

Universidade Federal de Juiz de Fora
Pós-Graduação em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais

Márcio Malafaia Filho

**ANÁLISE HIDROGRÁFICA AVALIANDO REDE DE DRENAGEM
BRASILEIRA: IMPLICAÇÕES LIMNOLÓGICAS**

JUIZ DE FORA
2013

Márcio Malafaia Filho

**Análise hidrográfica avaliando rede de drenagem brasileira: implicações
limnológicas**

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciências Biológicas, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Roland

Juiz de Fora

2013

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Malafaia Filho, Márcio.

Análise hidrográfica avaliando rede de drenagem brasileira: implicações limnológicas / Márcio Malafaia Filho. -- 2013.

73 f. : il.

Orientador: Fábio Roland

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós Graduação em Ecologia, 2013.

1. rede hidrográfica brasileira. 2. geoprocessamento. 3. ordens de Strahler. I. Roland, Fábio, orient. II. Título.

“Análise hidrográfica avaliando rede de drenagem brasileira: implicações limnológicas”

Márcio Malafaia Filho

Orientador: Prof. Dr. Fábio Roland

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciências Biológicas, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais.

Aprovada em 29 de maio de 2013

Prof. Dr. Fábio Roland

Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF

Prof. Dr. Arcilan Trevenzoli Assireu

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Dra. Raquel Fernandes Mendonça

Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

DEDICATÓRIA

Ao meu avô Aninan, o mundo perdeu a personificação do bom humor quando o
senhor se foi.

Ao senhor Daniel Ângelo Barletta Rooke que me deixou uma família fantástica
a qual eu me considero membro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Márcio Malafaia e Maria Rita Pimentel Malafaia, por todo amor, carinho, confiança e esperança em minha pessoa. Agradeço a eles também ter recebido em forma de presente de “Dia da Criança” aquela que hoje é minha melhor amiga, minha irmã, Marta Pimentel Malafaia.

Ao meu orientador Dr. Fábio Roland por ter aceitado a empreitada de me orientar, por todas as oportunidades, paciência e esperança depositados em mim, e principalmente por ter sido uma pessoa tão única a ponto de me inspirar a sempre querer ter um olhar diferente sobre o mundo, olhar este que não restritivo ao universo científico, e sim sobre toda a vida.

Agradeço a minha namorada e companheira de longa data, Mayse Itagiba Rooke, pelo companheirismo, compreensão, broncas e amor.

Agradeço aos amigos que fiz no Laboratório de Ecologia Aquática da Universidade Federal de Juiz de Fora, a vocês o meu mais profundo obrigado, saibam que sou um admirador de todos vocês, sem exceção, e que são diretamente culpados por eu ter me apaixonado pelas ciências biológicas.

Em especial meu obrigado ao Caique, Felipe, Nathan, Simone e Raquel pelos puxões de orelha e revisão deste texto.

Ao meu amigo Marcos Cicarini Hott, pelas oportunidades e por ter me ensinado (e continuar ensinando) a pensar sobre os mapas e o geoprocessamento.

Agradeço a minha comadre-prima Elizabeth Pimentel da Silva por ter sido sempre um exemplo a ser seguido por mim. Se eu representar para seus filhos, a metade do que você é pra mim, eu serei muito feliz.

Aos Pimentel Berzoini por terem abrigado minha família em especial Lilliane e Luciana que serviram de filhas para minha mãe enquanto os oficiais estavam ausentes.

A minha tia Helô, por ter sido a minha inspiração da busca do não convencional.

A senhorita Clara Jaeger e aos anos de psicanálise.

Aos meus antigos amigos Antônio, Daniel e João Paulo, pela amizade, pelas caronas, morada e pelos meus 15 quilos a mais.

As novas amizades formadas no PGECOL, como Luíza, Cassiano, Ricardo, Munike e José Carlos.

E a toda obra de Alan Moore, Will Eisner, Frank Miller, Karl Marx, Sigmund Freud, Machado de Assis, Mario Puzo, Richard Wagner, Bruce Dickinson, Steve Harris, Cliff Burton, Clarence Seedorf, Eric Cantona, George Romero e José Mojica Marins, sua arte sempre me inquietando e nunca me dando por satisfeito na busca de um sentido na vida.

“He knows changes aren't permanent, But change is”
Tom Sawyer – Rush

RESUMO

A água tem fundamental importância para a vida na Terra. Cerca de 70% da superfície terrestre é coberta por água, sendo que a maior parte dela pelos oceanos. Do total das águas, 3,46% encontram-se nos continentes. Todavia, os números sobre a área da superfície aquática continental no planeta são muito variáveis, pois geralmente negligenciam a superfície total dos corpos d'água de menores dimensões. Portanto, este estudo estimar o comprimento da rede hidrográfica brasileira, bem como sua distribuição sobre as 12 Regiões Hidrográficas do Brasil, através do uso do Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) e de técnicas de geoprocessamento apoiadas nos Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Além do comprimento, estimado em 7.325.672 Km – correspondente à soma de todos os rios do território brasileiro, discriminaram-se as ordens dos rios segundo a metodologia proposta por Strahler, metodologia esta que busca uma hierarquização dos córregos e rios. Nesta discriminação observou-se que os rios de primeira ordem (os que se comunicam diretamente com as nascentes) representam 51% do comprimento total dos rios e córregos em território nacional, indicando que os menores rios são mais abundantes que os rios maiores.

Palavras-chave: rede hidrográfica brasileira; geoprocessamento; ordens de Strahler.

ABSTRACT

It is well-established that water has a crucial importance to life on Earth. Nearly 70% of the Earth surface is covered by water, being the greatest part of it covered by the oceans. Out of all the water on Earth, 3.46% can be found in continents. However, the numbers concerning the continental water surface of the planet are changeable, once researchers generally do not consider the total surface of smaller water bodies. Therefore, this study aims at estimating the length of the Brazilian hydrographic network, as well as its distribution over 12 Brazilian hydrographic regions, by means of the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM). The study included geoprocessing techniques supported by the Geographic Information Systems (GIS). In addition to an estimated length of 7,325,672 km – correspondent to the sum of all the Brazilian rivers, this work also discriminated the stream order, as proposed by Strahler's methodology, which casts about for the hierarchy of both rivers and streams. Through this discrimination, it was observed that first order rivers (those which communicate directly with their source) represent 51% of the total length of the rivers and streams inside the Brazilian territory, thus indicating that small rivers are most abundant than large ones.

Key-words: Brazilian hydrographic network; geoprocessing; Strahler stream order.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Área mapeada pelo SRTM (Fonte: USGS).	3
Figura 2: Distribuição e limites das Regiões Hidrográficas sobre o SRTM.	6
Figura 3: Exemplo de ordenamento de Strahler para rios.	7
Figura 4: SRTM unificado sobre os limites do Brasil, no detalhe, o raster em sua resolução nativa	9
Figura 5: Fluxograma de operações no SIG para a geração dos dados.	12
Figura 6: Fill Sink.	14
Figura 7: Raster de altitude para raster de direção de fluxo. (a) são os valores e suas respectivas direções; (b) é a altitude e (c) a direção de fluxo.	15
Figura 8: Acumulação de fluxo.	16
Figura 9: (a) Acumulação de fluxo com gradiente mais claro com maior número de células de acúmulo. (b) Rios extraídos sendo a parte sem informação “NoData”.	17
Figura 10: Mapa contendo a drenagem ordenada.	17
Figura 11: Comparativo entre RH com <i>buffer</i> e sem <i>buffer</i>	18
Figura 12: Erros formados pelas linhas paralelas do SRTM nos lagos.	19
Figura 13: Aplicações do eixo medial. Em vermelho o eixo medial e em preto o contorno do polígono (Fonte: http://www.ndl.kiev.ua/content/centerline).	20
Figura 14: Relação entre ordem dos rios (Strahler) e o somatório das extensões dos rios de cada ordem, para todo o território brasileiro. A linha sólida representa a tendência exponencial de variação, acompanhada do seu coeficiente de correlação (R^2).	22
Figura 15: Relação entre ordem de Strahler e o somatório das extensões dos rios de cada ordem, para cada uma das RH. O eixo vertical está em escala logarítmica. As linhas sólidas representam a tendência exponencial de variação, acompanhadas dos R^2	23
Figura 16: Fração da extensão e área total de rios em função da ordem de Strahler no Brasil. Os dados de largura foram extraídos de Downing et al. (2012).	25
Figura 17: Relação entre ordens de Strahler e largura média de rios do mundo todo. A linha pontilhada conecta as larguras médias de rios de cada ordem. Este gráfico foi extraído de Downing et al. 2012.	42

Figura 18: Fração da extensão e área total de rios em função da ordem de Strahler. A - rios de todo o território brasileiro (dados gerados nesta dissertação); B – rios de todo o mundo (gráfico modificado de Downing et al. 2012).	44
Figura 19: Comparação métodos de levantamento de rede de drenagem. A: estimativa baseada em levantamentos do IBGE. B: estimativa baseada em modelo digital de terreno (SRTM), utilizada neste trabalho.	48

LISTA DE MAPAS

Mapa 1: Distribuição dos rios na RH Amazônia.....	27
Mapa 2: Distribuição dos rios na RH Tocantins.	28
Mapa 3: Distribuição dos rios na RH Atlântico Nordeste Ocidental.	29
Mapa 4: Distribuição dos rios na RH Parnaíba.	30
Mapa 5: Distribuição dos rios na RH Atlântico Nordeste Oriental.....	31
Mapa 6: Distribuição dos rios na RH Atlântico Leste.....	32
Mapa 7: Distribuição dos rios da RH São Francisco.....	33
Mapa 8: Distribuição dos rios na RH Atlântico Sudeste.....	34
Mapa 9: Distribuição dos rios na RH Paraná	35
Mapa 10: Distribuição dos rios na RH do Uruguai	36
Mapa 11: Distribuição dos rios na RH Atlântico Sul.....	37
Mapa 12: Distribuição dos rios na RH do Paraguai.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Extensão dos rios, porcentagem da extensão total e densidade de drenagem para cada ordem de Strahler, em todo o território brasileiro.	21
Tabela 2: Extensão dos rios, porcentagem da extensão total no Brasil e densidade de drenagem em cada região hidrográfica brasileira.	24
Tabela 3: Área total dos rios e porcentagem da área total para cada ordem de Strahler, em todo o território brasileiro. Dados calculados com base nas espessuras das ordens de rios em Downing et al. (2012).	25
Tabela 4: Área total dos rios e porcentagem da área total no Brasil em cada região hidrográfica brasileira. Dados calculados com base nas espessuras das ordens de rios em Downing et al. (2012).	26

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
OBJETIVOS	
2.1. Objetivo geral:	22
2.2. Objetivos específicos:	22
METODOLOGIA	
3.1. Área de estudo	23
3.2. Materiais e Métodos	23
3.2.1. Materiais utilizados	24
3.2.2. Procedimentos adotados	25
RESULTADOS	35
DISCUSSÃO	
Área dos rios	55
Densidade de drenagem do território brasileiro	54
Extensão de rios no Brasil – importância dos pequenos riachos	53
Implicações para os ciclos biogeoquímicos	58
Variabilidade entre as RHs	58
CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
GLOSSÁRIO	68

INTRODUÇÃO

A água é de fundamental importância para a vida na Terra, e o Brasil é o país detentor da maior área de água doce no mundo. Conhecer a superfície ocupada por água doce constitui numa importância ímpar no que diz respeito ao planejamento e melhor utilização deste recurso natural.

A *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) aponta que 71% da superfície terrestre encontram-se cobertos por água. No entanto, apenas uma pequena fração deste estoque de água corresponde aos rios e lagos, ou seja, está disponível para consumo humano. De acordo com (SHIKLOMANOV, 1993), 96,54% de toda água do mundo estão nos oceanos e os 3,46% de água doce restante estão distribuídos da seguinte forma:

- 1,74% nas calotas polares;
- 1,69% em aquíferos;
- 0,02% nos lagos;
- 0,0098% em outras fontes (nuvens, vapor d'água, etc.);
- 0,0002% nos rios.

Neste cenário, o Brasil possui 12% de toda a água doce e líquida no mundo, porém estas estimativas ainda envolvem incertezas, a fração da superfície terrestre ocupada por corpos d'água está em discussão. O *United States Geological Survey* (USGS) afirma que 0,0202% da água se encontram nos rios e lagos, enquanto estudos como o de (DOWNING, PRAIRIE, *et al.*, 2006) levantam a hipótese da área da superfície terrestre coberta somente por lagos e reservatórios ser maior que a anteriormente prevista. Este autor postula que a área coberta por água seja de 2,8% da área mundial, contrariando trabalhos anteriores como (LEHNER e DOLL, 2004) e (MEYBECK, 1995) que apontam números menores. BIRKETT e MASON (1995) defendem que existe uma dificuldade em encontrar bases cartográficas que exponham a superfície da água no planeta e há poucos dados que compreendam localização, extensão e outras características básicas de corpos d'água abertos e áreas alagáveis (LEHNER & DOLL, 2004). O recente trabalho de (BENSTED e LEIGH, 2012) demonstra que novas metodologias baseadas na topografia e não somente na visualização de imagens ou fotografias aéreas podem ser empregadas no mapeamento de rios e corpos d'água.

Além de constituir o habitat de uma grande diversidade de espécies, ecossistemas de água doce são recursos indispensáveis para o homem. Por se tratar de fonte de água para irrigação, consumo, fonte de alimento e lazer, dentre outros, as sociedades historicamente se desenvolveram em torno de ecossistemas aquáticos. Existe também a importância de ecossistemas aquáticos para outros organismos vivos e a disponibilidade de água superficial afeta o clima regional ao regular a umidade atmosférica. Além disso, ecossistemas aquáticos continentais (rios, córregos, lagos e reservatórios) são fontes de metano para a atmosfera, contribuindo com o efeito estufa (BASTVIKEN, TRANVIK, *et al.*, 2011)

Mesmo com todo o avanço científico já alcançado na área da ecologia aquática, o entendimento do papel de ecossistemas aquáticos nos ciclos de materiais ainda é bastante incompleto. Este problema é, em parte, causado pelas dificuldades em se estimar a densidade de drenagem das bacias hidrográficas. Densidade de drenagem é a medida de extensão total de rios em uma unidade de área da bacia de drenagem. Esta medida é fortemente relacionada com a dinâmica de interação entre ecossistemas aquáticos e terrestres, bem como com a atmosfera. Ecossistemas fluviais foram historicamente considerados como ductos passivos de transporte de materiais do ambiente terrestre para o aquático. Evidências mostram, no entanto, que redes fluviais são componentes ativos dos ciclos biogeoquímicos, que desempenham papel significativo a nível global (COLE, PRAIRIE, *et al.*, 2007).

Desta forma, saber onde estão e qual a extensão dos corpos d'água continentais se torna uma questão fundamental para a geração de bases científicas sólidas. (WHITEHEAD e ROBINSON, 1993) afirmam que a necessidade de estudos de mapeamento de corpos hídricos tem como intuito analisar as dinâmicas e os processos que controlam o comportamento da água e os impactos de mudanças do uso do solo sobre a qualidade e quantidade de água disponível. No entanto, o conhecimento sobre corpos d'água continentais ainda é limitado, principalmente por causa das suas grandes dimensões (comprimento e largura), da dinâmica sazonal altamente variada (épocas de seca e chuva) e, principalmente, da dificuldade de acesso a certas regiões. Diante desta realidade, o sensoriamento remoto torna-se a ferramenta mais viável para a caracterização e o monitoramento de corpos d'água continentais (BARBOSA, HESS, *et al.*, 2000); (NOVO, SHIMABUKURO e MERTES, 1998) Sensoriamento remoto é considerado “a arte e a ciência de obter informações sobre um objeto sem estar em

contato físico direto com o objeto” (JENSEN, 2009). Esta definição é abrangente, pois sensores remotos contemplam fotografias feitas com máquinas fotográficas presas a balões, imagem de satélites e diferentes formas de captação de imagens da superfície terrestre. Com os avanços tecnológicos, projetos como os satélites da série Landsat puderam ser lançados em 1972 e, desde essa época, estes satélites têm imagens de toda superfície terrestre.

Um levantamento que resultou em produtos amplamente utilizados foi o *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), uma missão de levantamento suborbital com equipamentos de radar que, entre seus objetivos, visava criar uma base global consistente e com os erros quantificados da topografia terrestre (RODRIGUEZ, MORRIS e BELZ, 2006). O projeto foi realizado em fevereiro de 2000 e durou apenas 11 dias, minimizando o efeito sazonal de secas e cheias nas análises (VAN ZYL, 2001). Este projeto mapeou 80% da topografia da Terra, compreendendo os paralelos de 56° sul e 60° norte, em uma escala de alta resolução (Figura 1).

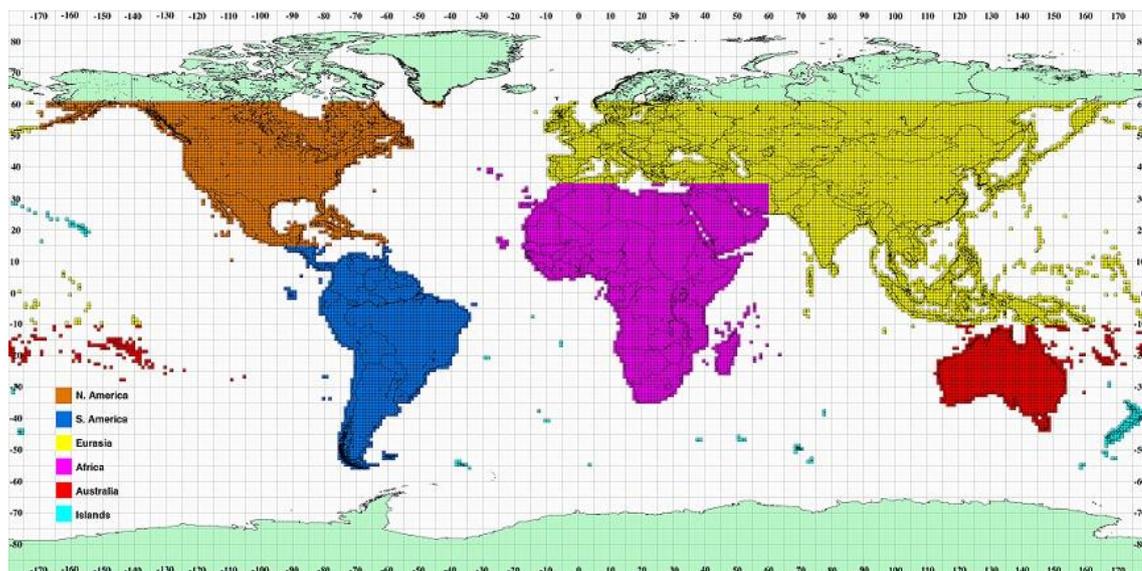


Figura 1: Área mapeada pelo SRTM (Fonte: USGS).

Como principal produto do SRTM gerou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) (USGS). Este modelo constitui de uma imagem em 16 *bits* contendo 65534 tons de cinza ou valores de pixel, sendo cada valor representativo de uma altitude em metros. Os números variam de -32767 a 32767 metros, contemplando assim, todas as altitudes da Terra. Sua resolução espacial é de 3 segundos de arco (aproximadamente 90 metros

de resolução) e encontra-se disponível gratuitamente no site da USGS (<http://www.usgs.gov/>).

Outro importante subproduto do SRTM, utilizado neste trabalho, foi o *SRTM Water Body Data* (SWBD). O SWBD é uma compilação das massas de água obtidas através do SRTM, disponível no site da USGS (http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SWBD/). Ambos os dados topográficos são objeto de processamento para a geração de informação numérica acerca da morfometria dos corpos hídricos.

Dados provenientes de varreduras por satélites apresentam dimensão espacial, ou seja, contêm coordenadas geográficas (latitude e longitude). Ao tratamento e extração de informação de dados georreferenciados, dá-se o nome de geoprocessamento. Este, por sua vez, manipula os dados espaciais pelo *Sistema de Informação Geográfica* (SIG).

(JENSON e DOMINQUE, 1988) apontavam uma forma de tratamento de imagem através de SIG com objetivo de extrair a drenagem de rios através de um Modelo Digital de Elevação (MDE). O MDE é um tipo de imagem específica para representar relevo.

Os rios e córregos podem ser agrupados em bacias hidrográficas, sendo estas um conjunto de terras que drenam a água para um ponto comum. Nesta perspectiva, (ODUM, 1971) defende a ideia de delimitar unidades de conservação por bacias hidrográficas e não pelos limites dos parques, pois os fenômenos que ocorrem na sua cabeceira podem afetar o resto de sua bacia e muitos parques têm as nascentes de seus rios fora dos domínios do mesmo.

