



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS HIDROLÓGICOS EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS UBRANAS**

Ítalo Rafael Costa de Mira

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, como requisito obrigatório para a conclusão da disciplina SER 300 – Introdução ao Geoprocessamento.

Docentes:

Prof. Dra. Silvana Amaral Kampel
Dr. Marcos Adami

Discente:

Ítalo Rafael Costa de Mira

São José dos Campos
2024

“A tarefa não é tanto ver o que ninguém viu, mas pensar o que ninguém pensou sobre o que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer (1788 – 1860)

RESUMO

A paisagem é um sistema complexo influenciado por interações entre elementos naturais e sociais, especialmente evidente em ambientes urbanos, onde tais interações frequentemente desencadeiam **desastres naturais, como inundações**, comuns no Brasil. Para entender esses processos, os estudos hidrológicos são fundamentais, pois utilizam **modelos** para prever cenários e auxiliar na tomada de decisões sobre o manejo da água. No entanto, os Modelos Digitais de Elevação (MDE) podem apresentar imprecisões, como depressões espúrias, que interferem na extração de atributos hidrológicos. Portanto, aprimorar a qualidade desses modelos é essencial para obter previsões mais precisas e contribuir para o manejo sustentável da água. Nesse contexto, este estudo investiga o impacto do processamento desses modelos na Bacia Hidrográfica do Rio Tamandateí, em São Paulo, enfatizando a importância da correção dos MDEs para torná-los hidrológicamente consistentes (MDEHCs). A metodologia do trabalho baseou-se na comparação qualitativa entre os atributos hidrológicos extraídos de MDEHCs, com e sem o ajuste do modelo, utilizando uma drenagem de referência. Como resultado geral, observou-se que o ajuste do MDEHC pode resultar em uma extração mais precisa dos atributos hidrológicos, principalmente em relação ao ajuste dos mesmos à drenagem de referência. Assim, a extração de atributos hidrológicos de um MDEHC corrigido, além de melhorar a precisão dos atributos, pode servir como base para a elaboração de políticas e sistemas de gestão e planejamento de bacias urbanas, contribuindo para a mitigação dos efeitos das inundações.

Palavras-chave: inundações urbanas; modelos digitais de elevação hidrológicamente consistentes; estudos hidrológicos; extração de atributos hidrológicos

EXTRACTION OF HYDROLOGICAL ATTRIBUTES IN URBAN WATERSHEDS

ABSTRACT

The landscape is a complex system influenced by interactions between natural and social elements, especially evident in urban environments, where such interactions often trigger natural disasters such as floods, which are common in Brazil. To understand these processes, hydrological studies are fundamental, as they use models to predict scenarios and help make decisions about water management. However, Digital Elevation Models (DEMs) can present inaccuracies, such as spurious depressions, which interfere with the extraction of hydrological attributes. Therefore, improving the quality of these models is essential in order to obtain more accurate predictions and contribute to sustainable water management. In this context, this study investigates the impact of processing these models on the Tamanduateí River Basin in São Paulo, emphasizing the importance of correcting the MDEs to make them hydrologically consistent (MDEHCs). The methodology of the work was based on a qualitative comparison between the hydrological attributes extracted from MDEHCs, with and without the burning of the model, using a reference drainage. As a general result, it was observed that burning the MDEHC can result in a more accurate extraction of hydrological attributes, especially in relation to their adjustment to the reference drainage. Thus, the extraction of hydrological attributes from a corrected MDEHC, in addition to improving the accuracy of the attributes, can serve as a basis for the development of policies and systems for the management and planning of urban basins, contributing to the mitigation of the effects of flooding.

Keywords: urban flooding; hydrologically consistent digital elevation models; hydrological studies; extraction of hydrological attributes

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág</u>
Figura 1 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tamanduateí – SP.....	4
Figura 2 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	5
Figura 3 - Correspondência da drenagem de referência com a imagem de satélite.	6
Figura 4 - Comparação das drenagens da região Norte da Bacia do Rio Tamanduateí - SP (Área 1).	12
Figura 5 - Comparação das drenagens da região Setentrional da Bacia do Rio Tamanduateí - SP (Área 2).....	13
Figura 6 - Comparação dos HANDs para canais de diferentes ordens da Bacia do Rio Tamanduateí – SP.....	14
Figura 7 - Comparação os HANDs para a região Norte da Bacia do Rio Tamanduateí – SP.	15
Figura 8 - Comparação os HANDs para a região Setentrional da Bacia do Rio Tamanduateí – SP.....	15
Figura 9 - Comparação dos HANDs para canais de diferentes ordens da Bacia do Rio Tamanduateí – SP.....	16
Figura 10 - Comparação os HANDs para a região Norte da Bacia do Rio Tamanduateí – SP.	17
Figura 11 - Comparação dos HANDs para a região Setentrional da Bacia do Rio Tamanduateí – SP.....	17
Figura 12 - Áreas Acumuladas Expandidas para MDEHCs sem e com drenagem de referência.	19
Figura 13 - Áreas Acumuladas Expandidas para a região Norte da Bacia do Rio Tamanduateí – SP.....	19
Figura 14 - Áreas Acumuladas Expandidas para a região Setentrional da Bacia do Rio Tamanduateí – SP.....	20
Figura 15 - Hierarquia fluvial da Bacia do Rio Tamanduateí - SP.	21

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DPI	- Divisão de Processamento de Imagens
HAND	- Height Above to the Nearest Drainage
ICESat	- Ice, Cloud, and Elevation Satellite
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDE	- Modelo Digital de Elevação
MDEHC	- Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
NASA	- National Aeronautics and Space Administration
NASADEM	- NASA Digital Elevation Model and Associated Products
PFS	- Priority First Search
QGIS	- Quantum Gis

SUMÁRIO

	<u>Pág</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
2 ÁREA DE ESTUDO	3
3 METODOLOGIA.....	5
3.1 Aquisição e tratamento dos dados	6
3.1.1 Bacia Hidrográfica do Rio Tamanduateí e rede de drenagem de referência ...	6
3.1.2 Modelo Digital de Elevação (MDE).....	7
3.1.3 Tratamento de dados.....	7
3.2 Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente (MDEHC).....	8
3.2.1 Remove Pits.....	8
3.2.2. Stream-Burning	9
3.3 Extração do HAND e da Área Acumulada Expandida.....	10
3.4 Avaliação dos Resultados	11
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
4.1 Rede de drenagem	12
4.2 HAND.....	14
4.2.1 HAND extraído do MDEHC sem drenagem de referência	14
4.2.2 HAND extraído do MDEHC ajustado com a drenagem de referência.....	16
4.3 Área Acumulada Expandida	18
4.4 Hierarquia fluvial.....	21
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

1 INTRODUÇÃO

A paisagem, conceituada por Metzger et al. (2001), é um sistema complexo de elementos interativos que moldam e são moldados pelo seu entorno. Em ambientes urbanos, essas interações frequentemente desencadeiam conflitos entre aspectos sociais e ambientais, resultando em **desastres naturais** (PEDRO; NUNES, 2012). No Brasil, os desastres mais comuns estão ligados a processos hidrológicos, como inundações, alagamentos e enxurradas (NETO, 2024).

Para compreender esses processos que controlam e impactam tanto a dinamicidade da água quanto o uso e ocupação da terra, como o tamponamento dos rios e canais e a ocupação de várzeas em áreas urbanas (SANTOS et al., 2019), destacam-se os estudos hidrológicos (RENNÓ, 2005), também conhecidos como modelagem hidrológica (MARINHO FILHO et al., 2012).

Segundo Schuler (1988) e Moraes (2003), os modelos hidrológicos são ferramentas de representação de sistemas naturais, que permitem uma descrição mais aprofundada e precisa dos fenômenos físicos envolvidos na dinâmica hidrológica da paisagem. Esses fenômenos incluem precipitação, perdas por interceptação, evaporação, infiltração, percolação, entrada e saída de águas subterrâneas, escoamento, além da previsão de cenários (MARINHO FILHO et al., 2012). O processo de modelagem requer um conhecimento detalhado da paisagem e dos processos interativos que afetam a dinamicidade da água (GALVÍNCIO et al., 2006).

Portanto, é importante adotar uma bacia hidrográfica para modelagens hidrológicas, pois suas características estão intimamente relacionadas à produção de água, onde a forma e o relevo influenciam seu regime (ZAKIA, 1998). O relevo, em particular, desempenha um papel fundamental na dinamicidade da água. Portanto, os modelos hidrológicos utilizam dados topográficos da bacia, como limites, declividade, orientação das vertentes e características dos canais de drenagem, para entender como a água se movimenta pela paisagem (MOORE et al., 1993; RENNO, 2005; GALVÍNCIO et al., 2006). Esses atributos topográficos podem ser obtidos por **meio de modelos** (RENNÓ, 2005).

Os modelos são abstrações ou representações da realidade usadas para compreender processos hidrológicos, avaliar práticas de manejo e analisar diferentes usos e ocupações da terra (SPRUILL et al., 2000). Além disso, esses modelos têm sido aplicados na

previsão de eventos futuros relacionados ao regime hídrico, o que auxilia na elaboração de políticas públicas (RIBEIRO; FERREIRA, 2014). Dentre os principais modelos, destacam-se os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) (VALERIANO; CARVALHO JUNIOR, 2003; VASCONSELOS et al., 2012; JARDIM, 2017).

Os MDEs consistem em dados organizados em uma estrutura retangular regular de pixels georreferenciados, representando digitalmente o terreno. Esses dados são obtidos a partir de mapas topográficos de curvas de nível ou por meio de técnicas de sensoriamento remoto (RENNÓ, 2005; BUARQUE, 2009; JARDIM, 2017). Atualmente, os MDEs derivados de sensoriamento remoto são a principal fonte de informações sobre a elevação da superfície terrestre, sendo utilizados na caracterização de bacias hidrográficas e na extração automática de atributos para modelagem hidrológica, como hidrografia, direções de fluxo, áreas de drenagem, declividade e comprimento dos trechos (BUARQUE et al., 2009; MORAIS; SALES, 2016; SANTOS et al., 2019).

Segundo Garbrecht & Martz (1999), a extração automática dos atributos topográficos e hidrológicos a partir de MDEs é uma alternativa viável para a confecção de modelos hidrológicos, devido à qualidade e cobertura dos dados. No entanto, apesar da eficiência e riqueza de informações proporcionadas por essa abordagem, a acurácia dos modelos hidrológicos pode ser afetada por um desafio específico: as depressões espúrias (WANG; LIU, 2006; CHAGAS et al., 2010).

As depressões espúrias são áreas falsamente representadas como depressões no terreno, mesmo que não existam características topográficas reais correspondentes. Essas depressões podem impactar a extração da rede de drenagem e a determinação de atributos hidrológicos. Elas são especialmente comuns em MDEs obtidos por sensoriamento remoto, devido a erros na obtenção dos dados (WANG; LIU, 2006; CHAGAS et al., 2010).

