

**ANÁLISE COMPARATIVA DE METODOLOGIAS APLICADAS À DELIMITAÇÃO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE – RN**

**Comparative analysis of methodologies applied to the demarcation of the
basin of Rio Doce - RN**

Franklin Roberto da Costa

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Pau dos Ferros, Rio Grande do Norte, Brasil.
franklincosta@uern.br

Raquel Franco de Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.
francodesouza.raquel@gmail.com

Sebastião Milton Pinheiro da Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.
sebastiaomilton@gmail.com

Artigo recebido em 25/07/2016 e aceito para publicação em 01/12/2016

RESUMO: A bacia hidrográfica é considerada um recorte geográfico importante para o planejamento ambiental. A sua precisa delimitação permite realizar um planejamento adequado para ocupação e uso correto pela sociedade. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa visual das delimitações automáticas realizadas com os programas TauDEM, SAGA e TERRAHIDRO, bem como da delimitação por análise visual, com as delimitações oficiais do SEMARH - RN e da ANA (ottobacia nível 05), visando redefinir e atualizar os limites da bacia hidrográfica do Rio Doce/RN. Para fazer a delimitação utilizaram-se os dados de elevação do terreno do banco de dados geomorfométricos do Brasil, TOPODATA, hidrografia das cartas topográficas da SUDENE, na escala 1:100.000 e imagens do Google Earth. Os dados foram trabalhados nos SIGs QGIS 2.14 Essen e Terraview hidro 0.4.1. Os resultados mostraram que a delimitação por análise visual e automática utilizando a plataforma TERRAHIDRO possibilitou identificar os limites da bacia em suas áreas aplainadas. Já o TauDEM e o SAGA identificaram um paleocanal do rio Doce, direcionando assim o ponto exutório da bacia. Entende-se que o TERRAHIDRO apresentou o melhor resultado para a delimitação da bacia, propondo-se seu uso em bacias hidrográficas com escalas média e grande.

Palavras-chave: QGIS; Geotecnologias; TOPODATA; Bacias.

ABSTRACT: The watershed is considered a geographical clipping important for environmental planning. Its correct delineation allows appropriate planning with the needs of society. In this sense, the present work aims to carry out a comparative analysis of visual automatic boundaries performed with the programs TauDEM, SAGA and TERRAHIDRO, as well as the delimitation by visual analysis, with the official boundaries of the SEMARH-RN and ANA (ottobacia 05 level), aiming to redefine and update the limits of the basin of Rio Doce/RN. To do the demarcation used the terrain elevation data of the database geomorphometrics

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1982-451320160308>

of Brazil, TOPODATA, hydrography of topographical maps of SUDENE, in scale 1:100,000, the Google Earth images, worked in SIGs QGIS 2.14 “Essen” and the Terraview hydro 0.4.1. The results showed that the delimitation and automatic visual analysis using the TERRAHIDRO Platform identified the basin boundaries in their flattened areas. Already the TauDEM and the SAGA identified a palaeochannel of Doce river, directing, so the mouth of the basin point. It is understood that the TERRAHIDRO presented the best result for the demarcation of the basin by its use to basin to medium and large scales.

Keywords: QGIS; TERRAHIDRO; Geotechnology; TOPODATA; Basins.

INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica como unidade de planejamento ambiental vem sendo analisada por várias ciências, com foco não apenas na questão dos recursos hídricos, mas aliando também todos os elementos físicos e antrópicos que a caracterizam. Rasmussen e Carpenter (1983) definem bacia hidrográfica como toda a área geográfica que drena água, sedimentos e materiais em solução para um ponto comum, em todo o curso de água ou rio.

Botelho e Silva (2004) consideram as bacias hidrográficas como unidades de análise e planejamento ambiental, sendo possível avaliar as ações humanas sobre o ambiente de forma integrada.

A delimitação dos divisores de água de uma bacia hidrográfica é considerada importante para estudos ligados à sua modelagem hidrológica e ambiental (RIBEIRO et al., 2008) e representa a primeira etapa para sua representação geoespacial (SEYLER et al., 2009).

De um modo geral, a delimitação de bacias hidrográficas não parece apresentar dificuldades do ponto de vista da sua cartografia territorial básica. Isto porque, as características físicas que a delimitam são perceptíveis em vários instrumentos de análise espacial e independem de fatores socioeconômicos para que se possam identificar os seus limites geoespaciais.

Historicamente, a delimitação físico-territorial de uma bacia hidrográfica, foi, ao longo do tempo, realizada sobre imagens aéreas (fotografias) e cartas topográficas, buscando seu contorno mediante a análise e traçado do relevo a partir de curvas de nível do terreno (COSTA et al, 2007; MARK, 1983, SILVA; ABDON, 1998).

Costa et al (2007) apontam que, para a análise destes produtos, se fazia necessário um bom treinamento para os executores, pois a visão planar 2-D dos atributos de relevo, no formato de curvas de nível, não é de fácil interpretação pelo olho humano, cuja princi-

pal característica é o atributo da visão tridimensional. Aliado a isso, a modelagem do relevo a partir de curvas de nível se deu no mapeamento sistemático brasileiro, entre 1978 e 1985, em escala média de 1:100.000 ou menor (LEAL, 2007). Na escala considerada, fica difícil demarcar e detalhar os contornos dos divisores de águas, ampliando a imprecisão devido ao nível de generalização cartográfica dos produtos gerados.

O advento das geotecnologias no Brasil ampliou as possibilidades de redefinição dos vários tipos de fronteiras e limites territoriais brasileiros, muitos deles protagonistas de litígios seculares, entre municípios e estados, inserindo-se nas disputas os limites das bacias hidrográficas.

As geotecnologias, voltadas para a realização dos diferentes tipos de delimitação terrestre, têm como suporte o Sensoriamento Remoto - SR (LILLESAND, 1990), mediante a tecnologia Light Detection and Ranging – (LIDAR) (COLLIS, 1970), com visão estereoscópica (CAMARGO et al, 2011), a tecnologia RADAR e seus dados, como o TOPODATA (VALERIANO, 2005).

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE afirma que o emprego das geotecnologias está trazendo um novo conhecimento com mais detalhes do território brasileiro, ampliando a visualização e a precisão, por exemplo, do posicionamento dos acidentes geográficos de uma região, em relação aos produtos cartográficos mais antigos (IBGE, 2015).

Vale lembrar que, de acordo com a Constituição Federal, Artigo 18 (BRASIL, 1988), para o caso de limites territoriais estaduais e municipais, os estados são responsáveis pelo trabalho de revisão e definição dos seus respectivos limites (MARANHÃO, 2011; PONTES et al, 2012), podendo o IBGE prestar serviços de orientação técnica e subsidiar com informações os Órgãos Estaduais de Terras e Cartografia e as Assembleias Legislativas (IBGE, 2015).

Outras instituições também utilizam geotec-

nologias para a delimitação e atualização de limites territoriais relacionados, por exemplo, a questões ambientais (COELHO et al, 2013; EUGENIO et al., 2011; JERONYMO et al, 2013; PINHEIRO, 2011).