Porém, para organizar e guiar diretrizes das políticas públicas brasileiras adotou-se o conceito de Regiões Hidrográficas (RH). As RH podem contemplar um grupo de bacias, uma bacia inteira ou sub-bacias hidrográficas e foram delimitadas pela Resolução Nº 32 de 15 de outubro de 2003 do Conselho Nacional dos Recursos Hídricos. O presente trabalho adota as RH como base para os estudos. Existem doze RH no Brasil, a saber:

- 1 - Região Hidrográfica Amazônica;
- 2 - Região Hidrográfica do Tocantins/Araguaia;
- 3 - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental;
- 4 - Região Hidrográfica do Parnaíba;

- 5 - Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental;
- 6 - Região Hidrográfica Atlântico Leste;
- 7 - Região Hidrográfica do São Francisco;
- 8 - Região Hidrográfica Atlântico Sudeste;
- 9 - Região Hidrográfica do Paraná;
- 10 - Região Hidrográfica do Uruguai;
- 11 - Região Hidrográfica Atlântico Sul;
- 12 - Região Hidrográfica do Paraguai.

Das 12 RH, três coincidem com as bacias hidrográficas de seus rios. São elas: as bacias de Tocantins/Araguaia, Parnaíba e São Francisco. Estas têm os mesmos limites com as regiões hidrográficas respectivas.

As Regiões Hidrográficas de Paraguai, Uruguai e Paraná são coincidentes com as bacias de seus rios somente em território nacional.

As Regiões Hidrográficas Atlântico Nordeste Ocidental e Atlântico Nordeste Oriental, Região Hidrográfica Atlântico Leste, Região Hidrográfica Atlântico Sudeste e Atlântico Sul englobam várias bacias de rios que deságuam no Oceano Atlântico.

A Região Hidrográfica Amazônica contempla a bacia do rio Amazonas (somente a parte brasileira), a ilha de Marajó e a bacia de alguns rios no Estado do Amapá que deságuam no Atlântico Norte.

As RH brasileiras podem ser estudadas utilizando o SRTM (Figura 2). Esta ferramenta permite estimar o comprimento e a localização da rede hidrográfica brasileira, bem como a quantidade de ordens de rios presente na mesma. Estas análises são úteis na realização de estimativas sobre a lâmina d'água existente na ótica da escala continental em questão, por volta de 1:500.000.

Regiões Hidrográficas sobre SRTM

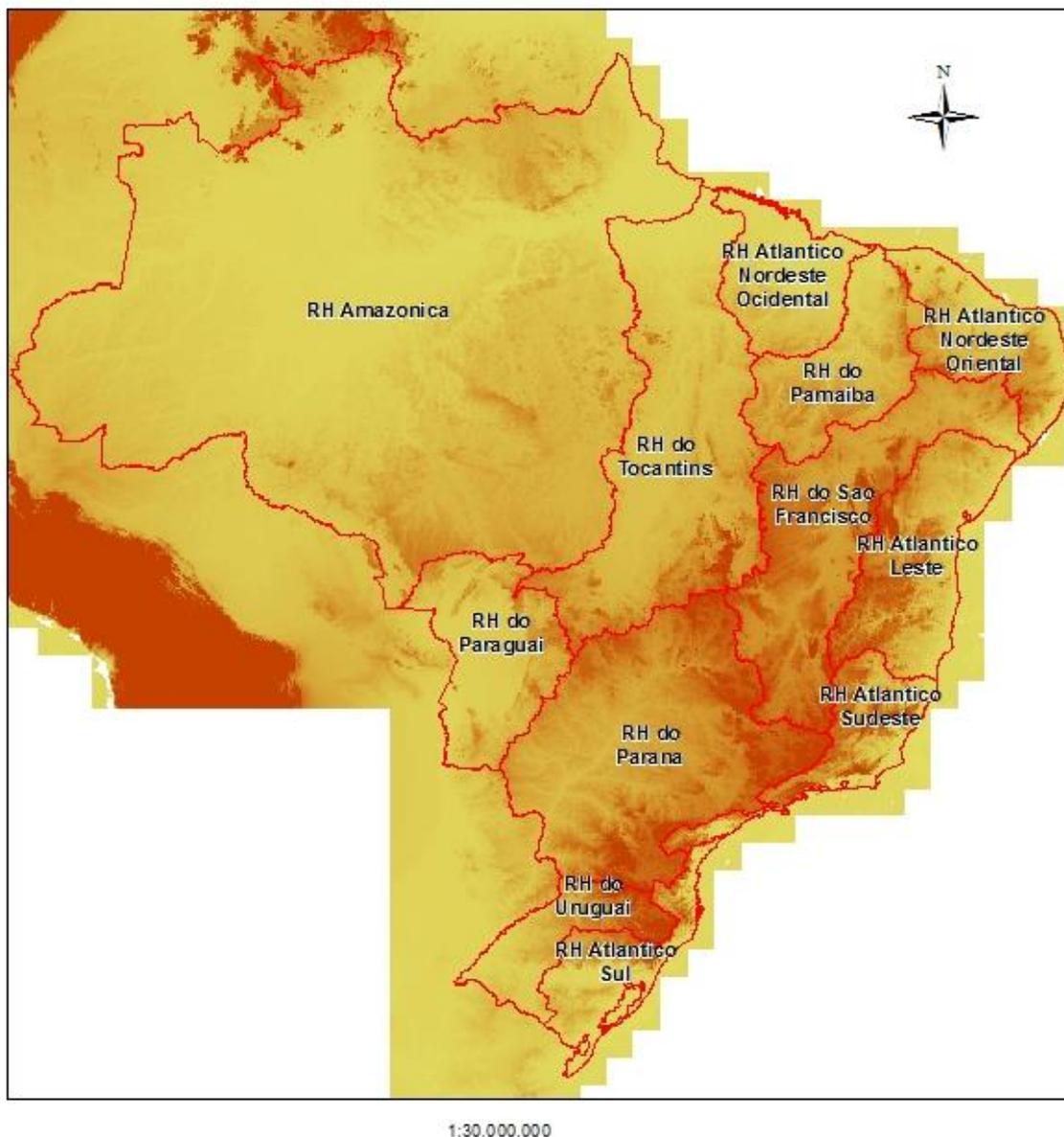


Figura 2: Distribuição e limites das Regiões Hidrográficas sobre o SRTM.

As ordens dos rios, primeiramente definidas por (HORTON, 1945) e depois modificadas por (STRAHLER, 1952) (STRAHLER, 1957) são utilizadas para hierarquizar rios. Os canais de primeira ordem não recebem afluentes; os canais de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem e só recebem afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem surgem da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e primeira ordens e assim sucessivamente (Figura 3).

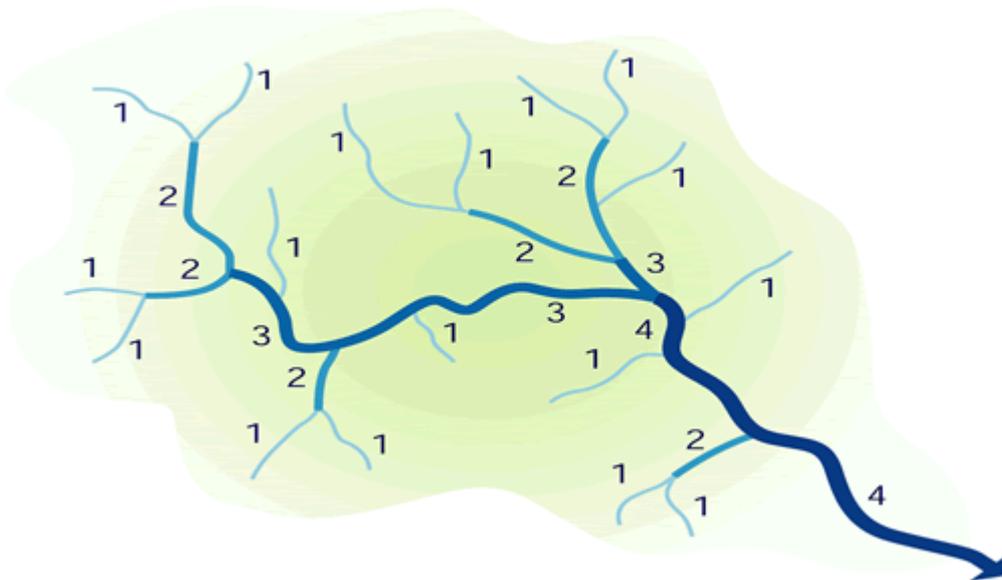


Figura 3: Exemplo de ordenamento de Strahler para rios.

O órgão responsável pelo mapeamento dos recursos hídricos no Brasil é o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Existe, no Brasil, a necessidade de mapeamentos sistemáticos, pois em um país com dimensões continentais como este há pouco levantamento de sua área em uma escala viável. Segundo o IBGE, apenas 13% da área do país foi mapeada na escala de 1:50.000 e em anos diferentes.

Enquanto a distribuição geográfica de lagos e reservatórios é relativamente bem conhecida (BIRKETT & MASON, 1995; DOWNING, 2006; LEHNER & DOLL, 2004; MEYBECK, 1984), ainda pouco se sabe sobre a quantidade e a distribuição de rios, especialmente no que se refere a sistemas de menores ordens. Concomitante a esta realidade, a discussão acerca da localização de corpos hídricos é mais intensa em lagos e reservatórios mesmo que exista um fluxo contínuo e conexo entre os pequenos, médios e grandes tributários, responsáveis pela formação dos grandes rios, os quais conduzem sedimentos até aos lagos e reservatórios. Tais lacunas evidenciam a grande importância de novos estudos nesta área.

1. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral:

- Mapear a rede hidrográfica brasileira e definir suas implicações limnológicas.

2.2. Objetivos específicos:

- Mensurar a extensão dos rios em território nacional utilizando o SRTM;
- Ordenar e estimar a porcentagem e a extensão das ordens (Strahler) dos rios.
- Obter a Densidade de Drenagem de cada região hidrográfica, bem como a densidade de cada ordem.
- Reconhecer padrões na drenagem das bacias hidrográficas brasileiras.

2. METODOLOGIA

3.1. Área de estudo

Todo território continental brasileiro foi contemplado neste trabalho, excluindo-se apenas os territórios ultramarinos, como Fernando de Noronha e Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Figura 4).

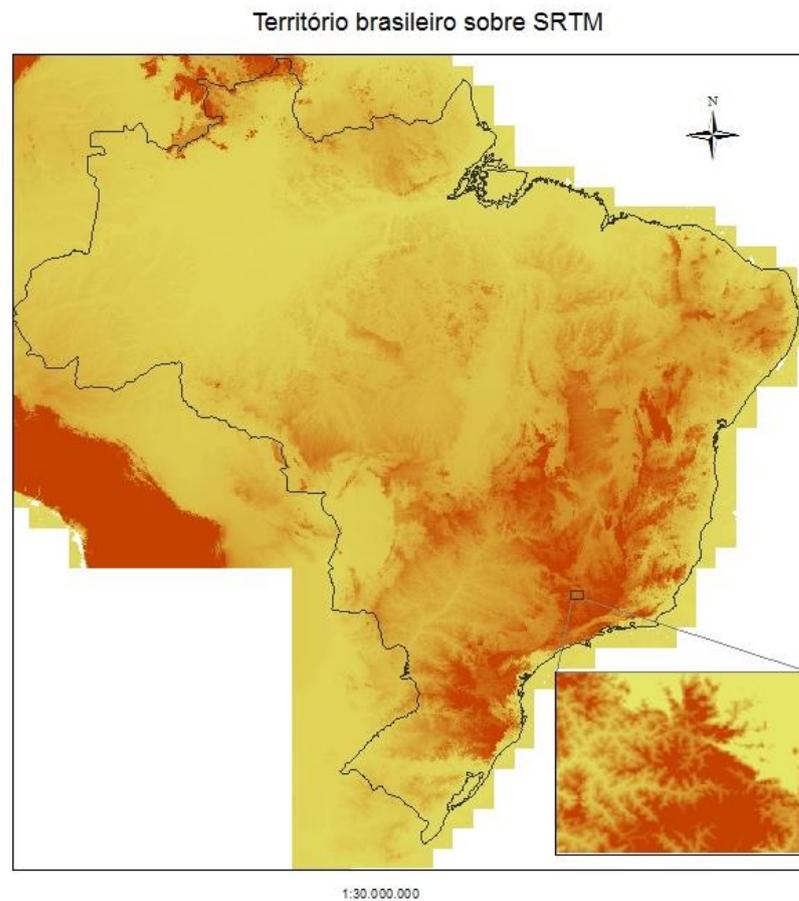


Figura 4: SRTM unificado sobre os limites do Brasil, no detalhe, o raster em sua resolução nativa

3.2. Materiais e métodos

A partir de procedimentos de modelagem hidrológica em geoprocessamento, as imagens e arquivos utilizados foram tratados para obter uma base de dados com

projeção cartográfica condizente com as dimensões da área de interesse, por meio das funções disponíveis no SIG.

3.2.1. Materiais utilizados

O tratamento de informações geográficas alocadas em grandes bases de dados demanda a utilização de máquinas e programas apropriados para tal. Os computadores disponíveis na atualidade comportam a execução de SIG's comerciais ou não de forma rápida e versátil.

Para a extração dos dados de rios (que tipo de dados) e ordens de Strahler foi utilizado o programa ArcGIS versão 10 (ESRI, 2012), o qual é um SIG com grande capacidade de análise, notadamente para problemas ambientais. O ArcGIS é um SIG de ampla distribuição mundial e com robusta biblioteca de análise para geoprocessamento. Este programa opera com os formatos de arquivos *raster* (ou imagem) e vetorial (ou *shapefile*). Estes formatos de arquivos são fundamentais para as análises feitas por geoprocessamento.

O formato *raster* é uma matriz numérica (também chamado “formato matricial”) que contém informação a cada pixel e tem uma resolução definida. Tal formato é amplamente utilizado em câmeras fotográficas digitais e como forma de armazenamento de imagens na internet.

O arquivo *raster* do SRTM é cedido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>). Contudo, o arquivo disponível atualmente se encontra com algumas imperfeições, tais como picos anômalos e áreas sem informação. Os *raster* utilizados neste trabalho foram obtidos do projeto Brasil em Relevo (EMBRAPA), oriundos do projeto de correção executado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) para sanar a ausência pontual de informação em pequenos agrupamentos de pixels (MIRANDA, COUTINHO e CARVALHO, 2005). Estas imagens foram unificadas em uma só imagem, que inclui todo o território nacional e alguns países da América do Sul.

Foram utilizados em algumas fases do trabalho dados no formato vetorial, especificamente denominados *shapefile*, os quais armazenam em arquivo a geometria das feições, através de pontos, linhas e polígonos, e informações atreladas à uma tabela de atributos. Os lagos, rios e exutórios foram representados pelo modelo vetorial na

análise de sua distribuição e análise geográfica, bem como em mensuração por área e comprimento.

3.2.2. Procedimentos adotados

Foram seguidas algumas etapas no intuito de preparar os dados geográficos obtidos das diversas fontes, bem como visando a geração dos planos de informação para a mensuração da rede de drenagem nacional por meio de tratamento numérico. Para tanto, alguns módulos de funções do SIG foram utilizados. Os comandos utilizados permitiram a produção das bases de dados e mapas.

As análises seguintes podem ser separadas em quatro momentos distintos, a saber:

- 1 – *Download* das imagens e dos vetores;
- 2 – Adequação do ambiente de trabalho a partir do módulo *Spatial Analyst Tools*;
- 3 – Bloco ou montagem de operações no *Spatial Analyst Tools*;
- 4 – Ajustes e refinamentos.

Os procedimentos adotados para análise dos dados e sua arquitetura metodológica está apresentada em um fluxograma das operações na Figura 5:

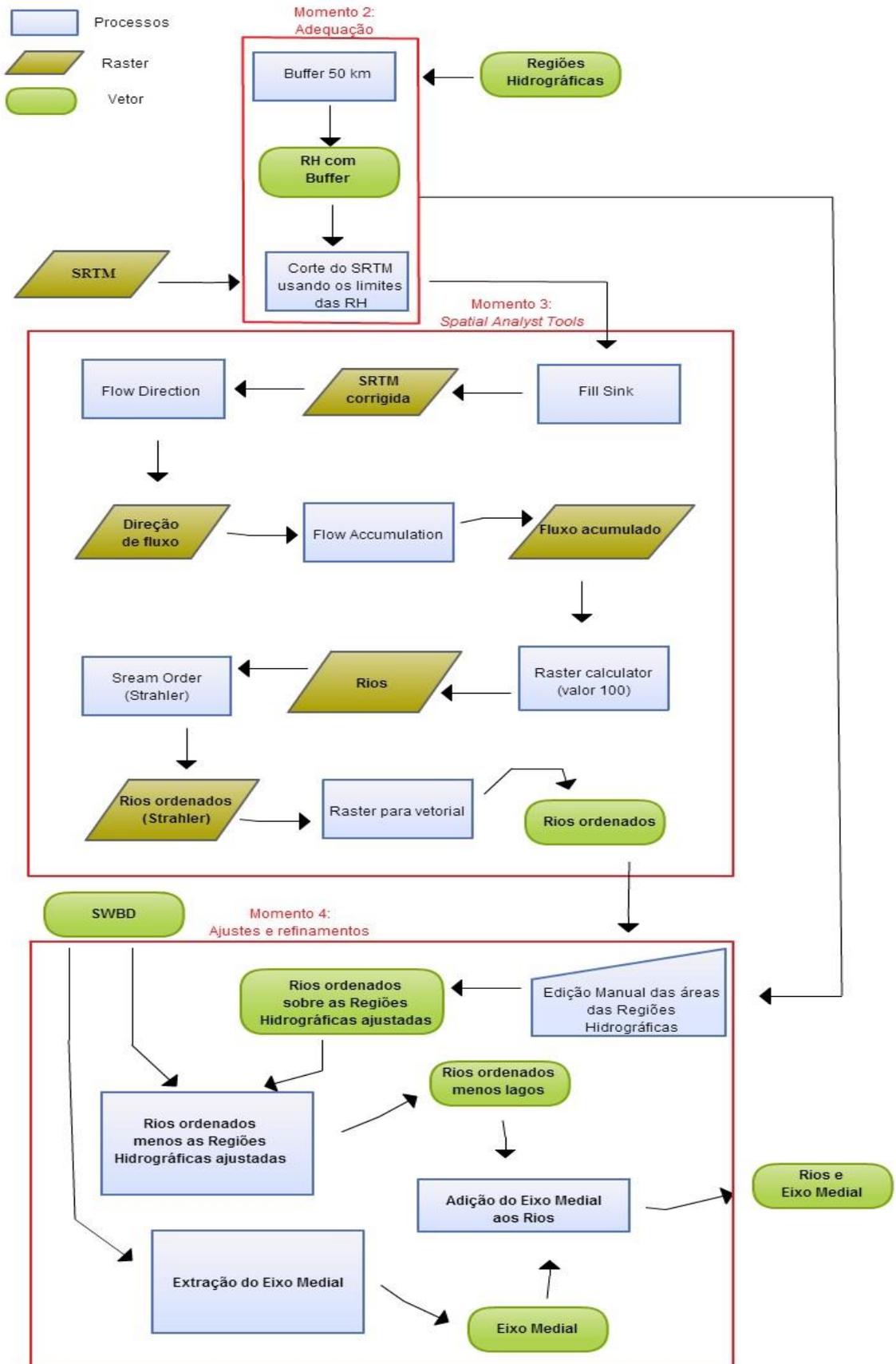


Figura 5: Fluxograma de operações no SIG para a geração dos dados.

Para fins de análise e divisão de compartimentos foram selecionadas as RH disponíveis no site SOSGISbr (<http://sosgisbr.com>) e o arquivo vetorial baixado tem o nome “Shape SIGEO com regiões hidrográficas nível 01”.

Com o arquivo vetorial das RH, aplicou-se o recorte no *raster* do SRTM por meio da máscara ou molde dessas regiões. Além disso, adotou-se uma margem de segurança, denominada *buffer*, de 5 km a cada RH. Este procedimento foi aplicado para que não houvesse rios que pudessem ser repetidos em duas RH diferentes, já que a delimitação das RH foi feita com base em algumas delimitações de bacias previamente executadas pelo IBGE e estas não utilizaram o SRTM. Foram gerados 12 *raster* das RH derivados do SRTM.

Dentro do pacote de extensões denominado *Spatial Analyst Tools* existe um conjunto de ferramentas específico para estudos de hidrologia, denominado *Hydrology*.