Assim sendo, Heng et al. (2004) destacam a importância da melhoria dos MDEs para a extração da drenagem e de atributos derivados dela, por meio de interpolações e remoção das depressões espúrias, a fim de torna-los hidrológicamente compatíveis ou consistentes (HUTCHINSON, 1989; MORAIS; SALES, 2016; JARDIM, 2017).

Nesse contexto, o presente estudo visa avaliar o impacto do processamento de MDEs na modelagem hidrológica. Serão comparados atributos hidrológicos, como a rede de

drenagem, área acumulada expandida e potenciais áreas de inundação (HAND), extraídos de MDEs originais e consistentes com e sem processamento. A análise será conduzida na Bacia Hidrográfica do Rio Tamanduateí, um afluente do rio Tietê, localizado na Região Metropolitana de São Paulo. A escolha da área justifica-se pela sua importância histórica e atual na desconfiguração da paisagem, devido à canalização, tamponamento, impermeabilização, supressão de áreas verdes e ocupação intensa em áreas de várzea, resultando no aumento das inundações nos últimos anos (RAMALHO, 2007).

Assim sendo, a justificativa do presente trabalho se dá de que a avaliação cuidadosa dos MDEs e a correção das depressões espúrias são essenciais para obter modelos hidrológicos mais precisos e contribuir para manejo sustentável da água na Bacia do Rio Tamanduateí (JARDIM, 2017; PEREIRA et al., 2018; SIQUEIRA, 2022).

1.1 Objetivo

Avaliar como o pré-processamento dos Modelos Digitais de Elevação (MDE) afeta a extração de atributos hidrológicos e sua relevância em pesquisas hidrológicas em áreas urbanas, com foco na Bacia Hidrográfica do Rio Tamanduateí como um caso de estudo.

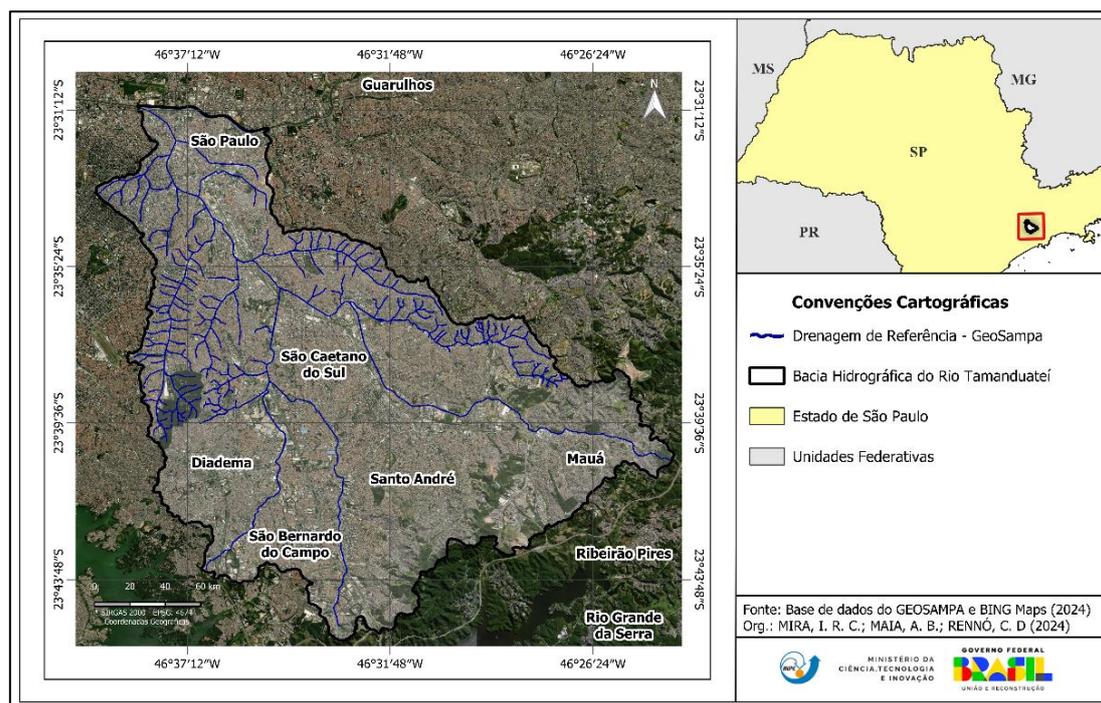
1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar qualitativamente os atributos hidrológicos extraídos de MDEs com e sem processamento, analisando diferenças na representação de características como rede de drenagem e potenciais áreas de inundação.

2 ÁREA DE ESTUDO

O Rio Tamanduateí, que nasce no município de Mauá e deságua no Rio Tietê, atravessa os municípios de Santo André, São Caetano do Sul e São Paulo. Sua bacia hidrográfica abrange uma área de 323 km², correspondendo à sub-bacia do Alto Tietê, incluindo partes dos municípios de São Bernardo do Campo e Diadema (SANTOS et al., 2019). A localização precisa da bacia pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tamanduateí – SP.



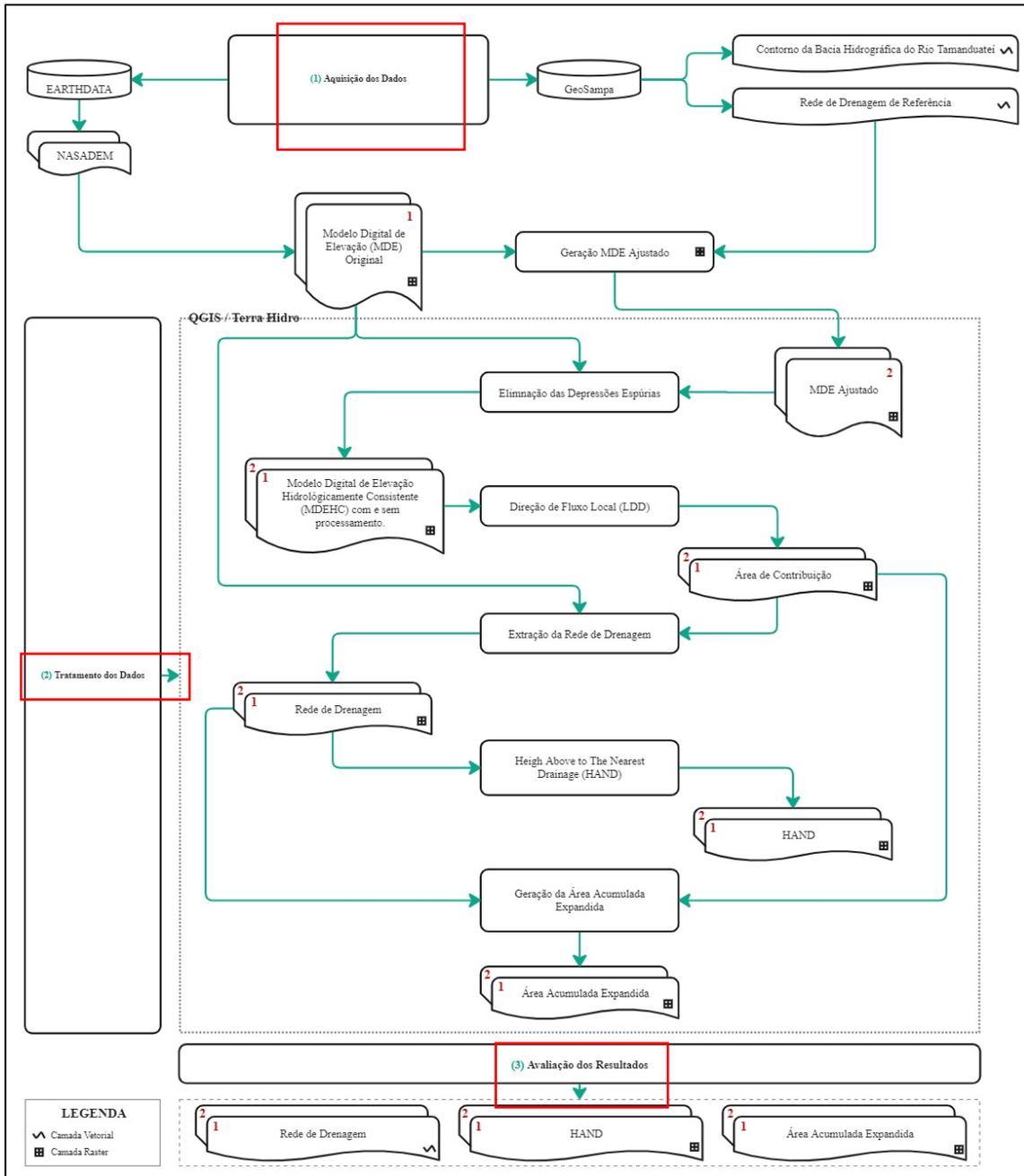
Fonte: Autor.

Originalmente, a bacia hidrográfica do Rio Tamanduateí apresentava meandros sinuosos e uma leve declividade, o que facilitava o escoamento das águas pluviais ao longo de todo o ano, resultando em áreas periodicamente alagadas (GAIARSA, 1991). No entanto, desde o início da década de 70, devido à rápida expansão urbana, associada à presença do maior Polo Industrial e Comercial de São Paulo, suas características naturais foram **drasticamente** modificadas. A canalização, retificação e obstrução dos cursos d'água, juntamente com a supressão de áreas verdes e a impermeabilização das várzeas, alteraram profundamente o sistema. Como consequência, houve uma redução significativa nos espaços disponíveis para a absorção da água da chuva, o que resultou em um aumento **expressivo no número de enchentes e inundações nos últimos anos** (NEVES, 2016; VALVERDE, 2017).

3 METODOLOGIA

A metodologia que guiará este estudo é essencial para garantir uma abordagem consistente e robusta em todas as fases da pesquisa. O fluxograma, apresentando na figura 2, oferece uma visão panorâmica das etapas que serão empreendidas, desde a coleta de dados até a análise e interpretação.

Figura 2 - Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Autor.