Quanto ao emprego de geotecnologias para a delimitação territorial de bacias hidrográficas, percebe-se, na literatura, que a automação dos processos de extração das características do meio físico apresenta mais eficiência (MARTZ; GARBRECHT, 1992), proporcionando uma economia de tempo, em detrimento da delimitação manual por análise visual.

Tendo em vista a importância da bacia hidrográfica como unidade de estudo e gestão territorial, estabelecida a partir da lei 9.433/1997 (BRASIL, 1997), a delimitação em escalas cartográficas maiores facilita a resolução de questões político-administrativas e para fins de planejamento ambiental, sob a perspectiva do desenvolvimento sustentável e do ordenamento territorial.

O estudo de caso apresentado neste artigo refere-se à bacia localizada na porção leste do Estado do Rio Grande do Norte, denominada Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Os dados oficiais referentes à delimitação da Bacia do Rio Doce/RN foram gerados pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte - SEMARH, no ano 2000, tendo como referência as cartas topográficas da SUDENE, na escala 1:100.000, folhas SB.25-V-C-V-MI-978 (Natal) e SB.25-V-C-IV-MI-977 (João Câmara) a partir de fotografias aéreas de 1969, restituição em 1970 e edição impressa de 1983, com intervalos de curvas de nível de 50 metros, sendo necessário, portanto, investigar e reavaliar a possibilidade de geração do modelo de elevação do terreno em escala maior de detalhes, a partir de dados TOPODATA que subsidiem a delimitação com maior detalhes dos divisores de água da Bacia do Rio Doce.

Além disto, optou-se ainda por realizar uma análise comparativa de desempenho de delimitação da Bacia do Rio Doce através de metodologias manuais e automáticas por meio de softwares livres open-source (FOSS). Os materiais empregados foram os dados TOPODATA (VALERIANO, 2008), as otobacias brasileiras (ANA, 2006), a hidrografia das cartas topográficas da SUDENE (1983) que recobrem a bacia, atualizadas pela SEMARH (SEMARH, 2000), além do software Google Earth Pro, estruturados em uma base de dados geográficos para os sistemas de informações

geográficas QGIS Essen 2.14 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2015), TERRAHIDRO/INPE (ROSIM et al, 2003), TauDEM - Terrain Analysis Using Digital Elevation Model (<http://hydrology.esu.edu/taudem>) e SAGA/GIS - System for Automated Geoscientific Analyses (<http://www.saga-gis.org/en/index.html>).

Vários são os trabalhos desenvolvidos para a delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando *softwares*. Com o TERRAHIDRO citam-se Falck et al. (2015), Rosim et al. (2012), Santos e Linhares (2012). Com o TauDEM pode-se destacar autores como Schmitt e Moreira (2015); Zhang e Chu (2015); e no ambiente SAGA tem-se, como exemplo, os trabalhos de Aranha e Ferreira (2013) e Marinho Filho (2014);

Neste sentido, o objetivo do presente trabalho é, portanto, realizar análise comparativa de procedimentos metodológicos manuais e automatizados em ambiente SIG para a delimitação dos divisores de águas da bacia hidrográfica do rio Doce a partir de MDE's de radar com resolução espacial de 30 metros e os limites pré-existentes em instituições e órgãos nacionais e estaduais do RN.

MATERIAIS E MÉTODOS

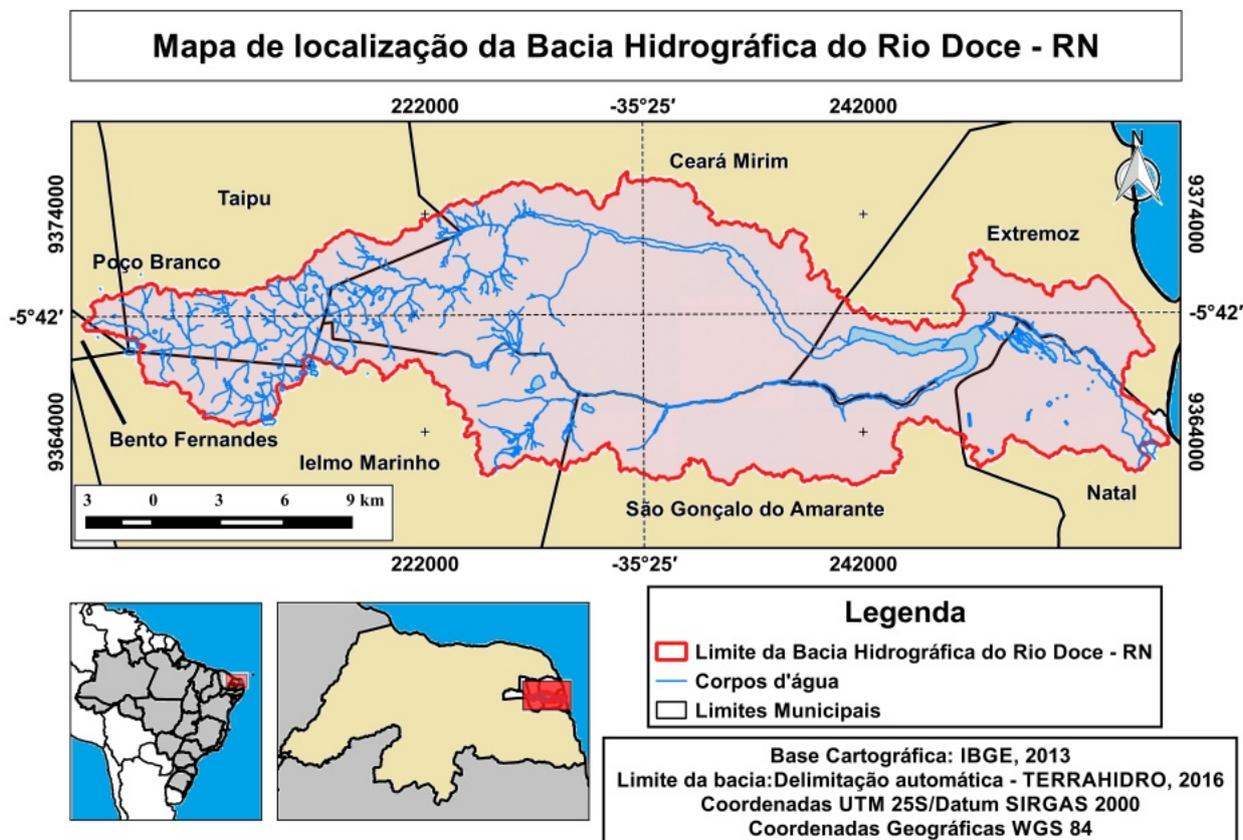
Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce está localizada na porção leste do Estado do Rio Grande do Norte, entre sendo limitada pelos paralelos 5°48' e 5°36' S e meridianos 35°42' e 5°36' W Gr. (205929 UTM E e 9371426 UTM N, SIRGAS 2000/25S), abrangendo uma área de 387,8 km² (SEMARH, 2000) (Figura 1).

O Rio Doce, que dá nome à bacia, tem origem na Lagoa de Extremoz, e esta, por sua vez, é alimentada pelos rios Guajirú e Mudo, que são os principais tributários da bacia, localizados a montante dessa lagoa.