As metodologias aqui empregadas são derivadas de (O'CALLAGHAN e MARK, 1984) e melhoradas por (BAND, 1986). As funções de tratamento número da drenagem são amplamente utilizadas para análises de bacias hidrográficas e suas propriedades quanto ao uso das terras e gerenciamento de riscos no planejamento de ações públicas (ALVES SOBRINHO, OLIVEIRA e RODRIGUES, 2010); (HOTT, GUIMARÃES e MIRANDA, 2004); (HOTT, FURTADO e RIBEIRO, 2007). Para o tratamento da base altimétrica matricial foram utilizados alguns princípios de modelagem hidrológica numérica em geoprocessamento. Para a correta consistência do fluxo superficial no MDE SRTM foi utilizada a função *Fill Sink*, a qual preenche as depressões indesejadas a partir dos valores dos pixels vizinhos, eliminando-as assim como qualquer depressão no terreno e sumidouros, assumindo-se a inexistência destes no local real (Figura 6).

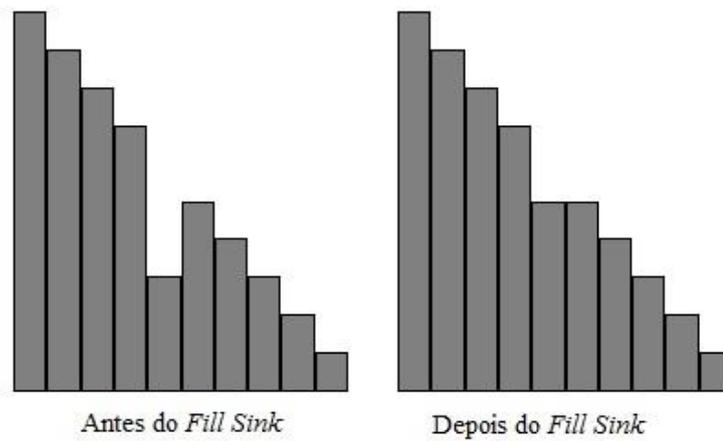
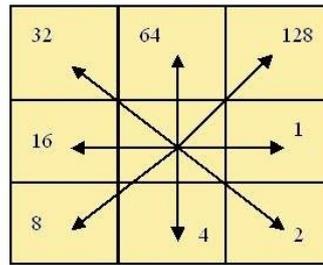
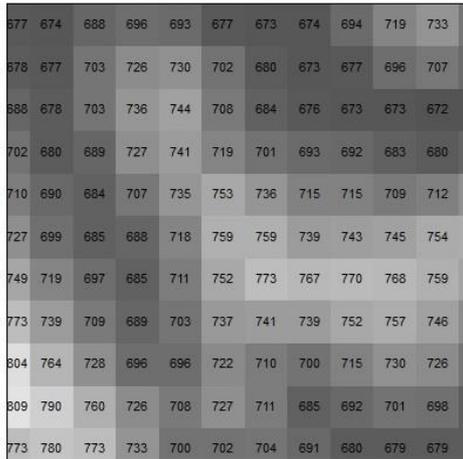


Figura 6: Fill Sink.

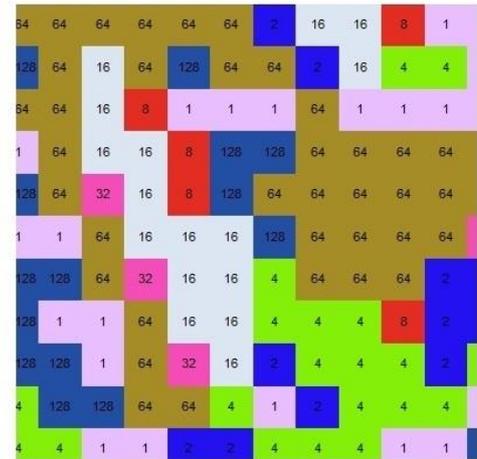
Com este preenchimento, a próxima ferramenta a ser utilizada, a *Flow Direction*, não encontra pontos de sumidouros indesejados sobre a superfície do relevo. Com a *Flow Direction*, criou-se o *raster* de direção de fluxo. O resultado direção de fluxo é um *raster* com valores inteiros de no máximo 8 bits (256 valores) e só são admitidos os valores 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128; se o valor for nulo, retorna como 0 (zero). Cada valor representa uma direção para qual um fluxo tende a ir (Figura 7). Os números resultantes da direção de fluxo são orientados de acordo com a rosa dos ventos (valor de pixel de 64 significa que o mesmo indica escoamento para a direção norte).



(a)



(b)



(c)

Figura 7: Raster de altitude para raster de direção de fluxo. (a) são os valores e suas respectivas direções; (b) é a altitude e (c) a direção de fluxo.

O passo seguinte foi verificar onde ocorre a acumulação deste fluxo que se dá concomitante à existência de maior concentração de direções. Esta acumulação de fluxo resulta em um caminho natural de menor energia por onde a água tende a moldar seu percurso, resultando num plano de informação onde os pixels mais claros informam um número maior de células à montante que fluem até um determinado ponto (Figura 8):



Figura 8: Acumulação de fluxo.

A partir do *raster* de acumulação de fluxo e da determinação das informações do ambiente de trabalho, diretório, tamanho de célula e extensão de saída, a ferramenta *Raster Calculator* foi utilizada para a extração da rede de drenagem.

A expressão utilizada foi:

“con([*raster flow accumulation*] > X, Y, SETNULL([*raster flow accumulation*]))”

Assim, cria-se uma condição (comando “com”) em que os valores de X devem ser maiores que o *raster flow accumulation* se a sentença for verdadeira, que ela substitua os valores maiores que X por Y, caso contrário (valores menores que X) ela retorna “NoData”. Neste estudo foram adotados $X = 100$ e $Y = 1$. O valor de “100” indica que a cada pixel recebe no mínimo uma micro bacia de 100 pixels de direção de fluxo para formar a acumulação de fluxo. Este processo gera um *raster* somente com os rios e nos locais onde estes inexistem, o *raster* retorna o valor “NoData” como a figura abaixo expressa:

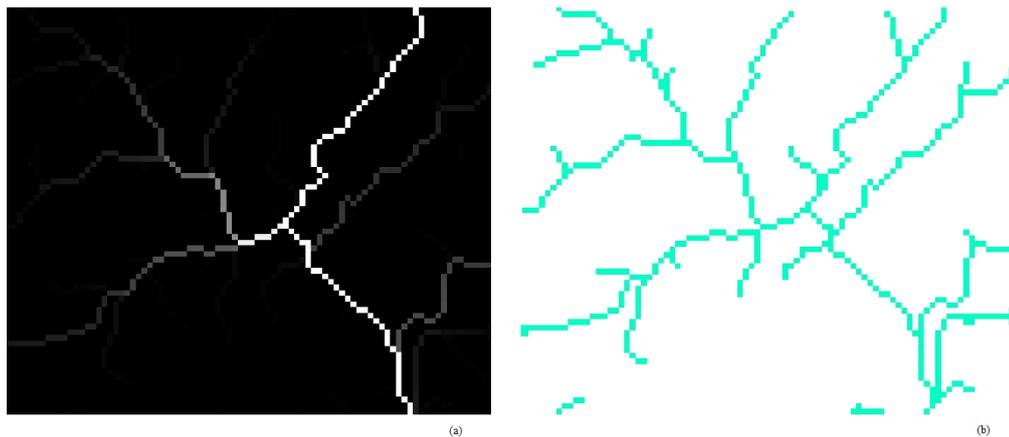


Figura 9: (a) Acumulação de fluxo com gradiente mais claro com maior número de células de acúmulo. (b) Rios extraídos sendo a parte sem informação “NoData”.

A partir da obtenção da rede de drenagem numérica, a mesma é refinada para deter uma única célula de largura, utilizando-se a função *Thin*.

A etapa posterior envolve os ordenamentos de acordo com Strahler na função “*Stream to Order*”. Os *input* de entrada para esta ferramenta são os *raster* com os rios extraídos e o de direção de fluxo. A partir deles, o *raster* de ordenamento é produzido conforme mostra a Figura 10, na qual cada cor representa uma ordem diferente:

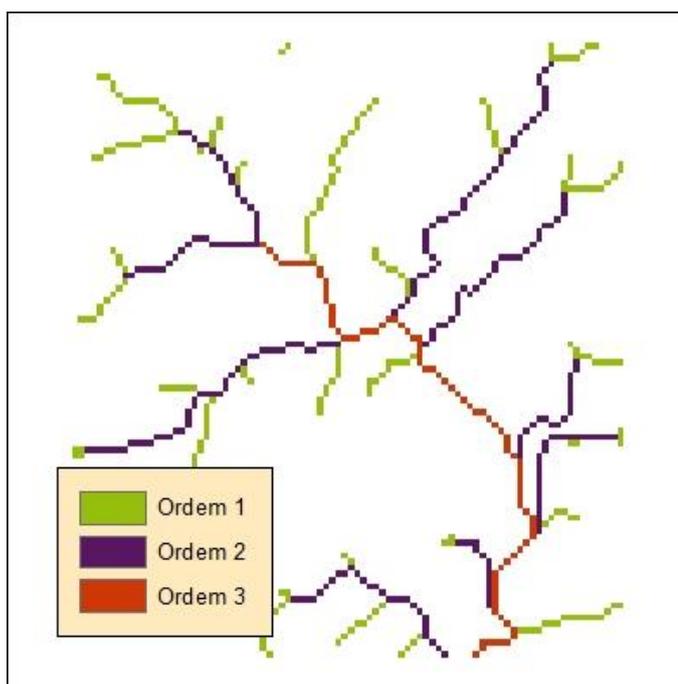


Figura 10: Mapa contendo a drenagem ordenada.

Após o ordenamento da drenagem numérica, esta foi convertida em vetor para cálculo de distância de segmentos.

Findado o uso do *Spatial Analyst Tools*, o próximo passo é manualmente excluir os rios que não são pertencentes às suas regiões hidrográficas. Para tanto, as RH com *buffer* foram editadas e este procedimento foi adotado para excluir do somatório os rios e córregos que podem ocorrer em duas RH diferentes ao mesmo tempo (exemplo na Figura11):

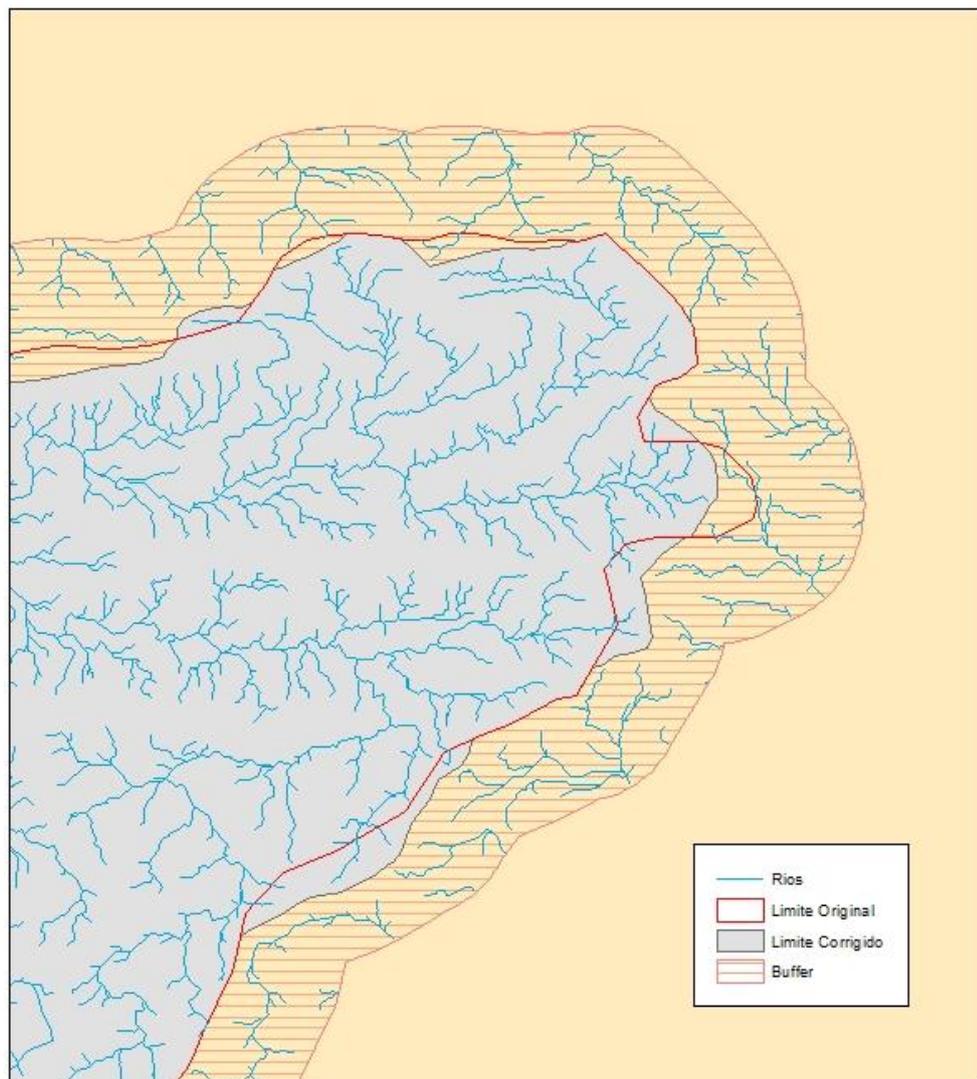


Figura 11: Comparativo entre RH com *buffer* e sem *buffer*.

Após o bloco da *Spatial Analyst Tools*, os rios e córregos devem estar delimitados, porém com um defeito do espalhamento superficial sobre as grandes massas de água, gerando-se drenagem espúria. Neste momento, foi utilizado o SWBD

para apagar todos os rios e córregos mal interpretados pelo programa que adquirem esta feição (Figura12):

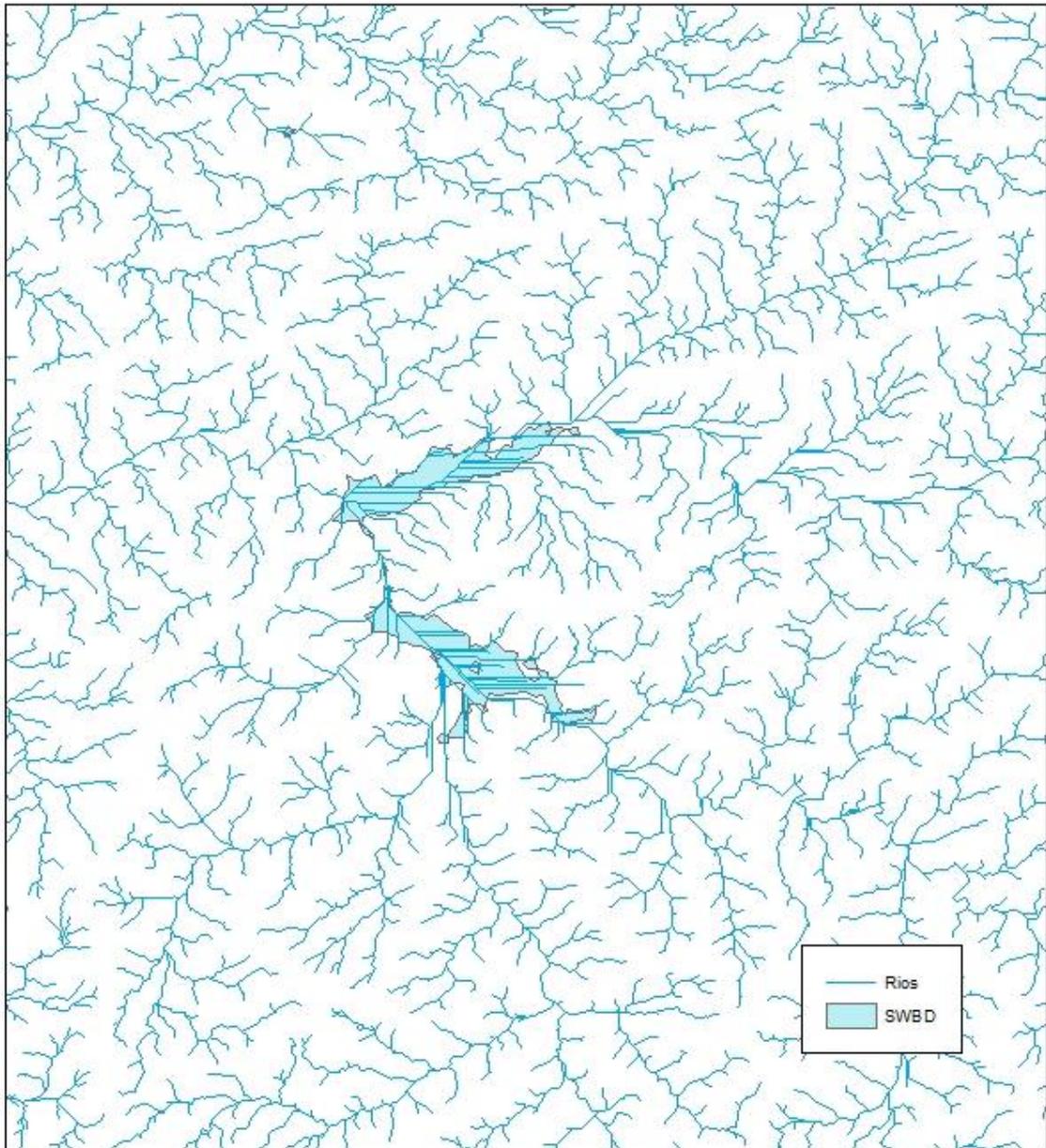


Figura 12: Erros formados pelas linhas paralelas do SRTM nos lagos.

A partir do Próprio SWBD foi feita a extração do eixo medial de cada polígono. O eixo medial, descrito por (BLUM, 1967), é também conhecido como esqueleto topológico e se define pelo fecho do conjunto de pontos do plano que possuem pelo menos dois pontos mais próximos a si (exemplo na Figura 13). (MCALLISTER e SNOEYINK, 2000) e (CHRISTENSEN, 1999) assumem que para uma generalização cartográfica, o eixo medial de um corpo hídrico seria a linha central do rio.

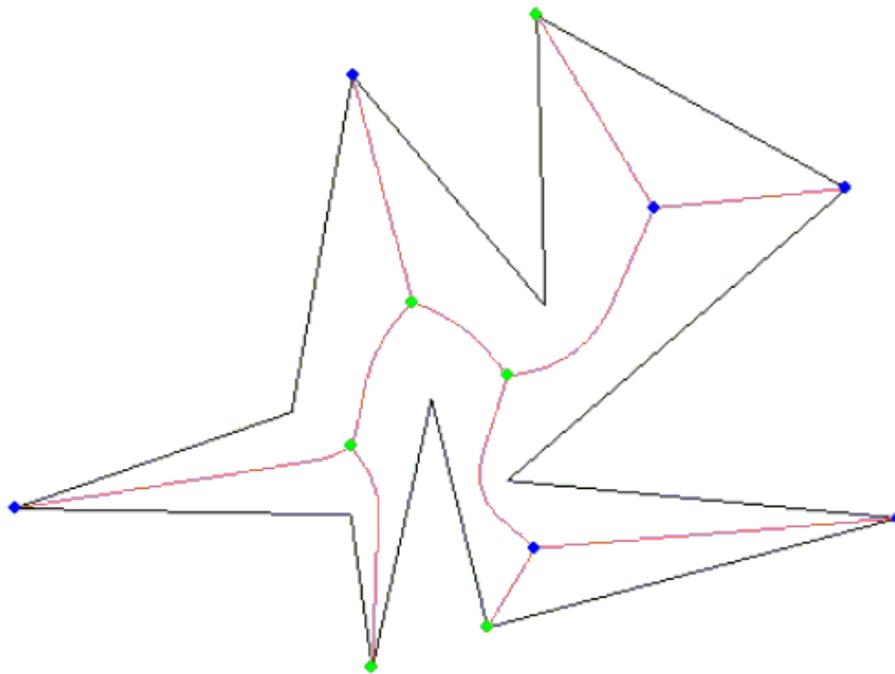


Figura 13: Aplicações do eixo medial. Em vermelho o eixo medial e em preto o contorno do polígono (Fonte: <http://www.ndl.kiev.ua/content/centerline>).

Após a extração do eixo medial de cada polígono, estes foram reintroduzidos no *shape* de rios e o ordenamento de Strahler foi refeito para categorizar os novos rios.

Ao fim das análises por SIG, as ordens de cada segmento de reta dos rios foram mensuradas para se saber sua extensão e a partir de então, obteve-se a densidade de drenagem de cada RH. A densidade de drenagem é a divisão do comprimento da rede de drenagem pela área da RH.

