



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

José Vinícius Boing de Souza

**Uso de descritores de terreno para o mapeamento de áreas suscetíveis à
inundação**

Florianópolis

2021

José Vinícius Boing de Souza

**Uso de descritores de terreno para o mapeamento de áreas suscetíveis à
inundação**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.

Coorientador: Prof. Camilo Daleles Rennó, Dr.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Souza, José Vinícius Boing de

Uso de descritores de terreno para o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação / José Vinícius Boing de Souza ; orientador, Pedro Luiz Borges Chaffe, coorientador, Camilo Daleles Rennó, 2021.

93 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Mapeamento de inundação. 3. Computação paralela. 4. Santa Catarina. 5. Classificador binário linear. I. Chaffe, Pedro Luiz Borges. II. Rennó, Camilo Daleles. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

José Vinícius Boing de Souza

Uso de descritores de terreno para o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Leonardo Hoinaski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Fabris Goerl, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Valmir da Silva, Dr.
Universidade Federal da Fronteira Sul

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em engenharia ambiental.

Prof. Leonardo Hoinaski, Dr.
Coordenador do programa

Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado. Código de financiamento 132599/2019-8.

RESUMO

O estado de Santa Catarina apresenta um longo histórico de eventos de inundação, com prejuízos bilionários acumulados até o dia de hoje. As áreas propensas a inundar podem ser mapeadas com o uso de descritores de terreno. Entretanto, o mapeamento em alta resolução no estado é dificultado pelo grande tempo de processamento no cálculo desses descritores. O objetivo deste trabalho foi avaliar a performance dos descritores em mapear a inundação no estado de Santa Catarina. Foram utilizados oito descritores de terreno (*declividade*, índice topográfico, índice topográfico modificado, *downslope index*, distância horizontal até a rede de drenagem, HAND, *Geomorphic Flood Index* (GFI) e *Local Flood Index* (LFI)) no estudo. Para lidar com a limitação do tempo de processamento, foi desenvolvido um pacote de funções em para o cálculo dos oito descritores, com implementações paralelas em GPU e CUDA para acelerar o processo. Também foram implementados métodos da avaliação de performance dos descritores em simular a inundação. Foram utilizados três MDE (Modelo Digital de Elevação) no estudo, SRTM 3 arco-segundos com resolução de 90 metros, SRTM 1 arco-segundo com 30 metros e ALOS PALSAR com 12,5 metros. As manchas de inundação produzidas pelo Banco Mundial foram utilizadas no trabalho para a calibração e avaliação de performance dos descritores. A implementação paralela apresentou menores tempos em relação à implementação sequencial, sendo entre 2,4 e 18 vezes mais rápida na maior resolução. Apenas o descritor *declividade* apresentou perda na velocidade. No mapeamento das áreas de inundação no estado, os descritores apresentaram baixos índices de performance, com valores de índice de ajuste abaixo de 0,5, indicando mais células classificadas erradas do que certas. O mesmo foi observado em uma menor escala, na bacia do rio Itajaí. Os descritores que apresentaram melhores resultados foram o HAND e GFI, com índices de ajuste próximos a 0,42 no estado e 0,51 na bacia. Comparando a calibração do descritor HAND em três escalas (estado, bacia e município), nota-se que a taxa de acerto é maior em áreas menores, com um índice de ajuste de 0,83 no município. A utilização de MDE de maior resolução não apresentou benefícios, reduziu a performance de alguns descritores e levou mais tempo de processamento para o cálculo dos descritores.

Palavras-chave: Mapeamento de inundação, Computação paralela, Santa Catarina, Classificador binário linear

ABSTRACT

The state of Santa Catarina, Brazil, has a long story of flood events, and to this day, has accumulated huge losses. Flood prone areas can be mapped by using terrain descriptors. However, high resolution mapping in the state is hindered by high computation run times. The objective of this study was to evaluate descriptors performance in mapping the flood prone areas in the state of Santa Catarina. Eight terrains descriptors (slope, topographic index, modified topographic index, downslope index, distance to the nearest drainage, HAND, Geomorphic Flood Index (GFI) and Local Flood Index (LFI)) were used in the study. To overcome the computational limitations, a python package was developed, equipped with GPU based parallel functions to calculate the descriptors. Methods to evaluate the mapping performance were also added to the toolbox. Three different digital elevation models were used and compared: SRTM 3 arcsec (90 meter resolution); SRTM 1arcsec (30m); and ALOS PALSAR (12.5). World Bank flood maps were used as benchmark map for calibration and validation. The parallel implementation presented faster results when compared to its sequential counterpart, with speedup ratio ranging from 2.4 to 18 times faster in the highest resolution. Only the slope descriptor presented a slower time. The descriptors presented a low capability to map flood prone areas in the state, with results of fit index below 0.5, indicating more errors than correct classification. The same occurred in Itajaí river basin. The descriptors HAND and GFI presented the best results, with a fit index close to 0.42 at the state and 0.51 at the basin. By observing the calibration step in three scales (state, basin and county), it was noted that descriptors perform better in smaller areas, where a fit index of 0.83 was obtained in the county. Comparing the results of three resolutions, it was not observed benefit of using higher resolutions as it led to a loss of performance for some descriptors and took more computational time.

Keywords: Flood mapping, Parallel computing, Santa Catarina, Linear binary classifier

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da direção de fluxo D8. Cada valor indica uma direção diferente....	22
Figura 2: Exemplos de correção do MDE. a) preenchimento de buracos. b) remoção de picos. Adaptado de (BARTÁK, 2009).....	22
Figura 3: Exemplo de pré-processamento em uma matriz 5x5. Para demonstrar a rede drenagem, foi utilizado um limiar de iniciação de 4 células.	23
Figura 4: Representação de um grid 3x3. O Z representa a elevação da célula e P_x é a dimensão da célula.....	23
Figura 5: Diferença entre gradientes hidráulicos a) Declividade da superfície ($\tan(\beta)$) e b) Downslope index ($\tan(\alpha_d)$). O nível do lençol freático reflete o gradiente calculado. Adaptado de Hjerdt et al. (2004).....	24
Figura 6: Representação do caminho até a rede de drenagem. Quadrado verde: célula inicial. Quadrado amarelo: Caminho percorrido. Quadrado azul: Rede hidrográfica. Valores representam a direção de fluxo.....	26
Figura 7: Etapas do cálculo do HAND. Fonte: Adaptado de Rennó et al. (2008).	27
Figura 8: Representação do descritor GFI (Geomorphic Flood Index). Ponto verde: Célula em análise. Ponto vermelho: Célula do rio conectada hidrológicamente. (A) Área de contribuição da célula do rio. (B) Corte transversal apresentando o nível de água e o HAND. Adaptado de Samela, Troy e Manfreda (2017).....	28
Figura 9: Mapa de localização e elevação do estado de Santa Catarina.....	31
Figura 10: Demonstração de modelos digitais de elevação com diferentes resoluções. a) SRTM 3 arco-segundos. b) SRTM 1 arco-segundo. c) ALOS PALSAR.	33
Figura 11: Representação das formas de endereçamento.....	35
Figura 12: Fluxograma geral do processo de cálculo de um descritor pela implementação paralela.....	36
Figura 13: Exemplo do cálculo do descritor <i>downslope index</i>	38
Figura 14: Exemplo do método de cálculo da distância horizontal até a rede de drenagem com divisões de matriz. O quadrado verde representa a célula inicial e drena até o quadrado azul (célula do rio). Passo 1: A matriz é dividida e apenas uma das sub-matrizes é alocada na memória da GPU, cortando o caminho hidrológico. Passo 2: uma implementação sequencial calcula a distância até rio para todas as células das linhas e colunas entre as sub-matrizes (quadrados vermelhos). Passo 3: A sub-matriz (quadrados amarelos) e a coluna de fronteira (quadrados	

vermelhos) são alocados para a memória da GPU. Passo 4: A função paralela calcula o descritor para todas as células e em casos que a célula vá para fora da matriz, é realizado a soma do caminho percorrido mais o valor da distância da célula de fronteira. Adaptado de Schiele et al. (2012).	40
Figura 15: Exemplo de cálculo do <i>downslope index</i> com divisão de matrizes. A partir da célula inicial (quadrado verde) é percorrido o caminho hidrológico até encontrar um ponto com a diferença de elevação definida (quadrado azul). Passo 1: A matriz é dividida e apenas uma sub-matriz será alocada na memória da GPU, bloqueando o caminho hidrológico. Passo 2: A função paralela tenta calcular o descritor para cada célula da sub-matriz (quadrados amarelos), marcando as células que drenam para fora da matriz (quadrados vermelhos). Passo 3: Após todas o descritor ser calculado para todas as sub-matrizes a implementação sequencial calcula o descritor para as células marcadas (quadrado amarelo escuro). Adaptado de Schiele et al. (2012).	41
Figura 16: Mancha de inundação (100 anos tempo de retorno) do Banco Mundial. Rasterizado para a resolução de 12,5 metros.....	42
Figura 17: Tempo de processamento (segundos) para cada descritor de terreno, resolução e implementação. Cada cor representa uma dimensão diferente enquanto a cor clara indica o tempo de processamento paralelo e a cor escura indica o tempo de processamento sequencial.	48
Figura 18: Exemplo comparativo entre resultados do descritor <i>downslope index</i>	51
Figura 19: <i>Declividade</i> e <i>downslope index</i> para o estado de Santa Catarina (90 metros).....	55
Figura 20: Índice topográfico e índice topográfico modificado para o estado de Santa Catarina (90 metros).....	56
Figura 21: Distância horizontal até a rede de drenagem e HAND para o estado de Santa Catarina (90 metros).....	57
Figura 22: GFI e LFI para o estado de Santa Catarina (90 metros).....	58
Figura 23: Curvas ROC para os oito descritores. Cada linha representa uma bacia.	60
Figura 24: Resultados do índice de ajuste (F) para as três resoluções, agrupados por descritor.	63
Figura 25: Resultados do índice de ajuste (C) para as três resoluções, agrupados por descritor.	64
Figura 26: Mapa de classificação binaria linear com o melhor índice de ajuste (F), obtido pelo descritor GFI na bacia do rio Timbó na resolução de 90 metros.....	65

Figura 27: Índice de ajuste e índice de acerto dos oito descritores de terreno em cada município para cada resolução. A) Resolução de 90m. B) Resolução de 30 metros. C) Resolução de 12,5 metros. As barras azuis representam o índice de acerto enquanto as barras amarelas representam o índice de ajuste.	67
Figura 28: Mapa de classificação binária usando GFI obtido no município Rio do Sul. Azul: Verdadeiro positivo. Vermelho: Falso negativo. Amarelo: Falso positivo.	68
Figura 29: Índice de ajuste e índice de acerto dos oito descritores de terreno em cada e resolução. A) Blumenau. B) Ilhota. C) Rio do Sul. As barras azuis representam o índice de acerto enquanto as barras amarelas representam o índice de ajuste.	69
Figura A1: Mapa de classificação linear das bacias do rio Antas e rio Peperi-guaçu.	81
Figura A2: Mapa de classificação linear das bacias do rio Mampituba e rio Araranguá.	82
Figura A3: Mapa de classificação linear das bacias do rio Urussanga e rio Tubarão.	83
Figura A4: Mapa de classificação linear das bacias do rio D’Una e rio da Madre.	84
Figura A5: Mapa de classificação linear das bacias do rio Cubatão Sul, rio Biguaçu e rio Tijucas.	85
Figura A6: Mapa de classificação linear das bacias do rio Itapocu e rio Cubatão.	86
Figura A7: Mapa de classificação linear das bacias do rio Negro e rio Canoinhas.	87
Figura A8: Mapa de classificação linear da bacia do rio Timbó.	88
Figura A9: Mapa de classificação linear das bacias do rio Pelotas e rio Canoas.	89
Figura A10: Mapa de classificação linear da bacia do rio Peixe.	90
Figura A11: Mapa de classificação linear das bacias do rio Jacutinga, rio Irani e rio Chapecó.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensões dos MDE de entrada para as simulações.	33
Tabela 2: Dimensões dos MDE de entrada para a avaliação do tempo de processamento.	34
Tabela 3: Tipo de variáveis e espaço de memória dos descritores e dados de entrada	39
Tabela 4: Taxa de velocidade para cada descritor e resolução.....	48
Tabela 5: Resultado da calibração das variáveis para a resolução de 90 m.	50
Tabela 6: Resultado da calibração das variáveis para a resolução de 30 m.	52
Tabela 7: Comparação dos índices de ajuste e de acerto da calibração do estado de Santa Catarina, bacia do rio Itajaí e município de Ilhota. 90 metros.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS *Advanced Land Observing Satellite*

AUC *Area Under Curve*

ASF *Alaska Satellite Facility*

CPU *Central Processing Unit* – Unidade central de processamento

CUDA *Compute Unified Device Architecture*

GFI *Geomorphic Flood Index*

GPGPU *General Purpose Graphics Processing Unit* – Unidade de Processamento Gráfico de Propósito Geral

GPU *Graphics Processing Unit* – Unidade de Processamento Gráfico

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

JAXA *Japan Aerospace Exploration Agency*

LFI *Local Flood Index*

LIDAR *light detection and ranging*

MDE Modelo Digital de Elevação

MIMD *Multiple Instruction stream, Multiple Data stream*

SRTM *Shuttle Radar Topography Mission*

PALSAR *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*

ROC *Receiver Operating characteristic Curve*

SAR *synthetic aperture radar*

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Dimensão
<i>A</i>	Área de contribuição	m ²
<i>a</i>	Área de contribuição específica	m ² /m
<i>b</i>	Fator de forma	-
<i>C</i>	Índice de acerto	%
<i>d</i>	Energia potencial gravitacional/Diferença de elevação a ser perdida	m
<i>F</i>	Índice de ajuste	%
FPR	Taxa de falsos positivo	
GFI	Geomorphic Flood Index	-
<i>H</i>	Outra nomenclatura para o HAND	m
<i>h</i>	Altura de nível de água	m
<i>Ld</i>	Distância horizontal percorrida	m
LFI	<i>Local Flood Index</i>	
<i>n</i>	Expoente < 1	-
<i>nFDR</i>	Número de células de direção ortogonal ou diagonal em um caminho hidrológico	-
<i>Px</i>	Dimensão do píxel do modelo digital de elevação	m
tan(α_d)	Downslope index	m/m
tan(β)	Gradiente hidráulico. Declividade pode atuar como substituto.	rad
Ti	Índice topográfico	-
Tim	Índice topográfico modificado	-
TPR	Taxa de verdadeiros positivo	
<i>Z</i>	Elevação	m

m: metros; rad: radianos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	INUNDAÇÕES	19
2.2	MAPEAMENTO DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO	20
2.3	DESCRITORES DE TERRENO.....	21
2.3.1	<i>Declividade</i>	23
2.3.2	<i>Downslope index</i>	24
2.3.3	Índice topográfico	25
2.3.4	Distância horizontal até a rede de drenagem	26
2.3.5	Distância vertical em relação a rede de drenagem mais próxima (HAND) ...	26
2.3.6	<i>Geomorphic flood index (GFI) e Local Flood Index (LFI)</i>.....	27
2.4	IMPLEMENTAÇÃO EM PARALELO.....	29
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	ÁREA DE ESTUDO	31
3.2	MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO.....	32
3.3	IMPLEMENTAÇÃO DO CÓDIGO	34
3.3.1	Implementação em paralelo.....	35
3.3.2	Limitações.....	38
3.3.3	HAND e distância horizontal até a rede de drenagem	39
3.3.4	<i>Downslope index</i>	40
3.4	MODELO DE INUNDAÇÃO DO BANCO MUNDIAL	41
3.5	TRANSFERÊNCIA DE LIMIAR DE CORTE.....	42
3.6	AVALIAÇÃO DE PERFORMANCE	43

4	RESULTADOS	47
4.1	TEMPOS DE SIMULAÇÃO	47
4.2	CALIBRAÇÃO DE VARIÁVEIS	48
4.3	DESCRITORES DE TERRENO.....	53
4.4	PERFORMANCE DE CLASSIFICAÇÃO BINÁRIA LINEAR: ESTADO SC ..	58
4.5	PERFORMANCE DE CLASSIFICAÇÃO BINÁRIA LINEAR: BACIA DO RIO ITAJAÍ	66
5	CONCLUSÃO.....	71
	REFERÊNCIAS.....	73
	APÊNDICE A – Mapas de classificação binária linear	81

1 INTRODUÇÃO

As áreas próximas aos rios são historicamente mais habitadas pelos seus benefícios, provendo acesso a água, agricultura e transporte, entretanto são mais propensas a um dos desastres hidrológicos mais comuns, a inundação (ALFIERI et al., 2017; ELSHORBAGY et al., 2017). As inundações afetam bilhões de pessoas e resultam em grandes perdas sociais e econômicas em todo o mundo (CRED/UNISDR, 2016). Devido ao aumento da temperatura global e consequentes mudanças climáticas, é previsto que a frequência e intensidade das inundações aumentem no futuro (BARTIKO et al., 2019; BERGHUIJS et al., 2019; BLÖSCHL et al., 2019; BORGES DE AMORIM; CHAFFE, 2019; DOTTORI et al., 2018).

No sul do Brasil, e principalmente no estado de Santa Catarina, as inundações são um dos desastres mais comuns. No período de 1991 a 2012 foram verificados 449 registros oficiais de inundação categorizados como desastres (UFSC; CEPED, 2013). No Período de 1995 a 2014 os prejuízos relacionados à inundação totalizaram um valor de R\$ 9,8 bilhões, relatados por 95% dos municípios do estado. No ano de 2008, um único evento de inundação acarretou em 4,9 bilhões de reais em perdas, principalmente devido ao porto de Itajaí ter ficado sem funcionar por várias semanas (BANCO MUNDIAL, 2016).

Os métodos de prevenção e mitigação de danos causados por eventos de inundação podem ser classificados como estruturais e não estruturais. As medidas estruturais são intervenções diretas no sistema de risco de inundação, como barragens, diques ou outras obras baseadas em engenharia. As medidas estruturais requerem um investimento alto e tempo para serem implementadas. As medidas não estruturais são todos os outros modos de intervenção, como avaliação de danos, previsão de eventos, planejamento de recursos hídricos e mapeamento das áreas de inundação (MEYER; PRIEST; KUHLICKE, 2012; TENG et al., 2017, 2019) e podem ser mais facilmente implantadas.

Mapas de inundação são medidas não estruturais que se baseiam na utilização de modelos hidrológicos e hidráulicos. Existem diversos modelos disponíveis, permitindo a escolha dependendo dos níveis de detalhamento desejados, informações disponíveis, contexto e capacidades computacionais (TENG et al., 2017). Estes modelos são frequentemente empregados, mas dependem de diversas informações, como dados de eventos passados, informações topográficas, dados de precipitação, ocupação de solo, estruturas naturais ou artificiais e mais, dependendo do modelo. Entretanto, a falta da disponibilidade dessas

informações impede os seus usos em locais e bacias sem redes de monitoramento (DEGIORGIS et al., 2012; NARDI et al., 2013).

A necessidade de estimar de inundações em regiões não monitoradas e os avanços nas tecnologias de sensoriamento da superfície terrestre permitiram o desenvolvimentos de novos modelos conceituais, baseados em modelos digitais de elevação (NOTTI et al., 2018; TENG et al., 2019). Esses modelos que utilizam MDE (Modelo Digital de Elevação) realizam simplificações dos processos físicos, utilizando a altimetria como base para os cálculos e resultam em índices que descrevem a topografia. Estes descritores de terreno podem ser utilizados em diferentes resoluções espaciais (GAROUSI-NEJAD et al., 2019; NARDI et al., 2019), com a vantagem de não necessitar de mudanças na metodologia quando aplicados em resoluções diferentes. Degiorgis et al. (2012) apresentaram o uso de métodos de classificação binária linear para relacionar alguns descritores a áreas propensas a inundar. Manfreda et al. (2015) e Samela et al. (2015) continuaram o estudo, adicionando mais descritores e comparando a sua performance no mapeamento, mostrando que os descritores HAND (*Height above the nearest drainage*) e o GFI (*Geomorphic Flood Index*) são capazes de mapear áreas de inundação com precisão em resoluções moderadas (e.g. SRTM 90m ou 30 metros). Samela, Troy e Manfreda (2017) estudaram e compararam a performance dos descritores de terreno em dois conjuntos de bacias: mais montanhosas e mais planas, de modo que o descritor GFI apresentou maior capacidade de mapeamento em ambos os casos, enquanto outros descritores apresentaram resultados diferentes nas duas regiões. Try et al. (2019) utilizaram descritores similares para o mapeamento de áreas propensas a inundar na bacia do rio Mekong, aonde o descritor HAND foi capaz de mapear as áreas de inundação de uma grande bacia hidrográfica (795.000 km²).

Alguns descritores também foram utilizados em estudos de mapeamento de larga escala e resolução. Entretanto, a utilização de resoluções mais refinadas e grandes áreas resultam em um tempo computacional muito elevado (LIU et al., 2018). Liu et al. (2018) desenvolveram um *framework* para o mapeamento de inundação continental para todo os Estados Unidos, em uma resolução de 10 metros com o descritor HAND). Entretanto, para calcular o descritor HAND para todo o país foram necessários 1,5 dias de processamento no supercomputador ROGER (*Resourcing Open Geospatial Education and Research*). Já Tavares da Costa et al. (2019) utilizaram o descritor GFI para mapear as áreas propensas à inundação para toda a Europa, em uma resolução de 25 metros, contando com uma plataforma *web* para apresentar e disponibilizar os resultados.

A paralelização dos cálculos com o uso de unidades de processamento gráfico (GPU) é uma alternativa que vem sendo aplicada em diversas áreas de pesquisa, pelos baixos custos e eficiência, quando comparada a outras opções, como *message passing interface* (MPI) e *clusters* de processadores (GICHAMO; TARBOTON, 2020; QIN; ZHAN, 2012). Neal et al. (2010) mostrou que GPUs apresentaram implementações mais rápidas, mas necessitaram de mais tempo de desenvolvimento. Outros estudos mostraram que GPUs podem ser mais eficientes que outros métodos de paralelização e não necessitam grandes modificações do código sequencial (GICHAMO; TARBOTON, 2020; TRISTRAM; HUGHES; BRADSHAW, 2014). Em relação aos usos de MDE, GPU apresenta resultados promissores na redução do tempo de cálculo de redes de drenagem (ORTEGA; RUEDA, 2010) e acumulação de fluxo (QIN; ZHAN, 2012).

A maioria das técnicas e métodos de cálculos dos descritores estão fragmentadas em diferentes softwares e ferramentas, não tendo em um único lugar de fácil acesso. Este trabalho desenvolveu um pacote para Python com implementações paralelas e sequenciais de oito descritores: *declividade*, índice topográfico, índice topográfico modificado, *downslope index*, distância horizontal até a rede de drenagem, HAND, GFI e LFI (*local flood index*). Além disso, enquanto a maioria dos estudos trata de MDE de baixa resolução ou de pequenas áreas, neste estudo, os descritores foram utilizados para realizar o mapeamento de manchas de inundação para todo o estado de Santa Catarina em três diferentes resoluções (90m, 30m e 12,5 m).

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho computacional e espacial dos descritores de terreno em mapear áreas suscetíveis à inundação no estado de Santa Catarina.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma ferramenta computacional baseada em paralelização em GPU para a aceleração dos cálculos dos descritores de terreno.
- Comparar o uso de diferentes resoluções de MDE no cálculo de descritores de terreno e suas performances.
- Comparar a performance dos descritores de terreno em diferentes territórios e escalas geográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INUNDAÇÕES

Segundo Goerl e Kobiyama (2005) existem muitos termos relacionados à eventos de inundação, como enchentes, enxurradas ou cheias, que são usados de forma errônea. A inundação pode ser definida como o transbordamento da água dos rios para além de suas margens. As inundações podem ser classificadas como inundações graduais, que ocorrem de forma lenta devido a precipitações de longa duração, ou inundações, que ocorrem de forma repentina ligadas a eventos de precipitação de alta intensidade. Em lugares foras do Brasil, inundações também podem ser associadas ao derretimento de gelo e neve em montanhas (BLÖSCHL et al., 2015).

A ocupação de regiões e locais próximos a rios é atrativa devido aos seus benefícios. Rios oferecem acesso a recursos hídricos, terras férteis para agricultura, alimentos, transporte e barreiras naturais. Estima-se que próximo de 1 milhão de pessoas vivem nessas regiões (ALFIERI et al., 2017; ELSHORBAGY et al., 2017). A ocupação dessas áreas deixa as populações mais vulneráveis. Inundações de rios estão entre desastres que mais impactam a vida das pessoas em todo mundo (BLÖSCHL et al., 2017). Entre os anos de 1995 e 2015 as inundações foram o desastre mais comum globalmente, correspondendo a 47% das notificações e afetando 2,3 bilhões de pessoas globalmente (CRED/UNISDR, 2016). Estima-se que inundações causam perdas econômicas de, em média, 104 bilhões de dólares todos os anos (BLÖSCHL et al., 2019). Esses impactos estão previstos para aumentar no futuro.

O sul do Brasil é frequentemente afetado por eventos de inundação. Durante os anos de 1995 a 2019 o Brasil sofreu prejuízos próximos de 114,89 bilhões de reais decorrentes de desastres hidrológicos. O sul do país apresentou 30% desses prejuízos, aonde Santa Catarina foi um dos estados mais afetados (CEPED/UFSC, 2019). Entre os anos de 1994 e 2014 foram registrados 2.704 casos de desastres no estado, sendo 62% desses casos relacionados a inundações. No ano de 2008 houve um grande evento de inundação que, sozinho, causou um prejuízo de 4,9 bilhões de reais (BANCO MUNDIAL, 2016). A região do vale do Itajaí possui um histórico destes eventos, com a ocorrência de 104 eventos durante o período. Entre os anos de 1991 e 2012, aproximadamente 600 mil pessoas foram afetadas por eventos de inundação, com 38 casos de morte relatados (CEPED/UFSC, 2013).