Os rios Guajiru e Mudo são intermitentes em sua nascente, permanecendo assim até a lagoa de Extremoz. A partir deste trecho eles se unificam e passam a correr em um rio principal, perene, denominado rio Doce. Segundo Cunha (2004), este corre sobre sedimentos quaternários de dunas e aluviões até a sua desembocadura. É alimentado por olheiros em aproximadamente 14 km de percurso, pois seu leito está em um nível mais baixo que o nível estático das águas.

Figura 1 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Doce - RN



Fonte: Org. dos autores.

A evolução paleogeográfica da bacia foi complexa, por estar ligada ao desenvolvimento do campo de dunas que contornam e desviam sua desembocadura e drenagem normais, formando lagoas alinhadas, que, em determinadas ocasiões, se comunicam entre si. Apesar da falta de dados mais concretos, Cunha (2004) afirma que houve uma migração de alguns quilômetros da sua desembocadura, como resposta à ação eólica existente. No ano de 1965, para evitar o total soterramento do curso do rio pelo avanço das dunas, o Departamento Nacional de Obras e Saneamento - DNOS canalizou o rio através de dragagens e outras obras superficiais, desviando seu curso para o estuário do rio Potengi, através do Canal de Manimbu (CUNHA, 2004). O autor afirma, ainda, que estudos batimétricos de detalhe, realizados em setembro de 2001, permitiram observar um paleocanal do rio Doce, comprovado a partir de levantamentos geofísicos através de registros na área de pós-praia da Redinha Nova.

A geologia da bacia é formada por depósitos colúvio-eluviais do Neogeno, com sedimentos arenosos e areno-argilosos esbranquiçados e avermelhados (CPRM, 2007), no baixo e médio curso da bacia (20% da sua área) (FAUSTINO, 2015); por rochas sedimentares inconsolidadas do Paleogeno e Neogeno do Grupo Barreiras (CPRM, 2007), localizadas do baixo ao médio curso da bacia, totalizando 44% da área (FAUSTINO, 2015) e no alto curso da bacia ocorrem rochas plutônicas do Ediacarano, pertencentes à suíte intrusiva Dona Inêz (CPRM, 2007), ocupando 14% da área da bacia (FAUSTINO, 2015).

A geomorfologia está representada por unidades da Depressão Sertaneja, Tabuleiros, dunas fixas e móveis, Planície Flúvio-Marinha e Planície de Inundação Fluvial (IDEMA, 2005). Os solos são classificados em neossolo quartzarênico, latossolo amarelo distrófico, planossolo solódico, solos indiscriminados de mangue e o argissolo vermelho-amarelo eutrófico (IGARN, 2009).

Materiais

Os dados TOPODATA da área em estudo foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, mais precisamente a partir do Banco de dados geomorfométricos do Brasil construído no projeto TOPODATA (VALERIANO, 2005).

Os processos de delimitação da bacia foram realizados no QGIS Essen 2.14 e no TERRAHIDRO 0.3.9. O primeiro teste foi feito a partir da análise visual comparativa das ottobacias (ANA, 2006), disponíveis em formato vetorial shapefile (shp) no site da Agência Nacional das Águas - ANA (<http://www.ana.gov.br>) com os dados das cartas topográficas digitais da SUDENE, atualizadas pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do RN (SEMARH, 2000), também em formato *.shp, e os dados vetoriais gerados manualmente a partir do TOPODATA (VALERIANO, 2008).

Os segundo e terceiro testes consistiram na delimitação automática da bacia hidrográfica a partir dos softwares TauDEM, SAGA GIS e a plataforma TERRAHIDRO/INPE. Os dois primeiros *softwares* foram inseridos a partir de plug-ins existentes no QGIS Essen 2.14, seguindo metodologia adotada por Martinez (2015) e Santos (2015) e o *plugin* TERRAHIDRO foi trabalhado no TERRAVIEW/INPE.

O TERRAHIDRO é uma plataforma desenvolvida para facilitar o desenvolvimento de aplicativos na área de recursos hídricos. Integra funções como capturar, representar, armazenar, manipular, recuperar e processar informações físicas e socioambientais relacionadas a elementos de bacias hidrográficas, em ambiente geo-computacional (ROSIM et al., 2003).

Procedimentos Metodológicos

A primeira fase consistiu na obtenção de dados espaciais referentes à bacia em órgãos públicos e privados, que pudessem dar a noção da sua localização espacial no Estado, e de dados TOPODATA da quadrícula 05S36 referentes à área de estudo. Os dados TOPODATA foram baixados e armazenados em ambiente SIG em coordenadas do sistema UTM 25S, Datum SIRGAS 2000, EPSG: 31985, no formato Geotiff.

Em seguida, foram importados os dados veto-

riais referentes às ottobacias de nível 05 (ANA, 2006), as curvas de nível, pontos cotados e hidrografia das cartas topográficas digitalizadas da SUDENE, escala 1:100.000. Foram importados ainda o plugin *openlayers* no SIG QGIS Essen 2.14 que permite a visualização das imagens orbitais da área de estudo no programa computacional Google Earth, além dos pontos georreferenciados de visita a campo para reconhecimento das possíveis áreas limítrofes da bacia do rio Doce.

Análise e delimitação Manual

A delimitação manual da bacia teve como referência inicial os dados altimétricos com cota 30 metros gerados pelo TOPODATA. Nesta vetorização foi sobreposta uma camada da imagem de satélite fornecida pelo Google Earth a partir do plugin *openlayers*. Para identificar os limites da Bacia utilizou-se a ampliação da elevação vertical em 3 vezes no Google Earth Pro. O resultado foi uma imagem que permitiu auxiliar, interativamente, no traçado dos limites da bacia. Em seguida, utilizou-se o plugin *Qgis2threejs*, que permitiu realizar uma visualização em 3 dimensões do terreno. O objetivo deste plugin foi a visualização dos limites (topos) da bacia. A hidrografia extraída das cartas topográficas da SUDENE (1983) e os pontos cotados de altimetria, além dos limites das Ottobacias (nível 05) proposta pela ANA (2006), serviram como direcionamento para a vetorização manual, a partir da análise visual dos limites da bacia.

Delimitação Automática com o software Taudem

Segundo Tarboton (2015), o software TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models) constitui um conjunto de ferramentas para a análise do terreno utilizando modelos digitais de elevação. Ele incorpora programas e funções de análise de Modelo Digital de Elevação (MDE) desenvolvidas ao longo de vários anos de pesquisas (CARVALHO, 2007; JESUS, 2009; MIOTO et al, 2014).

A delimitação da bacia do Rio Doce foi realizada em duas etapas. A primeira se deu a partir dos comandos: Pit Remove (preenchimentos de lacunas do MDE); D8 Flow Directions (mapeamento da drenagem); D8 Contributing Area (delimitação da bacia a partir da identificação do exutório); Stream Definition by Threshold (geração

de *raster* da rede de drenagem) (SANTOS, 2015)

Na segunda etapa foram utilizados os comandos: Identificação do exutório (plugin *openlayersplugins* no QGIS Wien 2.8); D8 Contributing Area com outlets shapefile (Delimitação da bacia do rio Doce); Conversão de *raster* para vetor.