Outra informação extraída do comprimento de cada ordem foi o R^2 da função exponencial representada em um gráfico de base logarítmica de 10. O R^2 , também chamado de coeficiente de determinação, mede a porcentagem da explicação da variação da variável dependente pela variação das variáveis independentes.

Os valores deste coeficiente de determinação variam entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais previsível é a sequência numérica da amostragem pesquisada.

Sob esta ótica, a base logarítmica foi adotada para comparar as grandezas de valores entre as ordens, visto que existe uma grande discrepância entre as ordens obtidas

no presente estudo. Além disso, o R^2 foi extraído com o intuito de explicar uma possível progressão entre os dados estimados.

3. RESULTADOS

De acordo com o levantamento por SRTM realizado neste trabalho, o Brasil possui uma extensão total de 7.325.672 Km de rios e córregos. A análise de ordenação de Strahler indicou que os rios de primeira ordem são responsáveis por mais de 50% da extensão total de rios no Brasil (Tabela 1), havendo decréscimo da extensão com o aumento da ordem (Figura 14). Foi observada uma forte correlação ($R^2 = 0,97$) entre extensão total e ordem de rios brasileiros. O mesmo padrão foi observado nas RH, individualmente (Figura 2). O fator de correlação (R^2) para esta correlação foi alto em todas as RH, variando de 0,896 na RH Atlântico Noroeste Ocidental a 0,999 nas RH São Francisco e Atlântico Sudeste.

Tabela 1: Extensão dos rios, porcentagem da extensão total e densidade de drenagem para cada ordem de Strahler, em todo o território brasileiro.

Ordem	Extensão (Km)	Extensão (%)	Densidade de Drenagem (km/km ²)
1	3.774.335,60	51,522	0,4430
2	1.788.329,70	24,412	0,2100
3	897.637,60	12,253	0,1060
4	436.092,70	5,953	0,0510
5	215.835,20	2,946	0,0250
6	113.407,50	1,548	0,0130
7	61.280,10	0,837	0,0070
8	22.729,30	0,31	0,0030
9	13.081,70	0,179	0,0020
10	1.096,80	0,015	0,0001
11	1.845,90	0,025	0,0002
Total	7.325.672	100	0,86

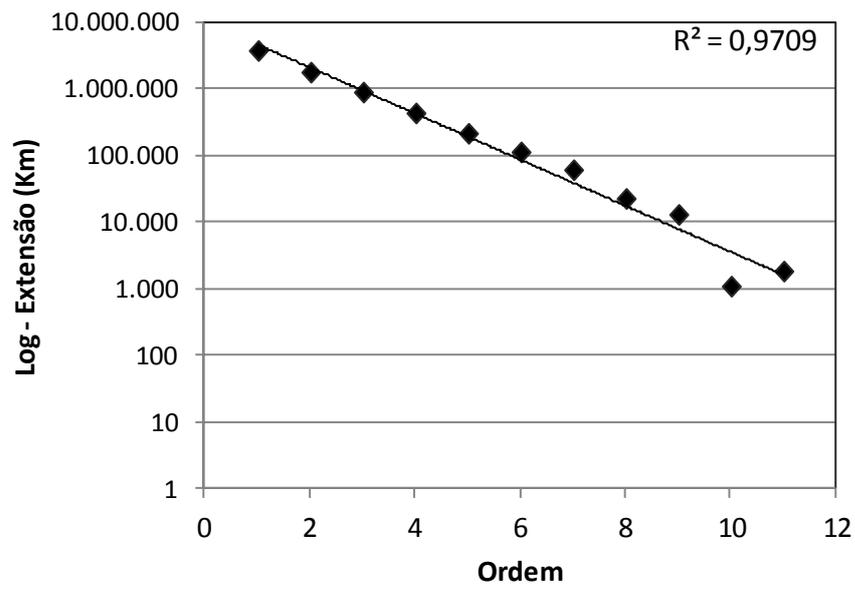


Figura 14: Relação entre ordem dos rios (Strahler) e o somatório das extensões dos rios de cada ordem, para todo o território brasileiro. A linha sólida representa a tendência exponencial de variação, acompanhada do seu coeficiente de correlação (R^2).

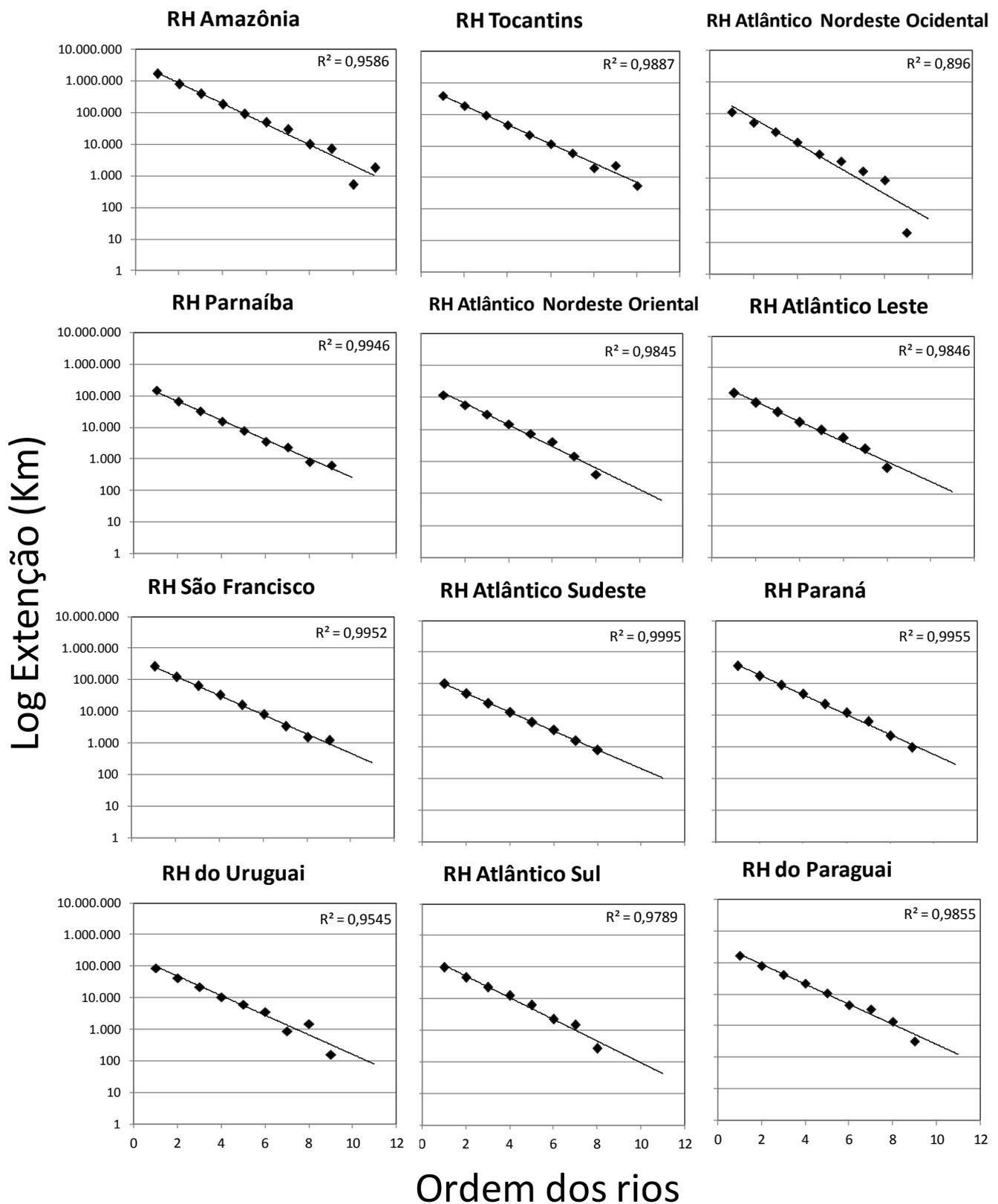


Figura 15: Relação entre ordem de Strahler e o somatório das extensões dos rios de cada ordem, para cada uma das RH. O eixo vertical está em escala logarítmica. As linhas sólidas representam a tendência exponencial de variação, acompanhadas dos R².

Da extensão total de rios no Brasil, quase 50% correspondem aos sistemas localizados na RH Amazônica, 10% na RH Tocantins, 10% na RH Paraná, 7% na RH São Francisco e menos de 5% em cada uma das demais RH (Tabela 2). Já com relação à densidade de drenagem, que leva em consideração a área de drenagem, a RH Amazônica (0,87 km/km²) apresentou valor inferior às RHs do Uruguai (1,03 km/km²), Atlântico Sul (1,02 km/km²), Atlântico Sudeste e do Paraguai (0,92 km/km²). As duas RHs mais densamente drenadas (do Uruguai e Atlântico Sul) foram as que apresentaram menor extensão total de rios.

Tabela 2: Extensão dos rios, porcentagem da extensão total no Brasil e densidade de drenagem em cada região hidrográfica brasileira.

Região Hidrográfica	Extensão (Km)	Extensão (%)	Densidade de Drenagem (km/km²)
RH Amazônia	3.351.113	45,7	0,87
RH Tocantins	773.127	10,6	0,84
RH Paraná	723.366	9,9	0,82
RH São Francisco	514.314	7,0	0,81
RH do Paraguai	333.423	4,6	0,92
RH Atlântico Leste	316.539	4,3	0,82
RH Parnaíba	283.073	3,9	0,85
RH Atlântico Nordeste Oriental	237.504	3,2	0,83
RH Atlântico Nordeste Ocidental	225.637	3,1	0,82
RH Atlântico Sudeste	196.433	2,7	0,92
RH Atlântico Sul	190.942	2,6	1,02
RH do Uruguai	180.201	2,5	1,03
TOTAL	7.325.672	100	0,86

A área ocupada por rios no Brasil e em cada uma de suas RH foi calculada utilizando as espessuras de rios de cada ordem de Strahler reportadas por Downing et al. (2012) multiplicadas pelos valores de extensão estimados neste trabalho. A área ocupada por rios no Brasil é de 109.849 Km². As ordens 4 a 9 foram as que apresentaram maior área total considerando todo o território brasileiro (Tabela 3, Figura 16). As mesmas ordens apresentaram as maiores áreas considerando cada RH separadamente (ver Anexo 1). A área ocupada por rios em cada RH brasileira variou de 2.213 Km² na RH Atlântico sul a 51.531 Km² na RH Amazônica (Tabela 4).

Tabela 3: Área total dos rios e porcentagem da área total para cada ordem de Strahler, em todo o território brasileiro. Dados calculados com base nas espessuras das ordens de rios em Downing et al. (2012).

Ordem	Área (Km2)	Área (%)
1	7171	6,5
2	4650	4,2
3	6732	6,1
4	11993	10,9
5	15691	14,3
6	22024	20,0
7	15014	13,7
8	11628	10,6
9	12931	11,8
10	1128	1,0
11	888	0,8
Total	109.849	100

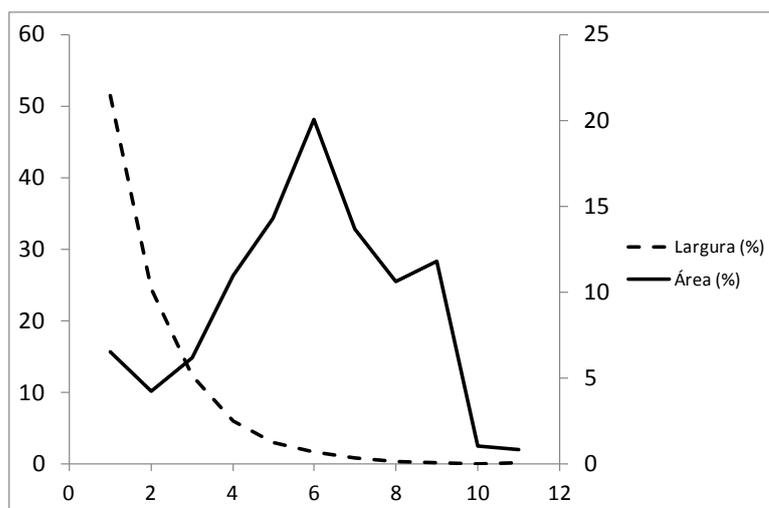


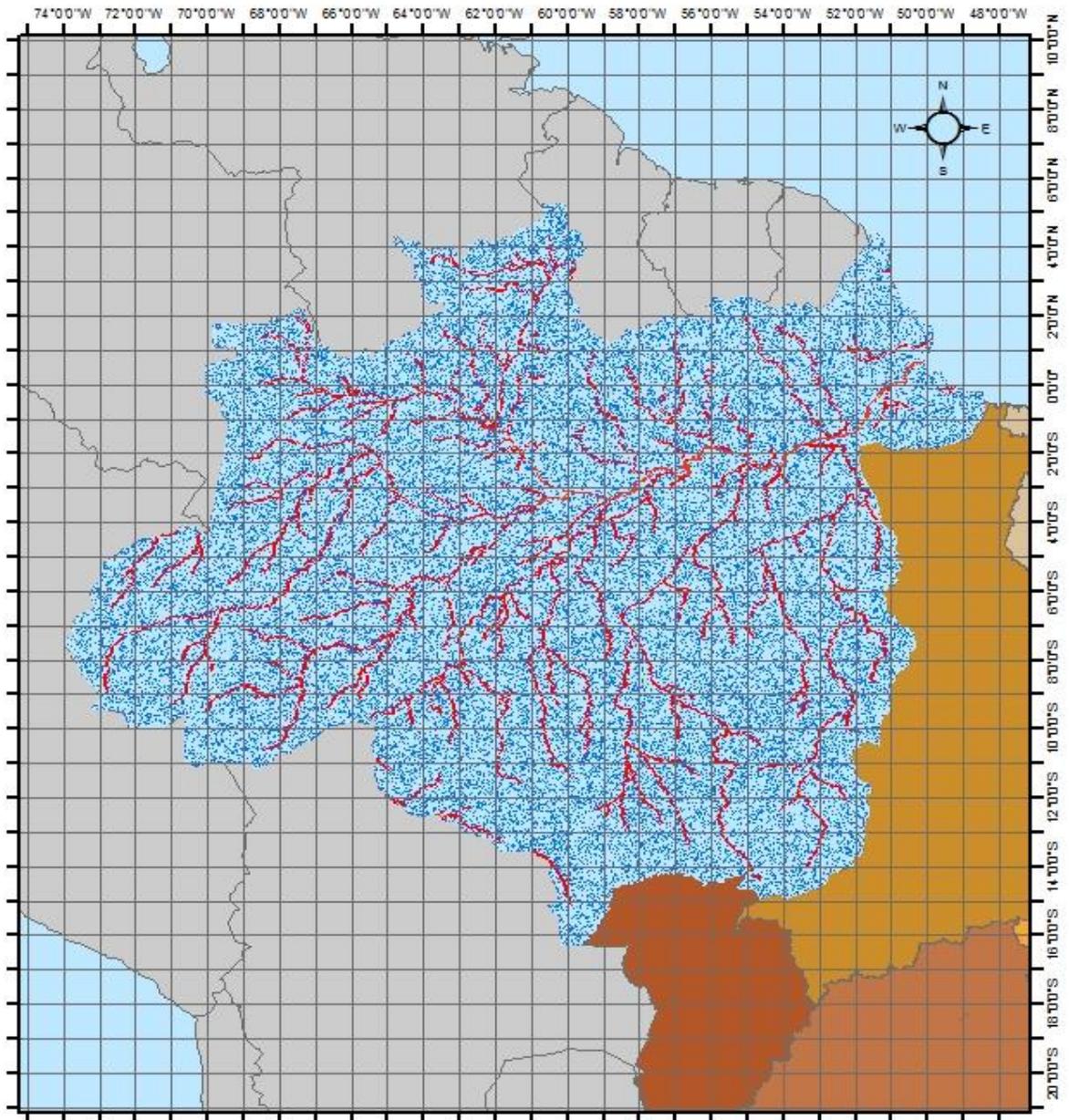
Figura 16: Fração da extensão e área total de rios em função da ordem de Strahler no Brasil. Os dados de largura foram extraídos de Downing et al. (2012).

Tabela 4: Área total dos rios e porcentagem da área total no Brasil em cada região hidrográfica brasileira. Dados calculados com base nas espessuras das ordens de rios em Downing et al. (2012).

Região Hidrográfica	Área (Km2)	Área (%)
RH Amazônia	51531	46,9
RH Tocantins	12653	11,5
RH Paraná	2903	2,6
RH São Francisco	4056	3,7
RH do Paraguai	2939	2,7
RH Atlântico Leste	4287	3,9
RH Parnaíba	7692	7,0
RH Atlântico Nordeste Oriental	2721	2,5
RH Atlântico Nordeste Ocidental	10759	9,8
RH Atlântico Sudeste	3112	2,8
RH Atlântico Sul	2213	2,0
RH do Uruguai	4983	4,5
TOTAL	109.849	100

Para cada uma das RH brasileiras, foram gerados mapas detalhados da rede de drenagem (Mapas 1 a 12).

RH AMAZÔNIA



Localização:



1:21.000.000

Datum WGS-84

Fonte: SRTM, IBGE

Legenda:

Ordem Strahler

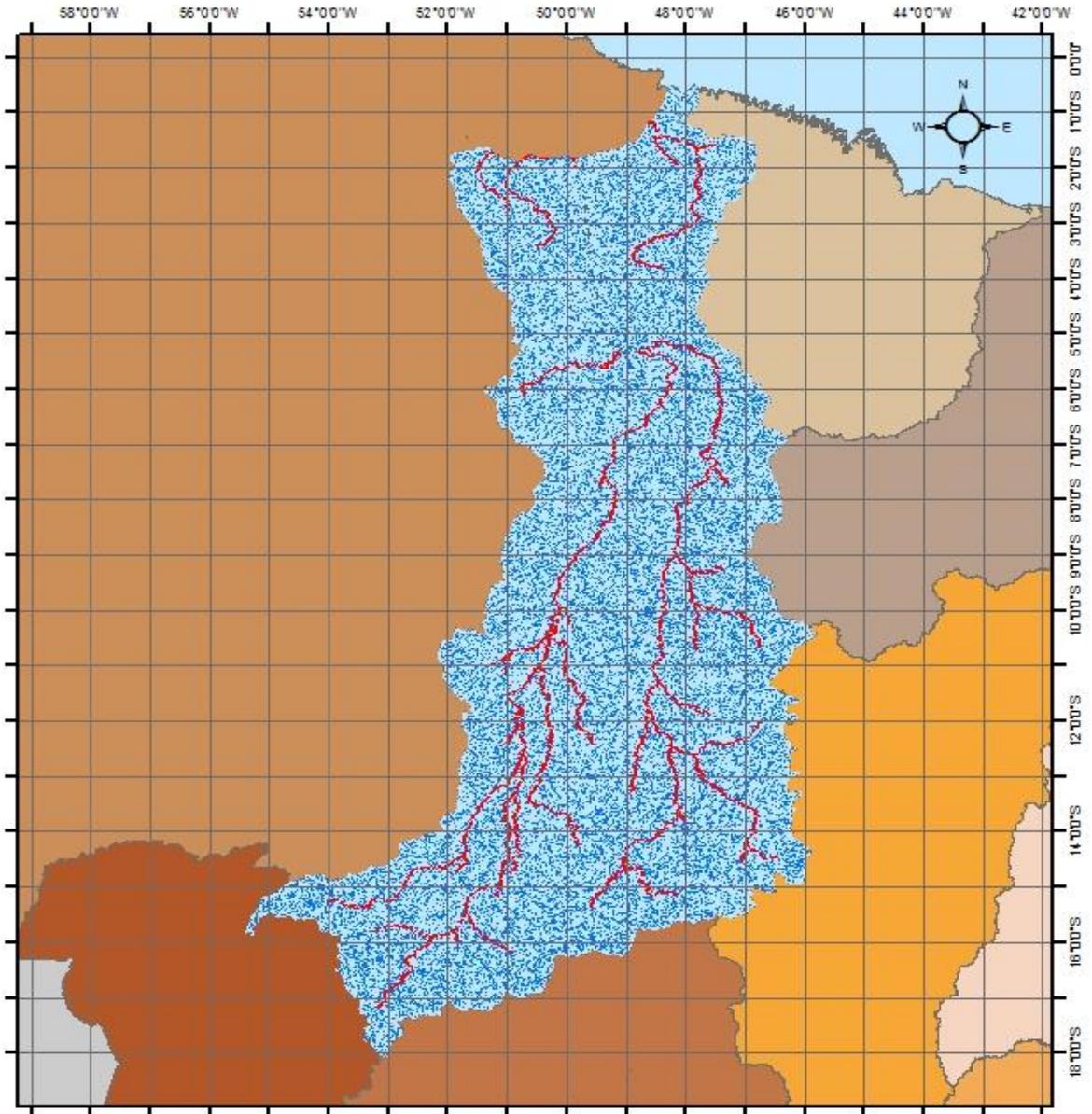
— 1; 2

— 3; 4; 5; 6

— 7; 8; 9; 10; 11

Mapa 1: Distribuição dos rios na RH Amazônia.