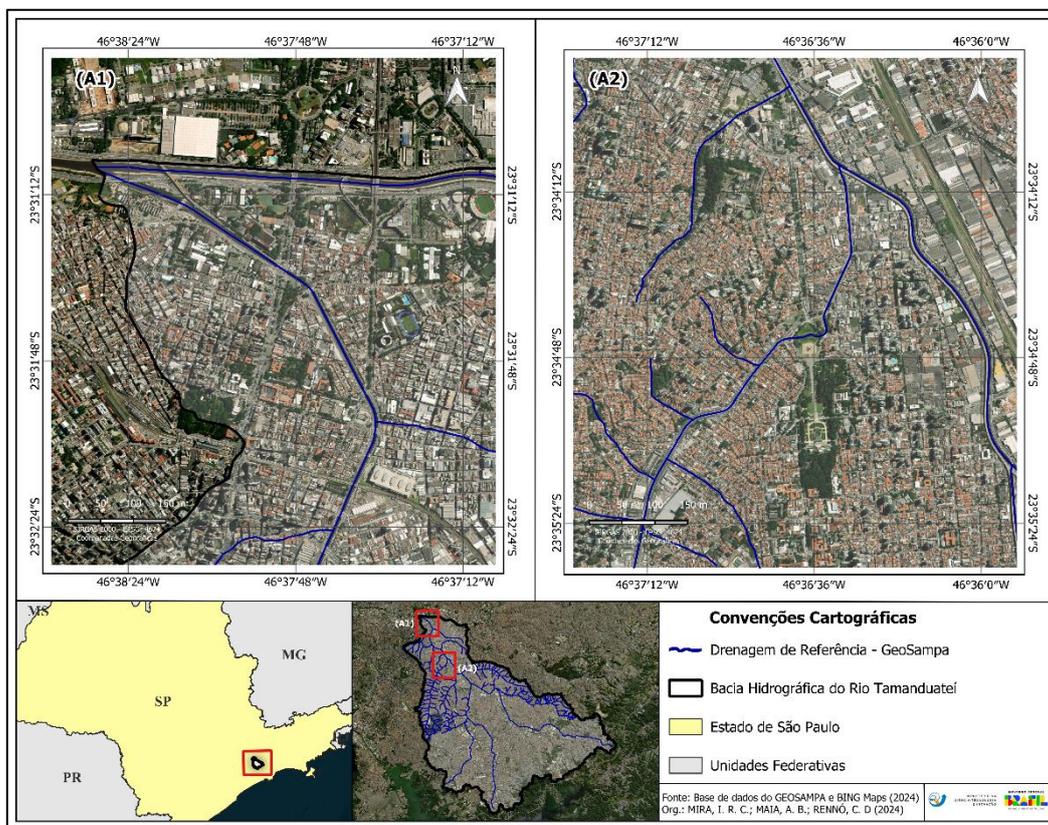
3.1 Aquisição e tratamento dos dados

3.1.1 Bacia Hidrográfica do Rio Tamanduateí e rede de drenagem de referência

A extração do contorno da bacia hidrográfica do Rio Tamanduateí e a obtenção da drenagem de referência foram feitas através do GeoSampa, um banco de dados georreferenciados públicos de São Paulo. Essa plataforma, implantada em 2015 pela Prefeitura Municipal, oferece visualização de dados no mapa digital da cidade (MDC) e por serviços online (WMS e WFS), permitindo também o download em vários formatos (PMSP, 2019; SILVA et al., 2023). Toda a base de dados é validada pela Secretaria Municipal de Licenciamento, sendo uma referência em dados espaciais do município (LIMA et al., 2017; OLIVEIRA; ALTAMIRANO, 2021).

Além disso, **desta** como rede de drenagem de referência se baseou em sua correspondência com a drenagem natural, observada através da sobreposição da camada vetorial da base de dados com as imagens de satélite, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Correspondência da drenagem de referência **com a imagem de satélite**.



Fonte: Autor.

3.1.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Conforme mencionado por Buarque et al. (2009), os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) provenientes do sensoriamento remoto são a principal fonte para caracterização de uma bacia hidrográfica e delimitação de atributos hidrológicos. Nesse contexto, existem diversas opções de MDEs disponíveis em bases de dados de agências espaciais e governamentais. Para este trabalho, optou-se pelo MDE do NASADEM disponibilizado pela base de dados EARTHDATA.

O NASADEM é o sucessor do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e foi produzido por meio do reprocessamento dos dados do SRTM, utilizando informações auxiliares de referência, como o satélite *Ice, Cloud and land Elevation Satellite* (ICESat). Esse processo visa corrigir erros e artefatos (CRIPPEN et al., 2016; ALVES; VALERIANO, 2023). O NASADEM possui uma resolução espacial de 30 metros com um arco de 1 segundo (INPE, 2009; CRIPPEN et al., 2016).

A escolha do MDE do NASADEM se justifica pelo fato de ter passado por um reprocessamento, resultando em menor presença de ruídos e erros médios quadráticos reduzidos, especialmente em áreas planas. Além disso, apresenta melhor resolução espacial, precisão vertical aprimorada e resultados superiores na extração de subprodutos (LACERDA et al., 2021; ALVES; VALERIANO, 2023; YOGI; STANGANINI, 2023). Adicionalmente, o NASADEM demonstra maior potencial para extração de informações em comparação com outros MDEs, especialmente em estudos relacionados à modelagem da dinâmica fluvial (LACERDA et al., 2021; ALVES; VALERIANO, 2023).

Dessa forma, a obtenção do MDE foi realizada por meio da base de dados da NASA, EARTHDATA, acessível através do seguinte endereço: <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/land-surface/topography/terrain-elevation/digital-elevation-terrain-model-dem>.

3.1.3 Tratamento de dados

Os softwares de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) desempenham um papel crucial em diversos estudos ambientais, incluindo análises hidrológicas e avaliações de vulnerabilidade ambiental (PEREIRA et al., 2018). Atualmente, existem várias opções de softwares, tanto comerciais quanto de livre acesso. Neste estudo, optamos

exclusivamente pela plataforma de livre acesso denominada *Quantum Geographic Information System* (QGIS) (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2018).

A escolha do QGIS baseou-se nas suas ferramentas automáticas para extração de drenagem e delimitação de bacias hidrográficas (PEREIRA et al., 2018). Além disso, o QGIS permite a instalação de extensões (*plug-ins*) muito úteis para análises hidrológicas, como o TerraHidro (INPE, 2016), que foi utilizado neste trabalho.

O TerraHidro é um sistema desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizado em São José dos Campos – SP (ROSIM et al., 2014). A escolha do TerraHidro para análises hidrológicas neste trabalho se deve ao fato de ele utilizar o método *Priority First Search* (PFS), desenvolvido por Sedgewick (1992). O PFS simula o comportamento físico da água, preservando as feições topográficas (ROSIM et al., 2014; PEREIRA et al., 2018).

3.2 Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente (MDEHC)

Grande parte dos modelos digitais de elevação enfrenta desafios na representação precisa dos padrões hidrológicos, devido à presença de depressões espúrias. Essas depressões interferem no escoamento superficial e prejudicam a obtenção de outros atributos necessários para modelar hidrológicamente uma bacia (CALLOW et al., 2007). Para superar esse desafio, é essencial corrigir essas depressões de forma precisa, permitindo a extração confiável de parâmetros hidrológicos, como direção e acúmulo de fluxo, rede de drenagem e identificação de áreas com potencial de inundação (O'CALLAGHAN; MARK, 1984; POGGIO; SOILLE, 2011; PEREIRA et al., 2018).

Atualmente, há diversas abordagens para ajustar um MDE para análises hidrológicas, resultando em um Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente (MDEHC). Esse MDEHC é capaz de reproduzir com máxima fidelidade o caminho preferencial do escoamento superficial (CHAVES, 2002; ZHANG et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2012). Assim, neste estudo, foram utilizadas a função “*Remove Pits*” do TerraHidro e o processo manual conhecido como “*Stream-Burning*”, descrito por Hutchinson (1989).

3.2.1 Remoção de depressões espúrias

Para melhorar a qualidade do Modelo Digital de Elevação (MDE) e eliminar irregularidades indesejadas, foi empregada a função “*Remove Pits*” disponível no

software TerraHidro ~~durante este estudo~~. Essa função é baseada em um método híbrido, que combina o preenchimento de depressões com a escavação do terreno. O objetivo é assegurar que as elevações resultantes sejam sempre inferiores às depressões presentes no MDE original (JARDIM, 2017).

Assim, neste estudo, essa função foi aplicada ao MDE em formato *raster* obtido por meio do NASADEM, com o intuito de **torna-lo** mais consistente e adequado para análises hidrológicas.

3.2.2. Incorporação da rede de drenagem de referência

Para alinhar o Modelo Digital de Elevação (MDE) com a rede de drenagem existente, foi empregado o processo conhecido como "*Stream-Burning*", "queima" ou ajuste. Essa técnica é essencial para ajustar o MDE original de forma a torná-lo compatível com a rede hidrográfica existente. O método consiste em processar o MDE original utilizando a rede hidrográfica vetorial disponível, de modo a alinhar as direções de fluxo resultantes com essa rede (HUTCHINSON, 1989; GRAHAM et al., 1999; CALLOW et al., 2007). Durante esse processo, as células que correspondem à drenagem de referência são ajustadas na superfície, utilizando um fator arbitrário definido pelo usuário (BUARQUE et al., 2009; RIBEIRO; FERREIRA, 2014).

De acordo com Buarque et al. (2009) e Ribeiro e Ferreira (2014), esse método é simples e eficiente computacionalmente, além de alterar pouco as células no terreno. Essas modificações melhoram as definições de escoamento, consequentemente aprimorando a acurácia dos atributos derivados do MDE.

Para este trabalho específico, rebaixamos em 10 metros todos os pontos de confluência entre o MDE original obtido por meio do NASADEM e a rede de drenagem de referência obtida pelo GeoSampa. Como resultado, gerou-se um Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC). É importante destacar que, para realizar essa operação, ambas as camadas precisaram estar no mesmo sistema de coordenadas de referência, utilizando o SIRGAS 2000 Zona 23S.

3.2.3 Hierarquia Fluvial

A hierarquia fluvial é de extrema importância na análise da paisagem e dinâmica fluvial de uma bacia hidrográfica, refletindo o comportamento do escoamento, e principalmente aplicado a estudos de suscetibilidade à inundação (MIRA et al., 2023).

Isto posto, para este trabalho, classificou-se os canais através da metodologia preconizada por Strahler (1952), o qual dois canais tributários de ordem menor se unem e formam canais de ordem maior e assim sucessivamente. Para isso, utilizou-se do MDEHC ajustado com a drenagem de referência, visto que o mesmo possa apresentar a rede de drenagem da bacia de maneira acurada.

3.3 Extração do HAND e da Área Acumulada Expandida

Os atributos hidrológicos são características dos corpos d'água e seus sistemas adjacentes, influenciando o comportamento e a qualidade da água (SINGH, 1995). O conhecimento desses atributos é fundamental para subsidiar a modelagem hidrológica (ARAÚJO, 2016) e prever desastres de natureza hidrológica. Dentre os diversos atributos hidrológicos relevantes para analisar a ocorrência de inundações em bacias hidrográficas, destacamos o '*Height Above to the Nearest Drainage*' (HAND), definido por Rennó et al. (2008), e a "Área Acumulada Expandida".

O modelo HAND é uma ferramenta que utiliza informações topográficas de um Modelo Digital de Elevação (MDE) para extrair dados hidrológicos de uma área (RENNÓ et al., 2008). Por meio desse modelo, é possível identificar áreas propícias ao acúmulo de água e analisar a suscetibilidade natural do terreno à ocorrência de inundações (ROSIM et al., 2014; DANTAS; CANILA, 2017; QUEIROGA et al., 2023).