Delimitação Automática com o software SAGA

A delimitação da bacia com o SAGA foi executada como relatado a seguir. Inicialmente, escolheu-se a opção Fill Sinks (Wang e Liu, 2006). Segundo Wang e Liu (2006), esta metodologia foi criada para identificar e preencher as depressões da superfície nos Modelos Digitais de Elevação, visando determinar a direção do fluxo e a divisão das microbacias com apenas um comando. O resultado foram 3 produtos: a) Filled DEM, b) Flow Directions e o c) Watershed Basins. O segundo passo foi a transformação do formato matricial em vetorial. Para tanto, no menu *raster* (matricial) do QGIS Essen 2.14 acessou-se o sub-menu conversão e, em seguida, a opção poligonalizar (*raster* para vetor). O resultado foi a divisão das bacias hidrográficas existentes dentro do recorte espacial analisado.

Após a transformação da imagem *raster* em vetor (do tipo *shapefile*), fez-se a extração da bacia hidrográfica do Rio Doce para comparar o produto vetorial resultante com as demais delimitações realizadas.

Delimitação Automática com o software TERRAHIDRO

No TERRAHIDRO, o processo de identificação dos limites da bacia hidrográfica do Rio Doce ocorreu a partir das seguintes etapas: *Flow Extraction* (direção de fluxo), *Contributing Area* (fluxo acumulado), *Drainage Extraction* (extração da rede de drenagem), *Segments* (definiu segmentos de drenagem), *Mini Basins* (delimitou a área de contribuição para cada segmento da rede de drenagem), *Vector Segments* (vetorizou cada segmento da rede de drenagem), *Vector Watersheds* (vetorização de cada bacia da rede de drenagem em formato vetorial), *Outlet Points* (Ponto para delimitação de áreas de contribuição), *Watershed Delineation* (delimitação da BH) e *Vector Watersheds* para vetorização de cada bacia tendo como referência o *outlet point* (ROSIM et al., 2003).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos foram analisados sob dois aspectos: em um primeiro momento compararam-se os valores de área e perímetro encontrados nas diferentes delimitações consideradas (Quadro 1). Em um segundo momento compararam-se os resultados das delimitações espaciais ao longo da área da bacia.

Quadro 1 - Área e perímetro da bacia do Rio Doce obtidos em órgão oficial e com diferentes metodologias

Delimitador	Área (km ²)	Diferença área (%)	Perímetro (km)
Limite SEMARH (mapa)	387,8	-	113,9
Limite Manual	390,1	0,6	131,4
Limite ANA (ottobacia 05)	451,5	16,4	136,2
Limite TauDEM	391,3	0,9	195,4
Limite SAGA	434,1	11,9	152,9
Limite TERRAHIDRO	396,7	2,3	209,8

Fonte: Org. dos autores

Percebe-se que as diferenças percentuais entre as áreas foram pequenas, exceto as observadas nas delimitações realizadas pela ANA e no programa SAGA, cujos valores alcançaram, respectivamente, 16,4% e 11,9% do tamanho do limite oficializado pelo Governo do Estado do Rio Grande do Norte. Estes aumentos

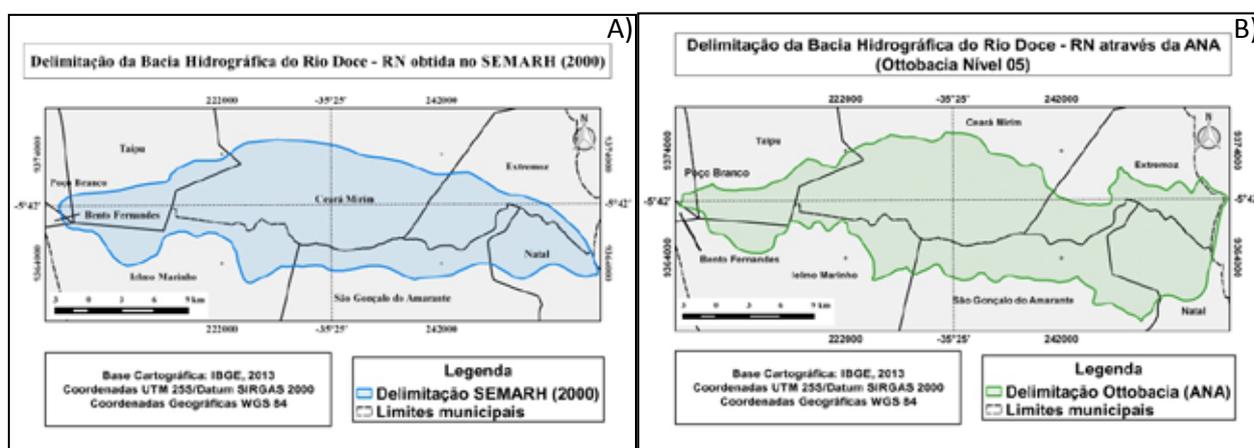
nos valores da área de representação da bacia podem ser ocasionados pela identificação de drenagem em paleocanal, redirecionando sua foz acima do curso atual. Segundo Cunha (2004), o rio foi retificado, canalizado para adequação da infraestrutura urbana instalada no local.

Já em relação ao perímetro da bacia, o SAGA, o TERRAHIDRO e o TauDEM apresentaram os maiores valores, e os resultados finais da delimitação apresentam endentação natural de um dado *raster*. Os perímetros observados nos mapas da SEMARH e da ANA não apresentam endentação observada nas delimitações automáticas (Figura 2 A e B).

Nos limites oficiais da SEMARH e ANA percebe-se uma semelhança na delimitação da bacia

no seu alto curso. A partir do médio curso, em direção à foz, há uma diferença na sinuosidade entre os limites da SEMARH e da ANA. Isto ocorre porque a base cartográfica utilizada pelo órgão estadual foram as cartas topográficas da SUDENE (1983). A delimitação da bacia realizada pela ANA utilizou a hidrografia gerada pelo IBGE (1:1.000.000), compilada do Modelo Digital de Elevação extraída dos dados Shuttle Radar Topography Mission - SRTM (ANA, 2007).

Figura 2: Delimitações realizadas por órgãos públicos Estadual e Federal, respectivamente (A) SEMARH – RN e (B) ANA.