RH TOCANTINS



Localização:



1:13.000.000

Datum WGS-84

Fonte: SRTM, IBGE

Legenda:

Ordem Strahler

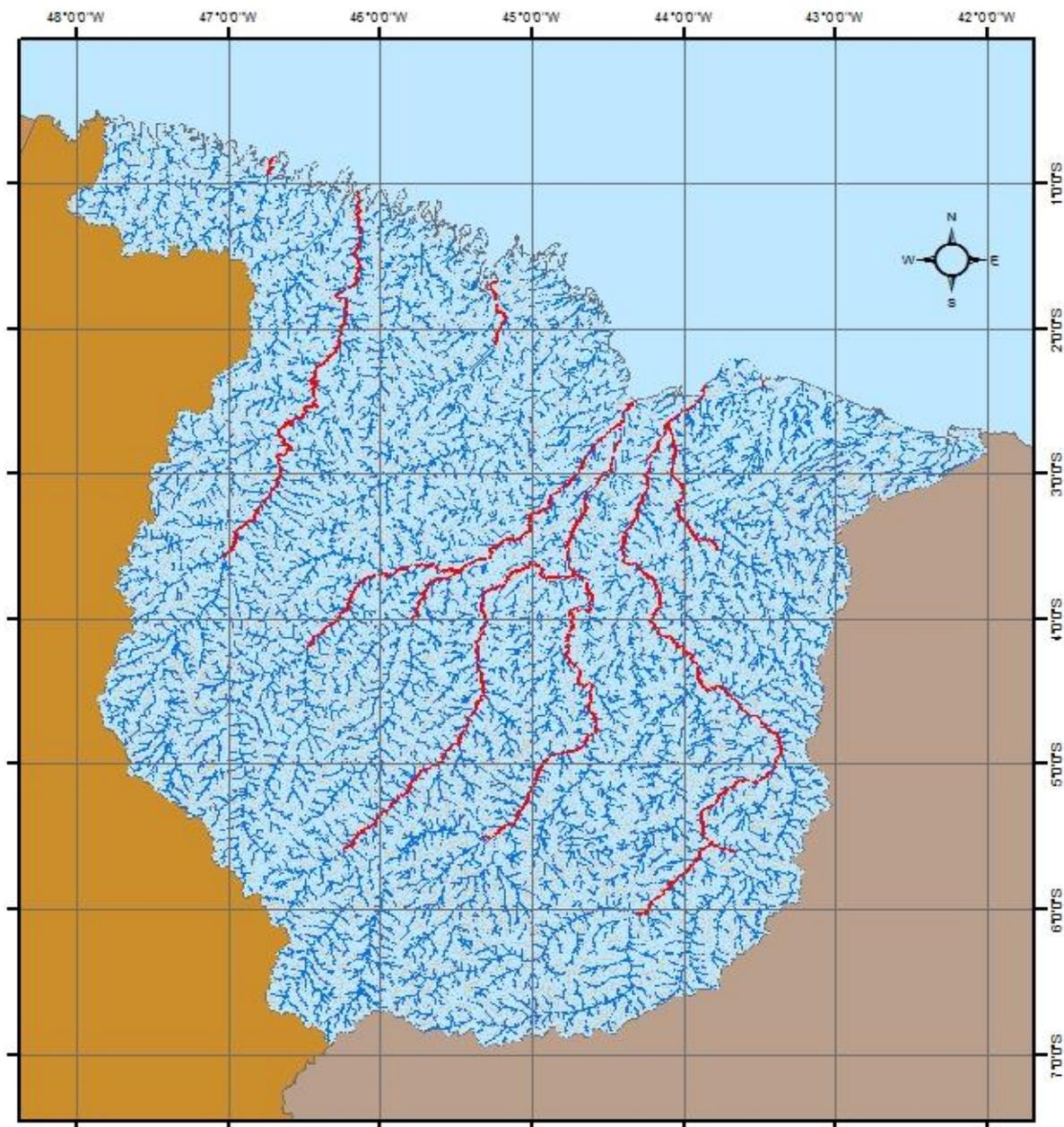
— 1; 2

— 3; 4; 5; 6

— 7; 8; 9; 10

Mapa 2: Distribuição dos rios na RH Tocantins.

RH ATLÂNTICO NORDESTE OCIDENTAL



Localização:



1:5.000.000

Datum WGS-84

Fonte: SRTM, IBGE

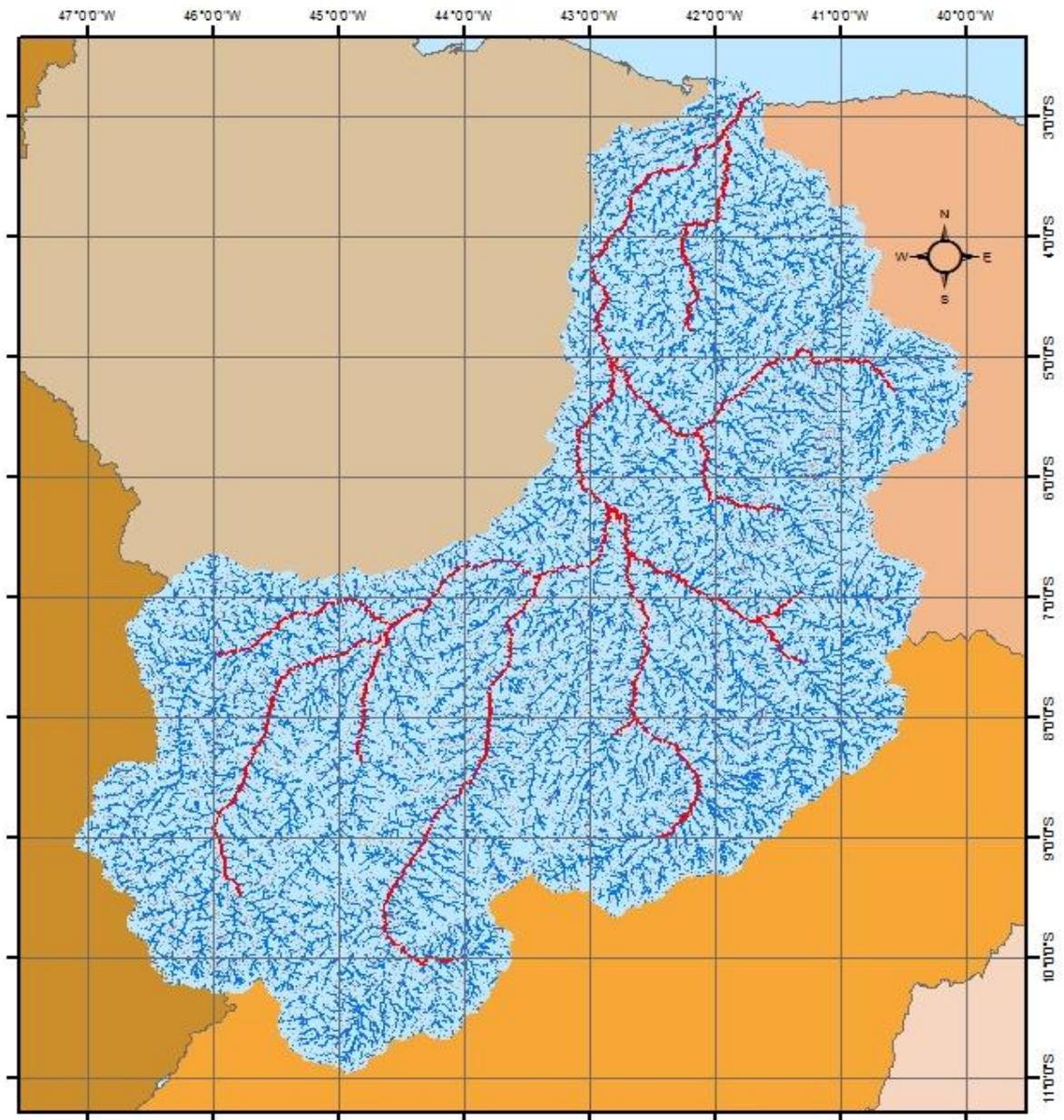
Legenda:

Ordem Strahler

- 1; 2
- 3; 4; 5; 6
- 7; 8; 9

Mapa 3: Distribuição dos rios na RH Atlântico Nordeste Ocidental.

RH PARNAÍBA



Localização:



1:6.000.000

Datum WGS-84

Fonte: SRTM, IBGE

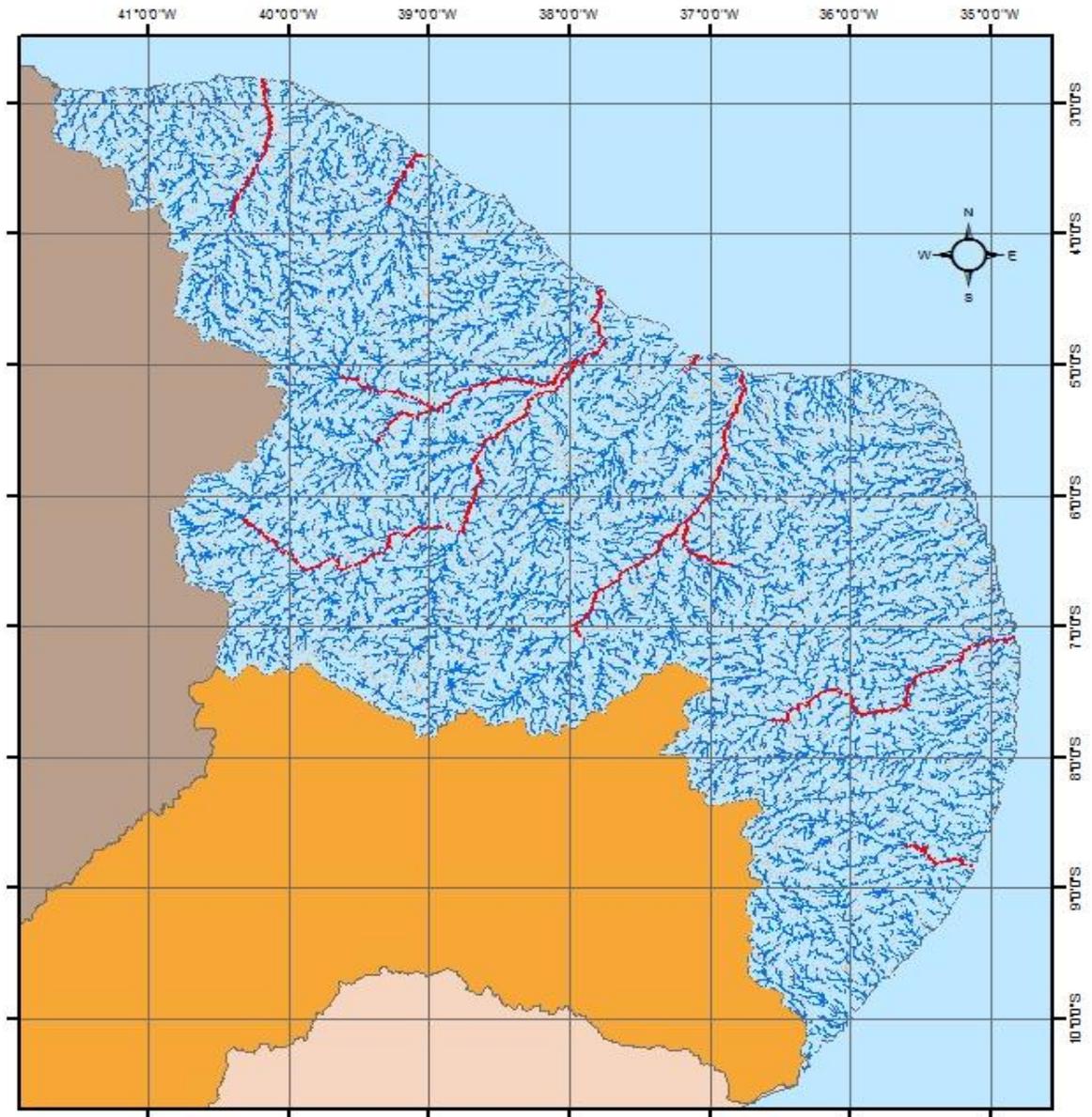
Legenda:

Ordem Strahler

- 1; 2
- 3; 4; 5; 6
- 7; 8; 9

Mapa 4: Distribuição dos rios na RH Parnaíba.

RH ATLÂNTICO NORDESTE ORIENTAL



Localização:



1:5.500.000

Datum WGS-84

Fonte: SRTM, IBGE

Legenda:

Ordem Strahler

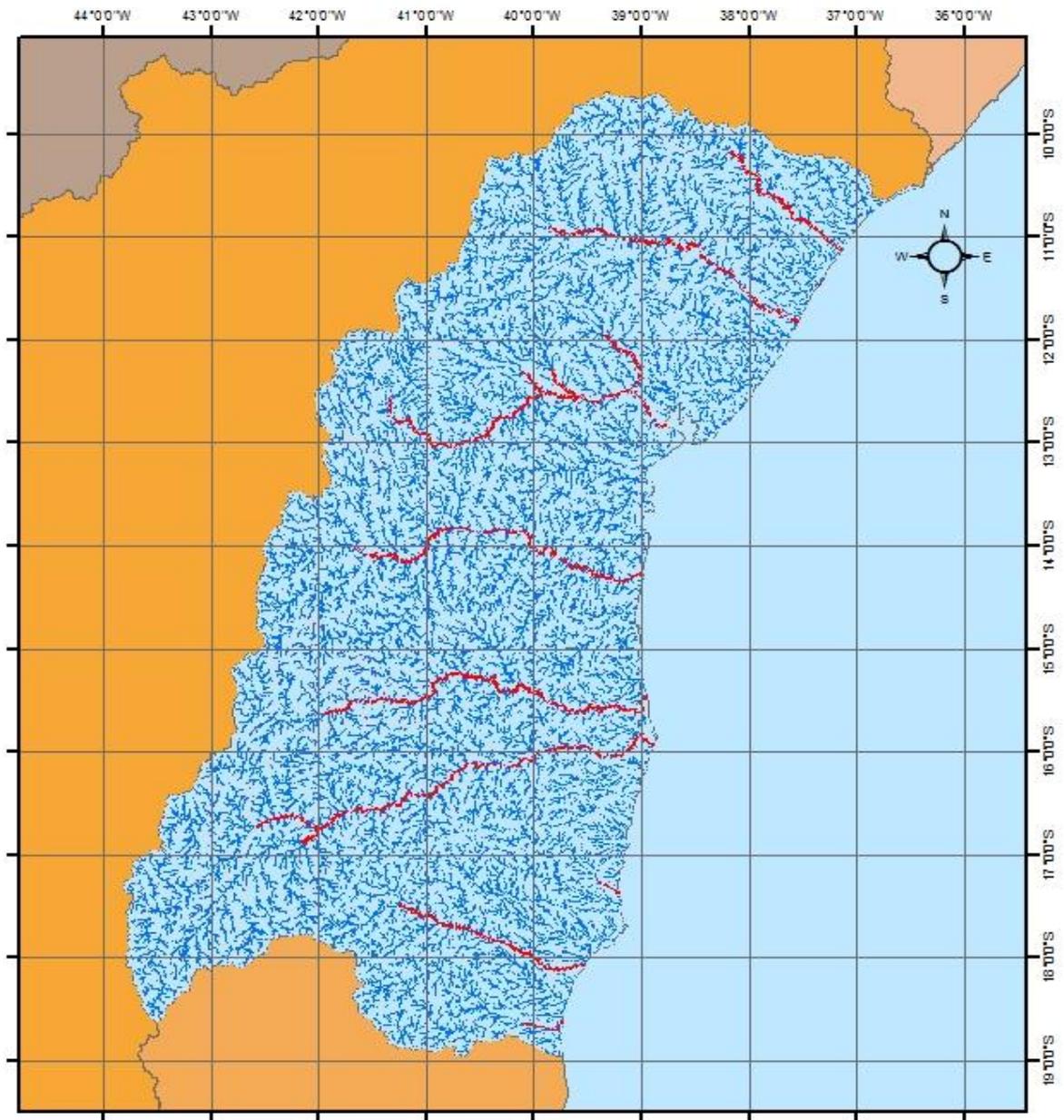
— 1; 2

— 3; 4; 5; 6

— 7; 8

Mapa 5: Distribuição dos rios na RH Atlântico Nordeste Oriental.

RH ATLÂNTICO LESTE



Localização:



1:7.000.000

Datum WGS-84

Fonte: SRTM, IBGE

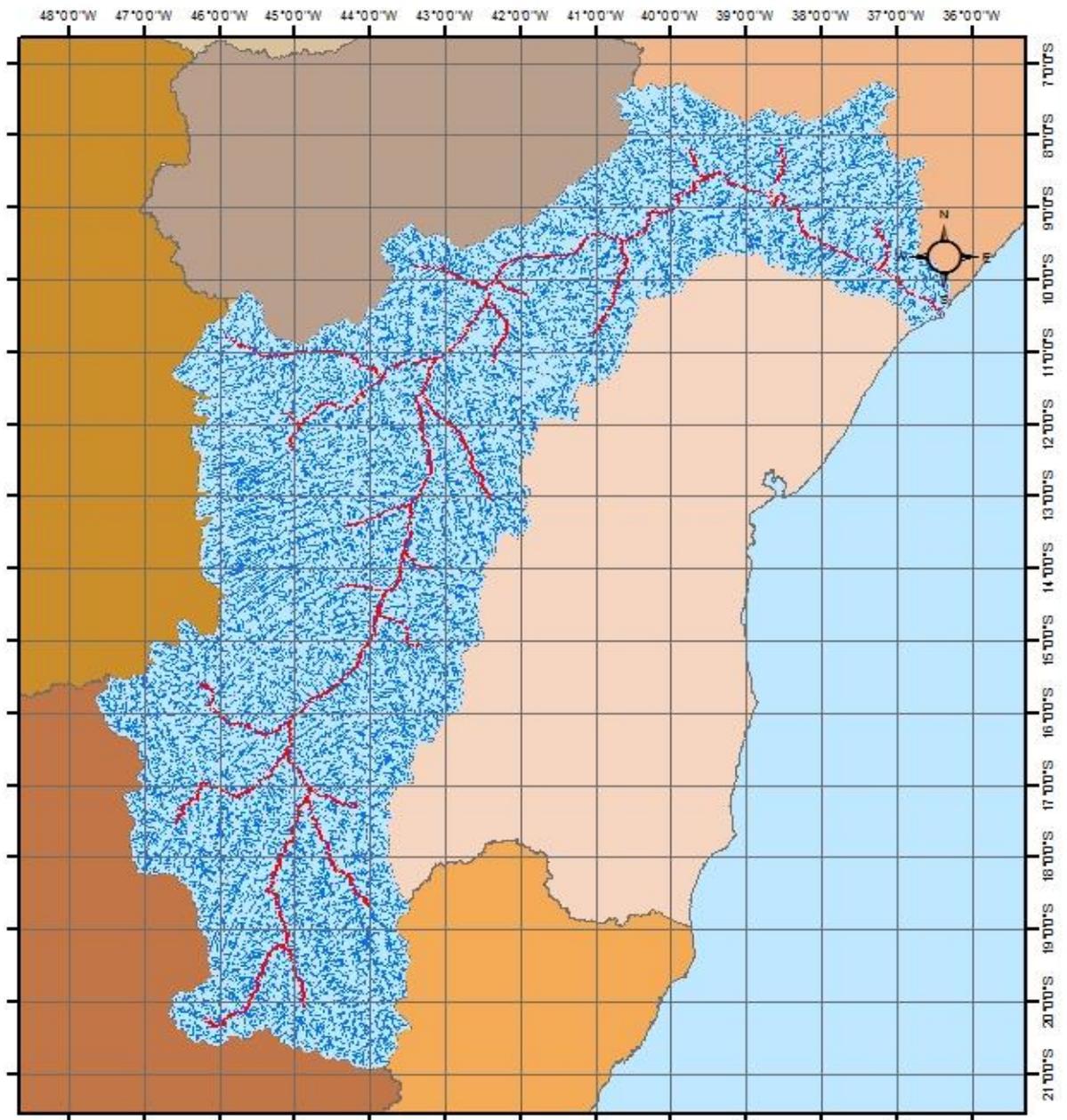
Legenda:

Ordem Strahler

- 1; 2
- 3; 4; 5; 6
- 7; 8

Mapa 6: Distribuição dos rios na RH Atlântico Leste

RH SÃO FRANCISCO



Localização:



1:10.000.000

Datum WGS-84

Fonte: SRTM, IBGE

Legenda:

Ordem Strahler

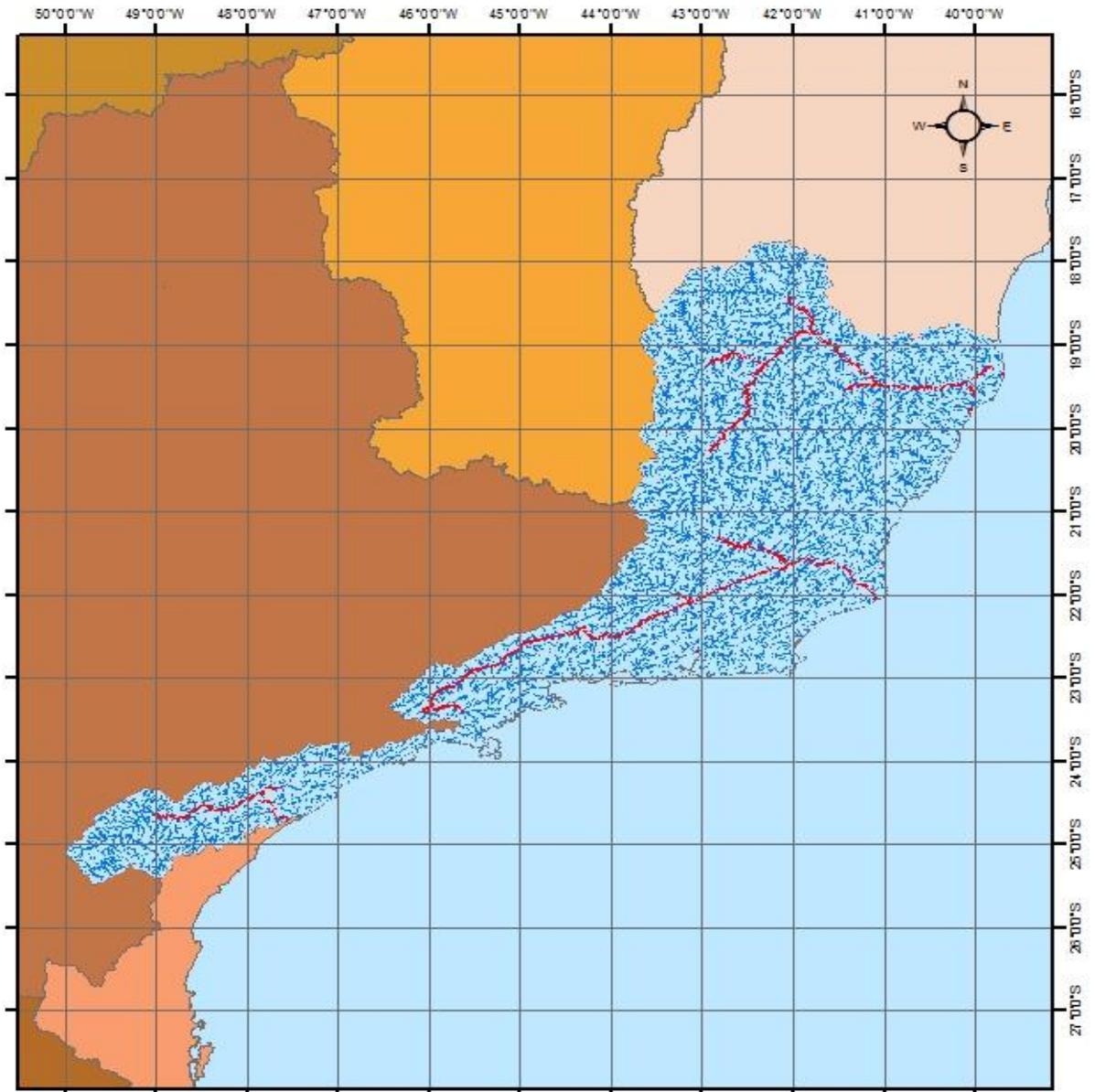
— 1; 2

— 3; 4; 5; 6

— 7; 8; 9

Mapa 7: Distribuição dos rios da RH São Francisco

RH ATLÂNTICO SUDESTE



Localização:



1:8.500.000

Datum WGS-84

Fonte: SRTM, IBGE

Legenda:

Ordem Strahler

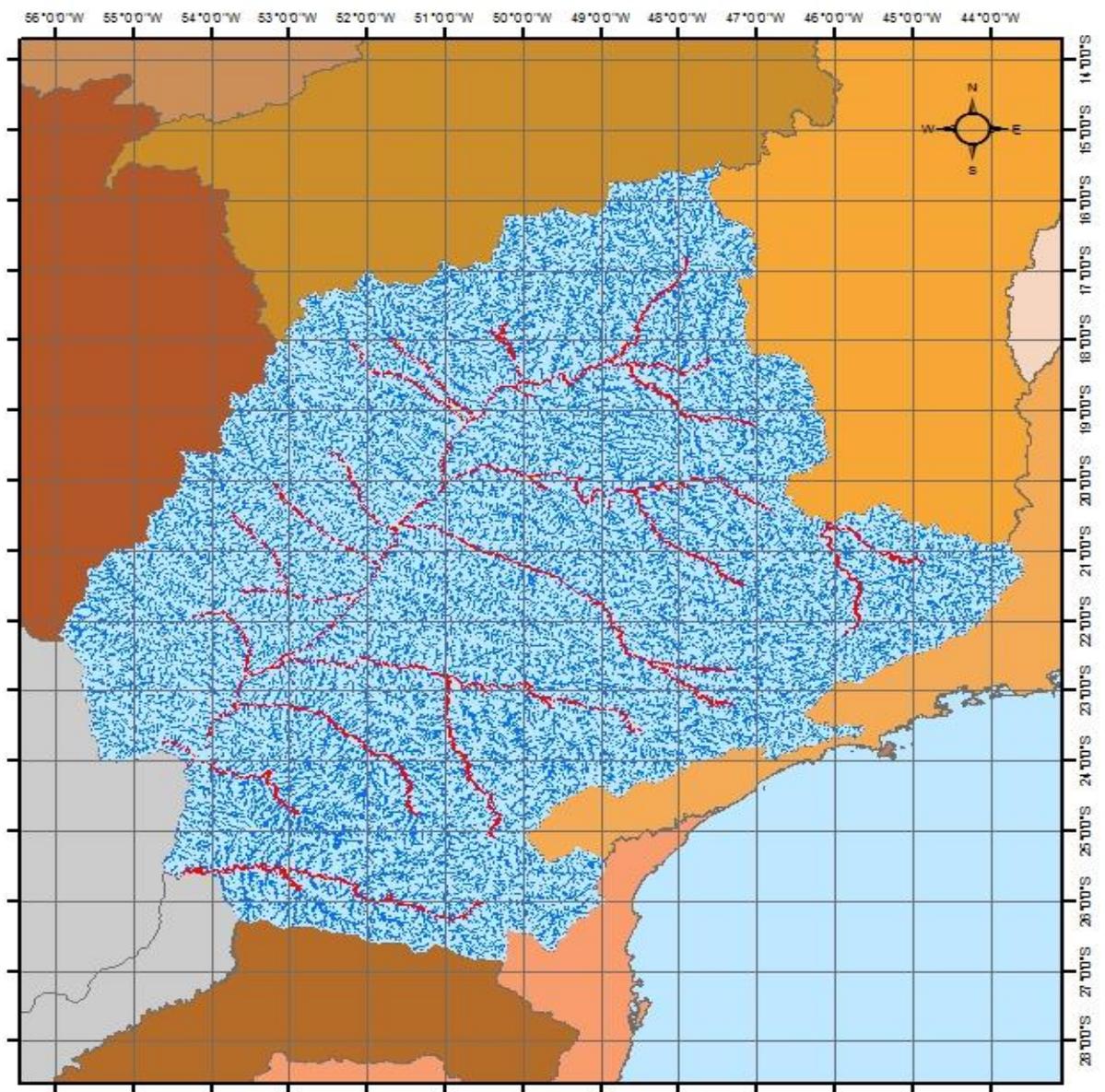
— 1; 2

— 3; 4; 5; 6

— 7; 8

Mapa 8: Distribuição dos rios na RH Atlântico Sudeste

RH PARANÁ



Localização:



1:10.000.000

Datum WGS-84

Fonte: SRTM, IBGE

Legenda:

Ordem Strahler

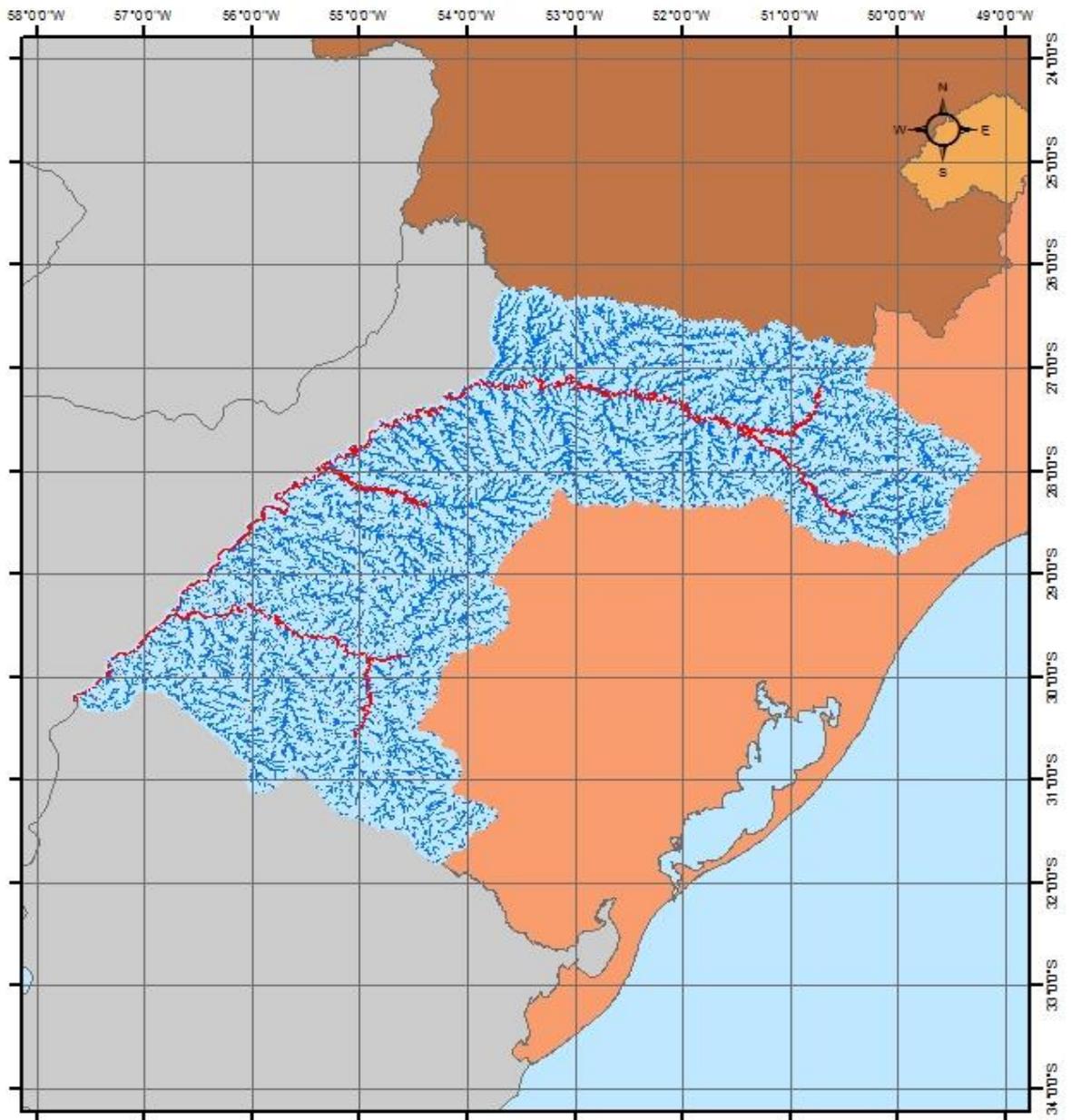
— 1; 2

— 3; 4; 5; 6

— 7; 8

Mapa 9: Distribuição dos rios na RH Paraná

RH URUGUAI



Localização:



1:7.000.000

Datum WGS-84

Fonte: SRTM, IBGE

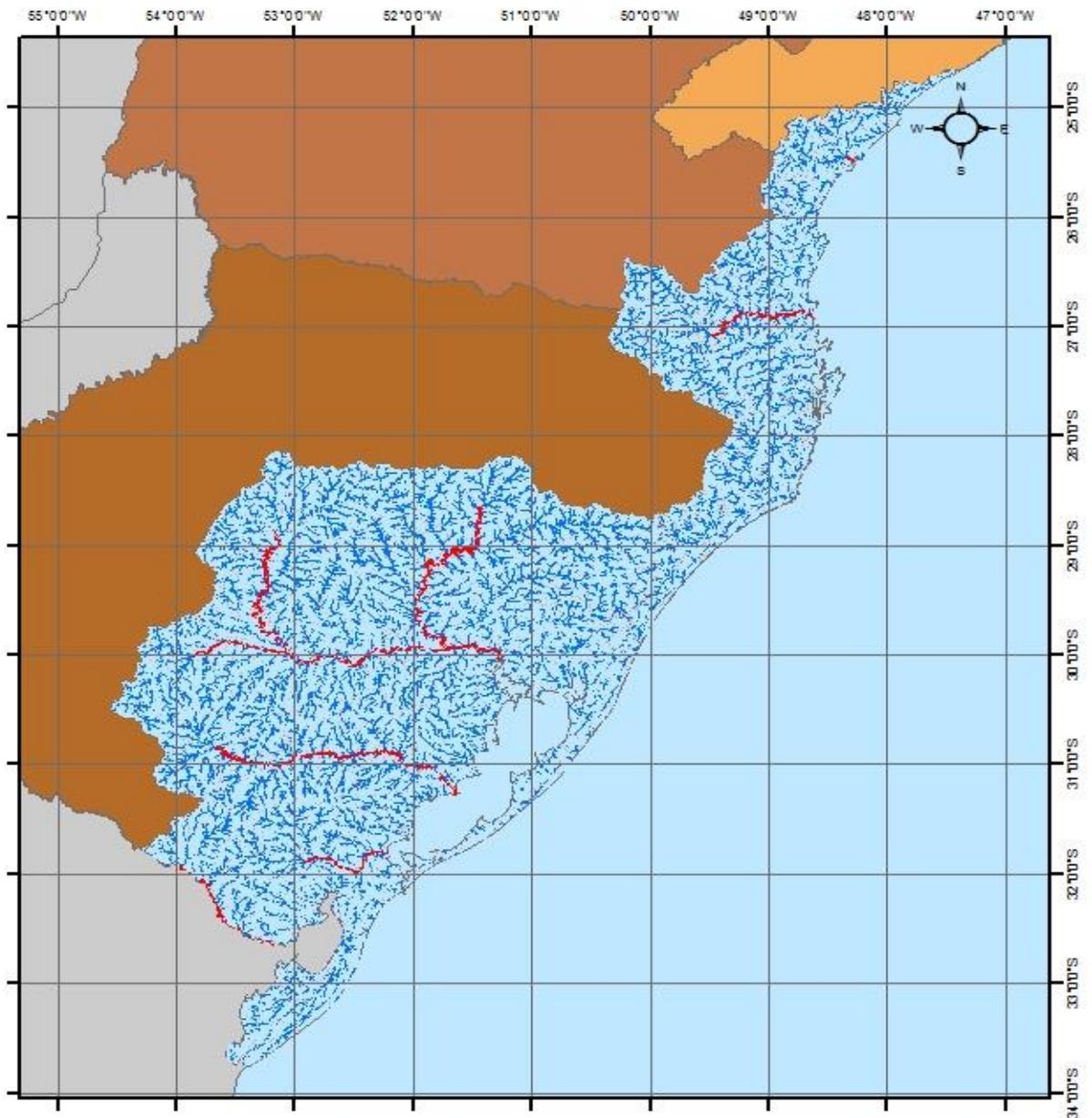
Legenda:

Ordem Strahler

- 1; 2
- 3; 4; 5; 6
- 7; 8

Mapa 10: Distribuição dos rios na RH do Uruguai

RH ATLÂNTICO SUL



Localização:



1:6.500.000

Datum WGS-84

Fonte: SRTM, IBGE

Legenda:

Ordem Strahler

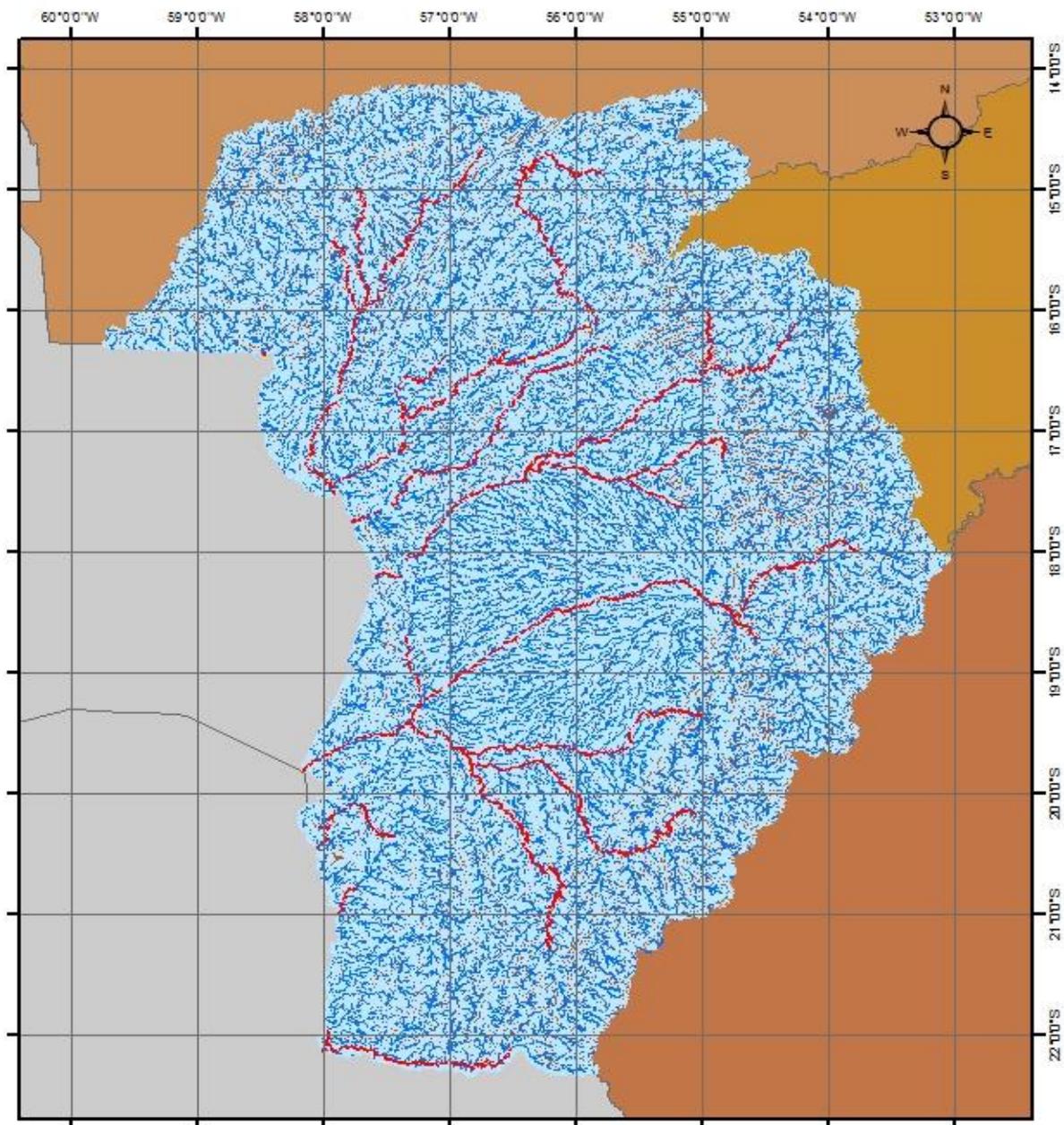
— 1; 2

— 3; 4; 5; 6

— 7; 8

Mapa 11: Distribuição dos rios na RH Atlântico Sul

RH PARAGUAI



Localização:



1:6.000.000

Datum WGS-84

Fonte: SRTM, IBGE

Legenda:

Ordem Strahler

- 1; 2
- 3; 4; 5; 6
- 7; 8; 9

Mapa 12: Distribuição dos rios na RH do Paraguri.