A "Área Acumulada Expandida", também conhecida como "Área de Acumulação de Fluxo", refere-se às regiões onde há uma maior concentração de fluxo hídrico na área (SANTOS et al., 2013; BANON et al., 2019), o que as torna mais suscetíveis a inundações.

Diante disso, para a obtenção desses parâmetros hidrológicos, foram realizadas as etapas metodológicas descrito na Figura 2.

3.4 Avaliação dos Resultados

A avaliação dos resultados obtidos se deu por meio de análises visuais, comparando os diferentes mapas gerados no software QGIS. Inicialmente, realizou-se uma avaliação qualitativa comparando a rede de drenagem de referência com as redes de drenagem geradas a partir do MDE do NASADEM, o MDE consistente sem a drenagem de referência e o MDE consistente, ajustado com a drenagem de referência.

Em seguida, comparou-se os HANDs e a Área Acumulada Expandida, entre o MDE consistente sem a drenagem de referência e o MDE consistente com a drenagem de referência.

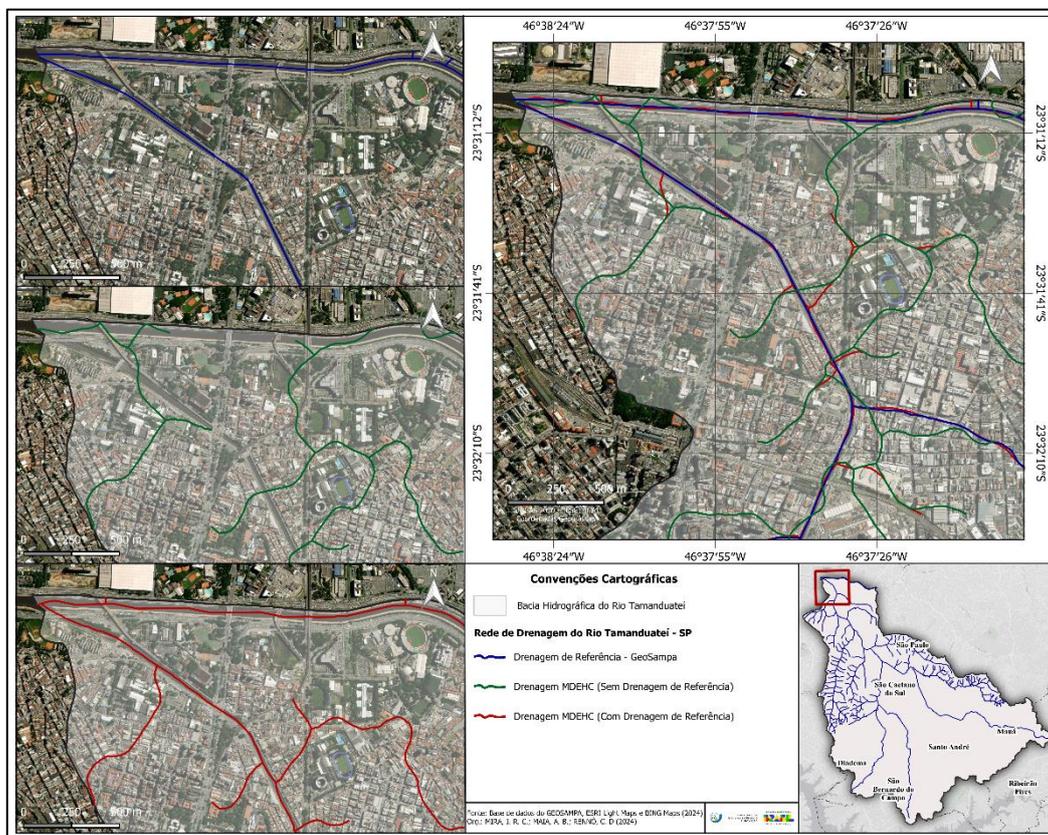
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Rede de drenagem

A comparação entre as redes de drenagem do GeoSampa e aquelas derivadas dos Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes (MDEHCs), com e sem ajuste, foi realizada em duas áreas distintas da bacia.

A “Área 1”, como foi denominada para fins de discussão, é apresentada na Figura 4. Esta área está localizada ao Norte da Bacia do Rio Tamanduateí, onde ocorre a interseção entre o Rio Tamanduateí e o Rio Tietê.

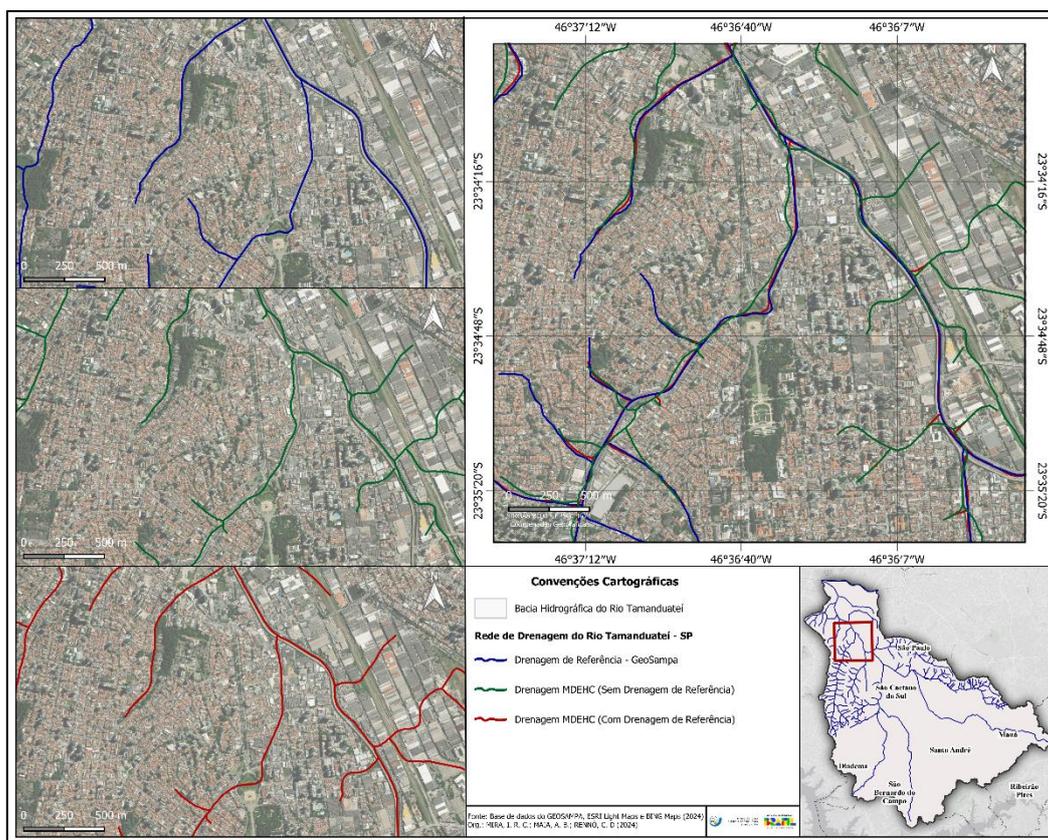
Figura 4 - Comparação das drenagens da região Norte da Bacia do Rio Tamanduateí - SP (Área 1).



Fonte: Autor.

Por outro lado, a Figura 5 mostra a “Área 2”, que se refere à região Setentrional da bacia. Esta área é caracterizada por uma rede de drenagem densa e com várias ramificações.

Figura 5 - Comparação das drenagens da região Setentrional da Bacia do Rio Tamanduateí - SP (Área 2).



Os resultados da comparação entre as redes de drenagem da bacia para as duas áreas, conforme apresentado, revelam que, para a Área 1, a drenagem extraída do MDEHC sem ajustar com a drenagem de referência não correspondeu às posições da drenagem de real. Este fato não ocorreu quando o mesmo MDEHC foi utilizado para a Área 2. Segundo Siqueira et al. (2016), essa incongruência pode ser atribuída ao método de remoção de depressões espúrias e direcionamento de fluxo, que tendem a gerar uma drenagem próxima à margem do rio em áreas de mesma cota.

A interrupção da drenagem na Área 1 para o MDEHC sem drenagem de referência pode ser atribuída à dificuldade de extração de dados em áreas planas, devido à dificuldade do algoritmo em conectar as direções de fluxos (FERNÁNDEZ et al., 2012).

No geral, ao comparar as drenagens nas duas áreas, nota-se que, na maioria dos casos, elas foram congruentes, principalmente aquelas extraídas do MDEHC cavado com a referência. Isso se deve ao processo de rebaixamento da calha dos rios pelo *stream-burning*, que melhora a coincidência entre as redes (RIBEIRO; FERREIRA, 2014), como

observado nas figuras 4 e 5. No entanto, apesar da coincidência entre as redes, há uma tendência na formação de trechos de drenagem falsos, onde eles não existem, para ambas as áreas, conhecidos como falsos canais (RIBEIRO; FERREIRA, 2014). Isso ocorre devido à dificuldade de extração e mapeamento das feições hidrológicas em áreas urbanizadas (CALLOW et al., 2007).

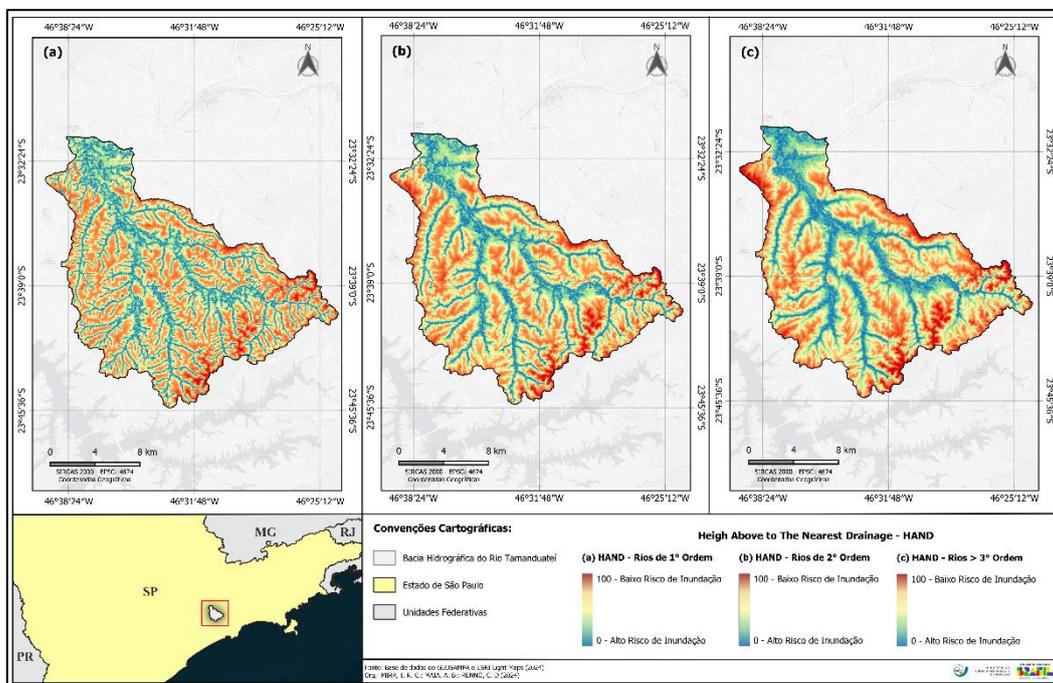
Nesse contexto, apesar das inconsistências entre a rede de drenagem de referência e, principalmente, do MDEHC cavado, o processamento do MDE melhora o traçado da drenagem, tornando sua representação mais fiel à realidade. Além disso, as confluências entre as redes de drenagem melhoram a precisão das variáveis hidrológicas obtidas a partir delas, proporcionando uma melhor acurácia na identificação das áreas mais propensas a inundações.