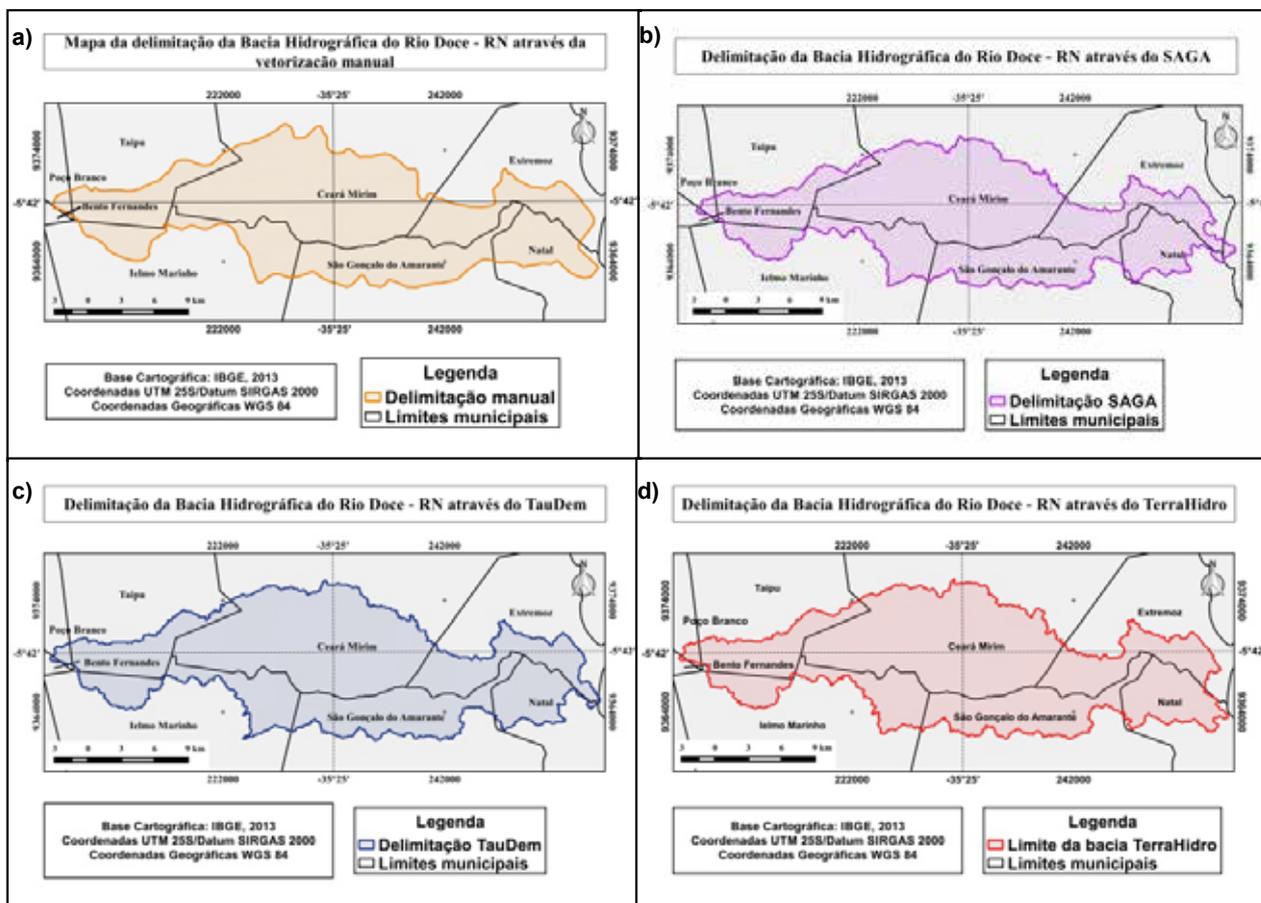
Fonte: Adaptado de SEMARH (2000) e ANA (2007)

No produto da ANA, observa-se que o limite apresenta um contorno com mais detalhes. No entanto, como a vetorização da hidrografia a partir das cartas da SUDENE possui uma escala cartográfica maior (com mais detalhes), a foz do rio ficou melhor delimitada se comparada com a delimitação da ANA, que extrapolou

nas porções nordeste e sudeste da bacia.

As delimitações realizadas nos softwares QGIS e TERRAHIDRO apresentaram diferenças e semelhanças entre si e entre as delimitações oficiais da SEMARH e da ANA (Figura 3).

Figura 3: Delimitações manual e automáticas da bacia hidrográfica do Rio Doce – RN: a)Manual, b)SAGA, c)TauDEM e d)TERRAHIDRO.



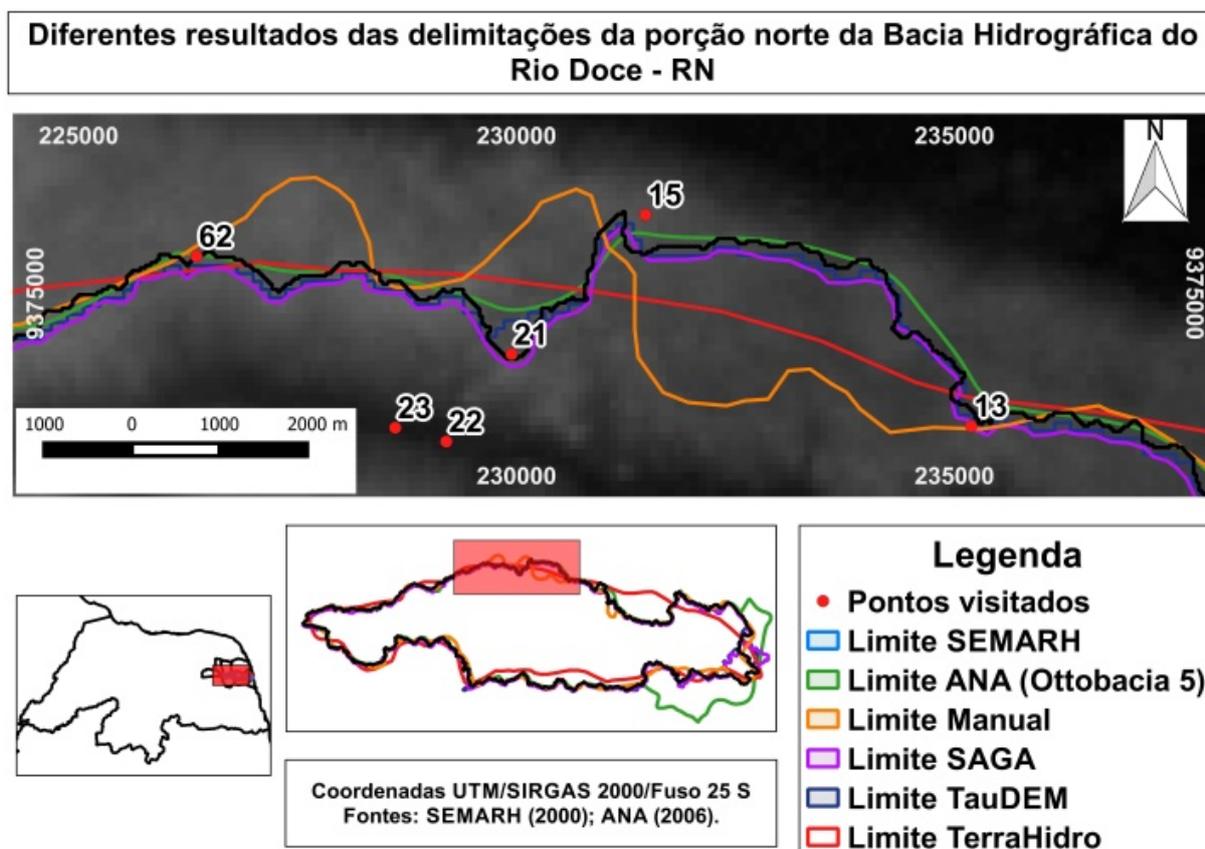
Fonte: Org. dos autores

Os resultados obtidos com a delimitação manual a partir dos dados do MDE/TOPODATA assemelham-se com os obtidos de forma automática em toda extensão da bacia, principalmente na porção oeste. No entanto, observaram-se algumas discrepâncias que serão discutidas a seguir. Assim como na delimitação da SEMARH, a delimitação manual não apresenta a endentação percebida naquelas realizadas

de forma automático. Além disso, houve diferenças na porção centro-norte da bacia, bem como na foz.