2.2 MAPEAMENTO DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO

As inundações ocorrem frequentemente em todo o planeta. Os métodos de resposta a esses eventos costumam for e mitigar os impactos, limitando os perigos, dano a estruturas e exposição de indivíduos a perdas. Entretanto, o contínuo desenvolvimento dessas regiões potencializa os riscos e exposição ao evento. O gerenciamento de riscos de inundação é um assunto cada vez mais importante, com a previsão do aumento da frequência e magnitude desses eventos (STEVENS; HANSCHKA, 2014; TOWE et al., 2020). Planos diretores e de uso do solo implementados em nível municipal ajudam a reduzir as perdas por desastres naturais quando aplicados para a indicação de áreas mais seguras para desenvolvimento. Ter o conhecimento de quais locais serão atingidos por esses eventos, com acurácia e certeza, e informar a população sobre os riscos associados é essencial (MERWADE et al., 2008; STEVENS; HANSCHKA, 2014).

A realização do mapeamento e modelagem de inundações busca entender, quantificar e representar as características e impactos das inundações ao longo de escalas espaciais e temporais (CHAUDHURI; GRAY; ROBERTSON, 2021). Modelos hidrológicos e hidráulicos são amplamente utilizados em mapeamento de inundações, avaliação de impactos, previsão em tempo real e planejamento de recursos hídricos. Atualmente existem diversos modelos diferentes, podendo ser escolhidos pelos níveis de detalhes desejados, dados e informações disponíveis, contexto e capacidades computacionais (TENG et al., 2017, 2019). Esses modelos apresentam grande capacidades de previsão de áreas de inundação. Entretanto, podem ser um processo longo, caro e necessita de grandes quantidades de informações frequentemente não disponíveis (DEGIORGIS et al., 2012; NARDI et al., 2013; SAMELA; TROY; MANFREDA, 2017).

Nos últimos anos novos modelos conceituais simplificados vem sendo desenvolvidos. Esses modelos utilizam simplificações de processos físicos, permitindo rápidas estimativas das áreas de inundação e aplicação em maiores áreas (TENG et al., 2019). O avanço de tecnologias de sensoriamento da superfície terrestre, como o LIDAR (*light detection and ranging*), SAR (*synthetic aperture radar*) e modelos digitais de elevação (MDE), a missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) por exemplo, se apresentaram como opções de menor custo e mais rápidas para a estimativa de áreas de inundação (NOTTI et al., 2018). Com o aumento da disponibilidade global de MDEs, modelos baseados na geomorfologia da bacia são uma alternativa aos modelos hidrológicos e hidráulicos. Nos últimos anos diversos estudos sobre

descritores foram realizados, relacionando condições topográficas com áreas propensas a inundar (e.g. NARDI; VIVONI; GRIMALDI, 2006; NOBRE et al., 2016; SPECKHANN et al., 2018) e comparando o desempenho em mapeamento de inundações (e.g. DEGIORGIS et al., 2012; SAMELA; TROY; MANFREDA, 2017).

2.3 DESCRITORES DE TERRENO

Eventos hidrológicos formam e modificam a superfície terrestre. Deste modo deve existir um atributo ou característica física que consiga relacionar inundações com a topografia de uma bacia (MANFREDA; DI LEO; SOLE, 2011). Alguns estudos vêm mostrando as capacidades dos descritores em fazer essa relação entre inundação e topografia. Degiorgis et al. (2012) estudaram a relação entre diversos descritores geomorfológicos e áreas suscetíveis a inundar. No estudo eles demonstraram que um limiar de classificação que aproxima um descritor um mapa de inundação de teste pode ser utilizado para mapear locais que não possuem um mapa de inundação. Manfreda et al. (2015) continuaram este estudo, comparando a performance de descritores em duas escalas diferentes. Já Samela, Troy e Manfreda (2017) compararam as performances de descritores em sub-bacias com diferentes características topográficas, demonstrando que regiões montanhosas se relacionam melhor com descritores diferentes de bacias mais planas.

A base para qualquer descritor de terreno é a elevação, representada pelo MDE. Entretanto cada descritor utiliza diferentes informações de entrada em seus cálculos. Deste modo o pré-processamento permite obter dois conjuntos de informações bastantes utilizados: a direção de fluxo e a acumulação de fluxo.

A direção de fluxo representa a direção que uma rede de drenagem segue entre uma célula para outra. A direção de fluxo é geralmente calculada utilizando o método clássico D8 (apresentado por O'Callaghan e Mark em 1984), que utiliza a declividade em relação as células vizinhas para determinar a direção. Figura 1 apresenta os valores utilizados pelo D8. Outros métodos buscaram aperfeiçoar o D8, como o *multiple flow direction* em que a direção de fluxo aponta para mais de uma célula vizinha, dividindo o fluxo da água. Um exemplo é o D-inf, proposto por Tarboton (1997).

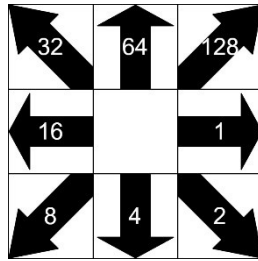


Figura 1: Representação da direção de fluxo D8. Cada valor indica uma direção diferente

De forma que o caminho hidrológico não seja interrompido por possíveis imperfeições do MDE ou estruturas não detectadas, como pontes, o MDE passa por um processo de correção de consistência hidrológica, garantindo um caminho hidrológico até os limites da matriz. Um método comum é o preenchimento de buracos, com o aumento da elevação das células sem saída até um nível que permita calcular a declividade. Outra opção é talhar um caminho entre as células mais elevadas, permitindo continuar a direção de fluxo (BARTÁK, 2009). A Figura 2 apresenta um exemplo dos métodos de correção.

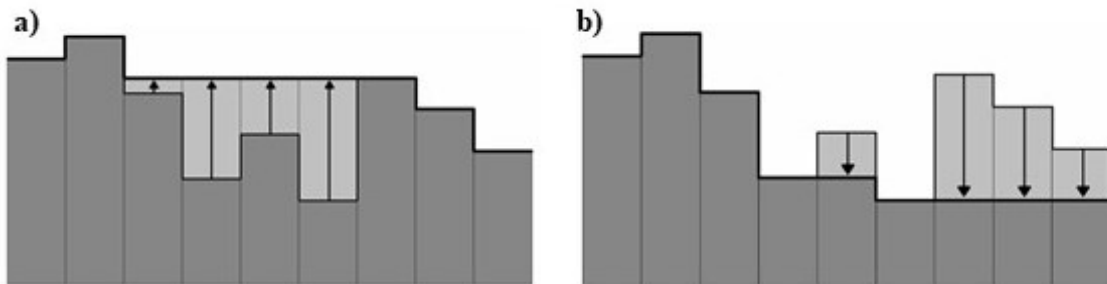


Figura 2: Exemplos de correção do MDE. a) preenchimento de buracos. b) remoção de picos. Adaptado de (BARTÁK, 2009)

O cálculo da acumulação de fluxo ou de áreas de contribuição a partir de MDE é uma das questões principais para a análise de terreno digitais e apresenta aplicações em diversas áreas como análise hidrológica e geomorfologia (QIN; ZHAN, 2012). A acumulação de fluxo representa a quantidade de células que drenam até certo ponto, sendo a área de contribuição a área coberta por estas células.

Independente da metodologia de direção de fluxo (D8 ou D-inf), a acumulação de fluxo pode ser utilizada para a geração de uma rede de drenagem. Utilizando um limiar de iniciação de rede de drenagem, as células que apresentam uma contribuição acima do limiar são classificadas como células de drenagem. A Figura 3 apresenta um exemplo de um MDE, com as direções de fluxo calculadas e acumulação de fluxo com um limiar de acúmulo.

Modelo de elevação					Direção de fluxo					Acumulação de fluxo				
10	11	12	10	7	2	4	2	2	4	1	1	1	1	1
10	8	9	7	4	2	2	2	2	4	1	3	1	2	3
12	7	7	5	3	2	2	1	1	1	1	2	4	14	25
9	7	6	5	4	1	1	128	128	64	1	4	8	2	3
12	11	8	6	7	128	128	128	126	64	1	1	1	1	1

Figura 3: Exemplo de pré-processamento em uma matriz 5x5. Para demonstrar a rede drenagem, foi utilizado um limiar de iniciação de 4 células.

2.3.1 Declividade

A *declividade* representa a variação da diferença vertical em relação a variação horizontal. Existem diversos algoritmos diferentes de cálculo da declividade, baseados em um *grid* 3x3 do MDE, conforme apresentado na Figura 4.

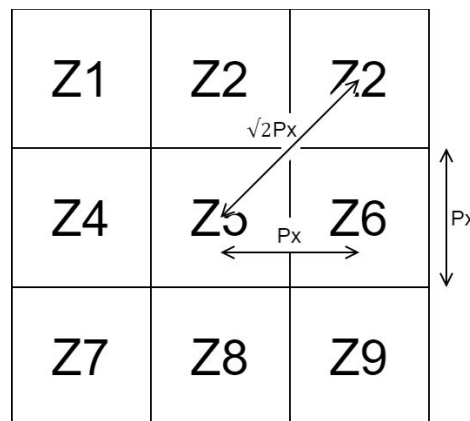


Figura 4: Representação de um grid 3x3. O Z representa a elevação da célula e P_x é a dimensão da célula.

O método *Steepest Downhill* é um método mais simples que considera apenas a maior declividade para as células vizinhas, podendo ser apresentada em porcentagem, graus ou radianos. A *declividade* é calculada diretamente do MDE, utilizando os seus valores para a diferença vertical e as suas dimensões para a diferença horizontal. A declividade vem sendo utilizada para o mapeamento em estudos comparativos (e.g. DEGIORGIS et al., 2012; MANFREDA et al., 2015; SAMELA; TROY; MANFREDA, 2017). A *declividade* pode ser utilizada sozinha para o mapeamento das áreas de risco de inundação. A *declividade* é calculada pela Equação 1:

$$\text{Declividade} = \left(\frac{Z_5 - Z_x}{Px} \right) \text{ ou } \text{Declividade} = \left(\frac{Z_5 - Z_x}{Px\sqrt{2}} \right) \quad \text{Equação 1}$$

onde Z_5 é a elevação de célula central, Z_x é a elevação de uma célula vizinha, Px é a dimensão da célula.

2.3.2 Downslope index

O *Downslope index*, proposto por Hjerdt et al. (2004), é um método alternativo para estimar o gradiente hidráulico. A declividade da superfície é comumente utilizada como substituto do gradiente hidráulico. Entretanto, em regiões de superfícies côncavas e convexas o gradiente hidráulico pode ser influenciado pelas condições de drenagem além do ponto em estudo. O *Downslope index* se baseia no cálculo das diferenças de cargas ao longo dos caminhos de fluxo. A Figura 5 demonstra a diferença do gradiente hidráulico obtido pelos dois métodos.

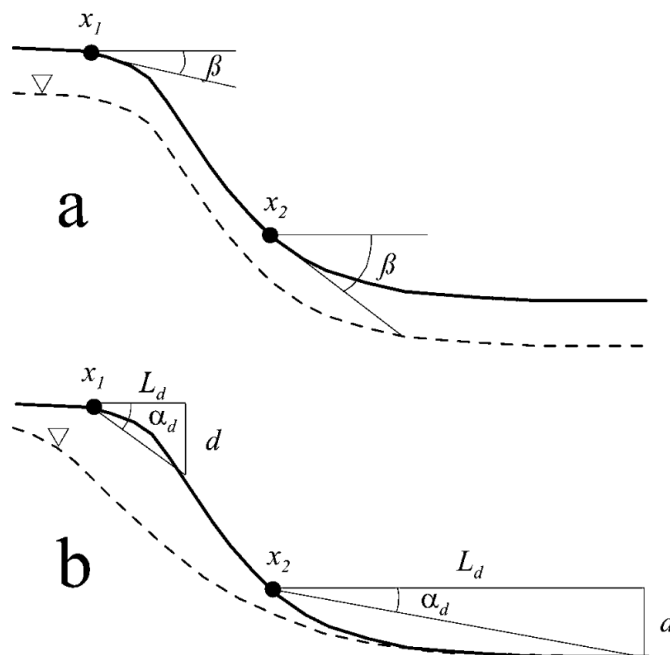


Figura 5: Diferença entre gradientes hidráulicos a) Declividade da superfície ($\tan(\beta)$) e b) Downslope index ($\tan(\alpha_d)$). O nível do lençol freático reflete o gradiente calculado. Adaptado de Hjerdt et al. (2004).

Esse método analisa a distância que uma parcela de água percorre ao longo do caminho de fluxo até perder uma certa quantidade de energia potencial gravitacional. A equação do *downslope index* é definida como:

$$\tan(\alpha_d) = \frac{d}{L_d} \quad \text{Equação 2}$$

onde L_d é a distância é a distância horizontal percorrida até um ponto a d metros abaixo da elevação inicial. A distância L_d é diferente para cada célula. O d representa a energia potencial a ser perdida.

2.3.3 Índice topográfico

O índice topográfico, apresentado por Kirkby (1975), é um índice composto por duas medidas importantes: a área de contribuição da célula, relacionada à localização hidrográfica na bacia, e o gradiente hidráulico, geralmente substituído pela declividade. A união dessas medidas faz com que o índice topográfico seja um indicador de áreas que tendem a acumular águas de precipitações e escoamento e, conseqüentemente, áreas propensas a inundar (MANFREDA; DI LEO; SOLE, 2011; MANFREDA; SOLE; FIORENTINO, 2008).

Manfreda, Sole e Fiorentino (2008) propuseram uma modificação para o índice topográfico, introduzindo um expoente n à área de contribuição. A adição do parâmetro permite o ajuste da relevância da área de contribuição e a declividade local para o cálculo do descritor (MANFREDA; DI LEO; SOLE, 2011; MANFREDA; SOLE; FIORENTINO, 2008). As equações apresentam o cálculo do índice topográfico e do índice topográfico modificado.

$$Ti = \ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right) \quad \text{Equação 3}$$

$$Ti_m = \ln\left(\frac{a^n}{\tan \beta}\right) \quad \text{Equação 4}$$

sendo a área de contribuição específica por unidade de largura ortogonal à linha de fluxo (m^2/m), $\tan(\beta)$ é a *declividade* (radianos) e n é um expoente < 1 . Caso seja utilizado a direção de fluxo D8, a acumulação de fluxo multiplicado pelo tamanho do pixel Px é o suficiente para representar a área específica para o cálculo do descritor. Já o expoente n pode ser estimado utilizando a seguinte equação:

$$n = 0.0016 * Px^{0.46} \quad \text{Equação 5}$$

onde Px é a resolução do modelo digital de elevação.

Entretanto, o índice topográfico apresenta limitações em seus pressupostos. O modelo considera que o gradiente da água subterrânea é sempre igual ao gradiente superficial e que a declividade local é um bom substituto para o gradiente hidráulico. Deste modo, o índice não é muito adequado para regiões mais planas, com direções de fluxos indefinidas, diferentes das declividades da superfície e propensas a mudar (RAHMATI et al., 2018).

2.3.4 Distância horizontal até a rede de drenagem

A distância horizontal até a rede de drenagem é definida como o comprimento do caminho hidrológico que a célula percorre até se conectar com a rede de drenagem mais próxima. A distância é calculada a partir da célula e é considerado as suas dimensões no cálculo. A Figura 6 apresenta um exemplo do descritor e a Equação 6 demonstra o seu método de cálculo.

$$\text{Distância} = \sum (nFDR_{\text{ortogonal}} + nFDR_{\text{diagonal}} * \sqrt{2}) * Px \quad \text{Equação 6}$$

onde $nFDR$ é o número de células e Px é a dimensão da célula. No exemplo da Figura 6, em um MDE de 90 metros a distância horizontal até a rede de drenagem seria de 794,56 metros.

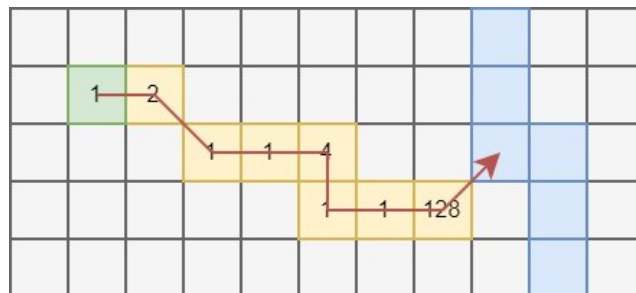


Figura 6: Representação do caminho até a rede de drenagem. Quadrado verde: célula inicial. Quadrado amarelo: Caminho percorrido. Quadrado azul: Rede hidrográfica. Valores representam a direção de fluxo.

2.3.5 Distância vertical em relação a rede de drenagem mais próxima (HAND)

O índice HAND (*height above the nearest drainagem*) é um descritor que foi apresentado por Rennó et al. (2008). Este descritor representa uma versão normalizada da topografia em relação a rede de drenagem mais próxima (NOBRE et al., 2011). O descritor é altamente dependente da rede de drenagem, refletindo a forma de execução do pré-processamento do MDE. A Figura 7 exemplifica o cálculo do descritor a partir do MDE, direção de fluxo e acumulação.

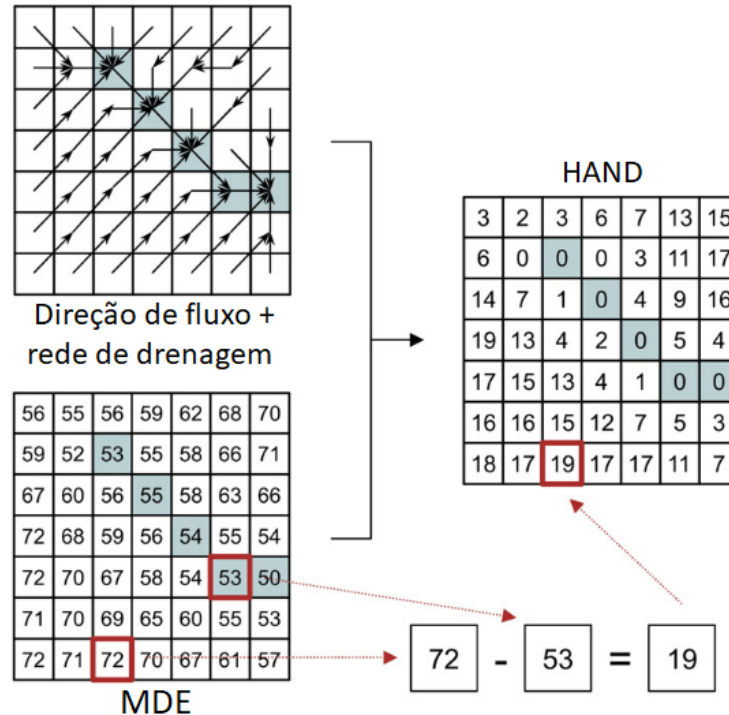


Figura 7: Etapas do cálculo do HAND. Fonte: Adaptado de Rennó et al. (2008).

O descritor tem sido bem utilizado na última década por apresentar bons resultados no mapeamento de áreas de risco de inundação. Nobre et al. (2016) compararam o mapa de inundação produzido com o descritor HAND com a mancha de inundação de um caso real. Speckhann et al. (2018) uniram análise de frequência ao índice HAND, obtendo acertos acima de 90% no mapeamento de eventos anteriores. Degiorgis et al. (2012), Manfreda et al. (2015) e Samela, Troy e Manfreda (2017) compararam a performance de diversos descritores, com o HAND se destacando entre os melhores descritores.

Recentemente Liu et al. (2018) realizaram o mapeamento de áreas de risco de inundação para todo o país dos Estados Unidos utilizando o descritor HAND com um MDE de 10 metros de resolução. Garousi-Nejad et al. (2019) aperfeiçoaram o método proposto por Liu et al. (2018), utilizando redes de drenagem de alta qualidade para a correção da rede de drenagem. Estruturas, como pontes, modificam o MDE e podem levar a erros de trajeto da direção de fluxo e acumulação de fluxo.

2.3.6 Geomorphic flood index (GFI) e Local Flood Index (LFI)

Os descritores *Local Flood Index* (LFI) e o *Geomorphic Flood Index* (GFI), apresentados por Manfreda et al. (2014), são similares ambos comparam uma altura de nível de água com a diferença de elevação H (HAND). Essa comparação indicaria a propensão de um

ponto ficar inundado durante a cheia do rio. A diferença entre os descritores está na origem dessa água durante o cálculo da altura do nível da água. A comparação é demonstrada pelas equações:

$$\text{GFI} = \ln\left(\frac{h_r}{H}\right) \quad \text{Equação 7}$$

$$\text{LFI} = \ln\left(\frac{h_l}{H}\right) \quad \text{Equação 8}$$

onde h é a altura do nível de água (m) e H é o HAND (*Height Above the Nearest Drainage*, m). Essas alturas h_r e h_l é calculada em função de uma área de contribuição, demonstrado nas seguintes equações:

$$h_r = bA_r^n \quad \text{Equação 9}$$

$$h_l = bA_l^n \quad \text{Equação 10}$$

sendo b um fator de escala, n o expoente, A_r é a área de contribuição da célula do rio, conectada hidrologicamente, e A_l é a área de contribuição local, da própria célula. A diferença entre os descritores está na origem da área de contribuição. O LFI considera que o perigo de inundação é devido ao escoamento excessivo até a célula. Já o GFI considera que a inundação ocorre devido ao transbordamento do rio, com o nível do rio acima do nível da célula. A Figura 8 apresenta uma demonstração do GFI.

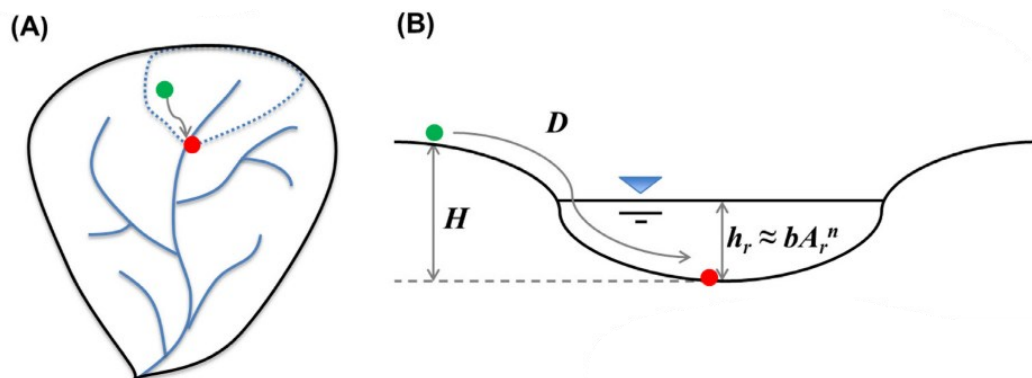


Figura 8: Representação do descritor GFI (Geomorphic Flood Index). Ponto verde: Célula em análise. Ponto vermelho: Célula do rio conectada hidrologicamente. (A) Área de contribuição da célula do rio. (B) Corte transversal apresentando o nível de água e o HAND. Adaptado de Samela, Troy e Manfreda (2017).

O GFI vem apresentando boa capacidade de previsão de áreas suscetíveis a inundação. Entre os descritores comparados por Samela, Troy e Manfreda (2017), o GFI foi o que mais se destacou por apresentar os melhores resultados para classificar as células da mancha de inundação. Tavares da Costa et al. (2019) utilizou o GFI para a produção de mapas de inundação com resolução de 25m para toda Europa. Tavares da Costa et al. (2020) complementaram o método, reduzindo a dependência do mapa de inundação de teste para a calibração do descritor.

2.4 IMPLEMENTAÇÃO EM PARALELO

A disponibilidade de imagens e informações provenientes de satélite vem aumentando nos últimos anos, permitindo o avanço em pesquisas e estudos. A utilização de MDE de alta resolução é um avanço essencial e desafiador para modelagem geomorfologia e hidrológica devido à grande quantidade de dados e o tempo de processamento. Novos meios de implementação e paralelização são necessários para a melhoria destes métodos (SCHIELE et al., 2012).

A paralelização dos métodos baseados em MDE vem sendo recomendada para reduzir o tempo de execução. Vacondio et al. (2017) apresentaram duas abordagens para a paralelização de modelos: a clássica, que utiliza MPI (*Message Passing Interface*) e openMP (*open Multi Processing, Multi-processamento aberto*), ou uma abordagem mais recente, com o uso de placas gráficas (GPU). Existem outros métodos de paralelização, como *clusters* de processadores e CPU de múltiplos núcleos (*Multi-core CPU*). O *cluster* é um grupo de qualquer quantidade de processadores, apresentando ganhos significativos no tempo de processamento, mas apresenta uma grande dificuldade de programação, aprendizagem e altos custos operacionais. As CPU de múltiplos núcleos é a opção mais comum e acessível, entretanto não apresenta um ganho significativo devido ao número limitado de núcleos (QIN; ZHAN, 2012).

Neal et al. (2010) comparou a utilização de três métodos de paralelização baseados em *openMP*, MPI e GPU e relataram que o MPI foi o que apresentou melhor equilíbrio entre desempenho e complexidade e foi levemente mais eficiente que *openMP*. Ainda assim, GPU apresentou a maior aceleração de execução entre os três métodos, mas teve um tempo de desenvolvimento muito elevado. Tristram, Hughes e Bradshaw (2014) estudaram o uso de GPU em modelos e notificaram que placas gráficas apresentaram acelerações significativas no tempo de execução sem necessitar de grandes mudanças nos códigos. Gichamo e Tarboton (2020) também apresentaram resultados mostrando que placas gráficas obtiveram uma maior

aceleração do tempo de processamento sem a necessidade de realizar um grande refatoramento do código. Com o avanço das tecnologias de *frameworks*, como o CUDA e o OpenCL, e o surgimento de novas ferramentas como NUMBA, a programação para a GPU tem ficado mais fácil e acessível, se aproximando a linguagens comuns como C e Python.

A escolha do método de paralelização depende de múltiplos fatores, como familiaridade com a interface de programação, a facilidade de adaptação do código para uma versão paralela e a configuração dos dados e memória do problema ser modelado (GICHAMO; TARBOTON, 2020). O uso de GPUs se destaca por apresentarem uma boa eficiência na aceleração de processamento e por serem mais acessíveis. *Frameworks* como NVIDIA CUDA permitiram o uso de GPU para processamentos mais complexos e extensivos, mas mantendo uma curva de aprendizagem baixa. O CUDA permite programar de forma similar a outras linguagens de programação, como o C, sem a necessidade de conhecimento da parte gráfica (NVIDIA, 2021).