4.2 HAND

4.2.1 HAND extraído do MDEHC sem drenagem de referência

A Figura 6 apresenta os resultados das áreas de inundações simuladas pelo modelo HAND para os canais de diferentes ordens, conforme a classificação proposta por Strahler (1952).

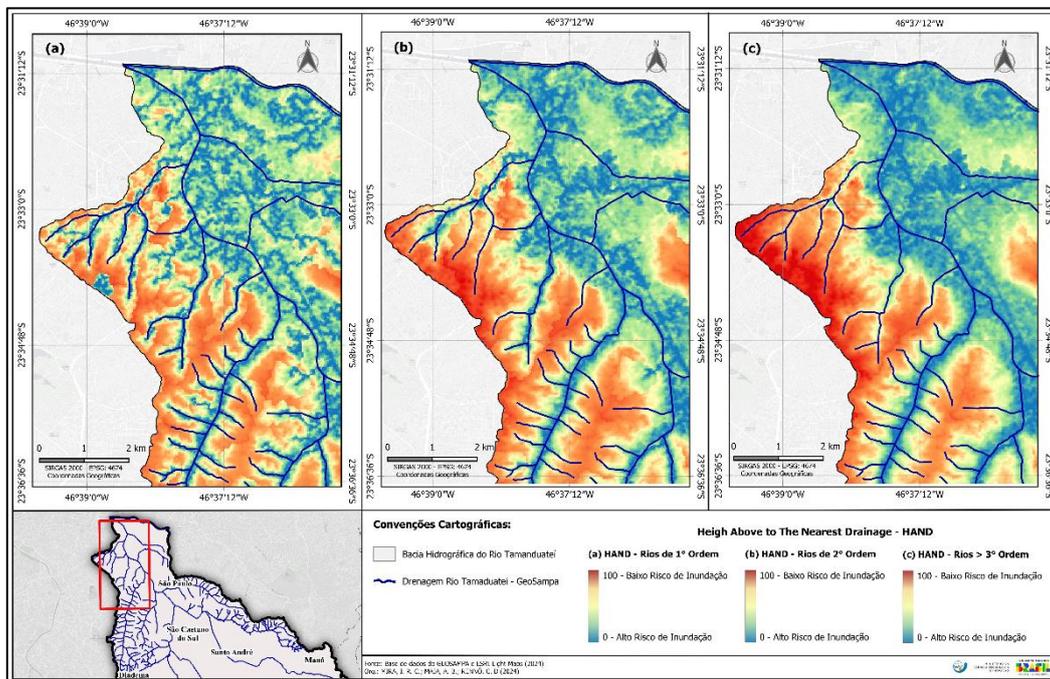
Figura 6 - Comparação dos HANDs para canais de diferentes ordens da Bacia do Rio Tamanduateí – SP.



Fonte: Autor.

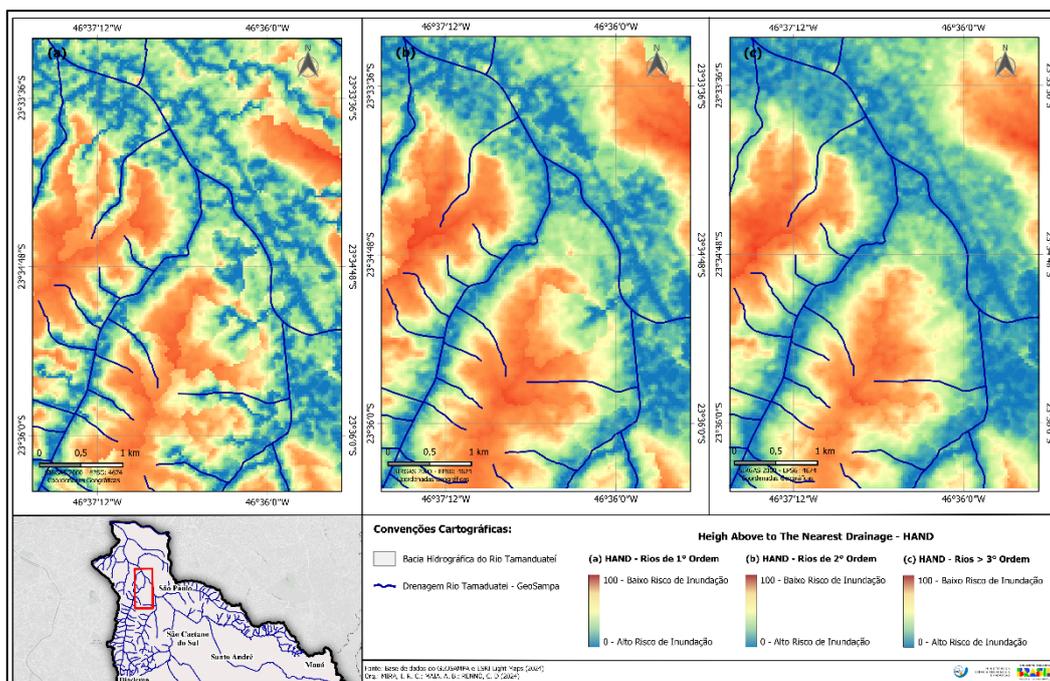
Dito isto, as Figuras 7 e 8 apresentam os HANDs para as Áreas 1 e 2, respectivamente, que foram as áreas de foco selecionadas para a discussão deste trabalho.

Figura 7 - Comparação os HANDs para a região Norte da Bacia do Rio Tamanduaé – SP.



Fonte: Autor.

Figura 8 - Comparação os HANDs para a região Setentrional da Bacia do Rio Tamanduaé – SP.



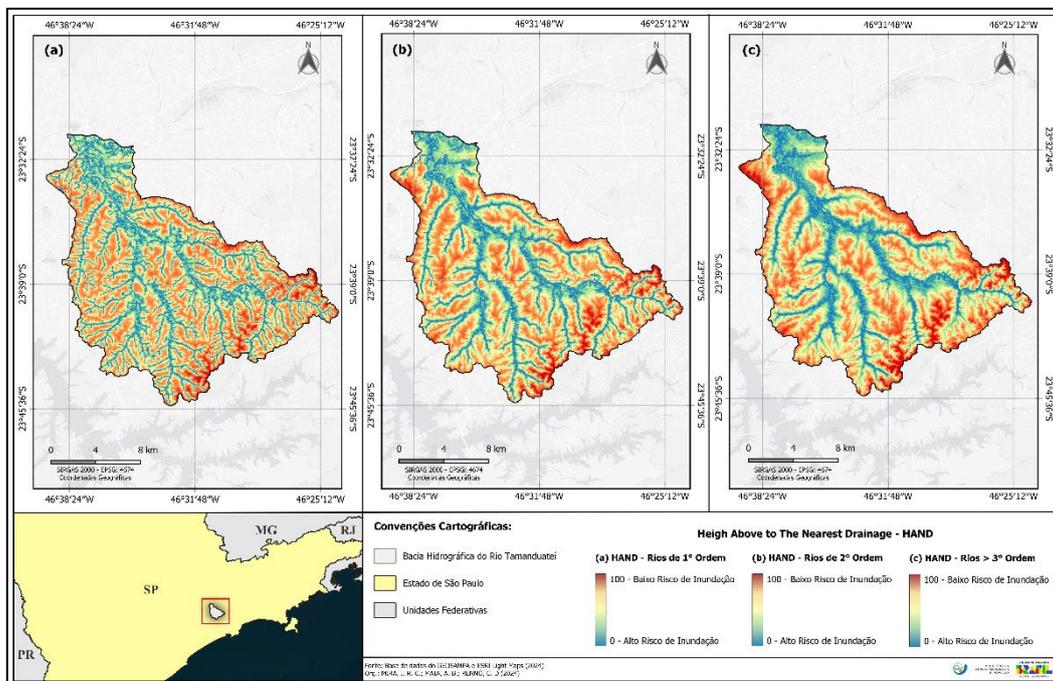
Fonte: Autor.

Em relação às áreas analisadas, nota-se que as áreas mais próximas aos canais principais, como o Rio Tietê e o Rio Tamandateí (conforme observado nas Figuras 4 e 5, respectivamente), a simulação realizada pelo modelo HAND provou ser precisa. Isso pode ser atribuído às constantes ocorrências de transbordamento desses rios.

4.2.2 HAND extraído do MDEHC ajustado com a drenagem de referência

A Figura 9 apresenta os resultados das áreas de inundação simuladas pelo modelo HAND para os canais de 1º, 2º e 3º ordem, ou superior, conforme a classificação proposta por Strahler (1952). Esses resultados foram obtidos utilizando o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC) ajustado com a drenagem de referência.