São nítidas as diferenças entre os limites da bacia gerados pela SEMARH (2000) e pela ANA (2006) e as demais delimitações. Destaca-se a porção centro-norte da bacia, na qual se insere uma grande área que nos demais métodos não aparece (Figura 4).

Figura 04 - Diferença na porção centro-norte da bacia.



Fonte: Org. dos autores

Essas diferenças poderiam ser justificadas em função da escala utilizada na época da elaboração dos limites (1:100000), bem como pelo tipo de equipamento e materiais utilizados no momento da delimitação da bacia pelos órgãos estadual e federal (SEMARH e ANA, respectivamente); cita-se ainda o efeito do relevo aplainado que, na análise visual, prejudica a interpretação das informações.

Ainda sobre a porção norte da bacia, a delimitação a partir da análise visual também apresentou diferenças, com uma sinuosidade excessiva quando comparado com as delimitações automáticas.

Para certificar a delimitação mais adequada para a área em estudo, foram realizadas visitas em campo, visando não apenas definir os limites da bacia (pontos 15, 21 e 62), mas também identificar a rede de drenagem (22 e 23) (FIGURA 04).

A etapa de verificação in loco (em campo)

foi realizada em alguns pontos dos limites da bacia, da nascente a foz, com destaque para os locais que apresentaram maiores discrepâncias entre os limites oficiais utilizados (SEMARH e ANA) e/ou os gerados com o apoio das Geotecnologias (Manual, TauDEM, SAGA e TERRAHIDRO).

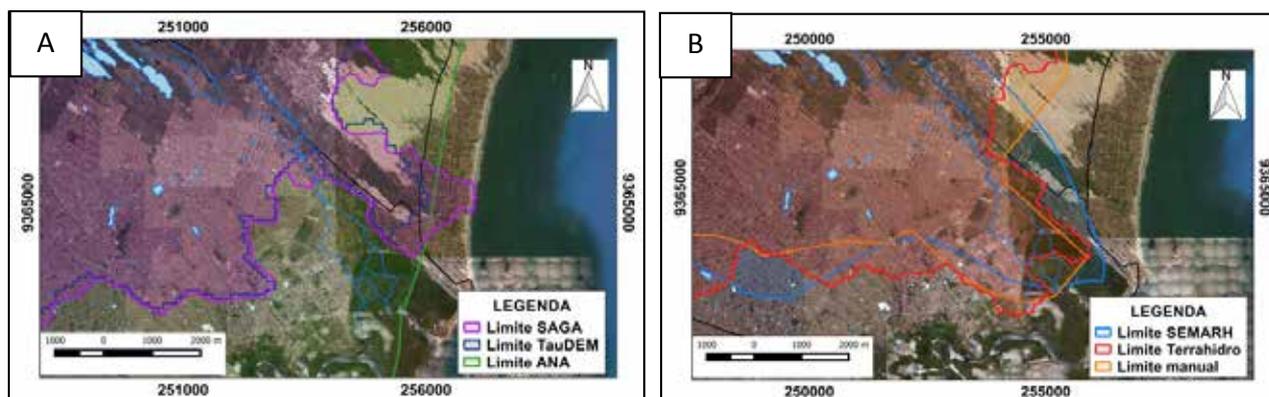
Outra diferença perceptível se deu na foz do rio. Os limites gerados com o SAGA e TauDEM identificaram uma foz mais ao norte da atual (FIGURA 05). Dois fatores podem ter ocasionado este problema. O primeiro relaciona-se ao relevo da área de estudo, pois se apresenta aplainado, dificultando a elaboração do Modelo Numérico de Elevação – MDE. Por conseguinte, a identificação dos limites da bacia com pequenas diferenças de declividade fica comprometida. Segundo Oliveira et al (2009) e Brubacher et al (2012), há uma tendência de aumento no deslocamento das drenagens à medida que diminui a declividade nas imagens TOPODATA.

A segunda causa pode ser a identificação de um paleocanal do rio Doce, que teve seu curso retificado pelo avanço das dunas, fazendo-o desaguar no Rio Potengi, a sudeste da bacia e não diretamente no oceano, como fazia antes de 1963 (CUNHA, 2004).

Na utilização dos procedimentos automáticos de delimitação da bacia, os programas geraram redes

de drenagem a partir dos dados TOPODATA que servem de base para sua representação espacial. Nos softwares SAGA e TauDEM, a rede de drenagem gerada permitiu identificar na sua foz apenas o curso antigo. No caso do TauDEM, que usa o ponto exutório da bacia para delimitação automática, demarcou-se aquele referente à foz extraída dos dados TOPODATA.

Figura 05 - Diferentes delimitações da foz da bacia. A) Delimitações com erros na identificação da foz. B) Delimitações com identificação correta da foz.



Fonte: Org. dos autores

No TERRAHIDRO, a rede de drenagem extraída do TOPODATA identificou a foz atual da bacia, permitindo demarcar seu ponto exutório e conseqüentemente a delimitação mais aproximada do curso atual do rio Doce.

A delimitação manual, a partir da análise visual das imagens do Google Earth permitiu delimitar a foz da bacia atual, se aproximando da delimitação automática realizada na plataforma TERRAHIDRO.

Convém lembrar que o uso de fotos aéreas em escala maiores e/ou imagens de satélite sem e com recursos de estereoscopia permitirão traçar e representar, com maior exatidão, as informações de relevo, além de informações relativas às características do meio físico, tais como geologia, geomorfologia, solos, além da sua delimitação espacial.

Entende-se, portanto, a necessidade do uso de instrumentos tecnológicos visando diminuir custos para a execução de trabalhos relacionados a uma possível atualização da delimitação das demais bacias hidrográficas do Estado. No entanto, é preciso estar atento para a execução dos comandos necessários voltados à geração de produtos com qualidade e precisão

cartográfica compatível com a escala empregada para não falsear os resultados.

CONCLUSÕES

A delimitação da bacia hidrográfica do Rio Doce apresentou, de uma maneira geral, características semelhantes na área das nascentes do rio para todas as formas de delimitação. No entanto, a partir da porção central da bacia, observaram-se diferenças entre as delimitações automáticas e visual, principalmente nas porções centro-norte e leste da bacia. Essas áreas apresentam um relevo aplainado, dificultando a identificação da rede de drenagem de primeira ordem, e a identificação das cumeeiras e quebras de relevo, na escala dos dados empregados, gerando, por conseqüente, diferentes perímetros e áreas da bacia pelas metodologias utilizadas.

A mudança do traçado do rio Doce, que antes de 1963 desaguava no oceano Atlântico, na praia da Redinha, gerou um novo percurso para a drenagem, que hoje deságua no estuário do rio Potengi. A plataforma TERRAHIDRO, a análise visual e a produzida

pela SEMARH, conseguiram representar a bacia pela foz atual. Já os programas TauDEM e SAGA representaram a foz do rio desaguando diretamente no Oceano Atlântico. A delimitação do SAGA foi a que mais extrapolou os limites, já que avançou para o oceano, caracterizando, assim, como a menos adequada para este setor.