Uma GPU é composta por múltiplos processadores MIMD (*Multiple Instruction stream, Multiple Data stream*), que por sua vez é composta por múltiplos processadores SIMD (*Single Instruction stream, Multiple Data stream*). A execução ocorre em múltiplos blocos de *threads*, em que cada thread executa o cálculo implementado. Cada *thread* pode acessar as informações disponíveis na memória dividida, entre um mesmo bloco, ou na memória global. O número de blocos dependerá da quantidade de informações a ser processada, como o número de elementos em uma matriz, e da quantidade de *threads* alocadas ao bloco. Cada *thread* recebe um endereço único dentro do bloco e que posteriormente será utilizado para a localização e realização dos cálculos na matriz (ORTEGA; RUEDA, 2010).

Os modelos de aceleração em GPU são geralmente baseados em *grid* cartesianos uniformes, sendo uma boa escolha para operações matriciais, como o caso de descritores de terreno e modelos de elevação (ERÄNEN et al., 2014). Entretanto, esse modelo em *grid* apresenta algumas limitações. A resolução precisa ser constante para toda a dimensão e a forma do domínio necessita ser retangular (VACONDIO et al., 2017). Isso dificulta a simulação de inundação em grandes áreas, principalmente para grandes resoluções, pois as células sem informações (*nodata*) ainda ocupam espaço na memória.

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Área de estudo do trabalho é o estado de Santa Catarina, localizada no sul do Brasil, entre os paralelos 26° e 30°S e meridianos 48° e 54°W. O estado faz fronteira com o Rio Grande do Sul (Sul), Paraná (Norte), Argentina (Oeste) e Oceano Atlântico (Leste). A estimativa da população em 2020 do IBGE (IBGE, 2020) apresenta 7.252.502 habitantes em 295 municípios. A Figura 9 apresenta a localização do estado.

O estado possui 23 grandes bacias hidrográficas: Antas, Araranguá, Biguaçu, Canoas, Canoinhas, Chapecó, Cubatão, Cubatão Sul, Madre, D'una, Irani, Itajaí, Itapocu, Jacutinga, Mampituba, Negro, Peixe, Pelotas, Peperi-Guaçu, Tijucas, Timbó, Tubarão e Urussanga. A Figura 9 também apresenta a localização de cada bacia no estado.

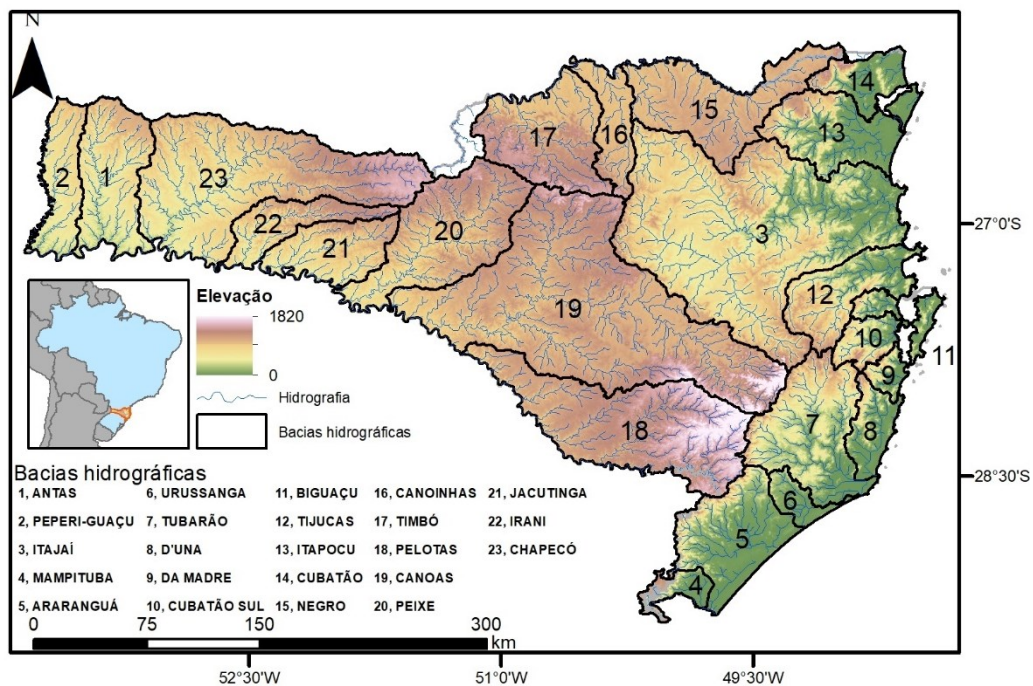


Figura 9: Mapa de localização e elevação do estado de Santa Catarina.

O estado apresenta, segundo a classificação de Köppen-Geiger (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), dois climas distintos: Cfa (clima temperado úmido com verão quente) em maior parte do estado e Cfb (clima temperado úmido com verão temperado) na região nordeste do estado.

3.2 MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

Neste trabalho serão utilizados os dados altimétricos provenientes de três fontes: SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resoluções de 90 e 30 metros, ALOS (*Advanced Land Observing Satellit*) com resolução de 12,5 metros e SDS (Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável) com resolução de um metro. A seleção desses modelos de elevação levou em conta a cobertura de todo o estado de Santa Catarina e a disponibilidade gratuita na internet.

A SRTM foi a primeira missão que produziu e disponibilizou dados de MDE para grande parte da superfície terrestre. Estão disponíveis as resoluções espaciais de 3 arcos de segundos (aproximadamente 90 metros na linha do equador) e de 1 arco de segundo (30 metros na linha do equador). Os modelos de elevação de ambas as resoluções estão disponíveis no link: <https://earthexplorer.usgs.gov>. Entretanto, imagens espaciais estão sujeitas a alguns erros observacionais. No caso do SRTM, os dados de elevação apresentam um viés positivo em áreas com grande cobertura vegetal. Outra fonte de erros são regiões declivosas e suas direções, aonde partes de trás de morros apresentam mais erros do que as partes de frente ao satélite (SHORTRIDGE; MESSINA, 2011; YAMAZAKI et al., 2017).

Lançado em 2006, pela JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*), o satélite ALOS equipado com o sensor PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) capturou imagens e informações da superfície terrestre até o ano de 2011. Devido o direcionamento lateral do radar, as imagens produzidas contêm distorções geométricas e radiométricas. A ASF (*Alaska Satellite Facility*) corrigiu essas imagens e disponibilizou para a comunidade. Utilizando o MDE de 30 metros da SRTM como base, as distorções e erros de localização foram removidos por meio de ortorretificação. Por fim, o projeto produziu MDEs em duas resoluções, 30 metros e 12,5 metros. Neste trabalho, foi utilizado o MDE de alta resolução de 12,5 metros, que possui uma vasta cobertura terrestre, incluindo todo o estado de Santa Catarina (ASF DAAC, 2015). O modelo pode ser acessado em: <https://search.asf.alaska.edu/>.

Em 2012 o governo do estado de Santa Catarina junto da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS) realizou um levantamento de dados geográficos de alta precisão para o desenvolvimento sustentável no estado. No site <http://sigsc.sds.sc.gov.br> estão disponíveis os dados levantados, incluindo um MDE com resolução espacial de 1 metro, com escala de 1:10.000.

Devido às características do MDE, a resolução espacial pode influenciar nos resultados dos cálculos dos descritores. A resolução também modifica quantidade de células presentes na matriz da área. Conseqüentemente, a área de cada pixel é menor, possivelmente levando a uma modificação do comportamento de fluxo e um aumento da acumulação de fluxo, necessitando então aumentar o limiar de iniciação de rede de drenagem para os descritores distância horizontal até a rede de drenagem e HAND e indiretamente para o GFI e LFI. A Figura 10 apresenta uma comparação entre os quatro MDE em uma mesma região, enquanto a Tabela 1 apresenta os dados de dimensões e células dos modelos de elevação utilizados.

Tabela 1: Dimensões dos MDE de entrada para as simulações.

Modelo digital de elevação	Dimensão da célula (m)	Linhas	Colunas	Número total de células	Células sem valor	Células valoradas
SRTM 3 arco-segundos	90	4.404	6.976	30.722.304	14.117.642	16.604.662
SRTM 1 arco-segundo	30	13.211	20.927	276.466.597	127.029.074	149.437.523
ALOS PALSAR	12,5	32.839	46.650	1.531.939.350	703.885.530*	828.053.820*

*Calculadas seguindo a proporção de 46%, encontrada nas outras resoluções

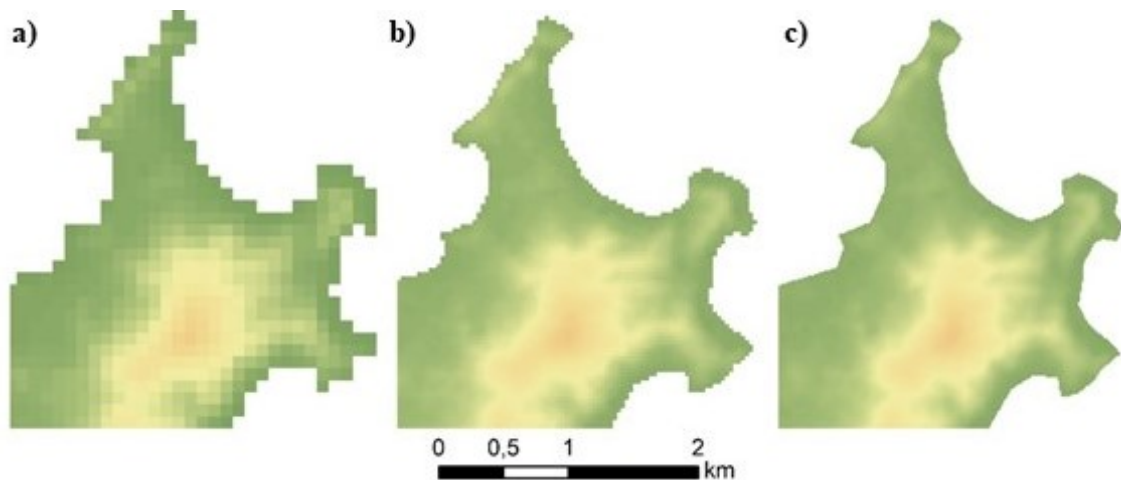


Figura 10: Demonstração de modelos digitais de elevação com diferentes resoluções. a) SRTM 3 arco-segundos. b) SRTM 1 arco-segundo. c) ALOS PALSAR.

Devido às limitações da placa gráfica e do processador discutidas na seção 3.3.2, não é possível utilizar o MDE da SDS para o mapeamento de inundação de todo o estado por ter uma grande dimensão e extrapolar as capacidades do computador. Para ainda tirar proveito da sua disponibilidade e alta resolução, o MDE foi utilizado no teste de desempenho da implementação paralela em reduzir o tempo de processamento dos cálculos dos descritores. Para isso o MDE passou por uma interpolação bilinear para as resoluções de 5, 10, 20, 30, 60 e 90 metros, permitindo a comparação em diferentes resoluções. A interpolação bilinear é um método de

interpolação mais simples e leve e que não necessita de mais informações além da elevação, sendo considerada uma abordagem adequada para reinterpolação de MDEs (SHI; WANG; TIAN, 2014). Os outros modelos de elevação não foram utilizados nessa etapa. A Tabela 2 apresenta uma comparação entre as diferentes resoluções.

Tabela 2: Dimensões dos MDE de entrada para a avaliação do tempo de processamento.

Dimensão da célula (m)	Linhas	Colunas	Número total de células	Células sem valor	Células valoradas
5	7.452	11.200	83.462.400	27.767.034	55.695.366
10	3.726	5.600	20.865.600	6.941.195	13.924.405
20	1.863	2.800	5.216.400	1.734.193	3.482.207
30	1.242	1.867	2.318.814	771.301	1.547.513
60	621	933	579.393	192.595	386.798
90	414	622	257.508	85.558	171.950

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO CÓDIGO

As etapas do pré-processamento foram realizadas no programa ArcMap 10.5, pela familiaridade com a ferramenta. Foi utilizado a técnica de preenchimento dos buracos para o cálculo da direção de fluxo e acumulação de fluxo. Para realizar as implementações dos cálculos dos descritores foi utilizado a linguagem de programação Python por ser disponível gratuitamente, ter o ideal de código fonte aberto, ter um grande suporte da comunidade e pelas ferramentas disponíveis para a computação de alta performance. A linguagem conta com diversos pacotes disponíveis para o desenvolvimento. Neste trabalho, as implementações dependeram principalmente do pacote Numba.

Em outras linguagens de programação, como o MATLAB, a programação paralela em GPU é feita em duas partes, em que os códigos são escritos na própria linguagem e o cálculo paralelo é escrito em kernels (blocos de códigos) em C. No caso do Python, a pacote Numba permite escrever os códigos diretamente em Python, sem a necessidade do uso de kernels. A pacote é responsável por traduzir as configurações do Python para C de forma que a placa gráfica e o CUDA entendam.

A plataforma de computação paralela para placas gráficas escolhida foi o NVIDIA CUDA. Existem outras plataformas para a programação em GPU, como o openCL, que são de código fonte aberto e podem ser utilizadas por diferentes marcas e tipos de placas gráficas. A escolha da utilização do CUDA é devido a seu maior desenvolvimento e para tirar vantagem da placa gráfica utilizada no trabalho. Todos os cálculos e simulações foram executados em um

notebook ACER Aspire VX 15, com um processador Intel Core i7-7700 HQ 2.80GHz, 16GB RAM e uma placa gráfica NVIDIA GeForce GTX 1050Ti com 4GB RAM dedicada.

Para a implementação sequencial também foi utilizado o compilador JIT (Just In Time) disponível no pacote NUMBA. Esse compilador JIT substitui o compilador padrão do Python (CPython) e acelera a execução do código. Devido a forma de desenvolvimento da linguagem, o compilador padrão do Python não é capaz de executar as implementações sequenciais em um tempo adequado.

Os códigos das implementações sequenciais e paralelas dos cálculos dos descritores estão disponíveis no pacote Descriptools. O pacote foi desenvolvido para juntar as implementações em apenas um local, assim como facilitar a sua disponibilização. Os códigos estão disponíveis no GitHub, em <https://github.com/JVBSouza/descriptools>.

3.3.1 Implementação em paralelo

Uma das grandes diferenças entre as implementações paralelas e sequenciais é o método utilizado pela GPU para acessar as células das matrizes. A implementação sequencial utiliza um endereçamento bidimensional enquanto a paralela utiliza o endereçamento unidimensional. A Figura 11 apresenta a diferença entre os endereçamentos. A utilização do endereçamento unidimensional facilita a programação para GPU pela forma que o CUDA lida com o endereçamento das *threads*, correspondendo o índice da localização da matriz com a *thread*. O endereçamento unidimensional também facilita os cálculos que utilizam alguma célula do rio, utilizando apenas um valor de endereço em vez de linha e coluna.

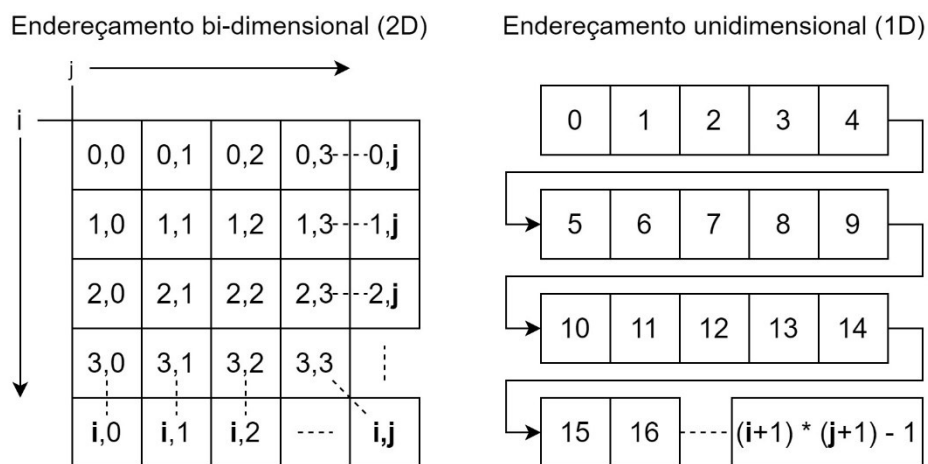


Figura 11: Representação das formas de endereçamento.

Outra diferença entre as implementações está nos processos em que é feito o cálculo. Para as implementações sequenciais há apenas uma função em que são inseridos os dados de entrada e retornam uma matriz dos descritores calculados. Para as implementações paralelas, o processo de cálculo do descritor está dividido em três seções. Como tentativa de facilitar o entendimento do processo e padronizar as formas que os descritores são calculados. A seção 1 e 2 fazem parte do código do “host”, desempenhado pelo processador. Já a seção 3 é o código do “device”, realizado pela GPU. A Figura 12 apresenta um fluxograma geral do processo do cálculo dos descritores. A primeira função divide as matrizes em partes menores, caso definido pelo usuário. A segunda função prepara os dados e faz a transferência de dados para a GPU e depois coleta o descritor calculado de volta. A terceira função é a realizada pela própria GPU.

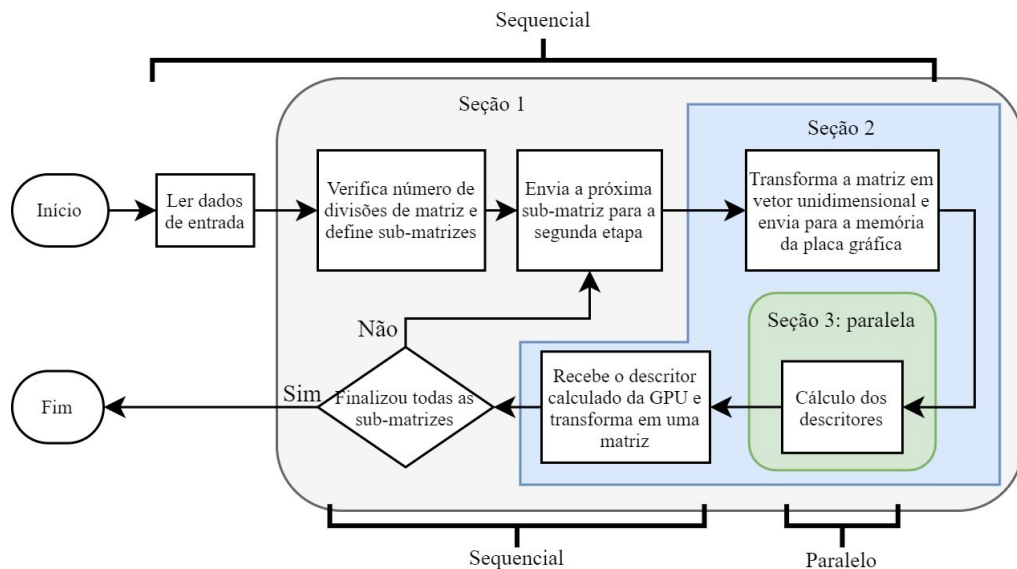


Figura 12: Fluxograma geral do processo de cálculo de um descritor pela implementação paralela

A seção 1 realiza a divisão das matrizes em partes menores, envia uma parte por vez para as próximas etapas e quando finalizada remonta a matriz do descritor inteira. Essa função foi desenvolvida para lidar com as limitações da memória disponível na placa gráfica. A seção 3.3.2 entra em mais detalhes sobre essa limitação.

A seção 2 transforma as matrizes de entrada em *arrays* unidimensionais, envia para a memória da placa gráfica, chama a função paralela, coleta da memória da GPU para a CPU o *array* do descritor e remonta como matriz. Para todos os descritores foi decidido o uso de 256 *threads* por bloco, enquanto o número de blocos é em função da dimensão da matriz dividido pelo número de *threads* (256).

A seção 3 é a própria função executada na placa gráfica para calcular os descritores. Nos casos dos descritores mais simples, como índice topográfico por exemplo, as lógicas de programação são as mesmas, por apenas utilizarem os mesmos índices para acessar as matrizes. Nestes casos as diferenças estão nas considerações de endereçamento de matrizes. Para os descritores mais complexos e com requisitos espaciais, parte do código paralelo foi adequado para atender a divisão de matrizes, mas a lógica das etapas e cálculos se mantem as mesmas.

A Figura 13 apresenta um exemplo para o cálculo do descritor *downslope index*. Para esse descritor são necessários os dados de entrada: modelo de elevação digital, matriz de direção de fluxo, a dimensão do pixel (resolução do MDE), a energia potencial (d) a ser perdida. A função também permite a definição da divisão de matrizes, *div_vert* e *div_hor* representam o número de divisões verticais e horizontais. Por exemplo, duas divisões verticais e duas horizontais vão gerar nove sub-matrizes a serem calculadas. Com isso a função *downsloper* é chamada, que realiza a etapa da seção 1, determinando os limites das sub-matrizes e chama a função *downslope_cpu*, que realiza a etapa da seção 2. Aqui são definidos os *threads* e *blocks* e as matrizes (ou sub-matrizes, caso haja divisão) de dados são transformadas em *arrays* unidimensionais e são enviados para a memória da GPU. Feito isso, a função paralela *downslope_gpu* é e o descritor é calculado pela GPU. Por fim, ainda na seção 2 o *downslope* é recebido da memória da GPU, é montado a matriz nas dimensões originais e é retornado para a seção 1. Caso seja uma sub-matriz, a próxima é enviada e o processo se repete. Por fim, a função *downslope_sequential_jit* calcula sequencialmente o descritor *downslope index* para as células marcadas pela implementação paralela e a matriz finalizada é retornada.

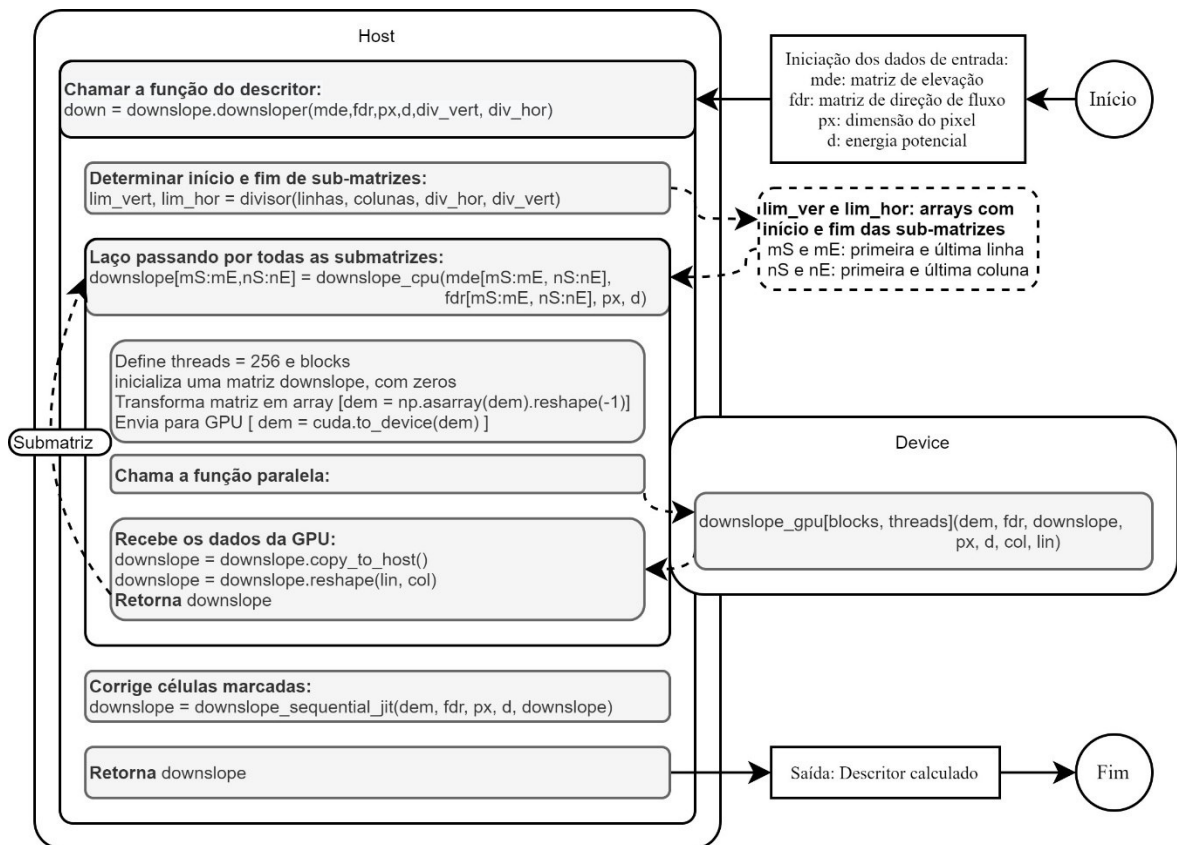


Figura 13: Exemplo do cálculo do descritor *downslope index*.

3.3.2 Limitações

Uma das maiores limitações encontrada para a implementação dos algoritmos paralelos em GPU é a memória global disponível para a placa gráfica. Essa memória limita a dimensão máxima das matrizes que podem ser simuladas. Cada descritor depende de diferentes dados de entrada e possuem tipos de dados diferentes, o que modifica a memória ocupada e modifica as dimensões máximas permitidas para a GPU. Foram adotadas duas considerações para lidar com a memória disponível: escolher os tipos de variáveis que menos ocupam espaço e implementar estratégias de divisões de matrizes.

Linguagens de programação não-tipadas ou fracamente tipadas, Matlab e Python por exemplo, não necessitam da declaração prévia do tipo da variável e definem o tipo conforme a situação. Entretanto, muitas vezes definem como tipos mais amplos e que ocupam mais espaço na memória, como o *double* no Matlab que ocupa 8 bytes ou o *float32* no Python que ocupa 4 bytes. Em caso de matrizes e vetores, a memória ocupada é o número de elementos multiplicado pelo espaço ocupado pelo tipo de variável. A Tabela 3 apresenta os descritores e dados de entrada, tipo de variável e o espaço de memória que o tipo ocupa.