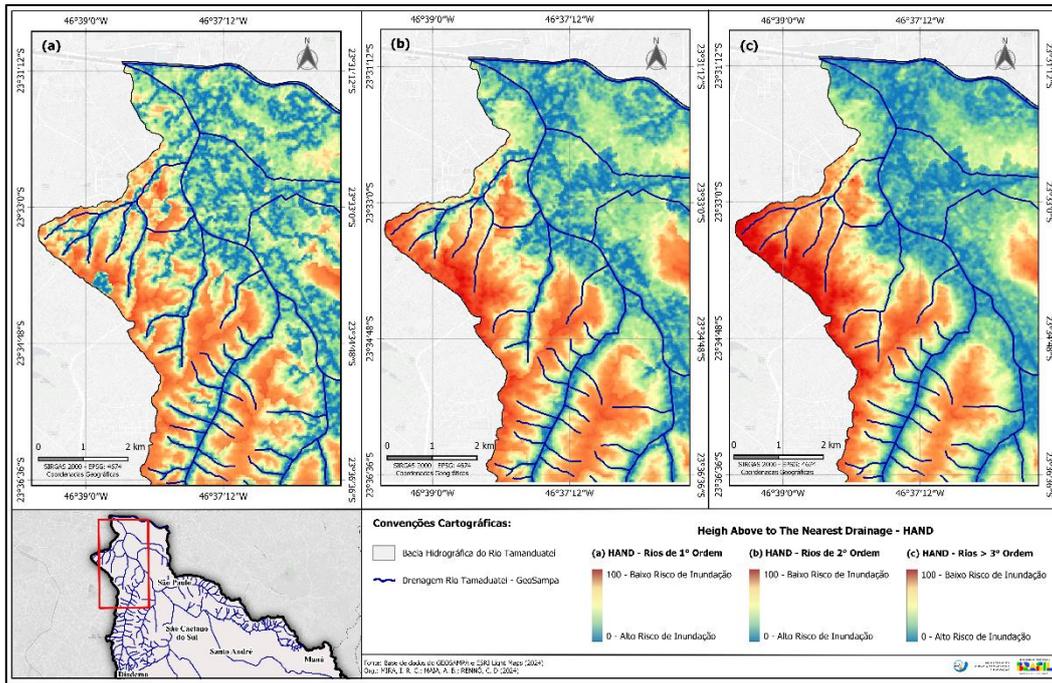
Figura 9 - Comparação dos HANDs para canais de diferentes ordens da Bacia do Rio Tamandateí – SP.



Fonte: Autor.

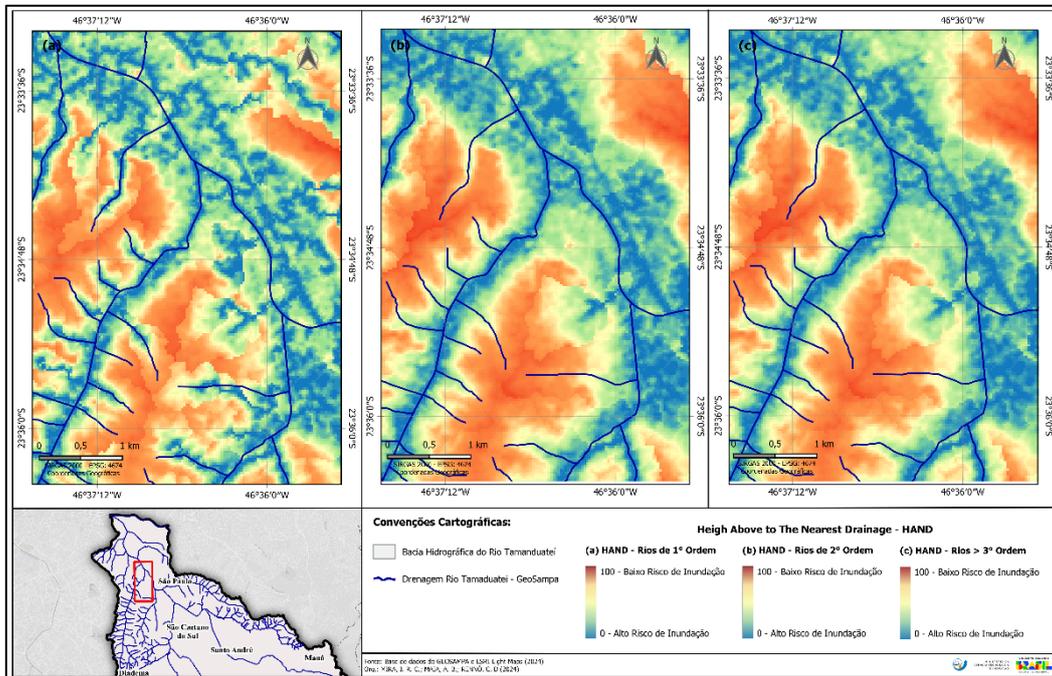
Dito isto, as Figuras 10 e 11 apresentam os HANDs para as Áreas 1 e 2, respectivamente, que foram as áreas de foco selecionadas para a discussão deste estudo.

Figura 10 - Comparação os HANDs para a região Norte da Bacia do Rio Tamandateí – SP.



Fonte: Autor.

Figura 11 - Comparação dos HANDs para a região Setentrional da Bacia do Rio Tamandateí – SP.



Fonte: Autor.

Ao comparar os modelos HAND gerados a partir de MDEHCs, tanto com quanto sem drenagens de referência para as duas áreas, observa-se que as mudanças foram mínimas

ou insignificantes. Isso ocorre porque o modelo HAND descreve a elevação da linha de água em relação às cotas do terreno e aos canais que compõem a área de contribuição da bacia. Ele distribui a superfície da água de maneira uniforme lateralmente à seção transversal e considera apenas as seções ajustadas para as trajetórias de fluxo superficial. Em outras palavras, ele apresenta a cota de inundação em uma condição hidrostática (MOMO et al., 2016).

No entanto, ao comparar a simulação do HAND entre os canais de diferentes ordens, para as duas áreas e para ambos os casos de MDEHC, sem e com drenagem de referência, verifica-se que os canais acima de 3º ordem foram os mais precisos para identificar as áreas propensas a inundações. Essas diferenças podem ser atribuídas ao fato de que as áreas de comissão (amarelo, vermelho e laranja) aumentam com o aumento da ordem dos canais, fazendo com que a área sujeita à inundação simulada pelo HAND (azul e verde) seja mais precisa quando correlacionada com a drenagem (MOMO et al., 2016).

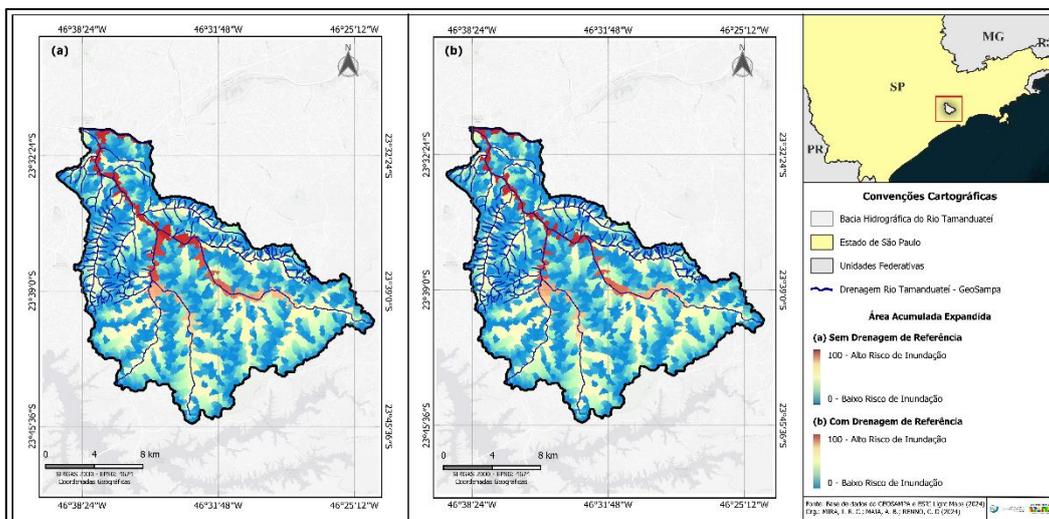
Nesse sentido, as alterações na linha de água descritas pela hidrodinâmica fluvial, como as obras realizadas no canal, alteração da rugosidade das margens, tamponamento dos canais e outras intervenções humanas e processos naturais ou induzidos por atividades antrópicas, não foram levadas em consideração. Isso pode alterar a representação mais precisa das áreas sujeitas a inundações (MOMO et al., 2016).

Nesse contexto, verifica-se que os diferentes MDEHCs, com e sem drenagem de referência, não alteram os resultados da simulação do HAND. No entanto, pode-se observar que os HANDs para canais de 3º ordem representaram de maneira mais fiel as áreas propensas a inundações. Isso sugere que essa simulação tem potencial para ser usada na previsão desses eventos e na extração de atributos hidrológicos a partir dela.

4.3 Área Acumulada Expandida

A Figura 12 apresenta os resultados das áreas acumuladas expandidas, obtidas através do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC), tanto sem quanto com a inclusão da drenagem de referência.

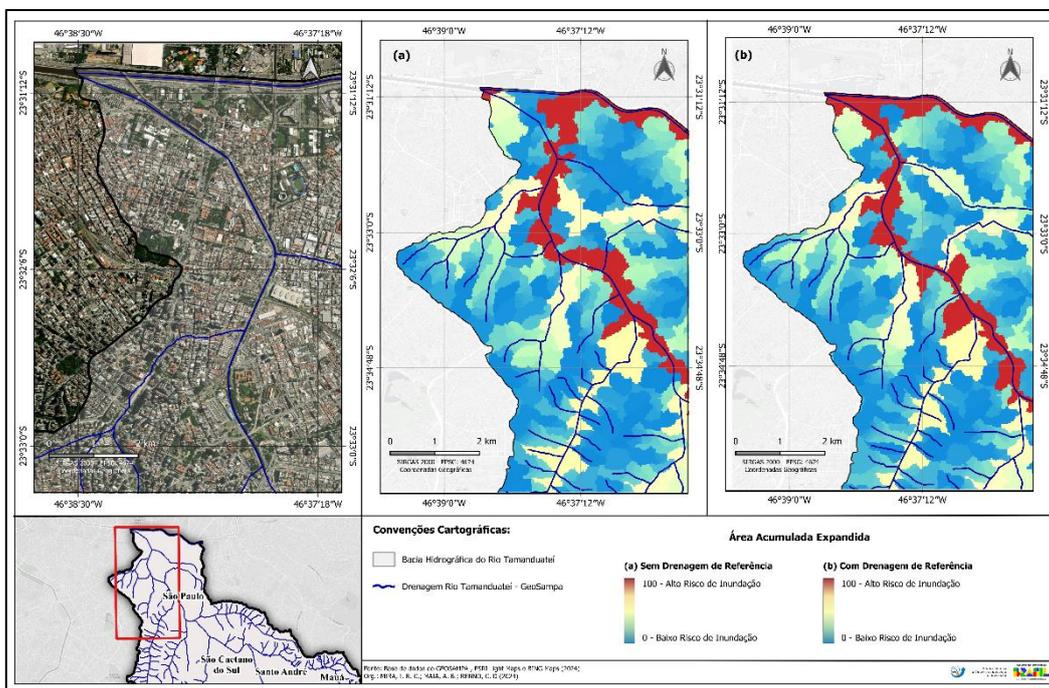
Figura 12 - Áreas Acumuladas Expandidas para MDEHCs **sem e com drenagem de referência.**



Fonte: Autor.