4. DISCUSSÃO

4.1. Extensão de rios no Brasil – importância dos pequenos riachos

A extensão total de rios no território brasileiro foi estimada, de acordo com o levantamento realizado neste trabalho, em 7.325.672 Km. Esta extensão é equivalente a aproximadamente 183 vezes o perímetro da linha do Equador ou 19 vezes a distância entre a Terra e a Lua. Esta estimativa conjunta das Regiões Hidrográficas através de uma mesma base de dados é inédita na literatura.

Este estudo mostrou que os rios de ordens mais baixas (1, 2 ou 3) são os mais importantes em termos de extensão – representam 88,1% do total no território brasileiro. Isso indica que as águas provenientes dos 88,1% dos rios brasileiros têm poucos tributários. Os córregos de primeira ordem, que recebem águas diretamente de suas nascentes, apresentam 51,5% da extensão total (3.774.335 Km, Tabela 1). A extensão dos rios diminui exponencialmente à medida que as ordens aumentam (Figura 14). Este é, certamente, o padrão geral para redes de drenagem, como foi apresentado no trabalho pioneiro de Strahler acerca da ordenação de rios (STRAHLER, 1957). Por exemplo, na Região Hidrográfica do Paraguai os rios de ordem 1 representam 50.5% (168.561 Km) da extensão total da RH (333.423 Km). (DOWNING, COLE, *et al.*, 2012) afirma que 52% de todos os rios do mundo são de primeira ordem.

Além da importância relacionada à sua extensão total, rios de ordens mais baixas são altamente ativos e importantes ecologicamente. Apesar do pequeno tamanho, a água que flui através destes ambientes apresenta uma grande área de contato com a atmosfera e o sedimento em relação ao volume total. Desta forma, as taxas de emissão de CO₂ por unidade de área em córregos, por exemplo, são duas a três vezes maiores do que as taxas em rios de maior porte (AUFDENKAMPE, MAYROGA, *et al.*, 2011) A emissão de CO₂ por rios de primeira e segunda ordem representa cerca de 20% da emissão total de ecossistemas amazônicos, reforçando a importância destes ambientes no ciclo de carbono (JOHNSON, LEHMANN, *et al.*, 2008). Apesar de não haver uma sistematização sobre quais ordens são mais sensíveis a perturbações (naturais ou antrópicas), evidenciadas pela alta razão entre a extensão (da área de contato com o ambiente terrestre) e a vazão ou volume de água. Além disto, rios de baixas ordens são menos resilientes, ou seja, possuem menor capacidade de retomar suas propriedades

originais após uma perturbação, que rios de ordens superiores a 4 (WESTMAN, 1974). Isto ocorre por-que rios pequenos têm poucos ou nenhum tributário e conseqüentemente sua vazão tende a ser menor. Já os rios de ordens superiores, por receber maior carga de tributários, são menos sensíveis aos fenômenos que podem ocorrer em seus tributários de ordem menor.

Os resultados deste estudo têm uma importante implicação política: nos últimos anos, o congresso brasileiro votou por mudanças propostas no código florestal. Uma das mudanças mais discutidas foi a redução da área de proteção permanente (APP) em rios de pequena ordem (até 10 metros de largura), cuja Lei 4.771/65 exigia a necessidade de recompor 30 metros em cada lado. Na nova proposta, a área a ser recomposta foi diminuída pela metade. Como este estudo mostrou que os rios de pequena ordem são elementos cruciais da rede de drenagem brasileira e considerando que a zona ripária é local de diversos processos biogeoquímicos e abriga grande biodiversidade, a redução da importância relativa dessas áreas no novo código florestal pode ter conseqüências ecológicas drásticas.

4.2. Densidade de drenagem do território brasileiro

A densidade de drenagem (Dd) média do Brasil é de 0,86 Km/Km² (Tabela 1). (STRAHLER, 1964) considera a Dd como uma expressão de proximidade dos canais. Esta medida, no entanto, também pode ser considerada uma importante ferramenta em estudos ecológicos, já que maiores densidades de drenagem estão relacionadas com maior extensão da interface entre os ambientes terrestres e aquáticos. Sabendo que Dd de 0,5 Km/Km² é considerada pobre, enquanto uma de 3,5 Km/Km² é considerada excepcionalmente bem drenada (GARCEZ, 1974), o Brasil se apresenta com uma baixa densidade de drenagem quando consideramos o país como um todo.

A densidade de drenagem, no entanto, não leva em consideração a área ocupada por água em uma determinada região, mas sim a extensão total da sua rede de drenagem. Esta medida foi estudada por (CHRISTOFOLLETTI, 1979) (CHRISTOFOLLETTI, 1981) analisando variáveis do meio físico como tipos de solo, relevo e cobertura vegetal. Entre os resultados, concluiu-se que os solos mais compactados tendem a gerar

uma Dd mais elevada que os de menor compactação e que relevos com maiores saliências são propensos a terem uma maior Dd.

O método utilizado neste estudo, baseado em modelos de elevação, fornece uma representação mais precisa da densidade de drenagem quando comparado com outros métodos, tais como fotografia aérea e imagens de satélite convencionais. Um estudo comparativo na bacia do rio Upper Little Tennessee mostrou uma grande discrepância nas medidas de densidade de drenagem pelo método tradicional (1,23 Km/Km²) e aquele baseado em modelos de elevação de (3,88 Km Km²) (BENSTED e LEIGH, 2012). Isto ocorre por que, como mencionado anteriormente, os modelos de elevação permitem a detecção de rios de baixas ordens (1, 2 e 3), que são os mais extensos e normalmente negligenciados pelos métodos tradicionais.

É importante destacar, no entanto, que uma vez que modelos de elevação se baseiam na identificação de canais definidos morfologicamente, quaisquer áreas de acúmulo de água, sejam rios perenes ou intermitentes, são computados. Desta forma, é possível que tal método cause certa superestimativa das densidades de drenagem. Este problema pode ser contornado através de calibração por observação em campo e identificação de corpos d'água intermitentes. Tal calibração foi realizada no âmbito do estudo na bacia do rio Upper Little Tennessee e indicou que a exclusão dos rios intermitentes não gerou alteração significativa na estimativa da densidade de drenagem (BENSTED e LEIGH, 2012). A bacia do rio Upper Little Tennessee, no entanto, possui área reduzida (aproximadamente 400 km²), o que facilita a calibração. No caso da avaliação realizada neste trabalho, incluindo todo o território brasileiro, uma calibração demandaria a utilização de imagens de alta resolução de épocas secas e próximas a passagem do SRTM, para evitar que alguma transposição ou barragem possa influenciar no levantamento.

4.3. Área dos rios

Outra medida importante em levantamentos hídricos é a área ocupada por água. O levantamento realizado no âmbito deste trabalho, no entanto, não permite que as larguras dos rios sejam estimadas e, por tanto, não fornecem a medida de área. Para obter tal dado, seriam necessários informações de declividade como indicado por

(LEFAVOUR e ALSDORF, 2005) ou como a metodologia proposta por Pavlevsky Smith (2008). Esta última, porém, dependeria de informações como um polígono que delimite os corpos d'água, estando assim sujeitas a variações de área devido às sazonalidades. Para viabilizar a análise da área ocupada por rios no Brasil, foram utilizadas, então, medidas de larguras dos rios de diferentes ordens reportadas na literatura (dados compilados por Downing et al. 2012) (Figura 17).

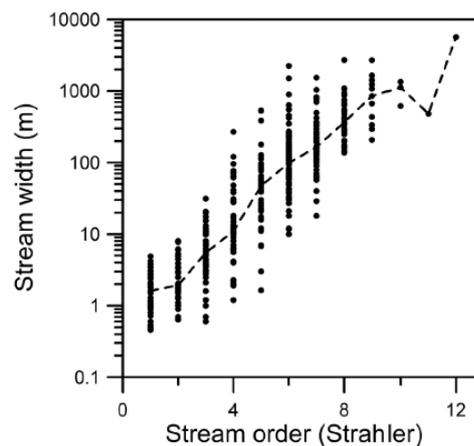


Figura 17: Relação entre ordens de Strahler e largura média de rios do mundo todo. A linha pontilhada conecta as larguras médias de rios de cada ordem. Este gráfico foi extraído de Downing et al. 2012.

Este trabalho indicou que rios de ordens intermediárias (4 a 9 no caso do Brasil) são os mais importantes em termos de área. Os rios destas ordens representam 81% de toda a área ocupada por rios no Brasil, enquanto os rios de baixas ordens representam 88% do total em termos de extensão (Tabela 3; Figura 18a). O padrão de variação da contribuição das diferentes ordens de Strahler para a extensão e a área de rios para o Brasil é muito semelhante àquele reportado para rios do mundo todo (Downing et al. 2012, Figura 18b).

A área ocupada por rios no Brasil é de 109.849 Km², o que representa 1.3% da área total do país. Estes dados referentes não consideram a área de lagos e reservatórios, já que a metodologia aqui descrita considera lagos e reservatórios como rios. Entretanto, a superfície ocupada por rios não deve ultrapassar 1.3% da área total do Brasil e segundo (DOWNING, PRAIRIE, *et al.*, 2006) a área dos rios representam entre 0.3 e 0.56% da superfície do mundo. Nesta metodologia também, todos os leitos de rio são considerados, independente se eles são intermitentes ou não.

Tabela 3. Área total dos rios e porcentagem da área total para cada ordem de Strahler, em todo o território brasileiro. Dados calculados com base nas espessuras das ordens de rios em Downing et al. (2012).

Ordem	Área (Km2)	Área (%)
1	7171	6,5
2	4650	4,2
3	6732	6,1
4	11993	10,9
5	15691	14,3
6	22024	20,0
7	15014	13,7
8	11628	10,6
9	12931	11,8
10	1128	1,0
11	888	0,8
Total	109.849	100

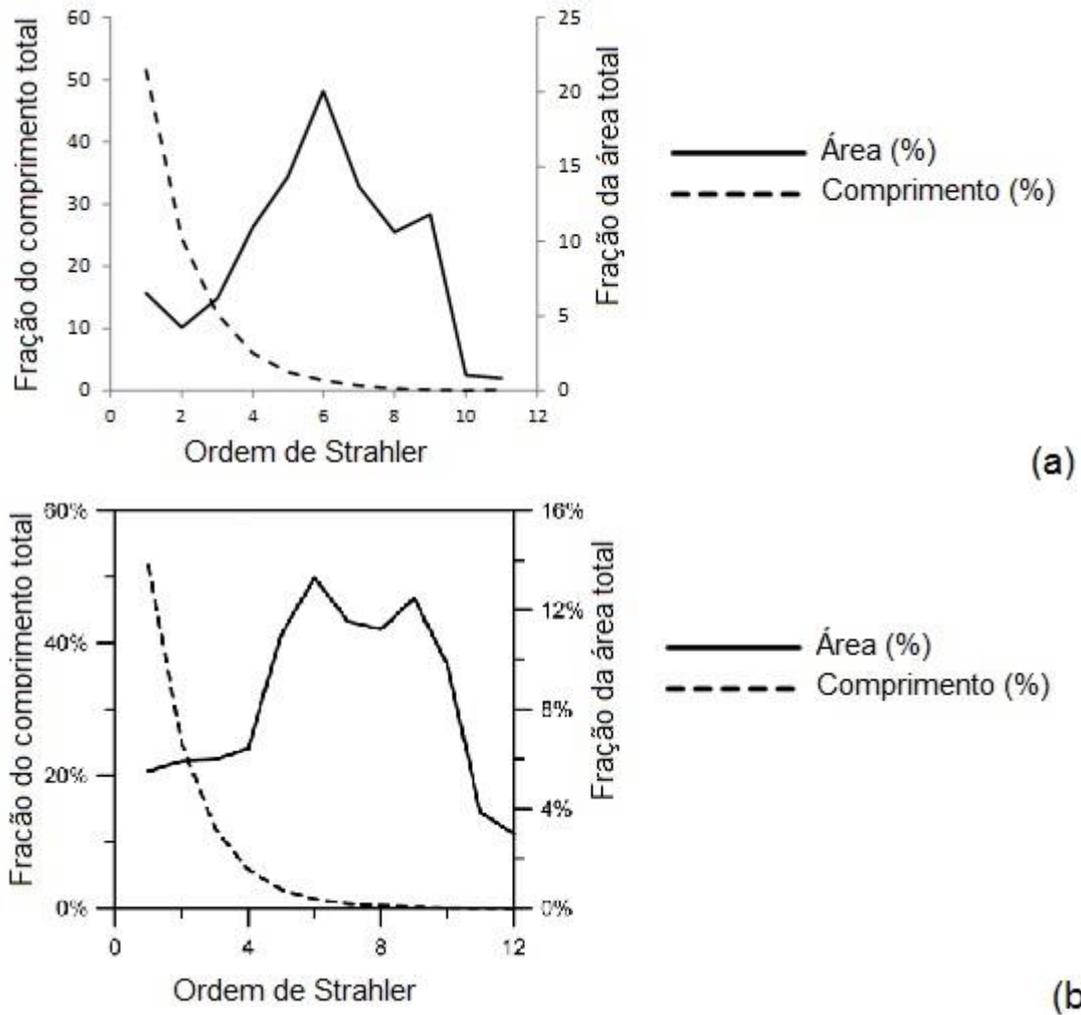


Figura 18: Fração da extensão e área total de rios em função da ordem de Strahler. A - rios de todo o território brasileiro (dados gerados nesta dissertação); B – rios de todo o mundo (gráfico modificado de Downing et al. 2012).

4.4. Variabilidade entre as RHs

As regiões hidrográficas (RH) brasileiras apresentaram ordem máxima de rios variando entre 8 e 11, sendo que apenas a RH da Amazônia apresentou a ordem 11. Enquanto a RH da Amazônia apresentou a maior extensão total de rios (mais de 3.000.000 km, 45% de todo o Brasil), a densidade de drenagem nesta RH (0,87 km/km²) foi próxima à média nacional (Tabela 2). Este padrão ocorreu, primeiramente, devido à grande área da RH da Amazônia. Além disso, a densidade de drenagem não leva em consideração a área dos corpos hídricos nem mesmo a vazão, o que explica uma densidade de drenagem relativamente baixa em uma região que comporta 20% de toda a água corrente no mundo. De fato, de acordo com a estimativa realizada neste estudo, a

RH da Amazônia sozinha contém 47% de toda a área ocupada por rios no Brasil (Tabela 4)

As maiores densidades de drenagem (0,92, 1,02 e 1,03 km/km²) foram registradas nas RH Atlântico Sudeste, Atlântico Sul e do Uruguai, onde também foram registradas as menores extensões totais de rios (Tabela 2).

De modo geral, as RH brasileiras apresentaram o mesmo padrão de redução exponencial na extensão total dos rios com o aumento das ordens de Strahler (Figura 15), refletindo o padrão registrado para todo o país (Figura 14). Fica claro, então, que a grande variabilidade morfológica, geológica, de solo, cobertura vegetal e clima entre as RH brasileiras, que estão inseridas em diferentes biomas, não afetam a classificação hierárquica das suas redes hidrográficas. Este padrão vai ao encontro do resultado discutido por (DOWNING, COLE, *et al.*, 2012), que mostra que a relação entre ordem de Strahler e o somatório da extensão total dos rios de cada ordem é constante em todo o mundo.

4.5. Implicações para os ciclos biogeoquímicos

Os resultados deste estudo sugerem que os rios brasileiros representam entre 17 e 23% da área e 8% do comprimento total dos rios do mundo, estimativa mundial esta obtida em (Downing et al., 2012). Isso sugere que os padrões ecológicos acontecendo em rios brasileiros devem ser extensivamente estudados, pois quaisquer modelos biogeoquímicos sobre a ciclagem de elementos químicos que envolvam rios devem levar em conta que grande parcela desses processos ocorrem em águas brasileiras.

Um dos ciclos que devem ser bastante regulados por processos acontecendo em águas brasileiras é o ciclo do carbono. Os ecossistemas aquáticos continentais, em especial os rios, são ecossistemas heterotróficos, com a respiração ecossistêmica sobrepujando a produção primária, o que é suportado pelo aporte de carbono originado em ecossistemas terrestres (Cole et al 1994, Cole et al 2007, Butman e Raymond 2011). Por esta razão, lagos e rios são emissores de CO₂, de maneira que as estimativas mais recentes mostram que ecossistemas aquáticos continentais emitem entre 1200 e 1400 Tg de carbono por ano (TRANVIK, DOWNING, *et al.*, 2009); (AUFDENKAMPE, MAYROGA, *et al.*, 2011), de maneira que estes ecossistemas tem o potencial de afetar os balanços regionais de carbono (COLE, PRAIRIE, *et al.*, 2007). Em território brasileiro, estimativas regionais sobre emissões de CO₂ só existem para a Amazônia.

Em função do intenso aporte de material orgânico terrestre que funciona como combustível para a respiração microbiana, os ecossistemas aquáticos de água doce amazônicos emitem 500 Tg C ano⁻¹ (RICHEY, MELACK, *et al.*, 2002), sendo responsáveis por entre 36 e 42% das emissões globais supracitadas. Diminuindo a área da RH Amazônia da soma das áreas de todas as RH brasileiras (109.849 km²) tem-se uma área de 58.708 km² para os quais não há estimativa de emissão de CO₂. Em estimativa recente sobre a emissão de CO₂ pelos rios e córregos norte-americanos, (BUTMAN e RAYMOND, 2011) apresentaram uma compilação sobre as estimativas de emissão de CO₂ por vários sistemas fluviais do mundo. De acordo com estes autores, a taxa de emissão média de ecossistemas fluviais varia entre 830 e 4008 g C m⁻² ano⁻¹. Assumindo esse espectro de variação como o provável espectro de variação de emissão de CO₂ por rios brasileiros, é possível estimar que as RH brasileiras excluindo a Amazônia emitam entre 49 e 235 Tg C ano⁻¹. Somando à estimativa de emissão na RH Amazônia, já existente, tem-se que os ecossistemas aquáticos brasileiros emitem algo entre 549 e 735 Tg C ano⁻¹, o que representa entre 42 e 57% das emissões globais de CO₂ por ecossistemas aquáticos continentais. Esses números tendem a ser ainda maiores, pois, com exceção da RH Amazônia, foram computadas somente as áreas do canal central dos rios. Como muitos rios, como os do Pantanal, tem largas planícies inundáveis que tendem a emitir CO₂, a quantidade real tende a ser ainda maior (RICHEY, MELACK, *et al.*, 2002). As incertezas nessas estimativas só podem ser neutralizadas a partir da determinação da emissão de CO₂ por cada bacia em particular. Entretanto, fica claro que os ecossistemas aquáticos brasileiros são elementos cruciais do ciclo global de carbono, reforçando a necessidade de compreender detalhadamente os processos relacionados ao ciclo de carbono nos diversos biomas do território brasileiro.

5. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado nesta dissertação contribui significativamente para a compreensão do sistema de drenagem do Brasil. Mais do que isto, este trabalho mostra que os avanços tecnológicos, principalmente dos levantamentos topográficos, trazem a possibilidade de um mapeamento hidrográfico de maior resolução e precisão

cartográfica. As estimativas realizadas até o presente eram baseadas em imagens de satélites passivos, dependentes da luz do sol e da visualização do alvo a ser mapeado ou baseado em levantamentos esparsos e antigos do IBGE. Os modelos digitais de terreno utilizados neste trabalho proporcionam um levantamento mais preciso da localização dos corpos d'água, especialmente em relação aos pequenos canais de água, que eram subestimados pelas análises tradicionais (Figura 19). Os resultados aqui apresentados confirmam a importância quantitativa destes pequenos canais de água (rios ordens 1, 2 e 3) nas mais diversas redes hidrográficas. Fica claro, então, que negligenciar tais sistemas, apesar de suas dimensões reduzidas, pode levar a sérias subestimativas dos processos ecológicos em ambientes fluviais.