Uma análise comparativa entre as metodologias empregadas na delimitação da bacia hidrográfica do rio Doce/RN permitiu observar que as delimitações automáticas, em comparação com a delimitação manual, apresentaram os resultados mais condizentes com a escala de análise utilizada neste artigo. Entre as delimitações automáticas, a diferença entre o TauDEM, o TERRAHIDRO e o SAGA está na forma de execução, pois os 02 primeiros necessitam de mais comandos no software, enquanto que o SAGA realiza a mesma ação com apenas 02 (dois) comandos.

No entanto, para execução automática, a delimitação do TERRAHIDRO apresentou o melhor resultado, pois nela a rede de drenagem gerada pelo programa seguiu o curso do rio para a foz atual, contribuindo assim para a determinação dos limites da bacia.

A delimitação por análise visual apresentou como qualidade a suavidade das linhas usadas, bem como uma melhor localização da foz do rio.

Diante dos resultados obtidos, verifica-se que, para a bacia Hidrográfica do Rio Doce, a melhor delimitação foi obtida na plataforma TERRAHIDRO, pois esta apresentou as melhores respostas para a sua delimitação na escala de análise executada em toda a bacia.

No entanto, considera-se importante a análise visual baseada em fotointerpretação, acompanhada de um bom embasamento teórico e sempre a realização de visitas a campo, como nesse estudo, para comprovar a veracidade dos resultados obtidos.

Importante destacar que as características dos dados empregados não possibilitam uma delimitação mais refinada em termos de escala cartográfica. Contudo, os resultados demonstram que é possível redefinir os limites de bacias hidrográficas com os dados, as ferramentas e os procedimentos empregados como forma de, rapidamente, se fazer uma atualização dos limites de bacias estaduais e federais.

REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas. *Topologia hídrica: método de construção e modelagem da base hidrográfica para suporte à gestão de recursos hídricos: versão 1.11.* / Agência Nacional de Águas, Superintendência de Gestão da Informação. Brasília: ANA, SGI, 2006. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2016.

ARANHA, C.F.; FERREIRA, N.C. Mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite – GO, utilizando software livre. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. *Anais...* Bento Gonçalves – RS, nov. 2013.

BOTELHO, R. G. M.; DA SILVA, A. S. Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. *Reflexões sobre a geografia física no Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. *Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997*. Diário Oficial da União. Brasília, Imprensa Oficial, 09 de janeiro de 1997.

BRASIL. Agência Nacional de Águas – ANA. *Manual de construção da base hidrográfica Otocodificada: fase 1 – construção da base topológica de hidrografia e otobacias conforme a codificação de bacias hidrográficas de Otto Pfafstetter: versão 2.0 de 1/11/2007*. Brasília: ANA, SGI, 2007.

BRUBACHER, J.P.; OLIVEIRA, G.G.; GUASSELLI, L.A.; LUERCE, T.D. Avaliação de bases SRTM para extração de variáveis morfológicas e de drenagem. *Geociências*, São Paulo, UNESP, v.31, n.3, pp. 381-393, 2012.

CAMARGO, F.F.; FLORENZANO, T.G.; ALMEIDA, C.M.; OLIVEIRA, C.G. Mapeamento geomorfológico com imagens estereoscópicas digitais do sensor ASTER/Terra. *Geociências*, UNESP, São Paulo, v.30, n.1, pp.95-104, 2011.

- CARVALHO, P.R.S. *Análise comparativa de métodos para delimitação automática das sub-bacias do alto curso do rio Preto*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Gestão Ambiental e Territorial, UNB. Brasília, 2007.
- COELHO, E.F.; SANTOS, A.R.; SANQUETTA, A.L.L.; SANT'ANNA, L.F. Identificação e quantificação das áreas em conflito com a legislação ambiental brasileira para Alegre, Espírito Santo, ES, Brasil. *Revista Geográfica Venezolana*, v.54, pp.31-45, 2013.
- COLLIS, R.T.H. Lidar. *Applied optics*, v.9, n.8, pp. 1782-1788, 1970.
- COSTA, C.A.G.; COSTA, A.C.; TEIXEIRA, A.S.; ALVES, N.N.L.; ANDRADE, E.M.; SOUZA, B.F.S.; LEÃO, A.O. Comparação do uso do SRTM para delimitação e caracterização fisiográfica de uma micro-bacia hidrográfica. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. *Anais...*, Florianópolis – SC, pp.4833-4840, 2007.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. *Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte - Escala 1:500.000*. Recife, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2007.
- CUNHA, E.M.S. *Evolução atual do litoral de Natal – RN (Brasil) e suas aplicações a gestão integrada*. Tese (Doutorado). Programa de Doctorado de Ciencias del Mar. Departament d'Ecologia e Departament d'Estratigrafia i Paleontologia. Universitat de Barcelona. Barcelona, 2004.
- EUGENIO, F.C.; SANTOS, A.R.; LOUZADA, F.L.R.O.; PIMENTEL, L.B.; MOULIN, J.V. Identificação das áreas de preservação permanente no município de Alegre utilizando geotecnologia. *Cerne*, Lavras, v. 17, n. 4, pp. 563-571, out./dez. 2011. DOI: 10.1590/S0104-77602011000400016.
- FALCK, A.S.; MAGGIONI, V.; TOMASELLA, J.; VILA, D.A.; DINIZ, F.L.R. Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: a case study in the Tocantins-Araguaia basin in Brazil. *Journal of Hydrology*. n.527, pp.943-957, 2015. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.05.042
- FAUSTINO, A.B.; SILVA, S.M.P. Caracterização geomorfométrica da bacia hidrográfica do rio Doce (RN), utilizando dados TOPODATA e recursos de geoprocessamento. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. *Anais...*, João Pessoa, PB, pp. 7493-7500, 2015.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Sobre base territorial*, 2015. Disponível em: <<http://saladeimprensa.ibge.gov.br/sala-de-imprensa-publicacoes/guia-das-atividades-de-geociencias/sobre-base-territorial.html>>. Acesso em: out.2015.
- IDEMA. Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente. Banco de Dados Geográficos. *Geomorfologia - RN*, Escala:1:100.000, 2005. CDROM.
- IDEMA. Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente. *Banco de Dados Geográficos. Solos - RN*, Escala:1:100.000, 2012. CDROM
- IGARN. Instituto de Gestão das Águas do RN. Sistema hidrográfico do estado, divisão de bacias hidrográficas. *Bacia Doce*, 2009. Disponível em: <<http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/IGARN/DOC/DOC00000000029746.HTML>>. Acesso em: 10 mar. 2016.
- JERONYMO, C. A. L.; SILVA, J. A. F.; FONSECA, K. T. Uso de geotecnologias na resolução do conflito territorial dos limites geográficos da APA do Sana-Macaé-RJ. *Seminário Regional Sobre Gestão de Recursos Hídricos*, n. 3, 2013.
- JESUS, N. *Avaliação do modelo digital de elevação ASTER para análise morfométrica de bacias hidrográficas*. Tese (Doutorado) Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas - SP, 2009.
- LEAL, P.R.G. *Controle de qualidade em Cartografia: proposta metodológica para avaliação das cartas topográficas do mapeamento sistemático nacional*. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC. Florianópolis – SC, 2007.