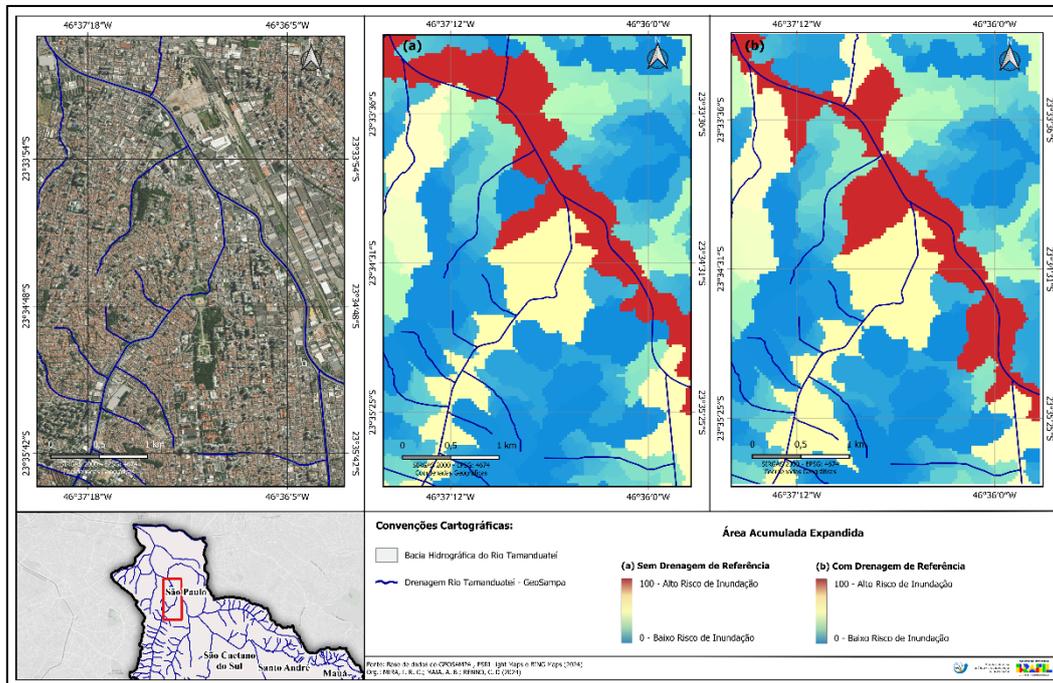
Dito isto, as Figuras 13 e 14 apresentam as áreas acumuladas expandidas para as Áreas 1 e 2, respectivamente.

Figura 13 - Áreas Acumuladas Expandidas para a região Norte da Bacia do Rio Tamanduaé – SP.



Fonte: Autor.

Figura 14 - Áreas Acumuladas Expandidas para a região Setentrional da Bacia do Rio Tamanduateí – SP.



Fonte: Autor.

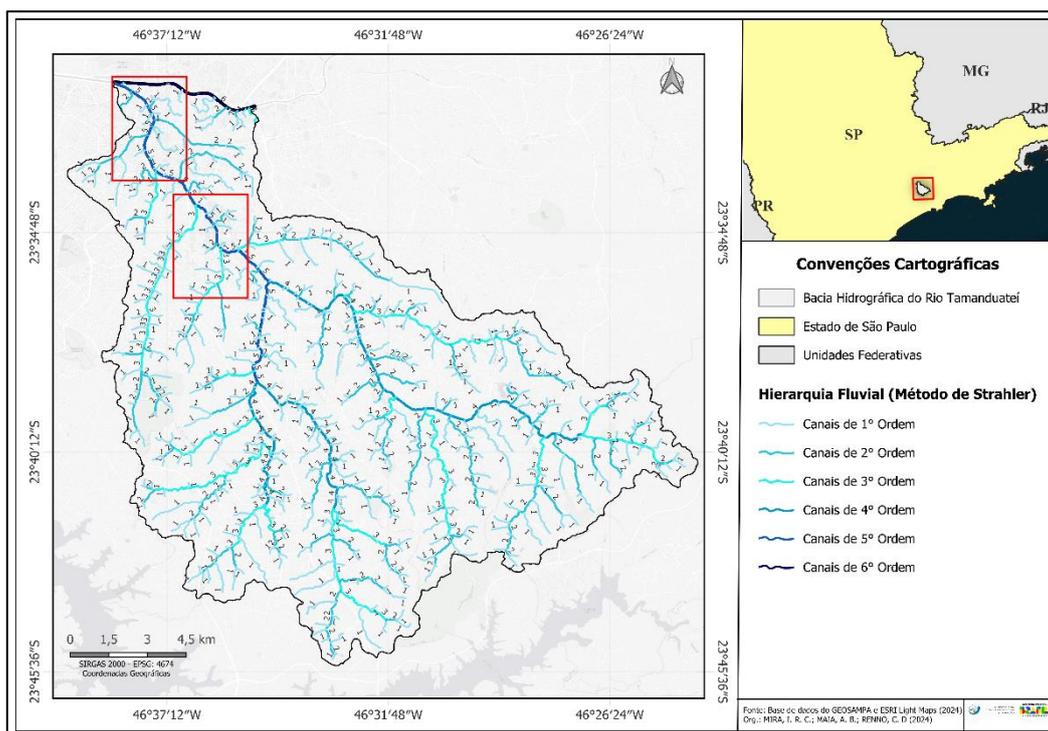
Ao comparar as áreas expandidas obtidas por Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes (MDEHCs), tanto sem quanto com a drenagem de referência para as Áreas 1 e 2, verifica-se que, em geral, os modelos representaram de maneira fiel as áreas com maior probabilidade de inundação (indicadas em vermelho). No entanto, considerando que as áreas acumuladas expandidas podem ser relacionadas às regiões conectadas aos grandes rios, um fator crucial para estudos de inundação (LIMA; RENNÓ, 2021), o MDEHC com drenagem de referência apresentou um melhor ajuste aos rios principais da bacia. Isso foi evidenciado quando comparado com o mapa contendo a imagem de satélite e a drenagem de referência para as áreas mencionadas.

Nesse contexto, percebe-se que a melhoria dos MDEHCs, através do processo de ajuste, aprimora a representação das áreas acumuladas expandidas. Isso pode resultar em uma maior precisão na extração de outros atributos hidrológicos derivados do mesmo, bem como na análise das áreas suscetíveis à inundação.

4.4 Hierarquia fluvial

A análise da Modelagem Digital de Elevação de Hidrografia Corrigida (MDEHC) após a drenagem de referência revelou a hierarquia fluvial na Bacia do Rio Tamanduateí, em São Paulo. Canais de até 6ª ordem foram identificados como pertencentes ao Rio Tietê, enquanto canais de 5ª ordem correspondem ao Rio Tamanduateí. Esses resultados foram obtidos utilizando o método de Strahler (1952), como mostrado na Figura 6.

Figura 15 - Hierarquia fluvial da Bacia do Rio Tamanduateí - SP.



Fonte: Autor.

Associando os mapas que apresentam o modelo HAND e de Área Acumulada Expandida, verificou-se que os locais mais suscetíveis **á inundarem** são aqueles que apresentaram maior ordem fluvial. Isso se justifica porque os canais fluviais principais (Rios Tietê e Tamanduateí) possuem muitos tributários de pouca extensão, fazendo com que o escoamento da água superficial chegue rapidamente aos rios de maiores ordens, resultado no acúmulo de água e assim as inundações (MIRA et al., 2023).

Isto posto, ao comparar os resultados dos mapas de área e modelos HAND com o mapa de hierarquia fluvial verifica-se que os mesmos apresentaram alta acurácia, principalmente no que tange ao MDEHC ajustado com a drenagem de referência. Assim, parte da

premissa que tais atributos hidrológicos podem ser utilizados como mediadores para tomadas de decisão frente a eventos hidrológicos extremos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A extração de atributos hidrológicos de uma bacia hidrográfica, utilizando Modelos Digitais de Elevação obtidos por técnicas de Sensoriamento Remoto, é crucial para o entendimento aprofundado dos regimes hidrológicos que a governam. Essa compreensão é fundamental para o desenvolvimento de políticas públicas e sistemas de gerenciamento, gestão e segurança eficazes. Os avanços tecnológicos atuais permitem a geração de produtos de maior qualidade e cobertura.

No entanto, é importante atentar-se à base de dados de referência usada para obter os modelos e os atributos de referência. Erros pontuais na extração de atributos hidrológicos podem distorcer a realidade e introduzir erros na fase de concepção. Portanto, a correção desses modelos é de extrema importância para melhorar a precisão dos resultados.

Nesse contexto, para os atributos hidrológicos selecionados e avaliados neste trabalho (rede de drenagem, *Height Above To The Nearest Drainage* – HAND e área acumulada expandida), observou-se diferenças significativas em função dos Modelos Digitais de Elevação Hidrológicamente Consistentes (MDEHCs), tanto sem quanto com correção pelo processo de ajuste. Isso ocorre porque o ajuste do MDEHC com a rede de drenagem de referência melhora a confluência da mesma, tornando-a mais representativa e fiel à realidade. Como consequência, os atributos derivados dela também se tornam mais precisos, melhorando a identificação das áreas mais suscetíveis a inundações.

No entanto, as extrações automáticas realizadas neste trabalho não levaram em consideração a dinâmica e as alterações no traçado da drenagem, como tamponamentos dos rios, canais subterrâneos e falsos canais. Esses fatores podem interferir na identificação precisa das áreas realmente sujeitas a inundações.

Com base nesses pressupostos, o desdobramento futuro deste trabalho levará em consideração a dinâmica dos canais, bem como a melhoria e implementação de outros atributos hidrológicos importantes para o estudo da ocorrência de inundações em bacias hidrográficas urbanas. Isso permitirá uma análise mais precisa e abrangente, contribuindo para a gestão eficaz dos recursos hídricos e a mitigação dos riscos de inundação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, F. C.; VALERIANO, M. M. Avaliação de MDEs de resolução espacial moderada no norte da Amazônia. In: XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 20, 2023, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2023. p. 109-112. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2023/04.18.18.02/doc/155360.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2024.
- ARAÚJO, D. C. S. **Dinâmica da umidade e variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo em uma bacia experimental do semiárido pernambucano**. 2016. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural do Pernambuco, Recife, 2016.
- BANON, G.; ARRAUT, E.; VILLAMARÍN, F.; MARIONI, B.; MOULATLET, G.; RENNÓ, C.; BANON, G.; NOVO, E. A review on crocodilian nesting habitats and their characterisation via remote sensing. **AMPHIBIA-REPTILIA**, v. 1, p. 1-21, 2019.
- BUARQUE, D. C.; FAN, F. M.; PAZ, A. R. D.; COLLISCHONN, W. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 2, p. 91-103, 2009.
- CALLOW, J. N.; VAN NIEL, K. P.; BOGGS, G. S. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? **Journal of hydrology**. v. 332, p. 30-39, 2007.
- CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; CARVALHO JÚNIOR, W. D.; SOUZA NETO, N. C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 218-226, 2010.
- CHAVES, M. A. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistente para a Sub-bacia Amazônica**. 2002. 115 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- CRIPPEN, R.; BUCKLEY, S.; AGRAM, P.; BELZ, E.; GURROLA, E.; HENSLEY, S.; TUNG, W. NASADEM global elevation model: Methods and progress. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 41, p. 125-128, 2016.
- DA SILVA, D. T. B. T.; AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P.; VAZQUEZ, G. H.; VANZELA, L. S. Caracterização Temporal e Espacial dos Alagamentos no Município de São Paulo. **Scientific Journal ANAP**, v. 1, n. 1. p. 423 – 438, 2023.
- DANTAS, C. G.; CANIL, K. Identificação e mapeamento de áreas suscetíveis a inundação na bacia do Aricanduva – SP utilizando o algoritmo descritor de terreno HAND. In: XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 17, 2017, Campinas. **Anais...** Campinas, 2017. p. 4046-4055. Disponível em: <https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/2556>. Acesso em: 06 abr. 2024.
- DE LIMA, V. L.; DAMIÃO, S. R. R.; DE OLIVEIRA, M. C. Implantação de banco de dados geográficos na Secretaria Municipal de Licenciamento de São Paulo. In: XVII ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL, 17, São Paulo. **Anais...** 2017. Disponível em: <https://encurtador.com.br/eER39>. Acesso em: 23 abr. 2024.