Tabela 3: Tipo de variáveis e espaço de memória dos descritores e dados de entrada

Matriz de dado	Tipo de variável ideal	Bytes ocupados pelo tipo
MDE	Int16	2
Direção de fluxo	uint8	1
Área de contribuição	int32	4
Declividade	Float	4
Distância horizontal	float	4
HAND	uint16	2
Índice topográfico	float	4
Índice topográfico modificado	float	4
<i>Downslope index</i>	float	4
<i>Geomorphic flood index</i>	float	4
<i>Local Flood index</i>	float	4

A outra forma de evitar o limite da memória é a divisão das matrizes em partes menores e realizar os cálculos dos descritores uma parte por vez. Para os descritores mais simples que utilizam apenas os valores das próprias células não é necessário nenhuma estratégia especial e as divisões são suficientes para calcular. No caso dos descritores HAND, distância horizontal até a rede de drenagem e o *downslope index*, os cálculos dependem do caminho hidrológico que pode ser interrompido pela divisão de matrizes. Nesses casos foram utilizadas estratégias de cálculos similares aos utilizados por Schiele et al. (2012), explicado na próxima seção.

3.3.3 HAND e distância horizontal até a rede de drenagem

Durante o cálculo dos descritores HAND e distância horizontal até a rede de drenagem o caminho entre a célula atual e a célula de rio é percorrido. Durante a função da divisão de matrizes, esse trajeto é interrompido e a implementação paralela não poderá finalizar o caminho até a célula do rio. Para resolver isso, nota-se que em um caminho hidrológico, todas as células do caminho drenam para a mesma célula de rio. Dessa forma, para permitir a divisão são utilizados *arrays* de fronteira, que possuem os respectivos valores de distância horizontal até a rede de drenagem e os índices de localização da célula do rio.

Os *arrays* de fronteira são calculados pela implementação sequencial apenas em colunas e linhas específicas localizadas entre as submatrizes. Esses *arrays* são enviados para a memória da GPU junto com submatriz que se deseja calcular o descritor. Durante o cálculo dos descritores na GPU, caso alguma célula tenha uma direção de fluxo direcionada para fora do

limite da submatriz, é usado então o valor de fronteira correspondente para o cálculo do descritor. A Figura 14 apresenta um exemplo do processo de cálculo com divisão.

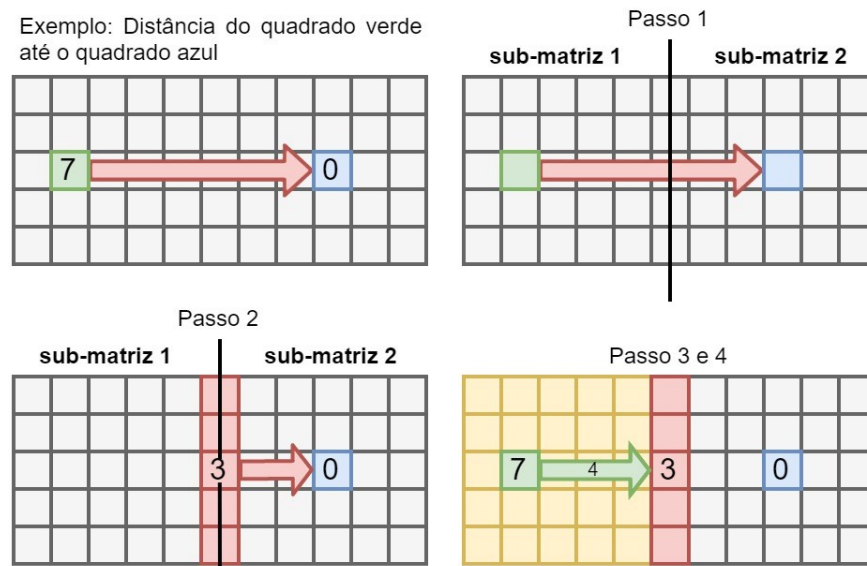


Figura 14: Exemplo do método de cálculo da distância horizontal até a rede de drenagem com divisões de matriz. O quadrado verde representa a célula inicial e drena até o quadrado azul (célula do rio). Passo 1: A matriz é dividida e apenas uma das sub-matrizes é alocada na memória da GPU, cortando o caminho hidrológico. Passo 2: uma implementação sequencial calcula a distância até rio para todas as células das linhas e colunas entre as sub-matrizes (quadrados vermelhos). Passo 3: A sub-matriz (quadrados amarelos) e a coluna de fronteira (quadrados vermelhos) são alocados para a memória da GPU. Passo 4: A função paralela calcula o descritor para todas as células e em casos que a célula vá para fora da matriz, é realizado a soma do caminho percorrido mais o valor da distância da célula de fronteira. Adaptado de Schiele et al. (2012).

3.3.4 Downslope index

Similar ao HAND e a distância horizontal até a rede de drenagem, o *downslope index* também considera o caminho hidrológico até encontrar uma diferença de elevação igual ou maior ao valor inserido. Dessa forma, cada célula percorre uma distância diferente e a estratégia anterior não é aplicável para esse caso. Para esse descritor foi desenvolvido um processo em duas etapas, em que primeiro a implementação paralela tenta calcular normalmente o descritor em cada submatriz e marca as células que estão direcionadas para fora. Depois da função paralela todas as submatrizes são juntadas para formar a matriz com dimensões originais e é utilizado a implementação sequencial para calcular o descritor para as células restantes, marcadas anteriormente. Um exemplo pode ser observado na Figura 15.

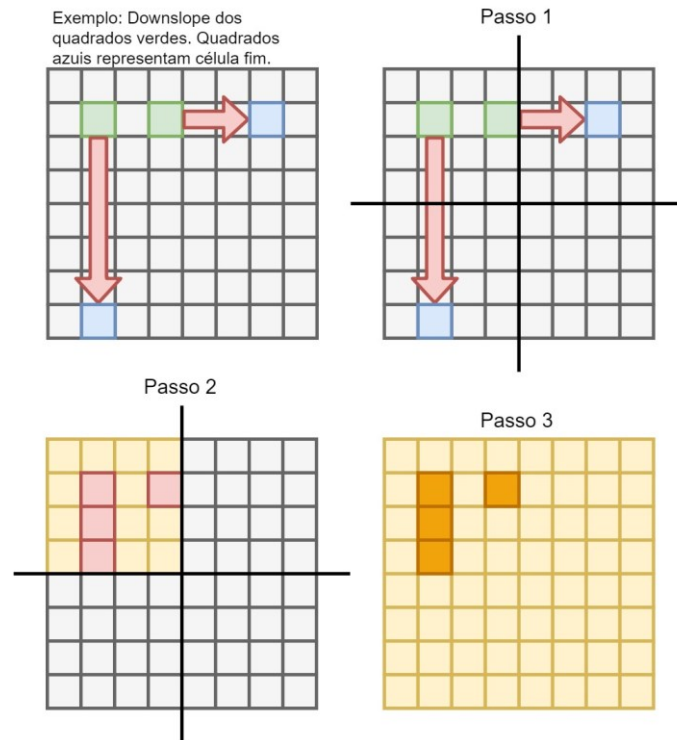


Figura 15: Exemplo de cálculo do *downslope index* com divisão de matrizes. A partir da célula inicial (quadrado verde) é percorrido o caminho hidrológico até encontrar um ponto com a diferença de elevação definida (quadrado azul). Passo 1: A matriz é dividida e apenas uma sub-matriz será alocada na memória da GPU, bloqueando o caminho hidrológico. Passo 2: A função paralela tenta calcular o descritor para cada célula da sub-matriz (quadrados amarelos), marcando as células que drenam para fora da matriz (quadrados vermelhos). Passo 3: Após todas o descritor ser calculado para todas as sub-matrizes a implementação sequencial calcula o descritor para as células marcadas (quadrado amarelo escuro). Adaptado de Schiele et al. (2012).

3.4 MODELO DE INUNDAÇÃO DO BANCO MUNDIAL

Devido aos recorrentes eventos extremos e as perdas relacionadas, o governo do estado de Santa Catarina trabalhou em conjunto do Banco Mundial para a produção de um modelo de catástrofes (CAT). Nesse trabalho foram coletadas diversas informações geográficas, dados urbanos, como censo nacional de 2010 e informações residenciais e ocupacionais, e dados hidrometeorológicos, como registros de precipitação, dados históricos de inundações e dados fluviais. Essas informações foram aplicadas em um modelo hidrológico, produzindo um Hidrograma de Vazão dos rios a partir de modelos de escoamento da precipitação. Também foi utilizado um modelo hidráulico bidimensional para a análise do escoamento sobre as superfícies de planícies de inundações. Com essas modelagens foram produzidos modelos de inundações, vulnerabilidade e exposição junto com métricas de risco e prejuízos para todo o estado (BANCO MUNDIAL, 2016).

O modelo de inundação está disponível para todo o Estado de Santa Catarina em 3 tempos de retorno diferentes (50, 100 e 1000 anos). O mapa de tempo de retorno de 100 anos foi utilizado como base de comparação com as manchas de inundação resultantes dos descritores durante a calibração e avaliação de performance dos descritores. Os outros modelos não foram utilizados devido à similaridade entre os modelos, de forma que não haveria grandes mudanças e adições na análise de performance. A Figura 16 apresenta a mancha de inundação do produzida pelo Banco Mundial, transformada em *raster* para a resolução de 12,5 metros.

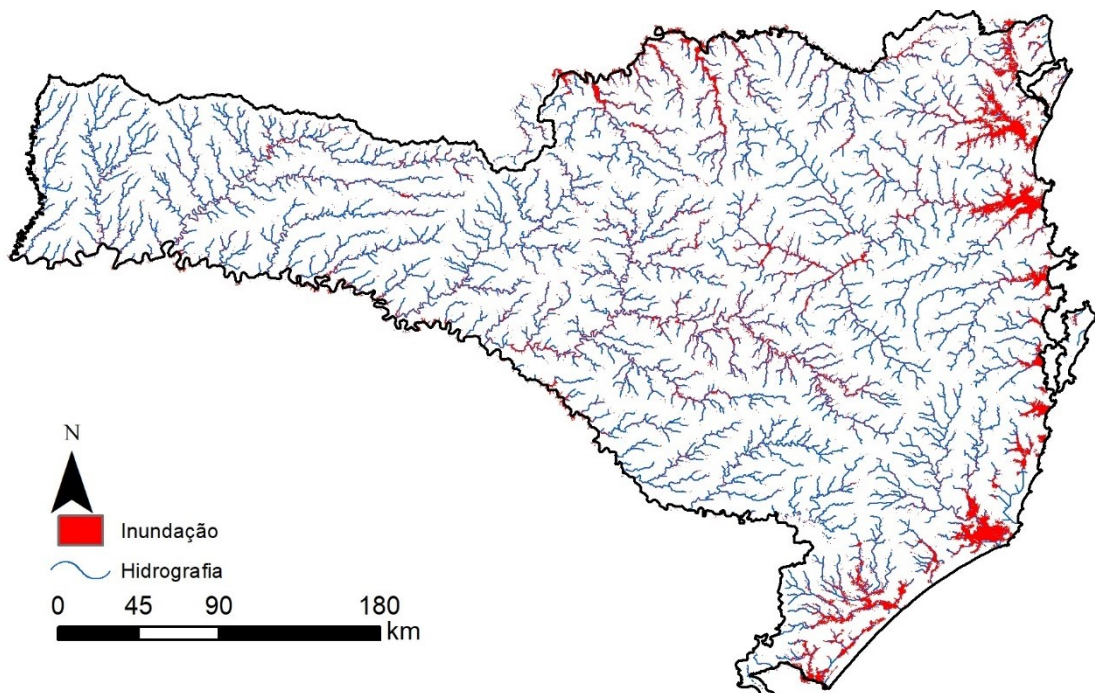


Figura 16: Mancha de inundação (100 anos tempo de retorno) do Banco Mundial. Rasterizado para a resolução de 12,5 metros.

Foram observadas algumas características no modelo de inundação do Banco Mundial. No modelo de inundação, alguns corpos de água, como a lagoa do Imaruí no sudoeste do estado ou a lagoa da Conceição foram desconsideradas, de forma que não sejam classificadas como inundadas. De modo a evitar um aumento de erros de classificação de falsos positivos pelos descritores, essas lagoas foram desconsideradas durante o processo de classificação binária.

3.5 TRANSFERÊNCIA DE LIMIAR DE CORTE

Para a delimitação das manchas de inundação a partir dos descritores calculados, será utilizada a classificação binária linear, utilizado por Degiorgis et al. (2012). Esse método

permite uma fácil comparação entre dois mapas binários, preenchidos com 0 ou 1. Os mapas de descritores podem ser transformados em mapas binários com a utilização de limiares de classificação. Primeiramente os descritores são normalizados utilizando o valor mínimo e máximo de toda a área de estudo, obtendo uma faixa de valores entre 0 e 1. Nessa faixa é aplicado um valor de corte que classifica os valores acima como inundados (1) ou não inundados (0) e os valores abaixo vice-versa, conforme o descritor. Para os descritores HAND, *declividade*, *downslope index* e distância horizontal até a rede de drenagem mais próxima os valores abaixo do limiar são considerados inundados e os valores acima, não inundados. Para os descritores restantes índice topográfico, índice topográfico modificado, GFI e LFI os valores abaixo do limiar são considerados não inundado enquanto os valores acima são inundados.

O limiar de classificação ótimo é o valor que apresentar a menor quantidade de erros em relação a células corretamente classificadas. Esse limiar ótimo é determinado pelo processo de calibração. Na etapa da calibração vários limiares normalizados, entre 0 e 1, são testados iterativamente para encontrar a menor razão de acertos para erros. Para isso é utilizado o índice de ajuste, que representa essa razão e é apresentado na seção a seguir. Com o limiar determinado, ele pode ser utilizado para classificar as células em outras regiões e produzir mapas de inundações para esses locais.

Além da calibração pelo limiar de corte, os descritores dependentes da rede de drenagem (distância horizontal até a rede de drenagem, HAND, GFI e LFI) também podem ser calibrados em função do valor de limiar de início de rede de drenagem. Entretanto, um único limiar não é capaz de gerar uma rede realística para todo o estado. Desse modo, serão escolhidos os valores que melhor aproximam os descritores aos mapas de teste dentro da bacia, durante o processo de calibração do limiar de corte. Para o descritor *downslope index*, o valor diferença de elevação (d) escolhido influencia no resultado do descritor. Desse modo, a diferença de elevação também pode ser calibrada de forma que melhor aproxime o descritor à mancha de inundação de comparação. Foram testados valores de diferença de elevação entre 5 e 30 metros.

3.6 AVALIAÇÃO DE PERFORMANCE

Para a avaliação da performance e calibração é realizado a união dos dois mapas binários, de forma que resulte em um mapa único com as células classificadas que serão usadas nos indicadores de acurácia. Utilizando valores diferentes para a indicação de inundação nos

mapas (1 e 2), mas usando o mesmo valor para não inundadas (0) facilita o entendimento da classificação. A soma dos mapas produz quatro valores únicos. Essas classificações são:

- Verdadeiro positivo (3): Descritor (1) e observado (2) indicam inundação;
- Falso positivo (1): Descritor aponta como inundado (1) enquanto o observado não indica inundação (0);
- Verdadeiro negativo (0): Ambos o descritor e o observado não indicam inundação (0);
- Falso negativo (2): O descritor não aponta inundação (0) enquanto o observado indica a inundação (2);

A partir dessas classificações é possível calcular métricas de desempenhos do modelo em aproximar à mancha de inundação observada. No estudo foram utilizados três métricas: índice de acerto (C , *correctness index*), também chamada de *recall* ou TPR (*True Positive Rate*, taxa de verdadeiros positivos); índice de ajuste (F , *Fit index*), também chamada de CSI (*Critical Success Index*); e a taxa de falsos positivos (FPR, *False Positive Rate*).

Os índices de acerto e de ajuste podem ser utilizados em conjunto para servir de indicação da sobreposição das áreas de inundação simuladas e observadas. O índice de acerto representa a capacidade do modelo em classificar corretamente as células de inundação, não levando em conta os falsos positivos. Enquanto o índice de ajuste representa a proporção de células corretamente classificadas em relação as células erroneamente classificadas. As equações 9 e 10 apresentam o cálculo dos índices de acerto e ajuste (BATES; DE ROO, 2000; SANGWAN; MERWADE, 2015).

$$TPR = C = \frac{\text{Verdadeiro positivos}}{\text{Verdadeiro positivos} + \text{falso negativos}} \quad \text{Equação 11}$$

$$F = \frac{\text{Verdadeiro positivos}}{\text{Verdadeiro positivo} + \text{falso positivos} + \text{falso negativos}} \quad \text{Equação 12}$$

O índice de ajuste foi utilizado para determinar a escolha do melhor limiar de corte durante a calibração. A calibração do índice de ajuste permite encontrar o limiar de corte que apresente uma maior presença de verdadeiros positivos e minimize a presença de erros de falso positivos e falso negativos. Esse índice não considera a quantidade de verdadeiros negativos, removendo a sua influência sobre o resultado da performance. A união dos índices pode dar as seguintes indicações:

- Alto valor de C e baixo valor de F : as células de inundações foram em maior parte classificadas como verdadeiros positivos e a maioria dos erros de classificação é devido a falsos positivos
- Baixo valor de C e baixo valor de F : Pouca presença de verdadeiros positivos e maior presença de falsos negativos.
- Alto valor de C e alto valor de F : Boa classificação, pouca presença de falsos negativos e falsos positivos.

Também foi utilizado curvas ROC (*Receiver operating characteristic curve*, curva Característica de Operação do Receptor) para avaliar a performance dos descritores. As curvas ROC representam graficamente o desempenho do limiar em classificar as células, facilitando a comparação entre os desempenhos dos descritores. Essas curvas utilizam duas métricas: a taxa de verdadeiros positivos (TPR), apresentada na equação 9, e taxa de falsos positivos (FPR), apresentada na equação a seguir.

$$\text{FPR} = \frac{\text{Falso positivos}}{\text{Falso positivos} + \text{Verdadeiros negativos}} \quad \text{Equação 13}$$

As métricas são calculadas para matrizes de confusão geradas pela variação de um limiar de classificação. A área embaixo da curva (AUC, *Area Under Curve*) quantifica a performance, variando de 0,5 (classificador completamente aleatório) a 1 (classificador perfeito). Curvas que apresentam uma AUC abaixo de 0,5 são péssimos classificadores, sendo piores que um sistema de classificação aleatório.

4 RESULTADOS

4.1 TEMPOS DE SIMULAÇÃO

Os tempos de processamento dos cálculos dos descritores de terreno para a região de Concórdia podem ser vistos na Figura 17. Os valores representam o tempo médio de execução de 3 cálculos para cada caso. As matrizes dos descritores apresentaram valores iguais ou próximos em ambas as implementações, aonde as pequenas diferenças são possivelmente causadas pelo modo que o processador e a GPU lidam com valores de ponto flutuante.

Com exceção da *declividade*, a implementação paralela foi em geral mais rápida do que a implementação sequencial. Nas menores resoluções há pouca diferença no tempo de processamento, próximos de 1 segundo. Apenas na maior resolução que já uma diferença considerável na velocidade de execução das implementações. Isso pode ser melhor observado na Tabela 4, que apresenta a taxa de velocidade entre as implementações

Devido aos baixos tempos de execução, apenas o *downslope index*, distância horizontal até a rede de drenagem e HAND apresentaram um ganho significativo com o uso de GPU. A razão desses descritores necessitarem de mais tempo na implementação sequencial é por serem descritores mais complexos e por terem mais etapas de cálculos. Esses descritores calculam repetidamente o caminho hidrológico até encontrarem a diferença de elevação para o *downslope index* ou uma célula de rio para o HAND e distância até a rede de drenagem. Como essas etapas são realizadas para cada célula, a maior quantidade de processadores presentes na GPU é mais eficiente do que a própria capacidade de processamento da CPU.

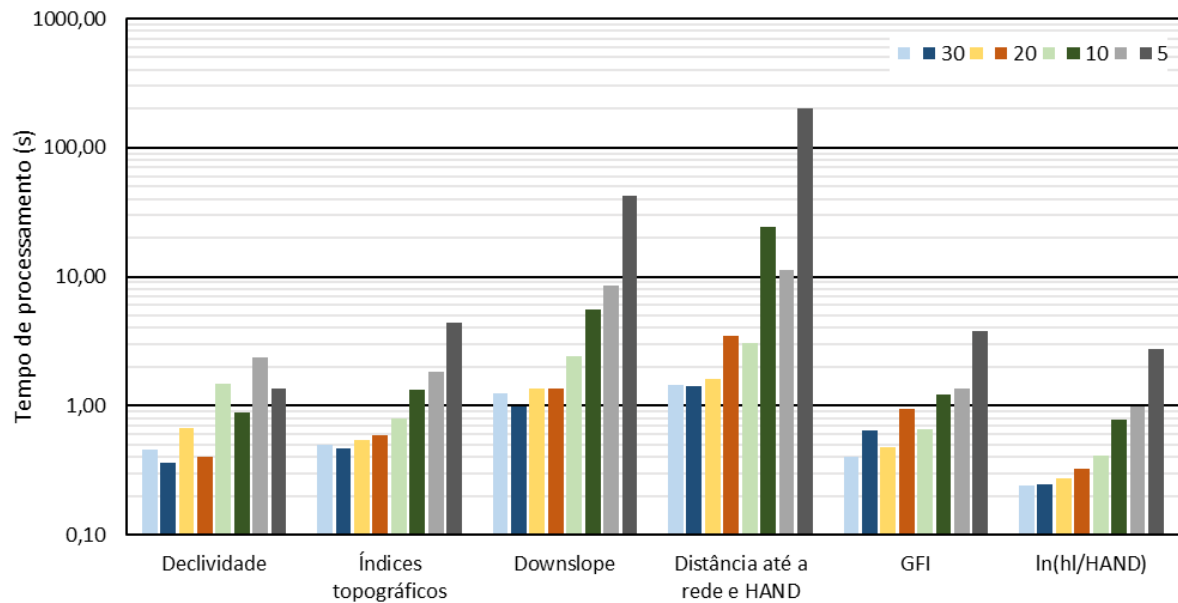


Figura 17: Tempo de processamento (segundos) para cada descritor de terreno, resolução e implementação. Cada cor representa uma dimensão diferente enquanto a cor clara indica o tempo de processamento paralelo e a cor escura indica o tempo de processamento sequencial.

Tabela 4: Taxa de velocidade para cada descritor e resolução.

Resolução espacial	<i>Declividade</i>	Índices topográficos	<i>Downslope index</i>	Distância horizontal e HAND	GFI	LFI
30	0,80	0,94	0,79	0,98	1,59	1,03
20	0,59	1,09	0,99	2,13	1,96	1,17
10	0,61	1,67	2,28	8,07	1,85	1,90
5	0,58	2,42	4,94	17,95	2,77	2,77

Para a implementação sequencial o compilador JIT já apresentou tempos de processamento consideráveis, não levando mais de 5 segundos para os descritores *declividade*, índices topográficos, GFI e LFI. A implementação do compilador não adicionou complexidade durante a programação, requerendo apenas a adição de uma linha que defino o JIT como o compilador da função.

Nota-se que para essas resoluções foi possível calcular o descritor para toda a dimensão da matriz sem a utilização das estratégias de divisão. As estratégias de divisões reduzem a quantidade de memória necessária para realizar a simulação por parte de matriz, mas levam a um aumento do tempo de processamento, devido as etapas sequenciais necessárias para preencher as matrizes.

4.2 CALIBRAÇÃO DE VARIÁVEIS

A Tabela 5 apresenta um resumo geral dos resultados da calibração da diferença de elevação para o *downslope index* e o limiar de iniciação de rede de drenagem para a distância horizontal, HAND, GFI e LFI. Os valores apresentados são os que obtiveram o melhor índice de ajuste (F) para aquela bacia, na resolução de 90 metros. De forma geral, a distribuição dos valores de calibração foi bem variada, sem tender a um valor único geral.

Para o *downslope index* as diferenças de elevação apresentaram melhor resultado nos valores baixos na faixa de 10 e 15 metros, notando que em algumas das bacias há uma diferença considerável entre os índices de ajuste resultantes. Já para o limiar de iniciação de drenagem os descritores apresentaram faixas diferentes de melhor valor, mas nota-se que para os quatro descritores o limiar de 5 km² apresenta resultados consideravelmente piores.

Para o *downslope index* o aumento da diferença de elevação d , na Equação 2, apresenta maior influência nas células de rios e próximas aos rios, de modo que essas regiões apresentem menores resultados do que topos de morros e montanhas. Isso acontece devido à baixa variância de elevação nessas regiões e a necessidade de percorrer caminhos cada vez mais distantes. Observou-se que nas bacias com valor ótimo de d de 5 e 10 metros, aumentar a diferença de elevação reduz o índice de ajuste (F) e aumenta o índice de acerto (C), possivelmente indicando um aumento de células classificadas como positivas sem aumentar o acerto de células verdadeiro positivas. Já os picos e as células de maior elevação mais afastadas dos rios são apenas levemente reduzidas, por haver pouca diferença na distância necessária a ser percorrida.

A diminuição do limiar de iniciação de drenagem leva a uma maior presença de células de rios, e conseqüentemente, a redução dos valores de distância horizontal e HAND. Para a distância horizontal até a rede de drenagem, os limiares que apresentaram melhores resultados foram os valores de 10 e 30 km². Já o HAND apresentou resultados melhores com valores acima de 15 km². Entretanto o descritor apresentou pouca variação do índice de ajuste nessa faixa, enquanto os piores resultados são encontrados no limiar de 5 km².

