHINI, M., ALDIGHIERI, B., TESTA, B., 2003. Path-based methods for the determination of nondisper- sive drainage directions in grid-based digital elevation models. *Water Resources Research*. v.39, n.6, p.1144, 2003.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Geração de direções de fluxo para modelagem hidrológica de grande escala. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; SILVEIRA, A. L. L. Improvements in large scale drainage networks derived from digital elevation models. **Water Resources Research**, 42 (8), doi: 10.1029/2005WR004544. 2006.

PAZ, A. R. *et al.* Extração automática de comprimentos de trechos de rio a partir do Modelo Numérico do Terreno para modelagem hidrológica distribuída. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 8p. 2007. **Anais...** CD-ROM.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, p. 84-95, 2008.

PELLETIER, J. Flow Routing. In: Quantitative modeling of earth surface processes. 1 ed. United Kingdom: University Press, Cambridge, p. 295. ISBN 978-0-521-85597-6. 2008.

PEREIRA, D. R.; FICHER, K. N. Delimitação de bacia hidrográfica a partir de diferentes modelos digitais de elevação. XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, UFS - São Cristóvão/SE. 2015.

PLANCHON O.; DARBOUX F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. **Catena**, v.42, p 159-176, 2001.

PIRES, J. M.; NASCIMENTO, M. C.; SANTANA, R. M.; RIBEIRO, C. A. A. S. Análise da Exatidão de Diferentes Métodos de Interpolação para Geração de Modelos Digitais de Elevação e Obtenção de Características Morfométricas em Bacias Hidrográficas. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 10 n.2 Abr/Jun 2005, 39-47.

QUINN, P.F., BEVEN, K.J., LAMB, R.. The ln_a/tanh index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. **Hydrol. Process**. 9, 161– 182. 1995.

RAHMAN, M. M., ARYA, D. S., GOEL, N. K. Limitation of 90 m SRTM DEM in drainage network delineation using D8 method a case study in flat terrain of Bangladesh. **Applied Geomatics**. v. 2, n. 2, p.49-58, DOI: 10.1007/s12518-010-0020-2, 10p, 2010.

REINOSO, J. F. A priori horizontal displacement (HD) estimation of hydrological features when versioned DEMs are used. **Journal of Hydrology**, 384(1-2), 130–141. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.01.017. 2010.

REED, S.M. Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4 km) gridded hydrologic modeling. **Water Resources Research** 39(9), 1238. 2003.

RENNÓ, C. D., NOBRE, A. D., CUARTAS, L. A., SOARES, J. V., HODNETT, M. G., TOMASELLA, J., WATERLOO, M. J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, 112(9). 2008.

RIBEIRO, C. A. A. S.; OLIVEIRA, M. J.; SOARES, V. P.; PINTO, F. A. C., Delimitação automática de áreas de preservação permanente em topos de morros e em linhas de cumeada: Metodologia e estudo de caso. In: Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicadas à Engenharia Florestal, 5, 2002, Curitiba, Paraná. Anais, 7 – 18p.

ROSSETTI, D. de F. *et al.* Origem tectônica de megaleques no norte da Amazônia com base em multisensores. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, 2835-2842. **Anais ...** CD-ROM.

SARAIVA, A. G. S.; PAZ, A.R. Multi-step change of scale approach for deriving coarse-resolution flow directions. **Computers & Geosciences**, v. 68, p. 53-63, 2014.

SARAIVA, A. G. S.; SOUSA, T. M. I.; PAZ, A. R. Erros nas áreas de drenagem de grandes bacias hidrográficas devido à forma de conversão da projeção geográfica. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE.

SHAW, D.; MARTZ, L. W.; PIETRONIRO, A. Flow routing in large-scale models using vector addition, **Journal of Hydrology** 307, pp. 38-47. 2005.

SHAW, D. A., MARTZ, L. W., & PIETRONIRO, A. A methodology for preserving channel flow networks and connectivity patterns in large-scale distributed hydrological models. **Hydrological Processes**, 19(1), 149–168. doi:10.1002/hyp.5765. 2005.

SHAW, D., MARTZ, L. W., & PIETRONIRO, A. Flow routing in large-scale models using vector addition. **Journal of Hydrology**, 307(1-4), 38–47. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.09.019.2005.