Este estudo é diferenciado também por ter sido feito a partir de uma única fonte de dados e utilizando uma única metodologia para toda a área mapeada. É importante destacar que um melhor refinamento desta análise pode ser obtido a partir de calibrações de campo. Estas calibrações são importantes, por exemplo, para identificar a densidade de corpos d'água intermitentes em relação aos perenes. Além disso, uma medida mais precisa da área ocupada por rios no Brasil depende de medidas de largura dos rios nas diversas RH, uma vez que estas larguras podem variar em uma mesma ordem. Medidas mais precisas da área ocupada por rios levarão a melhores estimativas, por exemplo, do complexo papel de rios nos ciclos biogeoquímicos.

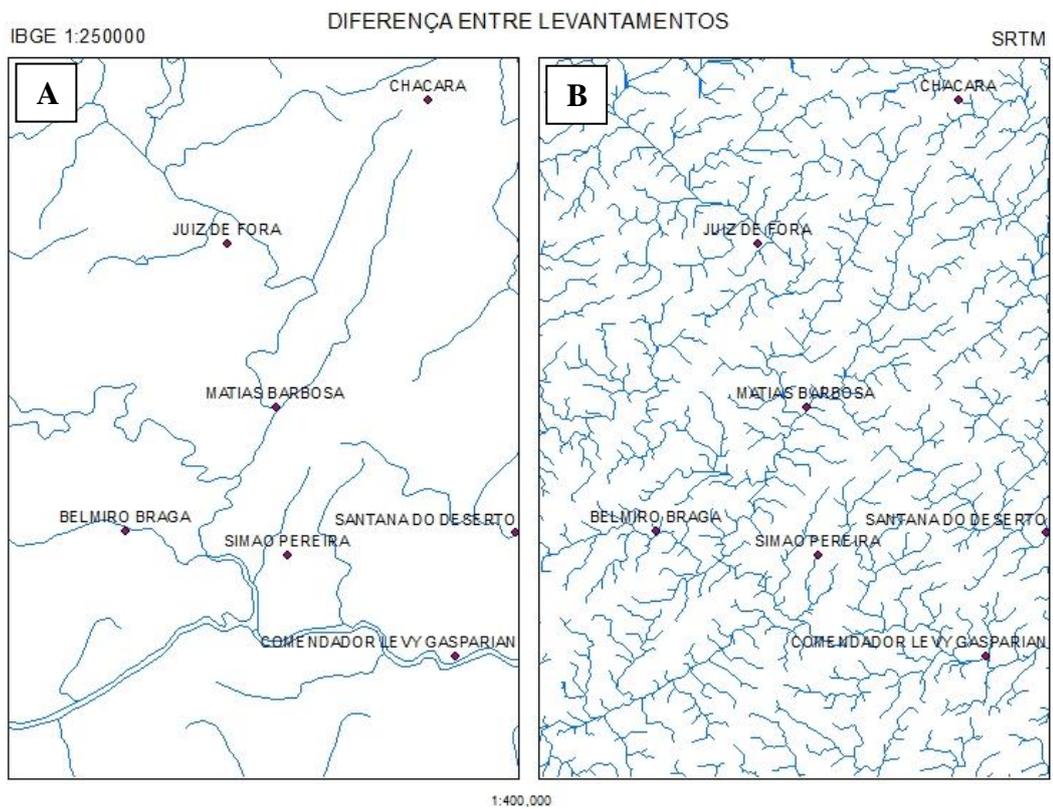


Figura 19: Comparação métodos de levantamento de rede de drenagem. A: estimativa baseada em levantamentos do IBGE. B: estimativa baseada em modelo digital de terreno (SRTM), utilizada neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, 2010.

AUFDENKAMPE, A. K. et al. Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere. **Frontiers in Ecology and the Environment**, fev. 2011. 53-60.

BAND, L. E. Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, v. 22, n. 1, p. 15-24, 1986. ISSN: 1944-7973 DOI: 10.1029/WR022i001p00015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/WR022i001p00015>>.

BARBOSA, C. et al. **Mapping amazon basin wetlands through region growing segmentation and segmented-based classification JERS-1 data**. IX Simpósio Latino Americano de Percepção Remota y Sistemas de Información Espacial. [S.l.]: [s.n.]. 2000. p. 1165-1176.

BASTVIKEN, D. et al. Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink. **Science**, 07 Janeiro 2011.

BENSTED, P. J.; LEIGH, D. S. An expanded role for river networks. **Nature Geoscience**, out. 2012. 2.

BLUM, H. A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape. **Models for the Perception of Speech and Visual Form**, Cambridge, MA, p. 362-380, 1967. Disponível em: <<http://pageperso.lif.univ-mrs.fr/~>

BUTMAN, D.; RAYMOND, P. A. Significant efflux of carbon dioxide from streams and rivers in the United States. **Nature Geoscience**, v. 4, n. 12, p. 839-842, 2011.

CHRISTENSEN, A. H. J. Cartographic Line Generalization with Waterlines and Medial-Axes. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 26, n. 1, p. 19-32, 1999. ISSN DOI: 10.1559/152304099782424893. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1559/152304099782424893>>.

CHRISTOFOLLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec, 1979.

CHRISTOFOLLETTI, A. **Geomorfologia fluvial: o canal fluvial**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

COLE, J. J. et al. Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. **Ecosystems**, v. 10, n. 1, p. 172-185, 2007. ISSN ISSN: 1432-9840 DOI: 10.1007/s10021-006-9013-8. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10021-006-9013-8>>.

DOWNING, J. A. et al. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. **Limnology & Oceanography**, 2006. 2388–2397.

DOWNING, J. A. et al. Global abundance and size distribution of streams and rivers. **Inland Waters**, v. 2, n. 4, p. 229-236, 2012.

ESRI. **ArcGIS Desktop: Versão 10**. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2012.

GARCEZ, L. N. **Hidrologia**. São Paulo: Edgar Bluncher, 1974.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, Maryland, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

HOTT, M. C.; FURTADO, A. L. S.; RIBEIRO, C. A. A. S. **Determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas no município de Campinas-SP**. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Florianópolis: [s.n.]. 2007. p. 3381-3388.

HOTT, M. C.; GUIMARÃES, M.; MIRANDA, E. E. **Método para determinação automática de Áreas de Preservação Permanente em topos de morros para o Estado de São Paulo, com base em geoprocessamento.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2004. 32 p.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente:** uma perspectiva em recursos terrestres. 1. ed. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009.

JENSON, S. K.; DOMINQUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data foar geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, 1988.

JOHNSON, M. S. et al. CO2 efflux from Amazonian headwater streams represents a significant fate for deep soil respiration. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 17, p. n/a--n/a, 2008. ISSN ISSN: 1944-8007 DOI: 10.1029/2008GL034619. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2008GL034619>>.

JONATHAN P. BENSTEAD, D. S. L. An expanded role for river networks. **Nature Geoscience**, out. 2012. 2.

LEFAVOUR, G.; ALSDORF, D. Water slope and discharge in the Amazon River estimated using the shuttle radar topography mission digital elevation model. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 17, p. n/a--n/a, 2005. ISSN ISSN: 1944-8007 DOI: 10.1029/2005GL023836. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2005GL023836>>.

LEHNER, B.; DOLL, P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. **Journal of Hydrology**, 2004. 1-22.

MCALLISTER, M.; SNOEYINK, J. Medial Axis Generalization of River Networks. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 27, n. 2, p. 129-138, 2000. ISSN DOI: 10.1559/152304000783547966. Disponivel em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1559/152304000783547966>>.

MEYBECK, M. **Physics and Chemistry of Lakes**. Berlin: Springer-Verlag, 1995.

MIRANDA, E. E. D.; COUTINHO, A. C.; CARVALHO, C. A. Brasil em Relevo. **Campinas**: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/>>. Acesso em: 06 dez. 2012.

NOVO, E. M. L. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; MERTES, L. O rio Amazonas em mosaico. **Ciência hoje**, Novembro 1998. 59-61.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing** , v. 28, n. 3, p. 323-344, 1984. ISSN ISSN: 0734-189X DOI: 10.1016/S0734-189X(84)80011-0. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734189X84800110>>.

ODUM, H. T. **Fundamentos de Ecologia**. Lisboa: Fundação Galouste Gulbenkian, 1971.

RICHEY, J. E. et al. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. **Nature**, v. 416, n. 6881, p. 617-20, #apr# 2002. ISSN ISSN: 0028-0836 DOI: 10.1038/416617a. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11948346>>.

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E. A Global Assessment of the SRTM Performance. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 249-260, 2006.

SHIKLOMANOV, I. **World Water Resources**. St Petesburg: [s.n.], 1993.

SHUTTLE Radar Topographic Mission. **USGS Science for changing world**, 2012. Disponível em: <<http://srtm.usgs.gov/index.php>>. Acesso em: 05 dez. 2012.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 10, p. 1117-1142, 1952.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Geophysical Union Trans.**, v. 38, p. 912-920, 1957.

STRAHLER, A. N. **Handbook of applied hydrology**. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. ed. [S.l.]: [s.n.], 1964.

STRAHLER, A. N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: CHOW, V. T. **Handbook of Applied Hydrology**. [S.l.]: McGraw-Hill, New York, 1964. p. 4-39/4-76.

TRANVIK, L. J. et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. **Limnology and Oceanography**, v. 54, n. 6 (part 2), p. 2298-2314, 2009. Disponivel em: <http://www.aslo.org/lo/toc/vol_54/issue_6_part_2/2298.pdf>.

USGS. The USGS Water Science School. **USGS**. Disponivel em: <<http://ga.water.usgs.gov/edu/earthwherewater.htm>>. Acesso em: 15 ago. 2012.

VAN ZYL, J. J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, v. 48, p. 559-565, 2001.

WHITEHEAD, M.; ROBINSON, P. G. Experimental basin studies—an international and historical perspective of forest impacts. **Journal of Hydrology**, 15 Maio 1993. 217–230.

7. GLOSSÁRIO

VERBETE	SIGNIFICADO
Acumulação de fluxo	<i>Raster</i> que indica quantas células se acumulam sobre uma direção específica.
Alvo	Objeto a ser imageado pelo sensor.
Bit	Menor unidade de informação de um computador, cujo valor pode ser 0 ou 1.
Corpos d'água	Qualquer acumulação significativa de água, usualmente cobrindo a Terra ou outro planeta.
D8	Resultado da direção de fluxo. Derivado de características hidrológicas da superfície, determina a direção do fluxo para cada célula da imagem.
Exutório	Ponto final da drenagem.
Geoprocessamento	Tecnologia que abrange o conjunto de procedimentos de entrada, manipulação armazenamento e análise de dados espacialmente referenciados.
Geo-referência	Sistema de coordenadas no qual a localização de um ponto da superfície da Terra pode ser identificada.
Imagem	Representação gráfica de um objeto, produzida por um dispositivo óptico ou eletrônico; é normalmente armazenada em formato <i>raster</i> , com valores binários ou inteiros que representam a intensidade de luz refletida, o calor ou outro tipo de grandeza do espectro eletromagnético.
MDE	Ver Modelo Digital de Elevação.
MNT	Modelo Numérico de Terreno - idem a MDE.
Modelo Digital de Elevação	Representação digital de um modelo numérico da superfície da Terra, obtido a partir de um conjunto de coordenadas (x,y,z) de pontos distribuídos no terreno.
Morfometria	Quantificação e análise do relevo.
<i>Raster</i>	Ver <i>Raster Data Structure</i> .
<i>Raster Data Structure</i>	Estrutura de Dados <i>Raster</i> . Estrutura de representação de dados espaciais em que os elementos são codificados na forma de uma matriz (grid). Quanto menor for o tamanho da quadrícula dessa matriz, maior será a semelhança com a representação vetorial do elemento. O tamanho da quadrícula é função da escala de trabalho e do nível de detalhe desejado.
Resolução	Distância mínima entre dois elementos contíguos, ou o tamanho mínimo de um elemento, numa imagem ou num mapa.
Resolução Espacial	Tamanho do pixel. Tamanho do menor alvo a ser reconhecido pelo sensor. Quanto menor a resolução, maior o detalhamento dos alvos.

Resolução Espectral	Capacidade de um sensor em diferenciar as infinitas variações do espectro radiométrico.
Resolução Radiométrica	Quantidade de tons de cinza de uma imagem. É medido em <i>bits</i> , o número de <i>bits</i> indica a potência elevada de base 2. Por ex.: 1 <i>bit</i> = 2 ¹ , esta imagem apresentaria 2 tons de cinza já uma imagem com 8 <i>bits</i> = 2 ⁸ ou seja, 256 tons de cinza.
Resolução Temporal	Tempo que o sensor leva para visitar o mesmo ponto.
Sensor	Dispositivo que capta e registra energia refletida ou emitida por elementos.
Sensor ativo	Tipo de levantamento que o sensor utiliza energia eletromagnética própria pra executar o imageamento.
Sensor passivo	Tipo de levantamento que o sensor utiliza a luz solar para executar o imageamento.
<i>Shapefile</i>	Arquivos contendo dados geoespaciais em formato de vetor. Possui interoperabilidade entre vários GIS.
SIG	Ver Sistema de Informação Geográfica.
Sistema de Informação Geográfica	Sistema baseado em computador, que permite ao usuário coletar, manusear e analisar dados georreferenciados. Um SIG pode ser visto como a combinação de hardware, software, dados, metodologias e recursos humanos, que operam de forma harmônica para produzir e analisar informação geográfica.
Vetor	Endereço que direciona o computador para uma nova posição de memória. Elemento gráfico cuja forma é representada por uma série de arcos. Contrasta com elemento <i>raster</i> . Uma medida que possui grandeza e orientação, contrastando com escalar, que só possui grandeza.

Anexo 1

Tabela A1. Informações relacionadas a extensão de rios, densidade de drenagem e área para cada ordem de Strahler, nas 12 regiões hidrográficas brasileiras.

Ordem	Extensão (Km)	Extensão (%)	Densidade de Drenagem (km/km ²)	Área (Km ²)	Área (%)
RH Amazônica					
1	1.742.861	52,0	0,45	3311	6,4
2	821.118	24,5	0,212	2135	4,1
3	404.828	12,1	0,105	3036	5,9
4	188.573	5,6	0,049	5186	10,1
5	93.302	2,8	0,024	6783	13,2
6	50.456	1,5	0,013	9799	19,0
7	30.038	0,9	0,008	7359	14,3
8	10.214	0,3	0,003	5225	10,1
9	7.339	0,2	0,002	7255	14,1
10	540	0,02	0,0001	555	1,1
11	1.846	0,06	0,0004	888	1,7
Total	3.351.113	100	0,866	51.531	100
RH Tocantins					
1	395.983	51,2	0,43	752	5,9
2	189.778	24,5	0,206	493	3,9
3	95.304	12,3	0,103	715	5,6
4	46.620	6,0	0,051	1282	10,1
5	22.701	2,9	0,025	1650	13,0
6	11.736	1,5	0,013	2279	18,0
7	5.986	0,8	0,006	1466	11,6
8	2.035	0,3	0,002	1041	8,2
9	2.428	0,3	0,003	2400	19,0
10	557	0,1	0,0006	573	4,5
11					
Total	773.127	100	0,839	12.653	100
RH Atlântico Nordeste Ocidental					
1	117.450	52,1	0,428	223	7,7
2	54.887	24,3	0,2	143	4,9
3	28.206	12,5	0,103	212	7,3
4	13.405	5,9	0,049	369	12,7
5	5.701	2,5	0,021	414	14,3
6	3.416	1,5	0,013	663	22,9
7	1.677	0,7	0,006	411	14,2
8	876	0,4	0,003	448	15,4
9	20	0,0	0,00007	20	0,7
10					
11					
Total	225.637	100	0,823	2.903	100
RH Paraíba					
1	151.207	53,4	0,454	287	7,1
2	67.571	23,9	0,203	176	4,3
3	33.202	11,7	0,099	249	6,1
4	15.707	5,5	0,047	432	10,6
5	7.940	2,8	0,024	577	14,2
6	3.611	1,3	0,011	701	17,3
7	2.377	0,8	0,007	582	14,4
8	818	0,3	0,003	419	10,3
9	640	0,2	0,002	633	15,6
10					
11					
Total	283.073	100	0,85	4.056	100

Ordem	Extensão (Km)	Extensão (%)	Densidade de		Área (Km2)	Área (%)
			Drenagem (km/km ²)	Área		
RH Atlântico Nordeste Oriental						
1	120.409	50,7	0,42	229	7,8	
2	58.574	24,7	0,204	152	5,2	
3	30.107	12,7	0,105	226	7,7	
4	14.892	6,3	0,052	410	13,9	
5	7.461	3,1	0,026	542	18,5	
6	4.181	1,8	0,015	812	27,6	
7	1.481	0,6	0,005	363	12,3	
8	401	0,2	0,001	205	7,0	
9				0	0,0	
10				0	0,0	
11				0	0,0	
Total	237.504	100	0,828	2.939	100	
RH Atlântico Leste						
1	158.975	50,2	0,409	302	7,0	
2	78.620	24,8	0,202	204	4,8	
3	39.838	12,6	0,103	299	7,0	
4	18.972	6,0	0,049	522	12,2	
5	10.720	3,4	0,028	779	18,2	
6	6.033	1,9	0,015	1172	27,3	
7	2.702	0,9	0,007	662	15,4	
8	679	0,2	0,002	347	8,1	
9				0	0,0	
10				0	0,0	
11				0	0,0	
Total	316.539	100	0,815	4.287	100	
RH São Francisco						
1	264.762	51,5	0,415	503	6,5	
2	122.822	23,9	0,192	319	4,2	
3	64.001	12,4	0,1	480	6,2	
4	32.818	6,4	0,051	902	11,7	
5	15.873	3,1	0,025	1154	15,0	
6	7.973	1,6	0,012	1548	20,1	
7	3.358	0,7	0,005	823	10,7	
8	1.498	0,3	0,003	766	10,0	
9	1.210	0,2	0,002	1196	15,5	
10				0	0,0	
11				0	0,0	
Total	514.314	100	0,805	7.692	100	
RH Atlântico Sudeste						
1	99.992	50,9	0,466	190	7,0	
2	48.464	24,7	0,226	126	4,6	
3	23.824	12,1	0,111	179	6,6	
4	12.373	6,3	0,057	340	12,5	
5	6.020	3,1	0,028	438	16,1	
6	3.414	1,7	0,016	663	24,4	
7	1.556	0,8	0,007	381	14,0	
8	791	0,4	0,004	404	14,9	
9				0	0,0	
10				0	0,0	
11				0	0,0	
Total	196.433	100	0,915	2.721	100	

Ordem	Extensão (Km)	Extensão (%)	Densidade de Drenagem (km/km ²)	Área (Km ²)	Área (%)
RH Paraná					
1	365.881	50,6	0,416	695	6,5
2	175.498	24,3	0,199	456	4,2
3	90.597	12,5	0,103	679	6,3
4	47.157	6,5	0,054	1297	12,1
5	22.630	3,1	0,026	1645	15,3
6	12.061	1,7	0,014	2342	21,8
7	6.347	0,9	0,007	1555	14,5
8	2.240	0,3	0,002	1146	10,7
9	954	0,1	0,001	943	8,8
10				0	0,0
11				0	0,0
Total	723.366	100	0,822	10.759	100
RH do Uruguai					
1	90.014	50,0	0,516	171	5,5
2	43.793	24,3	0,251	114	3,7
3	22.817	12,7	0,131	171	5,5
4	10.909	6,1	0,063	300	9,6
5	6.348	3,5	0,036	462	14,8
6	3.705	2,1	0,021	719	23,1
7	907	0,5	0,005	222	7,1
8	1.544	0,9	0,009	790	25,4
9	165	0,1	0,0009	163	5,2
10				0	0,0
11				0	0,0
Total	180.201	100	1,032	3.112	100
RH Atlântico Sul					
1	98.242	51,5	0,524	187	8,4
2	46.901	24,6	0,25	122	5,5
3	23.011	12,1	0,123	173	7,8
4	12.539	6,6	0,067	345	15,6
5	6.277	3,3	0,033	456	20,6
6	2.235	1,2	0,012	434	19,6
7	1.472	0,8	0,008	361	16,3
8	265	0,1	0,001	136	6,1
9				0	0,0
10				0	0,0
11				0	0,0
Total	190.942	100	1,018	2.213	100
RH do Paraguai					
1	168.561	50,6	0,464	320	6,4
2	80.305	24,1	0,221	209	4,2
3	41.904	12,6	0,115	314	6,3
4	22.127	6,6	0,061	608	12,2
5	10.863	3,3	0,031	790	15,8
6	4.587	1,4	0,012	891	17,9
7	3.381	1,0	0,009	828	16,6
8	1.370	0,4	0,004	701	14,1
9	326	0,1	0,0008	322	6,5
10				0	0,0
11				0	0,0
Total	333.423	100	0,917	4.983	100