Os descritores GFI e LFI são afetados indiretamente pelo limiar da rede de drenagem, dependendo do resultado do descritor HAND. O GFI não acompanhou os limiares do HAND, apresentando resultados melhores nos limiares de 10 e 15 km². Já para o LFI, os melhores resultados aparecem no limiar de maior valor de 30 km². Devido as suas equações, ambos os descritores apresentam um aumento dos valores calculados com a redução do limiar de rede de drenagem e HAND. Para o LFI, a equação utiliza o valor de acumulação de fluxo da própria célula, deixando a célula mais sensível aos baixos valores de HAND. Para o GFI, que utiliza a

acumulação de fluxo da célula do rio, a maior presença de células de rio não influencia tanto quanto o outro descritor.

Tabela 5: Resultado da calibração das variáveis para a resolução de 90 m.

Bacia	<i>Downslope index (m)</i>	Distância horizontal até a rede de drenagem (km ²)	HAND (km ²)	GFI (km ²)	LFI (km ²)
Antas	20	10	30	10	25
Peperi-Guaçu	20	20	20	20	25
Itajaí	10	10	30	25	30
Mampituba	15	30	25	25	25
Araranguá	5	30	30	20	30
Urussanga	5	30	30	25	30
Tubarão	10	10	30	30	30
D'una	5	30	15	10	15
Da Madre	10	30	20	25	20
Cubatão Sul	10	30	30	30	30
Biguaçu	5	10	30	30	30
Tijucas	10	10	30	30	30
Itapocu	15	15	20	10	20
Cubatão	15	10	20	10	20
Negro	10	20	20	10	30
Canoinhas	15	30	30	20	30
Timbó/Iguaçu	10	10	30	15	30
Pelotas	15	10	10	10	10
Canoas	10	10	15	15	15
Peixe	15	10	15	10	15
Jacutinga	30	15	15	15	25
Irani	25	10	15	15	15
Chapecó	10	15	15	15	20

A Figura 18 apresenta um exemplo comparativo de como a calibração pode influenciar sobre os resultados dos descritores *downslope index*. Nesse exemplo é demonstrado o mapa de classificação binária, com as células coloridas representando o verdadeiro positivo, falso positivo e falso negativo. Para o *downslope index* foi utilizado uma região da bacia do rio Canoinhas, com o mapa de classificação para as diferenças de elevação $d = 5$ metros e $d = 15$ metros. Nessa comparação a utilização de uma elevação menor levou a uma maior presença de falsos negativos, enquanto a elevação de 15 metros resultou em uma maior quantidade de células corretamente inundadas, mas com um aumento da presença de falsos positivos. Essa troca de erros pode ser evidenciada pelo índice de acerto (C) que passa de 0,597 para 0,86,

enquanto o aumento do índice de ajuste (F) passa de 0,405 para 0,557 indicando um aumento de verdadeiros positivos e uma redução dos falsos negativos.

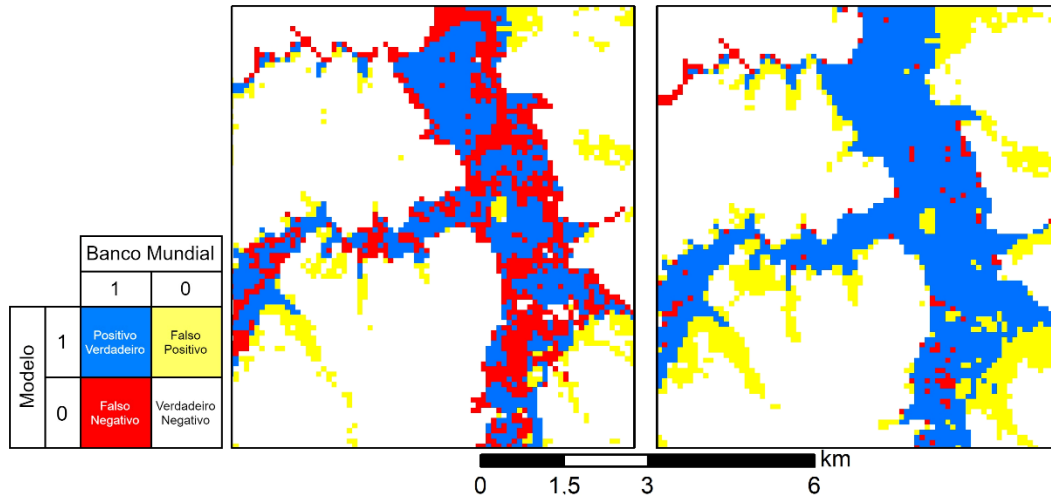


Figura 18: Exemplo comparativo entre resultados do descritor *downslope index*.

A Tabela 6 apresenta o resultado da calibração das mesmas variáveis para o MDE de resolução de 30 metros. Nota-se que houve uma mudança nos valores de limiar de iniciação de rede de drenagem para algumas bacias. Entretanto, observando as tabelas de performance dos descritores é visto que o índice de ajuste máximo apresenta pouca variação entre as resoluções, salvo algumas exceções. Para os descritores dependentes do limiar de rede de drenagem também não houve muita variação entre as performances, mas destacando a bacia do rio da Madre, que apresentou uma perda de aproximadamente 5% no índice de ajuste dos descritores distância horizontal até a rede de drenagem e LFI e 3% nos descritores HAND e GFI.

No caso do *downslope index* a resolução de 90 metros apresentou uma pequena melhor performance em relação à resolução de 30 metros. Nota-se, entretanto, que a diferença de elevação de 10 metros continuou sendo a melhor resultante, mas com um aumento da presença de $d = 5$ metros e redução de valores maiores. Imagina-se que com o aumento da resolução a variação das elevações entre as células será menor e, logo, valores menores de d representam melhor a topografia e gradiente hidráulico.

Para a distância e a rede de drenagem e o HAND as faixas de valores ótimos permaneceram na mesma proporção. Esse resultado já era esperado, considerando a mesma origem de ambos os MDE (SRTM) e que a diminuição da dimensão do pixel equilibra o aumento da quantidade de células.

Os descritores GFI e LFI apresentaram algumas poucas mudanças nos seus valores ótimos. No caso do GFI houve uma maior preferência para o limiar de 15km² e uma redução do limiar de 10 km². Enquanto para o LFI a maior preferência ainda foi de 30 km², mas com um aumento da presença do limiar de 20 km². Essas mudanças podem estar ligadas as pequenas variações do HAND e não apresentam um grande significado, considerando que ambos os descritores apresentaram índices de ajuste extremamente próximos para os limiares de iniciação de drenagem de 10 km² a 30 km².

Tabela 6: Resultado da calibração das variáveis para a resolução de 30 m.

Bacia	<i>Downslope index (m)</i>	Distância horizontal até a rede de drenagem (km ²)	HAND (km ²)	GFI (km ²)	LFI (km ²)
Antas	15	10	15	15	30
Peperi-Guaçu	20	20	30	30	30
Itajaí	10	25	30	30	20
Mampituba	10	30	30	25	30
Araranguá	5	25	25	10	25
Urussanga	5	30	25	25	25
Tubarão	10	15	20	20	20
D'una	5	30	30	30	30
Da Madre	10	30	20	5	20
Cubatão Sul	10	30	30	30	30
Biguaçu	5	10	30	30	30
Tijucas	10	25	30	25	30
Itapocu	10	15	15	15	15
Cubatão	10	10	20	15	20
Negro	10	20	30	20	30
Canoinhas	15	30	30	20	20
Timbó/Iguaçu	10	10	20	15	20
Pelotas	5	10	15	10	15
Canoas	5	20	20	15	25
Peixe	5	10	15	10	15
Jacutinga	5	15	25	25	30
Irani	25	10	15	15	25
Chapecó	10	10	15	15	20

Não foi possível realizar a calibração das variáveis para a resolução de 12,5 metros devido às grandes dimensões do MDE. Desse modo, utilizou-se a energia potencial $d = 10$ metros para o *downslope index* e um limiar de iniciação de rede de drenagem de 15 km² para os demais descritores. Esses valores foram escolhidos conforme os resultados das outras resoluções.

4.3 DESCRITORES DE TERRENO

Os oito descritores calculados para o estado de Santa Catarina são apresentados nas próximas figuras, sendo na Figura 19 a *declividade* e o *downslope index*; na Figura 20 o índice topográfico e índice topográfico modificado; na Figura 21 a distância horizontal até a rede de drenagem e HAND; e na Figura 22, o GFI e LFI. Os descritores foram agrupados por similaridade ou por apresentarem poucas diferenças entre si.

Nas Figuras 19, 20, 21 e 22 também estão apresentados os histogramas respectivos dos oito descritores de terreno calculados para o estado de Santa Catarina. Ambos os mapas dos descritores quanto os histogramas foram calculados para a resolução de 90 metros. Para os descritores *declividade*, *downslope index*, distância horizontal até a rede de drenagem e HAND, foram removidos alguns dos valores mais altos para uma melhor classificação dos grupos, calculados utilizando a regra Freedman-Diaconis.

Apresentados na Figura 19 os descritores *declividade* e *downslope index* apresentam grandes similaridades. Em ambos os descritores é possível identificar regiões mais planas ou elevadas, assim como as formas gerais das bacias e suas redes hidrográficas. A diferença está principalmente na influência da qualidade do MDE. Como a *declividade* considera apenas a elevação de células adjacentes, erros locais do modelo levam a resultados errados. Já o *downslope index* é menos influenciado por não usar elevações pontuais, mas pela distância a ser percorrida e a diferença de elevação.

Os descritores índice topográfico e índice topográfico modificado estão apresentados na Figura 20. Como a versão modificada utiliza um expoente para reduzir a influência da área de contribuição os seus resultados são reduzidos, entretanto as regiões de picos e início de escoamento são menos influenciadas. Para esses descritores, considera-se que quanto maior o valor do índice na célula, maior a retenção de água e, conseqüentemente, maior indicação possibilidade de inundação. Desse modo, regiões mais planas tendem a ser destacadas, pois apresentam menores valores de declividade e aumentam os índices calculados, como visto nas equações 3 e 4.

A Figura 21 apresenta os descritores distância horizontal até a rede de drenagem e HAND. O descritor HAND realiza uma normalização da topografia em relação à rede de drenagem, convertendo a elevação acima do nível do mar para elevação acima do rio de referência. Essa mudança pode destacar características locais que não eram possíveis serem

observadas antes. A distância horizontal até a rede de drenagem não apresenta indicação de características das bacias, de forma que o estado todo é bem similar e não aponta possíveis locais propensos a inundar. Já o HAND, além de demonstrar a rede hidrográfica como a distância horizontal, também tem a capacidade de destacar as regiões de baixa variação de elevação e possíveis locais mais propensos a inundarem.

Os últimos dois descritores, GFI e LFI, estão apresentados na Figura 22. De forma similar ao índice topográfico e versão modificada, o GFI e LFI também realçam regiões propensas a acumular água. A diferença nos resultados dos descritores é devido a forma de utilização da acumulação de fluxo, dessa forma o LFI resulta em resultados bem mais baixos do que o GFI. Ambos os descritores apresentam valores máximos similares em células de rios e proximidade por usarem os mesmos valores de acumulação e HAND próximos a zero. Desse modo, os picos vermelhos presentes nos histogramas são as células que contém uma grande acumulação de fluxo e HAND igual a 0. Para evitar divisão por zero o algoritmo soma um valor mínimo ao HAND, que aumenta ainda mais o resultado do logaritmo do cálculo dos descritores.

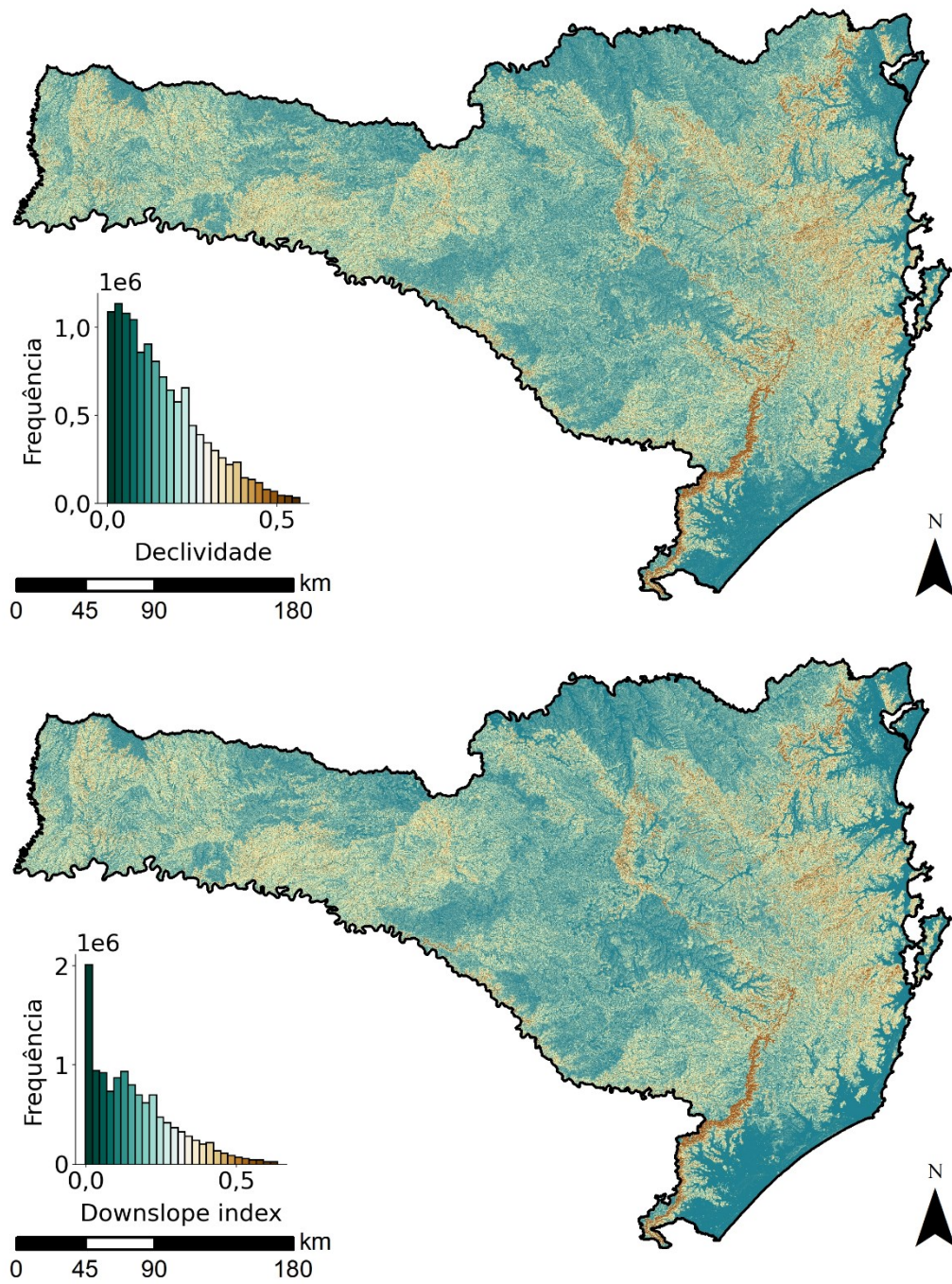


Figura 19: *Declividade e downslope index* para o estado de Santa Catarina (90 metros).

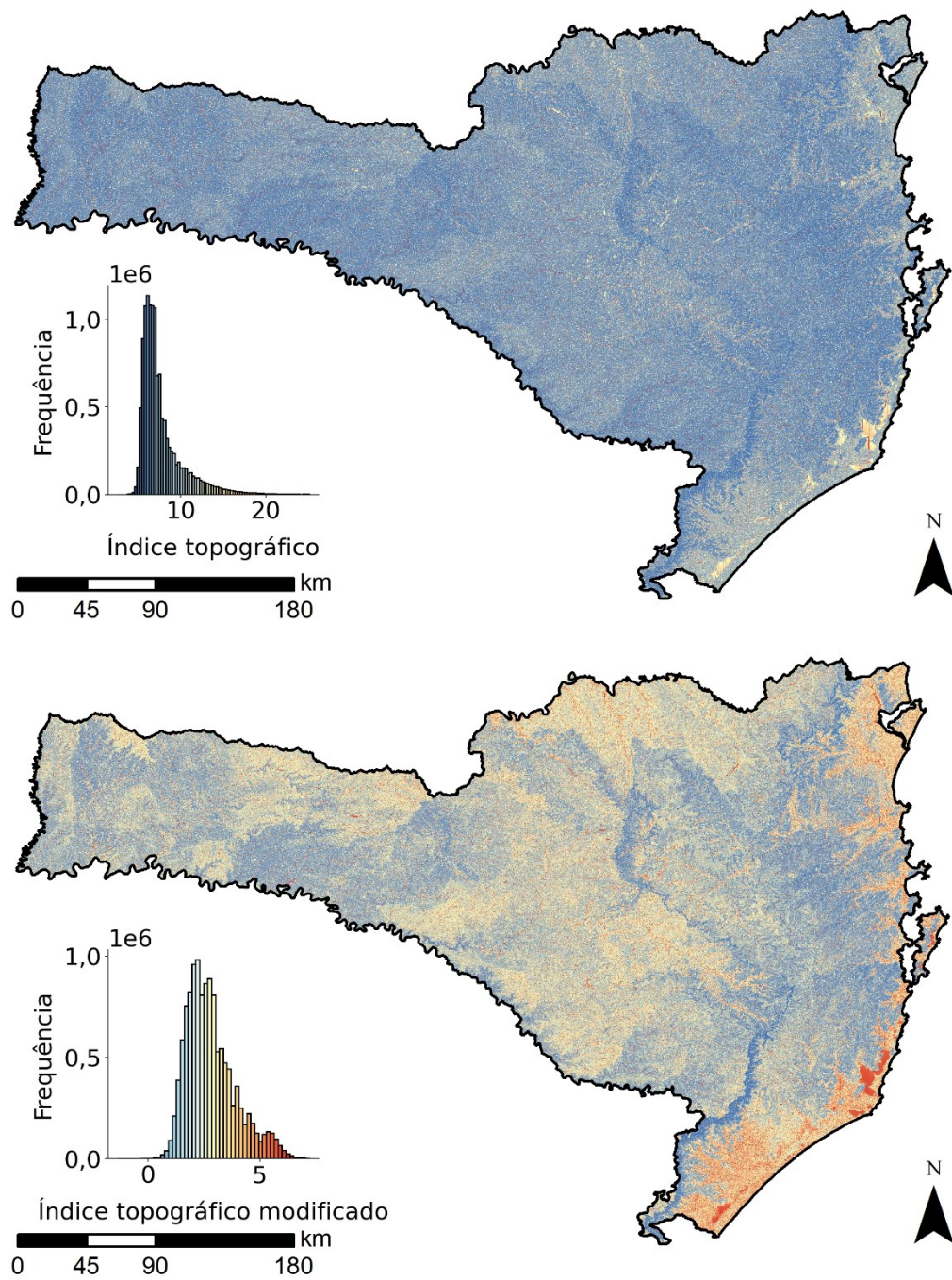


Figura 20: Índice topográfico e índice topográfico modificado para o estado de Santa Catarina (90 metros).

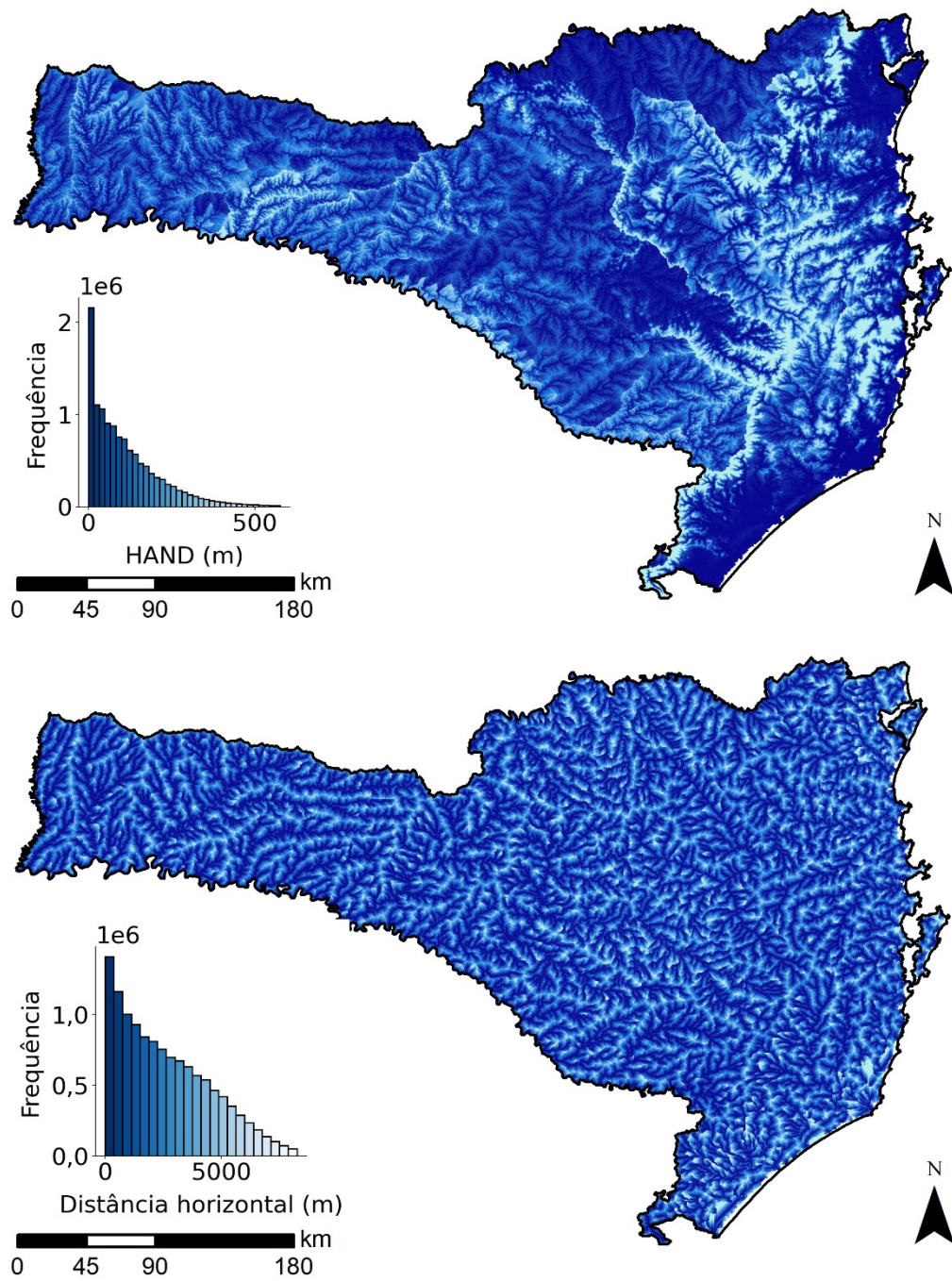


Figura 21: Distância horizontal até a rede de drenagem e HAND para o estado de Santa Catarina (90 metros).

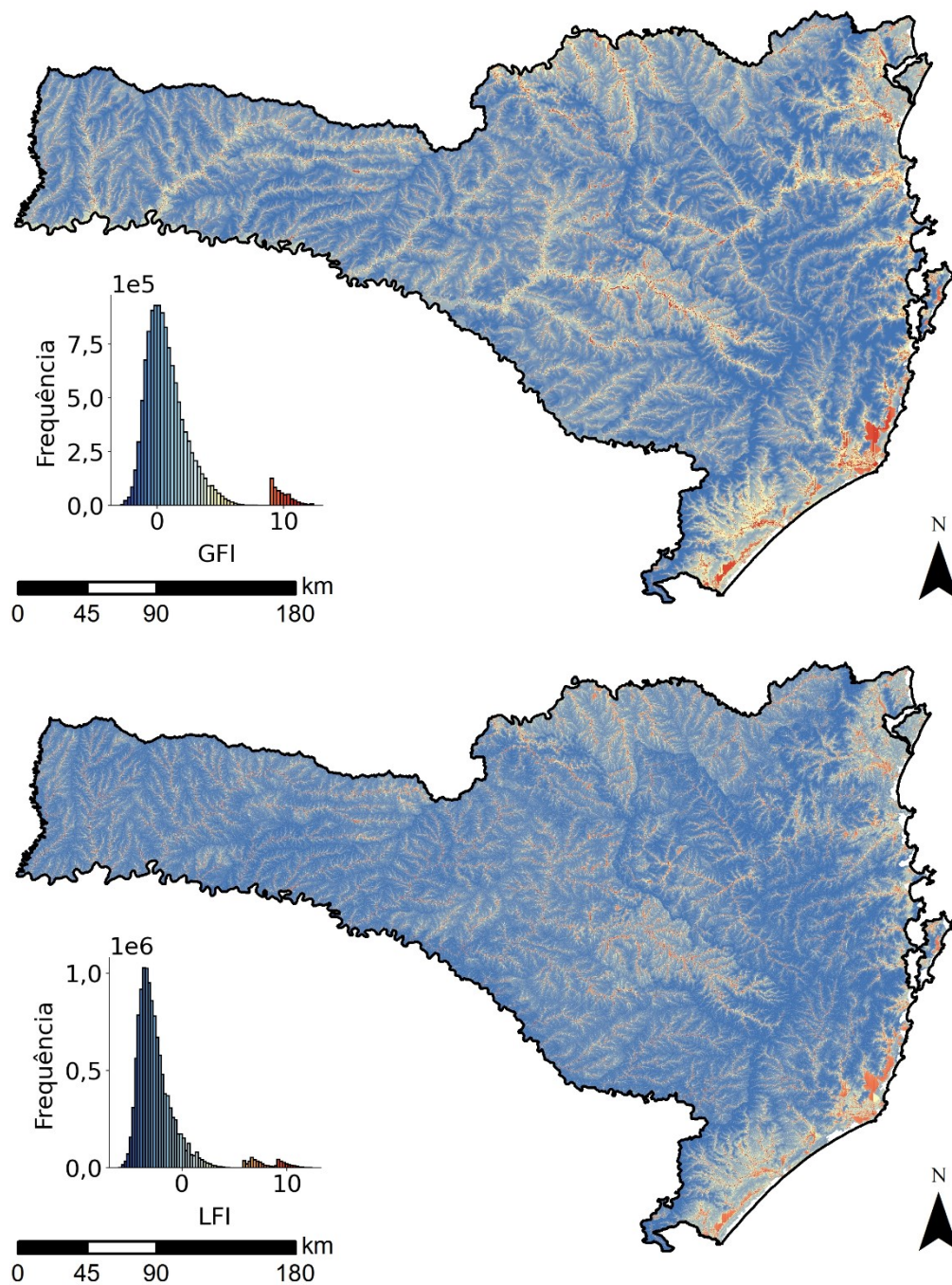


Figura 22: GFI e LFI para o estado de Santa Catarina (90 metros).