- LILLESAND, T. Satellite remote sensing: its evolution and synergism with GIS Technology. *Government Information Quartely*, v.3, n.3, pp.307-327, 1990. DOI: 10.1016/0740-624X(90)90027-L .
- MARANHÃO. Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos - IMESC. *Redefinição dos limites e divisas dos municípios do Estado do Maranhão*. São Luís - MA: Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos - IMESC, 2011. Disponível em: http://www.imesc.ma.gov.br/temp/docs/Relatorio_Identificacao_Territorial.pdf. Acesso em jan. 2016.
- MARINHO FILHO, G.M. *Avaliação do potencial natural de erosão na bacia hidrográfica do rio Formoso através da aplicação da equação universal de perda do solo*. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Tocantins. Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental. Palmas – TO, 2014.
- MARK, D.M. Relations between field-surveyed channel networks and map-based geomorphometric measures, Inez, Kentucky. *Annals of the Association of American Geographers*, n.73, v.3, pp.358-372, 1983.
- MARTINEZ, H. *Delimitação de bacias e extração de rede de drenagem no SAGA GIS*, 2015. Disponível em: <http://www.processamentodigital.com.br/2015/09/21/qgis28-delimitacao-de-bacias-no-saga/>. Acesso em: jul. 2015.
- MARTZ, L.W.; GARBRECHT, J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models. *Computers & Geosciences*, v.18, n.6, pp. 747-761, 1992. DOI: 10.1016/0098-3004(92)90007-E.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. *Cadastro Ambiental Rural: conceito, experiências e desafios no contexto das políticas de regularização ambiental*. Brasília, 2012.
- MIOTO, C.L.; RIBEIRO, V.O.; SOUZA, D.M.Q.; PEREIRA, T.V.; ANACHE, J.A.A.; PARANHOS FILHO, A.C. Morfometria de bacias hidrográficas através de SIGs livres e gratuitos. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, v.37, n.2, pp.16-22, 2014. DOI: 10.11137/2014_2_16_22.
- OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L.A.; SALDANHA, D.L. Avaliação da qualidade da drenagem extraída a partir de dados SRTM. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, MS. *Anais...*, 2009, p. 1-17.
- PINHEIRO, P.F.V. *A cartografia e o geoprocessamento como instrumento de análise das propostas de redefinição dos limites territoriais da Floresta Nacional do Jamanxim - Estado do Pará*. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Pará. Programa de Pós- Graduação em Geografia. Belém, PA, 2011.
- PONTES, L.M.V.; ALBUQUERQUE, E.L.S.; MEDEIROS, C.N. *A questão dos limites municipais do estado do Ceará*. Fortaleza - CE, 2012. Disponível em: http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/QUESTAO_LIMITES_MUNICIPAIS_CEARA.pdf. Acesso em: 26 fev. 2016.
- QGIS Development Team, 2015. *QGIS Geographic Information System: Open Source Geospatial Foundation Project*. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 10 dez. 2015.
- RASMUSSEN, E. M., CARPENTER, T. H. The Relationship Between Eastern Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures and Rainfall over India and Sri Lanka. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 517–528, 1983. DOI: 10.1175/1520-0493(1983)111%3C0517:TRBEEP%3E2.0.CO;2.
- RIBEIRO, C.A.A.S.; SOARES, V.P.; SANTOS, R.M.; SOARES, C.P.B. Estruturação topológica de grandes bases de dados de bacias hidrográficas. *Revista Árvore*, Viçosa – MG, v.32, n.4, pp.687-696. DOI: 10.1590/S0100-67622008000400010.
- ROSIM, S.; MONTEIRO, A.M.V; RENNÓ, C.D.; SOUZA, R.C.M.de; SOARES, J.V. TERRAHIDRO - Uma plataforma computacional para o desenvolvimento de aplicativos para a análise integrada de recursos hídricos. *Anais XI SBSR*. Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, pp. 2589 - 2596.

- ROSIM, S. LIMA, S.F.S.; MORAES, E.C.; JARDIM, A.C.; OLIVEIRA, J.R.F. Aplicação do TERRAHIDRO para delimitação automática de drenagem e limite das sub-bacias do rio Miranda. IV Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. *Anais...*, Bonito – MS, pp.405-412, 2012.
- SANTOS, J. *Delimitação de bacias hidrográficas com TauDEM*, 2015. Disponível em: <<http://www.processamentodigital.com.br/2015/04/10/qgis28-delimitacao-de-bacias-hidrograficas-com-taudem/>>. Acesso em jul. 2015.
- SANTOS, L.B.L.; LINHARES, C.A. ArcGis, IDL-HAND e TERRAHIDRO: avaliando eficácia e eficiência na delimitação de bacias hidrográficas usando diferentes fontes de dados altimétricos. Congresso brasileiro sobre desastres naturais. *Anais...*, Rio Claro – SP, pp. 1-10, 2012.
- SCHMITT, A; MOREIRA, C.R. Manejo e gestão de bacia hidrográfica utilizando o software gratuito Quantum – GIS. *Revista Cultivando o saber*. Edição especial, pp. 125 – 137, 2015.
- SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – SEMARH/RN. *Bacia do Rio Doce*, 2000. Disponível em: <<http://servicos.semarh.rn.gov.br/semarh/sistemadeinformacoes/consulta/cBaciaDetalle.asp?CodigoEstadual=07>>. Acesso em: abr. 2015.
- SEYLER, F.; MULLER, F.; COCHONNEAU, G.; GUIMARÃES, L.; GUYOT, J.L. Watershed delineation for the Amazon sub-basin system using GTOPO30 DEM and a drainage network extracted from JERS SAR images. *Hydrological processes*, n.23, pp.3173-3185, 2009. DOI: 10.1002/hyp.7397.
- SILVA, A. M. *Princípios básicos de hidrologia*. Departamento de Engenharia. UFLA, Lavras-MG. 1995.
- SILVA, J. S. V.; ABDON, M. M. Delimitação do Pantanal brasileiro e suas sub-regiões. *Pesquisa Agropecuária brasileira*. Brasília, v.33, n. especial, pp. 1703-1711, 1998.
- SUDENE. *João Câmara*. 62 x 74 cm. Folha SB.25-V-C-IV. Escala 1:100.000. Rio de Janeiro: Cruzeiro do Sul S.A., 1983.
- SUDENE. *Natal*. 62 x 74 cm. Folha SB.25-V-C-V. Escala 1:100.000. Rio de Janeiro: Cruzeiro do Sul S.A., 1983.
- TARBOTON, D. *Terrain Analysis using digital elevation models - TAUDDEM*. Disponível em: <<http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem3.1/>>. Acesso em: jun. 2015.
- VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2005, Goiânia, GO. *Anais...* Goiânia, 2005, pp. 1-8.
- VALERIANO, M. M. *TOPODATA* - banco de dados geomorfométricos locais do Brasil. 2008. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/topodata/data/grd/>>. Acesso em: fev. 2016.
- VON SPERLING, M. V. *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG. 2007.
- ZHANG, J.; CHU, X. Impact of DEM resolution on puddle characterization: comparison of different surfaces and methods. *Water*, v.7, pp.2293-2313, 2015. DOI: 10.3390/w7052293.
- WANG, L.; LIU, H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 20, n. 2, pp.193-213, 2006. DOI: 10.1080/13658810500433453.