SILVA, T. C. N. Análise da evolução histórica das vazões e descarga de sedimentos do rio Uruguai no trecho entre Iraí e Uruguaiana. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria. 2014.

TARBOTON, D. G.; AMES, D. P. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data. In : World Water And Environmental Resources Congress, 2001, Orlando, Florida. Proceedings... Orlando: ASCE, 2001.

TATSCH, J. D. *et al.* Comparação entre dois procedimentos de upscaling de redes de drenagem. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 8p. 2009. **Anais ...** CD-ROM

TAY, L.T., SAGAR, B.S.D., CHUAH, H.T. Analysis of geophysical networks derived from multiscale digital elevation models: a morphological approach. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters** 2 (4), 399–403. 2005.

TEMME, A.J.A.M.; SCHOORL, J.M.; VELDKAMP, A. Algorithm for Dealing with Depressions in Dynamic Landscape Evolution Models. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. , p. 452-461, 2006.

TRIBE, A. Towards the automated recognition of landforms (valley heads) from digital elevation models. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING, 4. Zurich, Switzerland. **Proceedings...**, Zurich, Switzerland, 1990, p.45-52.1990.

VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO, M.; AMARAL, B. D.; MENDES JÚNIOR., J. N.; LIMA, D. Modeling small watersheds in Brazilian Amazônia with SRTM-90m data. **Computers & Geosciences**, v.32, n.8, p.1169-1181, 2006.

VALERIANO, M.M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Topodata: processamento dos dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. 79 p. (sid.inpe.br/mtcm19@80/2010/05.10.18.42-RPQ).

VALERIANO, M. M. Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p. (INPE-15318-RPE/818).

VOGT, J. V., COLOMBO, R., & BERTOLO, F. Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. **Geomorphology**, 53(3-4), 281–298. doi:10.1016/S0169-555X(02)00319-7. 2003.

WALLIS, C.; WALLACE, R.; TARBOTON, D.G.; WATSON D.W.; SCHREUDERS K.A.T; TESFA, T.K. Hydrologic Terrain Processing Using Parallel Computing. In: WORLD IMACS CONGRESS AND MODSIM09 INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION, 18., 13-17 jul. 2009, Cairns, Australia. **Proceedings...** Cairns: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation, p. 2540-2545. ISBN: 978-0-9758400-7-8. 2009.

WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R. On The Effect Of Digital Elevation Model Accuracy On Hydrology And Geomorphology. **Water Resources Research**, v. 35, n. 7, p. 2259-2268,1999.

WANG, X., YIN, Z.-Y. A comparison of drainage networks derived from digital elevation models at two scales. **J. Hydrol.** 210, 221–241. 1998.

WANG, M.; HJELMFELT, A.T.; GARBRECHT, J. DEM aggregation for watershed **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos** 20 modeling, J. Amer. Water Resour. Assoc. 36(3), pp. 579-584. 2000.

WILSON, J. P.; GALLANT, J.C. Digital terrain analysis In: Terrain analysis: principles and applications. New York: John Wiley and Sons, 2000. p. 1–28. ISBN 0- 471-32188-5.

WILSON, J.P.; AGGETT, G.; DENG, Y.; LAM, C. S. Water in the Landscape: A Review of Contemporary Flow Routing Algorithms. In: ZHOU, Q.; LEES, B.; TANG, G. **Advances in digital terrain analysis**. Berlin: Springer-Berlag , p. 472. ISBN: 978-3-540-77799-1 e-ISBN: 978-3-540-77800-4. 2008.

WOLOCK, D.M., PRICE, C.V. Effects of digital elevation model and map scale and data resolution on a topography-based watershed model. **Water Resources Research** 30 (11), 3041–3052. 1994.

ZHANG, X., DRAKE, N.A., WAINWRIGHT, J., MULLIGAN, M. Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: scaling issues and a fractal method for their solution. **Earth Surface Processes and Landforms** 24 (9), 763–779. 1999.

ZHANG, W., MONTGOMERY, D.R., “Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations”, **Water Resources Research**, 30,4,1019- 1028,1994.

ZHOU, Q., & CHEN, Y. Generalization of DEM for terrain analysis using a compound method. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 66(1), 38–45. doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.08.005. 2011.

ZHOU, Q., LIU, X. Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties. **Computers and Geosciences** 30 (4), 369–378. 2004.

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