4.4 PERFORMANCE DE CLASSIFICAÇÃO BINÁRIA LINEAR: ESTADO SC

A performance dos descritores de terreno foi testada em todas as bacias de duas formas: com as curvas ROC e com a calibração do limiar de classificação que apresenta a menor proporção de erros. O mapa de inundação de 100 anos de retorno produzido pelo banco mundial foi utilizado como base para as análises de performance.

As curvas ROC são apresentadas na Figura 23. Cada coluna de gráfico representa uma resolução diferente, enquanto cada linha de figura é uma bacia. A linha pontilhada em diagonal representa a classificação aleatória de 50% de acerto da classificação, de forma que as curvas acima dessa linha representam modelos melhores. A comparação visual das linhas permite um entendimento melhor de qual curva tem uma melhor performance, além do valor da AUC. Nota-se que todos os descritores apresentaram AUC acima de 0,5, indicando que os modelos são melhores que uma classificação aleatória.

Entre os descritores, o *downslope index*, HAND, GFI e LFI apresentaram as melhores performances, com o *downslope* mantendo a média da AUC acima de 0,85 em todas as resoluções, enquanto a média do HAND, GFI e LFI se mantiveram acima de 0,9. Em todas as resoluções, o índice topográfico foi o descritor que apresentou as piores curvas. Pode-se observar pelas curvas e AUC que a *declividade*, índice topográfico e índice topográfico modificado apresentaram perda de performance com o aumento das resoluções, enquanto os outros descritores apresentaram apenas pequenas variações nas suas curvas.

Já em relação as bacias, percebe-se que a bacia do rio Araranguá, rio D'Una e rio Cubatão apresentaram as menores AUC em todos os descritores e resoluções. Essas bacias apresentam muitas áreas planas, que dificultam a classificação pelo descritor e acabam como falsos positivos. Além disso, essas bacias apresentam corpos de águas que são classificados como inundados pelos descritores, mas não são considerados nas manchas de inundação do Banco Mundial, aumentando ainda mais a presença de falsos positivos. Já a bacia do rio Cubatão Sul apresentou a melhor performance geral em nas três resoluções.

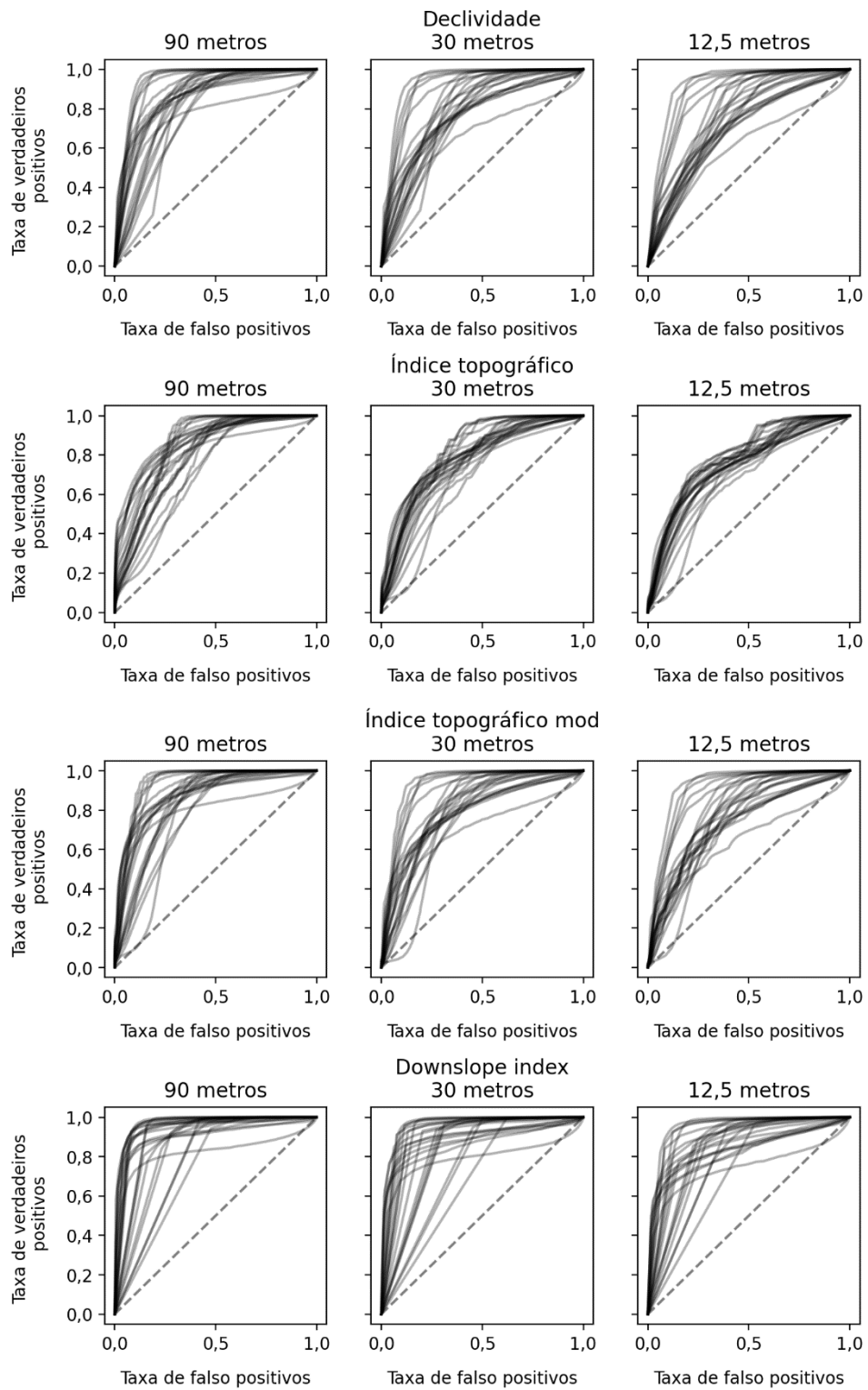


Figura 23: Curvas ROC para os oito descritores. Cada linha representa uma bacia.

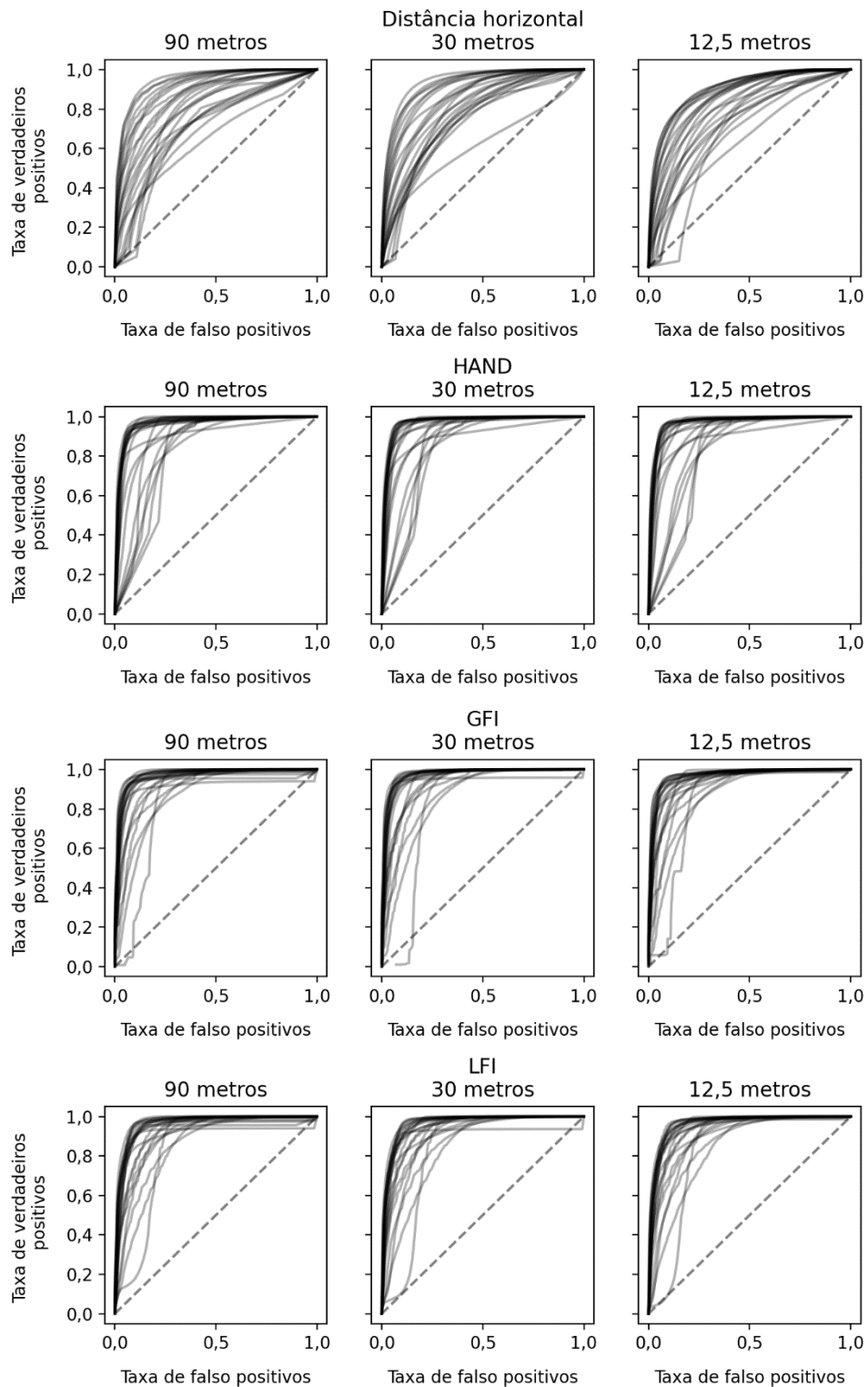


Figura 23: Curvas ROC para os oito descritores. Cada linha representa uma bacia. (continuação)

A Figura 24 apresenta a distribuição dos índices de ajuste (F) resultantes para cada resolução, agrupado por descritores. Conflitando com os resultados apresentados nas curvas ROC, o índice de ajuste resultante mostra que os descritores não apresentaram boa capacidade

no mapeamento das áreas de inundação. Para todos os casos foi obtido um índice de ajuste menor do que 0,5, indicando a presença maior de células classificadas erroneamente do que células de inundação corretamente classificadas.

Entre os oitos descritores, o HAND e o GFI apresentaram os melhores resultados, em que as bacias apresentaram em média valores de índice de ajuste acima de 0,4. Na maioria desses casos o GFI apresentou um pequeno aumento de performance sobre o HAND. Já o LFI, que também utiliza o HAND, apresentou uma perda de performance em relação ao descritor.

A *declividade* apresentou baixos resultados nas performances com valores de índice de ajuste na faixa de 0,05 a 0,23. Nota-se que a bacia do rio Pelotas apresentou o pior resultado encontrado, obtendo um índice de ajuste de 0,058 nas três resoluções. Para o índice topográfico, esperava-se um aumento de performance em relação a *declividade*, considerando a união do descritor com a área de acumulação de fluxo para tentar melhorar a previsão das áreas de inundação. Similar ao LFI, o índice topográfico adiciona a acumulação de fluxo da própria célula no cálculo, o que também levou a uma perda de performance. Já o índice topográfico modificado apresentou um aumento da performance sobre a versão modificada, diminuindo a influência da área de acúmulo de fluxo, mas ainda apresentando péssimos resultados. O *downslope index*, uma alternativa a *declividade* como gradiente hidráulico, apresentou uma performance maior.

Comparando os resultados entre as resoluções, nota-se que não há muitos benefícios no aumento da resolução. Para os três melhores descritores, HAND, GFI e LFI os resultados apresentaram poucas diferenças, com um leve aumento da média de performance. Para o *downslope index* houve uma melhora geral dos resultados na mudança de 90 metros para 30 metros, com um aumento da média de performance do descritor para essa resolução. Entretanto, a resolução de 12,5 metros apresentou resultados mais similares a resolução de 90 metros. Nota-se que nessa resolução as bacias do rio Pelotas e Jacutinga apresentaram resultados muito baixos, com índices de performances próximo de 0,06. Esse resultado pode estar relacionado ao descritor não conseguir se aproximar fielmente das características topográficas da região nessa resolução.

Para os outros descritores, a distância horizontal até a rede de drenagem, *declividade* e índices topográficos, se mantiveram com a menor capacidade de previsão da mancha de inundação. O aumento da resolução levou a uma perda de eficiência, com uma redução geral do índice de ajuste e da sua média. O aumento da quantidade de células pode ter levado uma

maior irregularidade nas elevações. Como o cálculo da *declividade* considera apenas as células prontamente a adjacentes, estão mais suscetíveis a essas variações pontuais.

A origem e qualidade dos modelos de elevação apresentaram maior influência sobre a *declividade*, visto a perda de performance na mudança de 90 metros para 30 metros. O descritor é influenciado diretamente pelas presenças de erros de elevação no MDE, que modificam o comportamento e direção da *declividade* e, possivelmente reduzem a performance do descritor. Como o índice topográfico é baseado na *declividade*, a perda de eficiência foi possivelmente transferida, reduzindo os resultados dos índices de performance. Já o *downslope index*, que também representa o gradiente hidráulico, apresentou melhores resultados, não sendo impactado pelas presenças de erros. É possível então que a substituição da *declividade* pelo *downslope* no cálculo dos índices topográficos levem a uma melhora de performance.

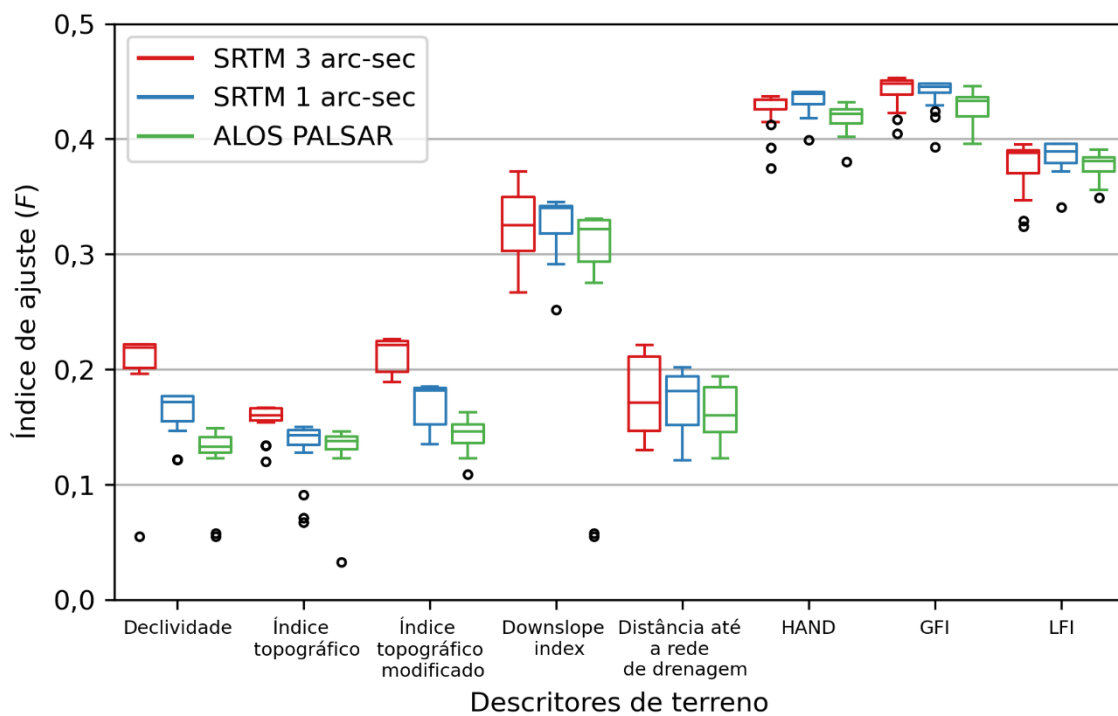


Figura 24: Resultados do índice de ajuste (F) para as três resoluções, agrupados por descritor.

Em relação a capacidade dos descritores em classificar as células de inundação corretamente, a Figura 25 apresenta os resultados do índice de acerto (C). A princípio, nota-se que os cinco primeiros descritores, *declividade*, índice topográfico, índice topográfico modificado, *downslope index* e distância horizontal até a rede de drenagem, apresentam grandes variações no resultado, enquanto HAND, GFI e LFI apresentam valores mais constantes.

Os valores de índice acima de 0,5 indicam que há mais células de verdadeiros positivos do que falsos negativos e possivelmente a maior parte dos erros é devido à presença de falsos positivos. Nos casos dos descritores índice topográfico e distância horizontal até a rede de drenagem, houve uma maior presença de valores abaixo de 0,5. Esses descritores apresentaram baixa capacidade na classificação das células e foram os descritores que obtiveram o pior desempenho com o índice de ajuste.

Em relação as diferenças entre resoluções, o índice de acerto apresentou um leve aumento para os descritores HAND, GFI e *downslope index*. Esse aumento, junto da leve melhora do índice de ajuste, indica que houve um aumento das células corretamente classificadas e uma redução de falsos negativos. Já para os descritores *declividade*, índice topográfico e índice topográfico modificado, ocorreu o oposto, onde tanto as médias do índice de acerto quanto o índice de ajuste apresentaram uma queda. Nesses casos o aumento da resolução piorou a classificação das células e aumentou a presença de falsos negativos.

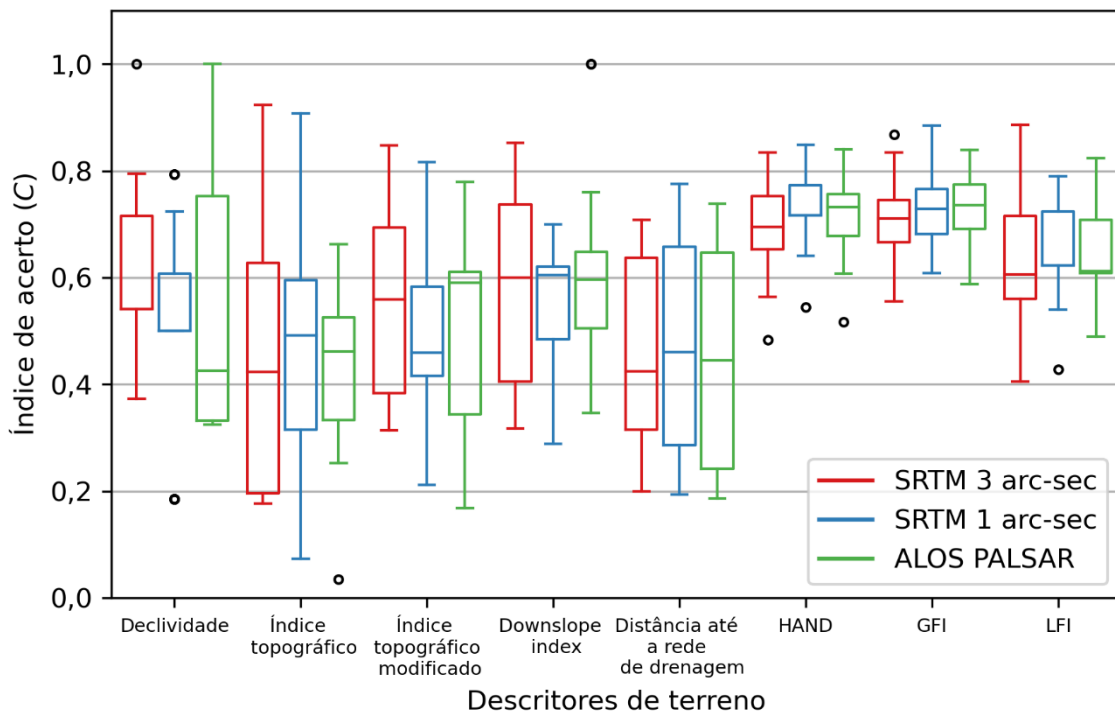


Figura 25: Resultados do índice de ajuste (C) para as três resoluções, agrupados por descritor.

Comparando os resultados das curvas ROC com a calibração do índice de ajuste é possível verificar um conflito entre as performances indicadas. As curvas ROC resultaram em ótimos resultados com curvas AUC acima de 0,7 em todos os casos, o que indicaria uma boa capacidade de classificação. Já os índices de ajuste obtidos não passaram de 0,5 quando aplicados para todo o estado, indicando baixa capacidade de classificação. Essa diferença ocorre

devido a utilização da taxa de falsos positivos na curva ROC. A taxa utiliza verdadeiros negativos em seu cálculo e que, devido a dimensão das bacias e resolução, acaba superando a presença de falsos positivos e leva a menores valores da taxa. Ainda assim, as curvas ainda permitiram comparar os descritores entre si, também apontando os mesmos descritores bons e ruins para classificação.

O mapa de classificação binária gerado a partir do melhor índice de ajuste na resolução de 90 metros pode ser observado na Figura 26. O mapa foi gerado pelos resultados do descritor GFI na bacia hidrográfica do rio Timbó na resolução de 90 metros. Devido à dimensão do estado não é possível observar com grandes detalhes as classificações das células. Entretanto, nota-se que há uma maior presença de erros (células vermelhas e amarelas) nas regiões próxima a costa. Nessas regiões, as células que drenam para o mar não são detectadas pelo descritor HAND, por não ter uma rede hidrográfica definida. Desse modo, as células acabam classificadas como falso negativos. Os descritores GFI e LFI, por utilizarem o HAND como base, recebem esse erro e também classificam as células como falsos negativos. Além disso, aproximadamente 62% dos erros presentes são devido a falso positivos, concordando com o índice de acerto (0,67) e indicando uma superestimação das áreas propensas a inundar.

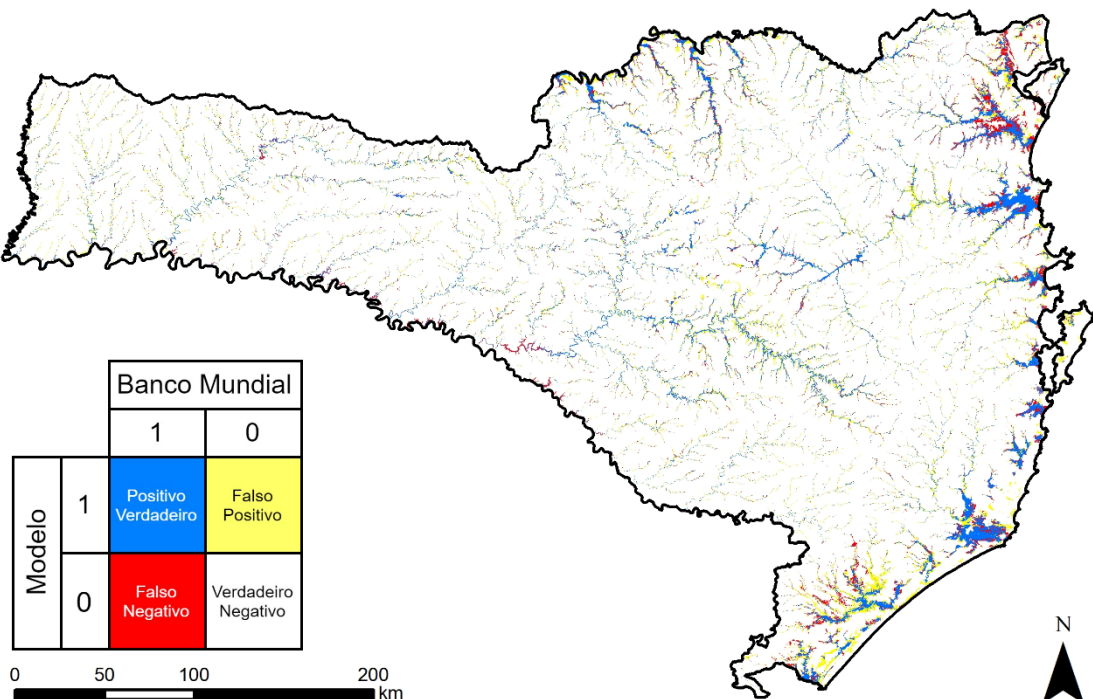


Figura 26: Mapa de classificação binária linear com o melhor índice de ajuste (F), obtido pelo descritor GFI na bacia do rio Timbó na resolução de 90 metros.

4.5 PERFORMANCE DE CLASSIFICAÇÃO BINÁRIA LINEAR: BACIA DO RIO ITAJAÍ

A fim de testar a performance dos descritores de terreno em uma escala geográfica menor, foi feita uma análise similar para a bacia do rio Itajaí, uma das maiores bacias hidrográficas do estado e que apresenta um longo histórico de eventos de inundação. Para esse caso, também foi utilizado os mapas de inundação produzidos pelo Banco Mundial para a calibração e análise de performance. Foram utilizados os municípios Blumenau, Ilhota e Rio do Sul como base para a calibração e transferência de limiar. A energia potencial d e o limiar de iniciação de drenagem foram calibrados para os descritores *downslope index*, distância horizontal, HAND, GFI e LFI em cada município.

Primeiramente foi verificado a performance dos três municípios escolhidos com os três modelos digitais de elevação. Os índices de performance para cada resolução são demonstrados na Figura 27. Similar à análise do estado, os descritores GFI e HAND apresentaram os melhores resultados de índice de ajuste em todos os casos, com valores próximos a 0,5 para o HAND e valores acima de 0,5 para o GFI. Para os outros descritores, os resultados indicam a maior presença de células erroneamente classificadas do que células de inundação corretamente classificadas. Na maioria dos casos o índice de acerto apresentou resultados elevados, indicando que a grande maioria das células de inundação foram corretamente classificadas. Nesses casos, os descritores que apresentaram um índice de ajuste baixo com um índice de acerto alto apresentam maior presença erros de falso positivos do que falsos negativos. Nos casos em que ambos os índices são baixos, como o a distância horizontal até a rede de drenagem, há uma maior presença de falsos negativos do que verdadeiros positivos, demonstrando a baixa capacidade de classificação dos descritores nesses casos.