- DE OLIVEIRA, A. C.; ALTAMIRANO, M. Avenida Paulista como patrimônio cultural e o patrimônio cultural da Avenida Paulista. *E| C*, n. 31, p. 153-167, 2021.
- DE SOUSA MORAIS, R. C.; SALES, M. C. L. Extração automática de drenagem: uma análise comparativa a partir de diferentes ferramentas e bases de dados. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 6, p. 1849-1860, 2016.
- FERNÁNDEZ, D. C. J.; VALERIANO, M. M.; ZANI, H.; ANDRADES FILHO, C. O. Extração automática de redes de drenagem a partir de Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, n. 5, p. 619-634, 2012.
- GAIARSA, O. A. **Santo André: ontem, hoje, amanhã**. Santo André: Prefeitura Municipal de Santo André - PMSA, 1991, 362 p.
- GALVÍNCIO, J. D.; SOUZA, F. A. S.; SHIRINIVASAN, V. S. Análise do relevo da bacia hidrográfica do açude Epitácio Pessoa. **Revista de Geografia**, v. 23, n. 1, p. 54-69, 2006.
- GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. **Journal of hydrology**, v. 193, n. 1-4, p. 204-213, 1997.
- GRAHAM, S. Global grids of glass: on global cities, telecommunications and planetary urban networks. **Urban Studies**, v. 36, n. 5-6, p. 929-949, 1999.
- HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of hydrology**, v. 106, n. 3-4, p. 211-232, 1989.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAIS (INPE). **TerraHidro**. 2016. Disponível em: <https://www.dpi.inpe.br/terrahidro/doku.php>. Acesso em: 30 abr. 2024.
- _____. **TopoData**: banco de dados geomorfométricos do brasil. Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. 2009. Disponível em: <https://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: 30 abr. 2024.
- JARDIM, A. C. **Direções de fluxo em modelos digitais de elevação**: um método com foco na qualidade da estimativa e processamento de grande volume de dados. 2017. 135 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.
- LACERDA, H. C.; LEITÃO, R.; NERO, M. A.; DA COSTA TEMBA, P.; MACEDO, D. R. Avaliação comparativa da precisão vertical de modelos digitais de elevação derivados de satélites globais gratuitos. **Revista Espinhaço**, p. 1-12, 2021.
- LIMA, D. L. C.; RENNÓ, C. D. Mapeamento de áreas alagáveis na Bacia Amazônica a partir de dados extraídos do MDE-SRTM e avaliação da incerteza por meio da entropia de Shannon. In: XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 24, 2021, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2021. p. 1-10. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=13640>. Acesso em: 20 abr. 2024.
- MARINHO FILHO, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI, J. C.; MAGALHÃES, L. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.
- METZGER, J. P. O que é ecologia de paisagens? **Biota Neotropica**, v. 1: p. 1-9, 2001.

- MIRA, I. R. C.; SILVA, M. L. Mapeamento da suscetibilidade à inundação na Bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG. **Revista Caderno de Geografia**, v. 33, n. 74, p. 782-810, 2023.
- MOMO, M. R.; PINHEIRO, A.; SEVERO, D. L.; CUARTAS, L. A.; NOBRE, A. D. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. **RBRH**, v. 21, p. 200-208, 2016.
- MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A. E.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil science society of america journal**, v. 57, n. 2, p. 443-452, 1993.
- MORAES, J. M. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 61-70, 2003.
- NETO, F. L. **Brasil bate recorde e registra 1.161 desastres naturais em 2023, segundo Cemaden. 2024.** Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2024/01/brasil-bate-recorde-e-registra-1161-desastres-naturais-em-2023-segundo-cemaden.shtml#:~:text=Ao%20longo%20dos%2012%20meses,por%20dia%20no%20ano%20passado>. Acesso em: 02 abr. 2024.
- NEVES, B. F. **Estudo das inundações no município de Santo André e sua relação com as chuvas intensas.** 2016. 99 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Urbana) - Universidade Federal do ABC, Santo André, 2016.
- 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.
- OLIVERA, G. R. K.; GALO, M. Modelagem de telhados a partir de ajuste de superfícies utilizando dados LIDAR e imagem hipsométrica, In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 3. 2012, Presidente Prudente. **Anais...** Presidente Prudente, 2012. p. 134 – 139. Disponível em: https://www2.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2012_III_SBG/_artigos/A116.pdf. Acesso em: 25 mar. 2024.
- PEDRO, L. C.; NUNES, J. O. R. A Relação entre processos morfodinâmicos e os desastres naturais: uma leitura das áreas vulneráveis a inundações e alagamentos em Presidente Prudente-SP. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 2, n. 34, p. 81-96, 2012.
- PEREIRA, J. L. G.; FERREIRA, L. V.; SALES, G. M.; THALÊS, M. C.; POCCARD-CHAPUIS, R.; RENNÓ, C. D.; ROSIM, S. Avaliação de ferramentas automáticas para a extração da rede de drenagem a partir de dados de elevação SRTM para o município de Paragominas, estado do Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, v. 13, n. 3, p. 409-433, 2018.
- PREFEITURA DE SÃO PAULO. **GeoSampa – Mapa Digital da Cidade de São Paulo.** São Paulo: Prefeitura de São Paulo, 2019. Disponível em: http://geosampa.prefeitura.sp.gov.br/PaginasPublicas/_SBC.aspx . Acesso em: 21 abr. 2024.
- QUEIROGA, A. A.; OLIVEIRA, R. G. L.; FILGUEIRA, H. J. A.; CUNICO, C. Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação aplicando diferentes modelos digitais de elevação no modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND). **Revista Do Departamento De Geografia**, v. 43, p. 1-13, 2023.

RAMALHO, D. Rio Tamanduateí-Nascente à Foz: percepções da paisagem e processos participativos. **Paisagem e Ambiente**, n. 24, p. 99-114, 2007.

RENNÓ, C. D. Eliminação de áreas planas e extração automática de linhas de drenagem em modelos digitais de elevação representados por grades triangulares. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2005 p. 2543-2550. Disponível em: <http://mar.te.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.18.48/doc/2543.pdf>. Acesso em: 22 abr 2024.

RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.

RIBEIRO, H. J.; FERREIRA, N. C. Análise comparativa de redes hidrológicas geradas a partir de superfícies hidrológicamente consistentes. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, p. 784-805, 2014.

ROSIM, S.; OLIVEIRA, J. R. F.; JARDIM, A. C.; CUELLAR, Z. Extração da drenagem da região nordeste utilizando o sistema TerraHidro. In: XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 12, 2014, Natal. **Anais...** Natal, 2014. p. 1-10. Disponível em: <https://eventos.abrh.org.br/xiisrhn/anais/papers/PAP018346.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.

SANTOS, D. F. F.; VALVERDE, M. C.; BRAMBILA, R. B.; FERREIRA, M. C. A. Inundações na Bacia do Rio Tamanduateí – Santo André: Estudo de caso dos dias 10 e 11/03/2019. In: Anais: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 23, Foz de Iguaçu. **Anais...** 2019. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/142/XXIV-SBRH0060-1-20210518-114127.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2024.

SCHAEFER-SANTOS, J.; LINGNAU, C.; GALVÃO, F. Mapeamento de campos hidromórficos na serra Catarinense por meio de modelagem hidrológica. **Floresta e Ambiente**, v. 20, p. 316-326, 2013.

SCHULER, G. A. Remote Sensing in Hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 100, p. 239-265, 1988.

SEDGEWICK, R. **Algorithmen**. 2. ed. Bonn: Addison-Wesley, 1992. 41 p.

SINGH, V. P. **Computer models of watershed hydrology**. Colorado: Highlands Ranch, 1995. 1130p.

SINGH, V. P. **What is environmental hydrology?** Dordrecht: Springer Netherlands, 1995. 12 p.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: uma ferramenta open source para determinação de informações topológicas em bacias hidrográficas integrada a um ambiente SIG. **RBRH**, v. 21, p. 274-287, 2016.

SIQUEIRA, V. L. Modelagem e previsão hidrológica em escala continental para a América do Sul. 2022. 263 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2022.

SPRUIILL, C. A.; WORKMAN, S. R.; TARABA, J. L. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. **Transactions of the ASAE**, v. 43, n. 6, p. 1431-1439, 2000.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Trans. American Geophysical Union**, v. 38, n. 6. p. 920, 1952.

VALERIANO, M, M; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n. 1, p. 17 – 29, 2003

VALVERDE, M. C. A interdependência entre vulnerabilidade climática e socioeconômica na região do abc paulista. **Ambiente & Sociedade**, p. 39-60, 2017.

VASCONCELOS, V.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; COUTO JUNIOR, A. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de Classificação Geomorfométrica baseado em uma arquitetura sequencial em duas etapas: Árvore de Decisão e Classificador Espectral, no Parque Nacional da Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, p. 171-186, 2012.

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, p. 193-213, 2006.

YOGI, F.; STANGANINI, F. N. Comparação e Avaliação de Modelos Digitais de Elevação dos sensores SRTM, ASTER, TANDEM/TERRASAR–X, NASADEM, COPERNICUS DEM e ALOS PALSAR para análise digital de terreno para aplicações no saneamento básico. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 1, p. 1-21, 2023.

ZAKIA, M. J. B. **Identificação e caracterização da zona ripária em uma microbacia experimental**: implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de florestas. 1998. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

ZHANG, J. G.; CHEN, Y. R.; SU, Y. R.; KONG, X. L.; ZHANG, W.; SHIM Y.; LIANG, H. B.; SHEN, G. M. Spatial variability and patterns of surface soil moisture in a field plot of karst area in southwest China. **Plant, Soil and Environment**, v. 57, n. 9, p. 409-417, 2011.