O mapa de classificação binária gerada para a bacia do rio Itajaí pode ser observado na Figura 28. Esse mapa de classificação foi gerado a partir do limiar de classificação do melhor índice de ajuste encontrado na resolução de 90 metros, resultante do GFI do município Ilhota. Também é apresentado os outros dois municípios, Blumenau e Rio do Sul, com seus respectivos mapas de classificação binária e índices de performance. É possível ver que na região mais baixa da bacia há uma maior presença de erros de falsos negativos, indicando sub-predição. Enquanto nas regiões mais elevadas da bacia há maior presença de erros de falsos positivos. Entretanto, como a região leste da bacia é uma costa, parte dos erros de falsos negativos estão ligados a má classificação do HAND em células que drenam para o mar e não para rios.

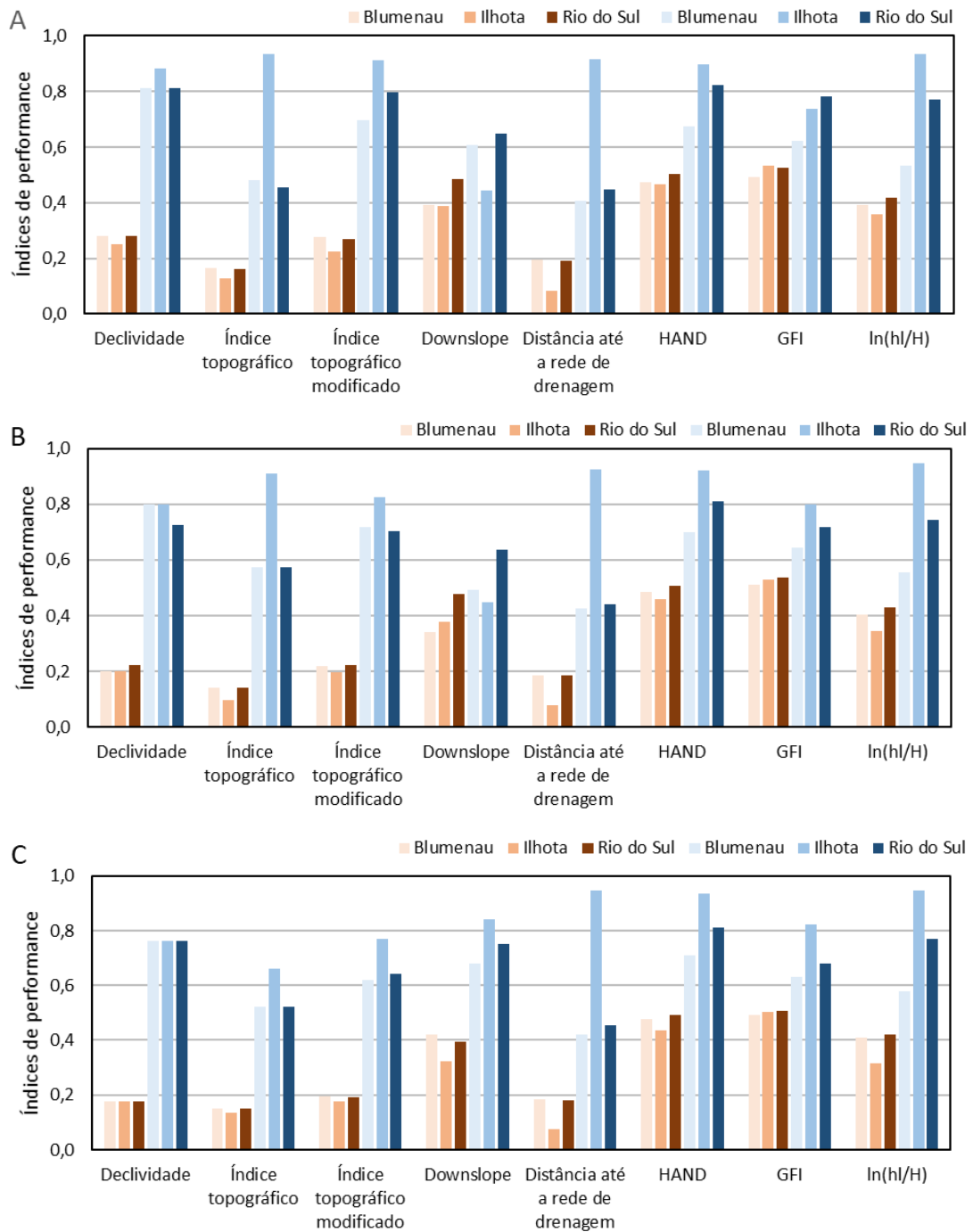


Figura 27: Índice de ajuste e índice de acerto dos oito descritores de terreno em cada município para cada resolução. A) Resolução de 90m. B) Resolução de 30 metros. C) Resolução de 12,5 metros. As barras azuis representam o índice de acerto enquanto as barras amarelas representam o índice de ajuste.

Continuando a análise de performance dos descritores, foi comparado os resultados das três diferentes resoluções para cada município. Os gráficos na Figura 29 apresentam os índices de performance resultantes. É necessário lembrar que as origens dos MDE diferem e apenas as resoluções de 90 e 30 metros são da SRTM. Dito isso, o aumento da resolução apresentou uma redução de eficiência para os descritores *declividade*, *índice topográfico* e

índice topográfico modificado, similar a análise do estado. Nota-se que o *downslope index* também apresentou uma perda de eficiência em dois dos municípios analisados, diferente do estado que apresentou resultados similares nas três resoluções. Os descritores GFI e HAND apresentaram resultados próximos, sem muita variação entre as resoluções. O município de Ilhota apresentou valores altos do índice de acerto em quase todos os descritores, apresentando mais erros de falsos positivos e menos falsos negativos. Esses resultados apontam que não há muita vantagem na utilização de resoluções mais refinadas, considerando as dificuldades e maior tempo de processamento nos cálculos dos descritores e etapas de calibração.

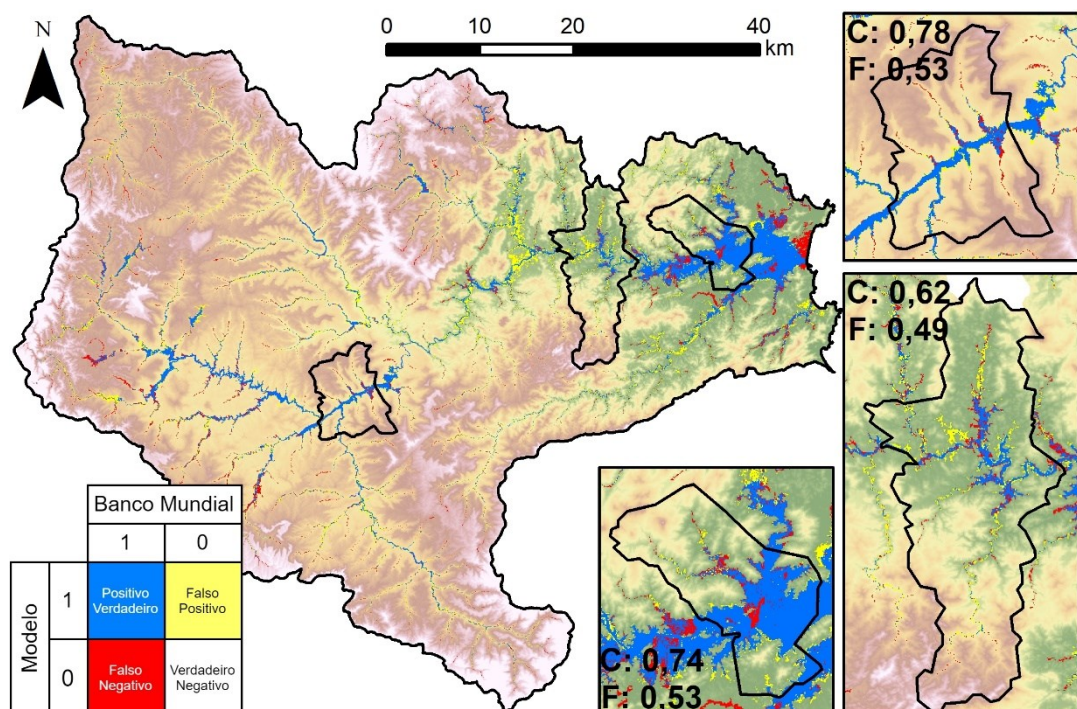


Figura 28: Mapa de classificação binária usando GFI obtido no município Rio do Sul. Azul: Verdadeiro positivo. Vermelho: Falso negativo. Amarelo: Falso positivo.

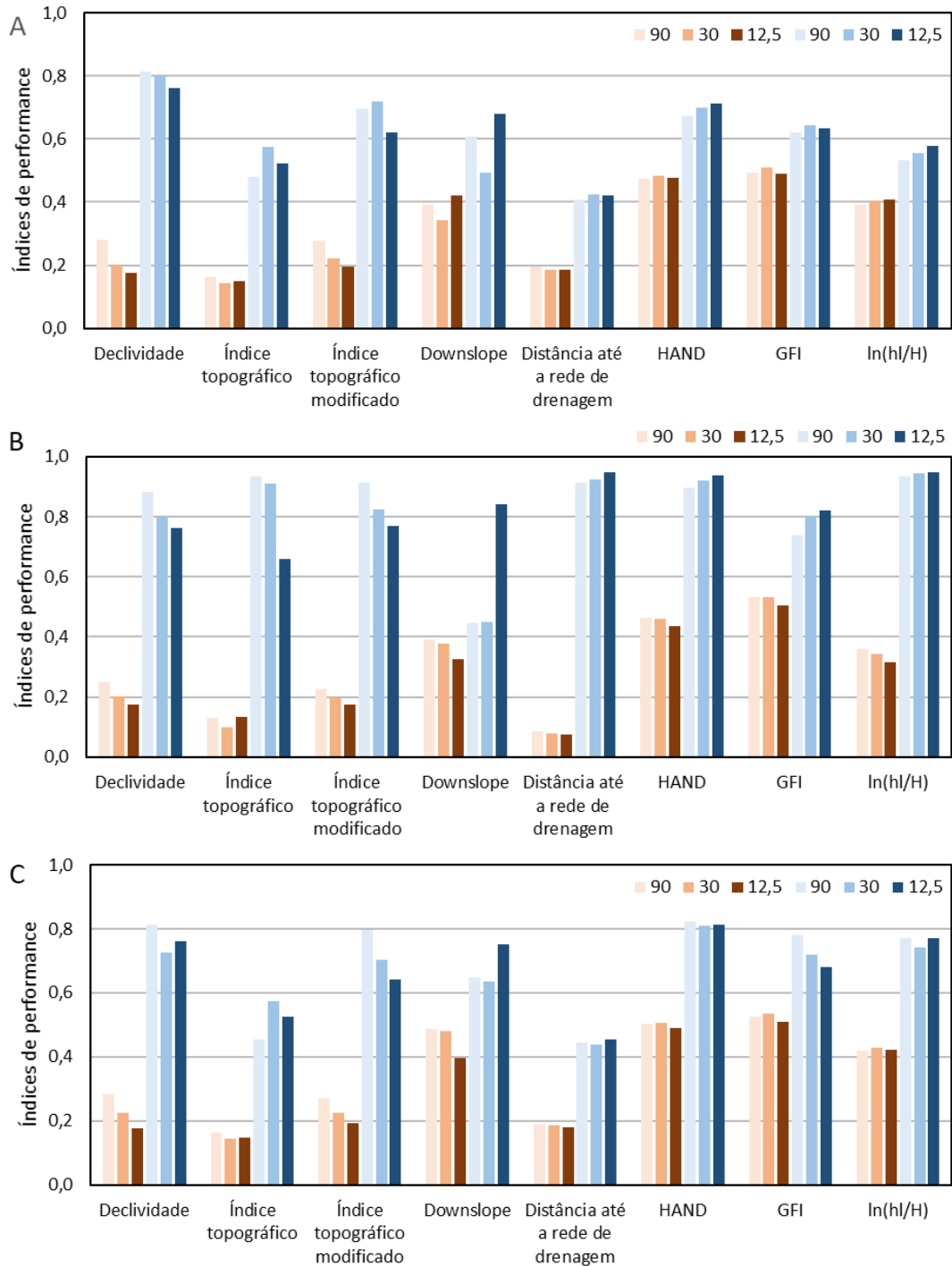


Figura 29: Índice de ajuste e índice de acerto dos oito descritores de terreno em cada e resolução. A) Blumenau. B) Ilhota. C) Rio do Sul. As barras azuis representam o índice de acerto enquanto as barras amarelas representam o índice de ajuste.

Considerando os resultados da performance do limiar transferido, tanto para o estado de Santa Catarina quanto a bacia do rio Itajaí, os descritores apresentaram pouca capacidade para prever corretamente as manchas de inundação. Entretanto, isso não significa que a transferência de limiar ou que a bacia não foi capaz de obter um resultado similar ao estado. Se

a calibração é realizada em todo o estado, é possível encontrar os melhores valores possíveis de índice de ajuste e índice de acerto que podem ser obtidos. Um exemplo é apresentado na Tabela 7, demonstrando os valores máximos dos índices para o HAND, calculado com um limiar de rede de drenagem de 30 km². É possível ver pela tabela que quanto maior a área de estudo, menor é a performance máxima do descritor. Em escala reduzida para o município de Ilhota, foi obtido um bom índice de ajuste, com 83% de células corretamente classificadas.

Tabela 7: Comparação dos índices de ajuste e de acerto da calibração do estado de Santa Catarina, bacia do rio Itajaí e município de Ilhota. 90 metros.

	Índice de ajuste	Índice de acerto
Santa Catarina	0,416	0,696
Bacia do rio Itajaí	0,502	0,824
Ilhota	0,832	0,951

Entende-se então que a topografia e as características físicas internas da região influenciam sobre os resultados dos descritores. Em regiões menores os descritores são mais capazes de aproximar e relacionar a superfície com inundações. Entretanto, o aumento da área de estudo junta regiões com características diferentes, de modo que um sozinho descritor não é capaz de apresentar uma classificação aceitável para toda a área.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a performance de oito descritores de terreno para previsão de áreas suscetíveis à inundação no estado de Santa Catarina. O estado foi escolhido devido ao seu longo histórico de inundações e pela disponibilidade de modelos de elevação e mapas de inundação para toda a área de estudo. Foram utilizadas diferentes modelos de elevação digital para verificar se há relações entre a resolução e o desempenho dos descritores. A grande dimensão da área de estudo permitiu a utilização das bacias hidrográficas contidas no estado como base para calibração e performance.

Para a execução dessas atividades foi desenvolvido um pacote em Python, equipado com as funções de cálculo de descritores e de avaliação de performance. Para os descritores foram criadas implementações sequenciais e paralelas, aplicado em placas gráficas com o uso do CUDA. A lógica por trás dos cálculos dos descritores permaneceu similar entre as implementações, e a maior diferença são os métodos de divisão de matrizes desenvolvidos para a implementação paralela. As dimensões máximas calculáveis dependem da memória global disponível para a placa gráfica. As estratégias adotadas permitiram utilizar a resolução de 12,5 metros para todo o estado de Santa Catarina. Foi realizado uma comparação dos tempos de execução afim de identificar os benefícios da utilização da paralelização. Entretanto, apenas os cálculos dos descritores distância até a rede de drenagem e HAND apresentaram uma aceleração considerável de quase 18 vezes. Já os outros descritores apresentaram acelerações menores, variando de 1 a 5 vezes, ou desaceleração no caso da *declividade*. Esses resultados indicam que ainda há bastante espaço para o aprimoramento da implementação paralela.

Os descritores que apresentaram uma melhor capacidade de previsão das manchas de inundação do Banco Mundial foram o HAND, *height above the nearest drainage*, e o GFI, *geomorphic flood index*. Esses descritores foram os únicos que obtiveram índices de ajuste (F) acima de 0,4 com a transferência do limiar para o estado de Santa Catarina. O mesmo é encontrado na análise da bacia do rio Itajaí, com índices acima de 0,45. Considerando estudos anteriores que também avaliaram a performance de descritores de terreno no estado, nota-se que há uma diferença nos resultados obtidos. Esses estudos relataram altas performance de alguns descritores, como o HAND, em mapear áreas propensas a inundar. Nota-se que a mancha de inundação escolhida para a comparação é uma grande fonte de incertezas, devido à falta do conhecimento completo de sua produção e considerações feitas em seus estudos.

A utilização de diferentes resoluções de MDE permitiu verificar se o detalhamento adicional influencia no mapeamento. Tanto na avaliação no estado quanto na bacia do rio Itajaí, a resolução não pareceu influenciar positivamente nos resultados. Com o aumento da resolução, a *declividade* apresentou uma queda na performance e provavelmente influenciou na perda de performance do índice topográfico e índice topográfico modificado. Já os outros descritores apresentaram leves variações.

Observou-se pelas calibrações dos descritores de terreno que a capacidade de previsão da inundação está possivelmente ligada a dimensão e características físicas da bacia. As calibrações no estado e bacias apontaram resultados máximos de índice de ajustes próximos a 0,5, enquanto a calibração em municípios resultou em valores de índice de ajuste acima de 0,8.

Em estudos futuros, recomenda-se levar em consideração as incertezas presentes no trabalho. A falta de confiança com a origem das manchas de inundação utilizadas como base e a qualidade dos MDE utilizados para calcular os descritores pode ter influenciado diretamente nos resultados. Desse modo, testar a performance dos descritores em mais manchas de inundação de casos reais e MDE de maior resolução em escalas menores pode apresentar um aperfeiçoamento da performance dos descritores. Também se sugere a utilização de redes de drenagem de alta qualidade durante o pré-processamento dos MDE, de forma que garanta uma direção de fluxo e acumulação de fluxos corretos. Por fim, recomenda-se a utilização de métodos de classificação que unam múltiplos descritores de terreno, de modo que consigam representar melhor uma bacia do que um descritor isolado.

REFERÊNCIAS

ALFIERI, L. et al. Global projections of river flood risk in a warmer world. **Earth's Future**, v. 5, n. 2, p. 171–182, 2017.

ASF DAAC. **ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected high res.** Disponível em: <search.asf.alaska.edu>.

BANCO MUNDIAL. **Santa Catarina: A gestão de riscos de desastres no contexto do planejamento 425 estratégico para o aumento da resiliência a perigos naturais.** Washington: Banco Mundial, 2016. Disponível em: <<https://documents1.worldbank.org/curated/en/625351496862211155/pdf/115244-WP-OUO-9-PORTUGUESE-disasters.pdf>>.

BARTÁK, V. How to extract river networks and catchment boundaries from DEM . a review of digital terrain analysis techniques. **Journal of Landscape Studies**, v. 2, n. January 2009, p. 57–68, 2009.

BARTIKO, D. et al. Spatial and seasonal patterns of flood change across Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 9, p. 1071–1079, 2019.

BATES, P. D.; DE ROO, A. P. J. A simple raster-based model for flood inundation simulation. **Journal of Hydrology**, v. 236, n. 1–2, p. 54–77, 2000.

BERGHUIJS, W. R. et al. Growing Spatial Scales of Synchronous River Flooding in Europe. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 3, p. 1423–1428, 2019.

BLÖSCHL, G. et al. Increasing river floods: fiction or reality? **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 2, n. 4, p. 329–344, 2015.

BLÖSCHL, G. et al. Changing climate shifts timing of European floods. **Science**, n. 357, p. 588–590, 2017.

BLÖSCHL, G. et al. Changing climate both increases and decreases European river floods. **Nature**, v. 573, n. 7772, p. 108–111, 2019.

BORGES DE AMORIM, P.; CHAFFE, P. B. Towards a comprehensive characterization of evidence in synthesis assessments: the climate change impacts on the

Brazilian water resources. **Climatic Change**, v. 155, n. 1, p. 37–57, 2019.

CEPED/UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010 - volume Santa Catarina**. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>>.

CEPED/UFSC. **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil (1995-2019)**. Florianópolis: CEPED UFSC, 2019. Disponível em: <https://ftp.ceped.ufsc.br/danos_e_prejuizos_versao_em_revisao.pdf>.

CHAUDHURI, C.; GRAY, A.; ROBERTSON, C. InundatEd-v1 . 0 : a height above nearest drainage (HAND) -based flood risk modeling system using a discrete global grid system. p. 3295–3315, 2021.

COSTA, R. T. et al. Predictive modelling of envelope flood extents using geomorphic and climatic-hydrologic catchment characteristics. **Water Resources Research**, v. 56, p. 0–3, 2020.

CRED/UNISDR. **The Human cost of weather related disasters 1995-2015**. Université Catholique de Louvain: Centre for Research of the Epidemiology of Disasters and The United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2016. Disponível em: <https://www.preventionweb.net/files/46796_cop21weatherdisastersreport2015.pdf>.

DEGIORGIS, M. et al. Classifiers for the detection of flood-prone areas using remote sensed elevation data. **Journal of Hydrology**, v. 470–471, n. November, p. 302–315, 2012.

DOTTORI, F. et al. Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 9, p. 781–786, 2018.

ELSHORBAGY, A. et al. Topography-and nightlight-based national flood risk assessment in Canada. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 4, p. 2219–2232, 2017.

ERÄNEN, D. et al. A full graphics processing unit implementation of uncertainty-aware drainage basin delineation. **Computers and Geosciences**, v. 73, p. 48–60, 2014.

GAROUSI-NEJAD, I. et al. Terrain Analysis Enhancements to the Height Above

Nearest Drainage Flood Inundation Mapping Method. **Water Resources Research**, n. March, p. 1–27, 2019.

GICHAMO, T. Z.; TARBOTON, D. G. UEB parallel: Distributed snow accumulation and melt modeling using parallel computing. **Environmental Modelling and Software**, v. 125, n. December 2019, p. 104614, 2020.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. **Xvi Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos**, p. 14, 2005.

HJERDT, K. N. et al. A new topographic index to quantify downslope controls on local drainage. **Water Resources Research**, v. 40, n. 5, p. 1–6, 2004.

IBGE. **Estimativas de população enviadas ao TCU para o primeiro dia de julho de 2020**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-480-de-populacao.html>>.

KIRKBY, M. J. **Hydrograph Modelling Strategies**. [s.l.] Department of Geography, University of Leeds, 1975.

LIU, Y. Y. et al. A CyberGIS Integration and Computation Framework for High-Resolution Continental-Scale Flood Inundation Mapping. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 54, n. 4, p. 770–784, 2018.

MANFREDA, S. et al. Flood-Prone Areas Assessment Using Linear Binary Classifiers based on Morphological Indices. **Vulnerability, uncertain, and risk**, p. 2002–2011, 2014.

MANFREDA, S. et al. Flood-prone areas assessment using linear binary classifiers based on flood maps obtained from 1D and 2D hydraulic models. **Natural Hazards**, v. 79, n. 2, p. 735–754, 2015.

MANFREDA, S.; DI LEO, M.; SOLE, A. Detection of Flood-Prone Areas Using Digital Elevation Models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, n. 10, p. 781–790, 2011.

MANFREDA, S.; SOLE, A.; FIORENTINO, M. Can the basin morphology alone provide an insight into floodplain delineation. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 118, n. June 2014, p. 47–56, 2008.

MERWADE, V. et al. Uncertainty in Flood Inundation Mapping: Current Issues and Future Directions. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 7, p. 608–620, 2008.

MEYER, V.; PRIEST, S.; KUHLCHE, C. Economic evaluation of structural and non-structural flood risk management measures: Examples from the Mulde River. **Natural Hazards**, v. 62, n. 2, p. 301–324, 2012.

NARDI, F. et al. Comparing a large-scale dem-based floodplain delineation algorithm with standard flood maps: The Tiber river basin case study. **Irrigation and Drainage**, v. 62, n. S2, p. 11–19, 2013.

NARDI, F. et al. GFPLAIN250m, a global high-resolution dataset of earth's floodplains. **Scientific Data**, v. 6, p. 1–6, 2019.

NARDI, F.; VIVONI, E. R.; GRIMALDI, S. Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method. **Water Resources Research**, v. 42, n. 9, p. 1–15, 2006.

NEAL, J. C. et al. A comparison of three parallelisation methods for 2D flood inundation models. **Environmental Modelling and Software**, v. 25, n. 4, p. 398–411, 2010.

NOBRE, A. D. et al. Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1–2, p. 13–29, 2011.

NOBRE, A. D. et al. HAND contour: A new proxy predictor of inundation extent. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 2, p. 320–333, 2016.

NOTTI, D. et al. Potential and limitations of open satellite data for flood mapping. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, 2018.

NVIDIA. **CUDA C++ Programming Guide**. Disponível em: <<https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/index.html#cuda-general-purpose-parallel-computing-architecture>>.

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.

ORTEGA, L.; RUEDA, A. Parallel drainage network computation on CUDA. **Computers and Geosciences**, v. 36, n. 2, p. 171–178, 2010.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classificatio. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644, 2007.

QIN, C. Z.; ZHAN, L. Parallelizing flow-accumulation calculations on graphics processing units-From iterative DEM preprocessing algorithm to recursive multiple-flow-direction algorithm. **Computers and Geosciences**, v. 43, p. 7–16, 2012.

RAHMATI, O. et al. Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. **Environmental Modelling and Software**, v. 102, p. 1–12, 2018.

RENNÓ, C. D. et al. 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.

SAMELA, C. et al. DEM-Based Approaches for the Delineation of Flood-Prone Areas in an Ungauged Basin in Africa. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 2, p. 06015010, 2015.

SAMELA, C.; TROY, T. J.; MANFREDA, S. Geomorphic classifiers for flood-prone areas delineation for data-scarce environments. **Advances in Water Resources**, v. 102, p. 13–28, 2017.

SANGWAN, N.; MERWADE, V. A Faster and Economical Approach to Floodplain Mapping Using Soil Information. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 51, n. 5, p. 1286–1304, 2015.

SCHIELE, S. et al. Parallelization strategies to deal with non-localities in the calculation of regional land-surface parameters. **Computers and Geosciences**, v. 44, p. 1–9, 2012.

SHI, W.; WANG, B.; TIAN, Y. Accuracy Analysis of Digital Elevation Model Relating to Spatial Resolution and Terrain Slope by Bilinear Interpolation. **Mathematical**

Geosciences, v. 46, n. 4, p. 445–481, 2014.

SHORTRIDGE, A.; MESSINA, J. Spatial structure and landscape associations of SRTM error. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 6, p. 1576–1587, 2011.

SPECKHANN, G. A. et al. Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, n. 1, p. 87–100, 2018.

STEVENS, M. R.; HANSCHKA, S. Municipal flood hazard mapping: The case of British Columbia, Canada. **Natural Hazards**, v. 73, n. 2, p. 907–932, 2014.

TARBOTON, D. Tarboton, D.G. 1997 A New method for the Determination of Flow Directions and Upslope Areas in Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research* 33(2): 309-319. **Water resources research**, v. 33, n. 2, p. 309–319, 1997.

TAVARES DA COSTA, R. et al. A web application for hydrogeomorphic flood hazard mapping. **Environmental Modelling and Software**, v. 118, n. April, p. 172–186, 2019.

TENG, J. et al. Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling and Software**, v. 90, p. 201–216, 2017.

TENG, J. et al. Enhancing the Capability of a Simple, Computationally Efficient, Conceptual Flood Inundation Model in Hydrologically Complex Terrain. **Water Resources Management**, v. 33, n. 2, p. 831–845, 2019.

TOWE, R. et al. Rethinking data-driven decision support in flood risk management for a big data age. **Journal of Flood Risk Management**, v. 13, n. 4, p. 1–19, 2020.

TRISTRAM, D.; HUGHES, D.; BRADSHAW, K. Accelerating a hydrological uncertainty ensemble model using graphics processing units (GPUs). **Computers and Geosciences**, v. 62, p. 178–186, 2014.

TRY, S. et al. Delineation of flood-prone areas using geomorphological approach in the Mekong River Basin. **Quaternary International**, v. 503, n. March 2018, p. 79–86, 2019.

UFSC, U. F. D. S. C.; CEPED, C. U. D. E. E. P. S. D. Atlas Brasil. v. Brasil, 2º, p. 126, 2013.

VACONDIO, R. et al. A non-uniform efficient grid type for GPU-parallel Shallow Water Equations models. **Environmental Modelling and Software**, v. 88, p. 119–137, 2017.

YAMAZAKI, D. et al. A high-accuracy map of global terrain elevations. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 11, p. 5844–5853, 2017.

APÊNDICE A – Mapas de classificação binária linear

Aqui estão apresentados os mapas de inundação classificados para cada bacia do Estado. Cada cor indica uma classificação. A cor azul representa o verdadeiro positivo, a cor vermelha o falso negativo e a cor amarela o falso positivo.

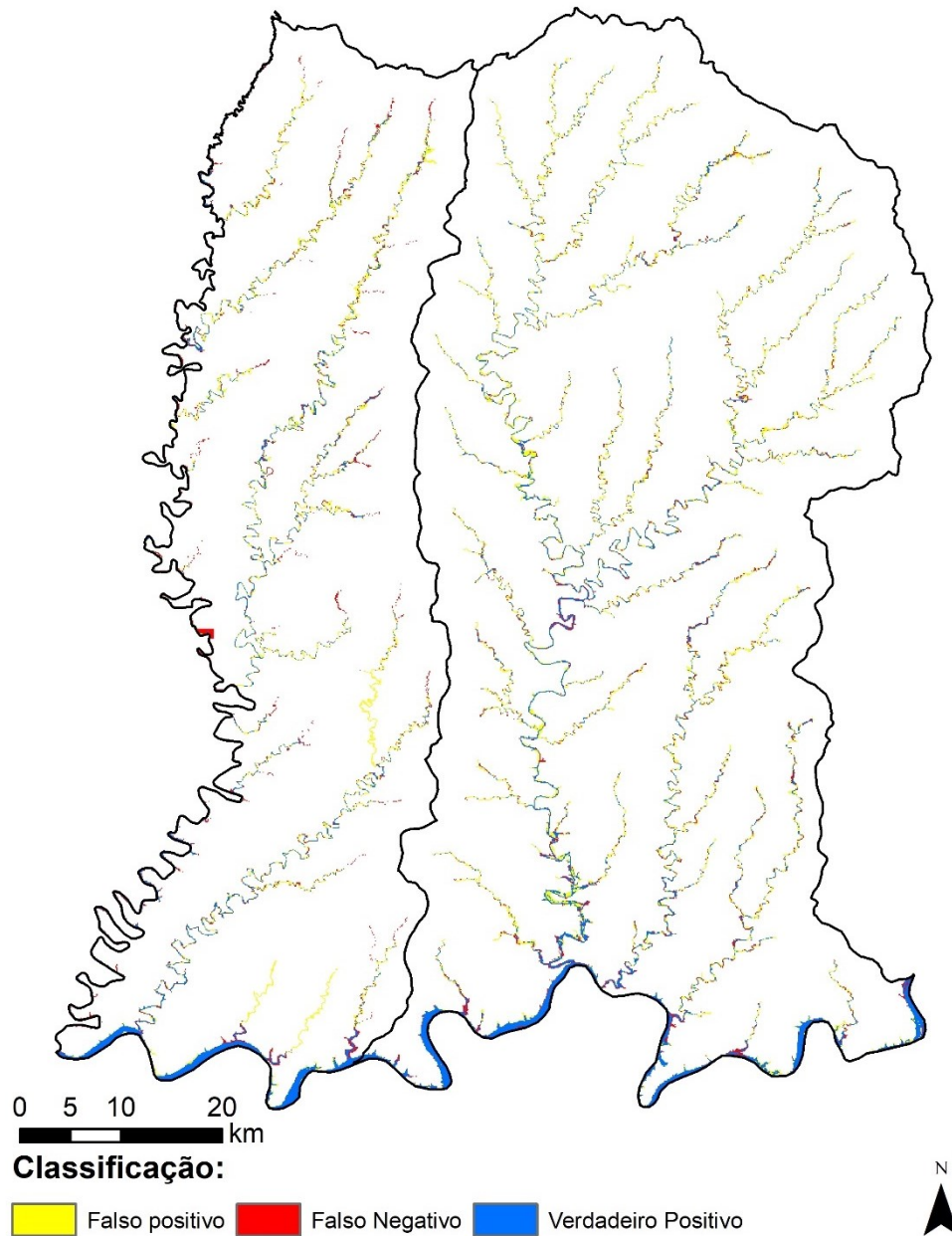


Figura A1: Mapa de classificação linear das bacias do rio Antas e rio Peperi-guaçu.

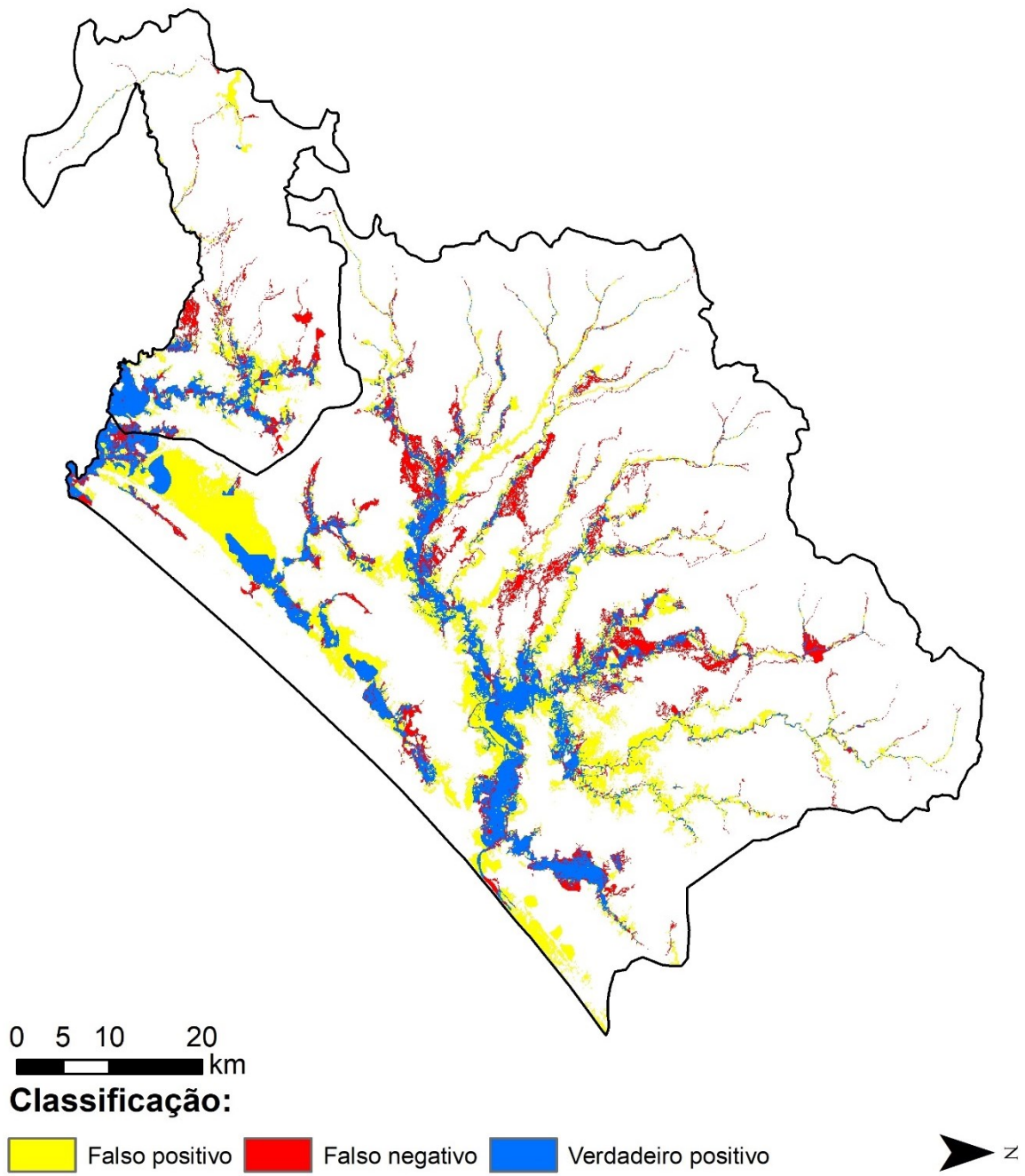


Figura A2: Mapa de classificação linear das bacias do rio Mampituba e rio Araranguá.

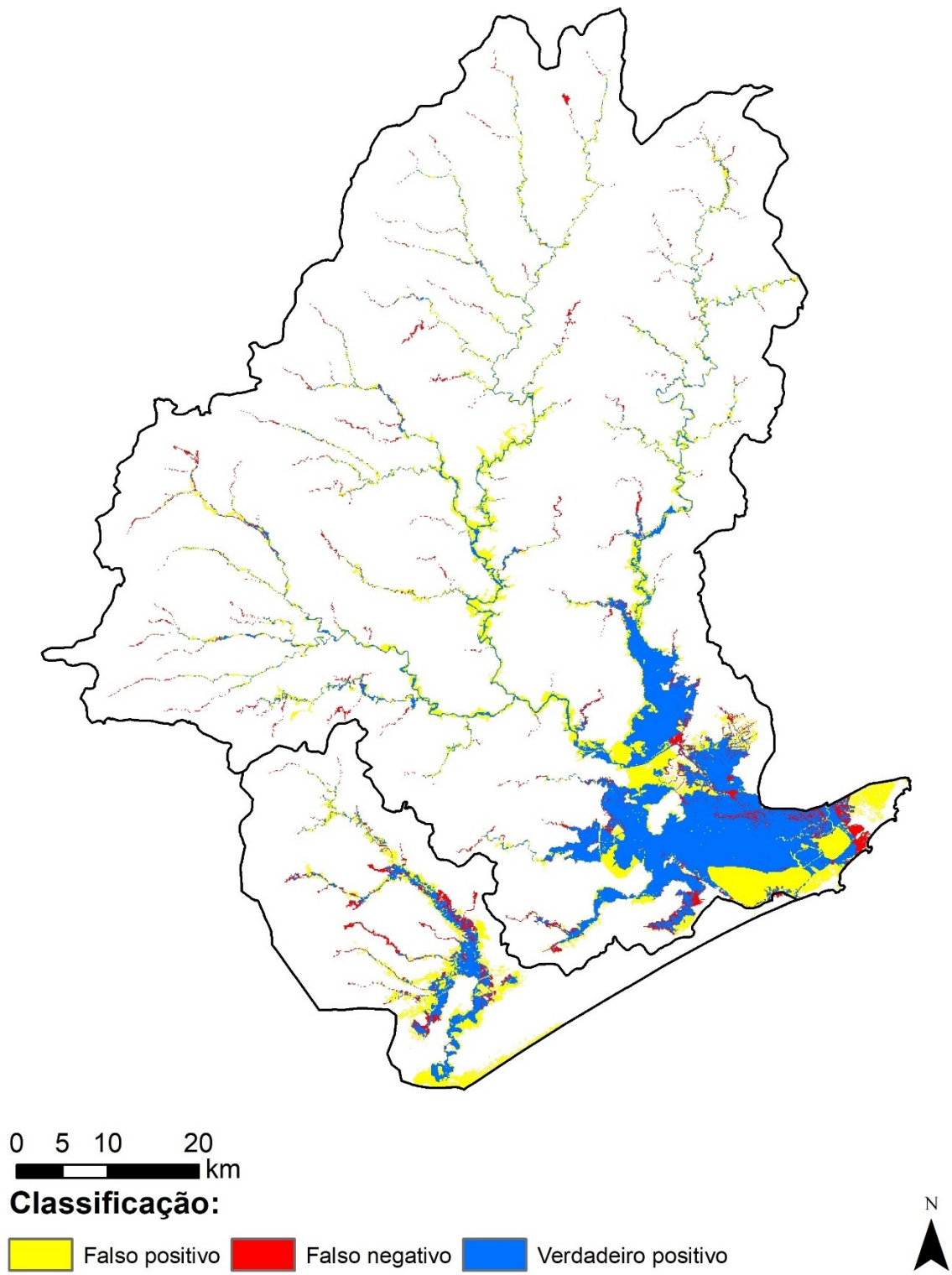


Figura A3: Mapa de classificação linear das bacias do rio Urussanga e rio Tubarão.

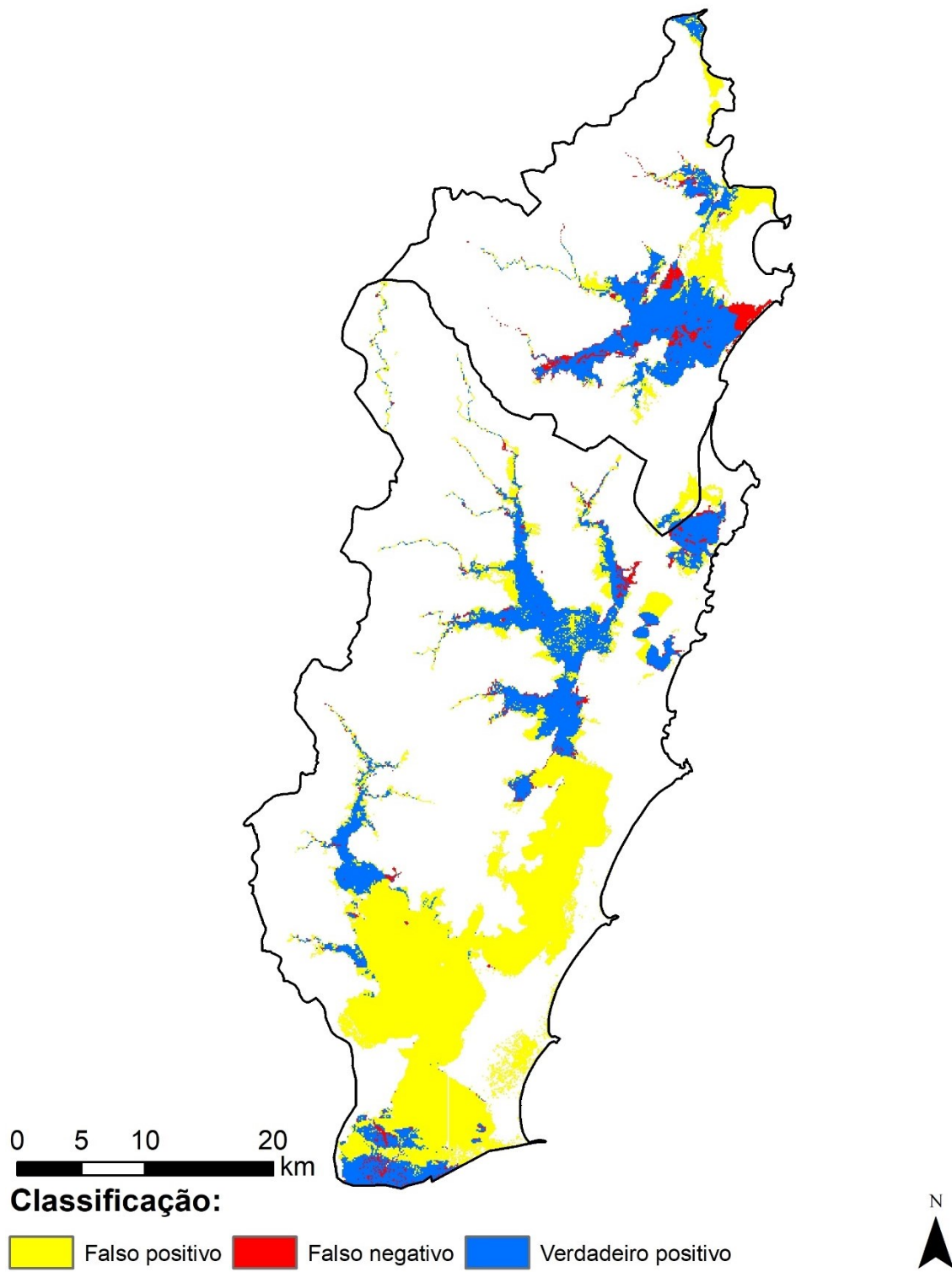


Figura A4: Mapa de classificação linear das bacias do rio D'Una e rio da Madre.

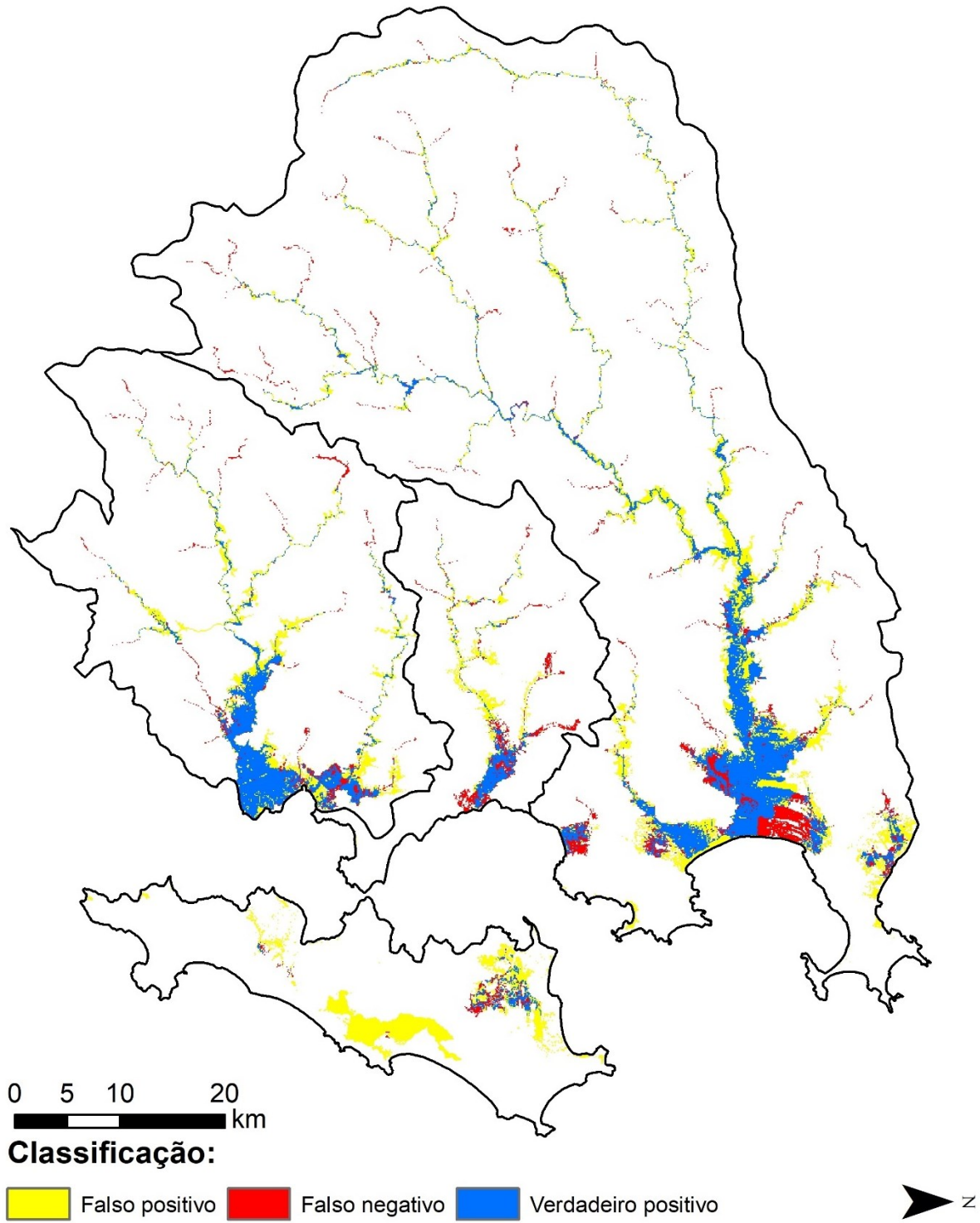


Figura A5: Mapa de classificação linear das bacias do rio Cubatão Sul, rio Biguaçu e rio Tijuca.

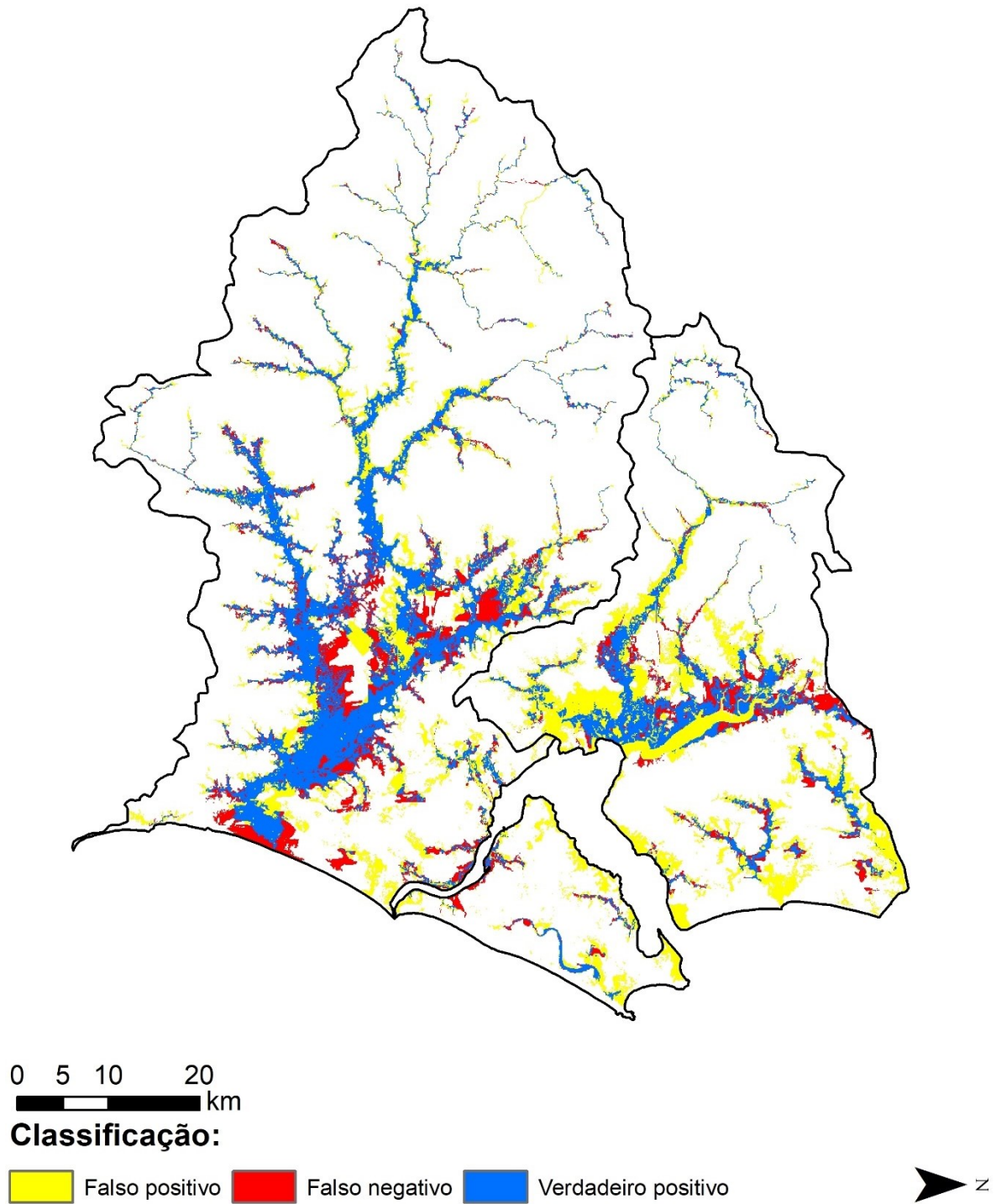


Figura A6: Mapa de classificação linear das bacias do rio Itapocu e rio Cubatão.

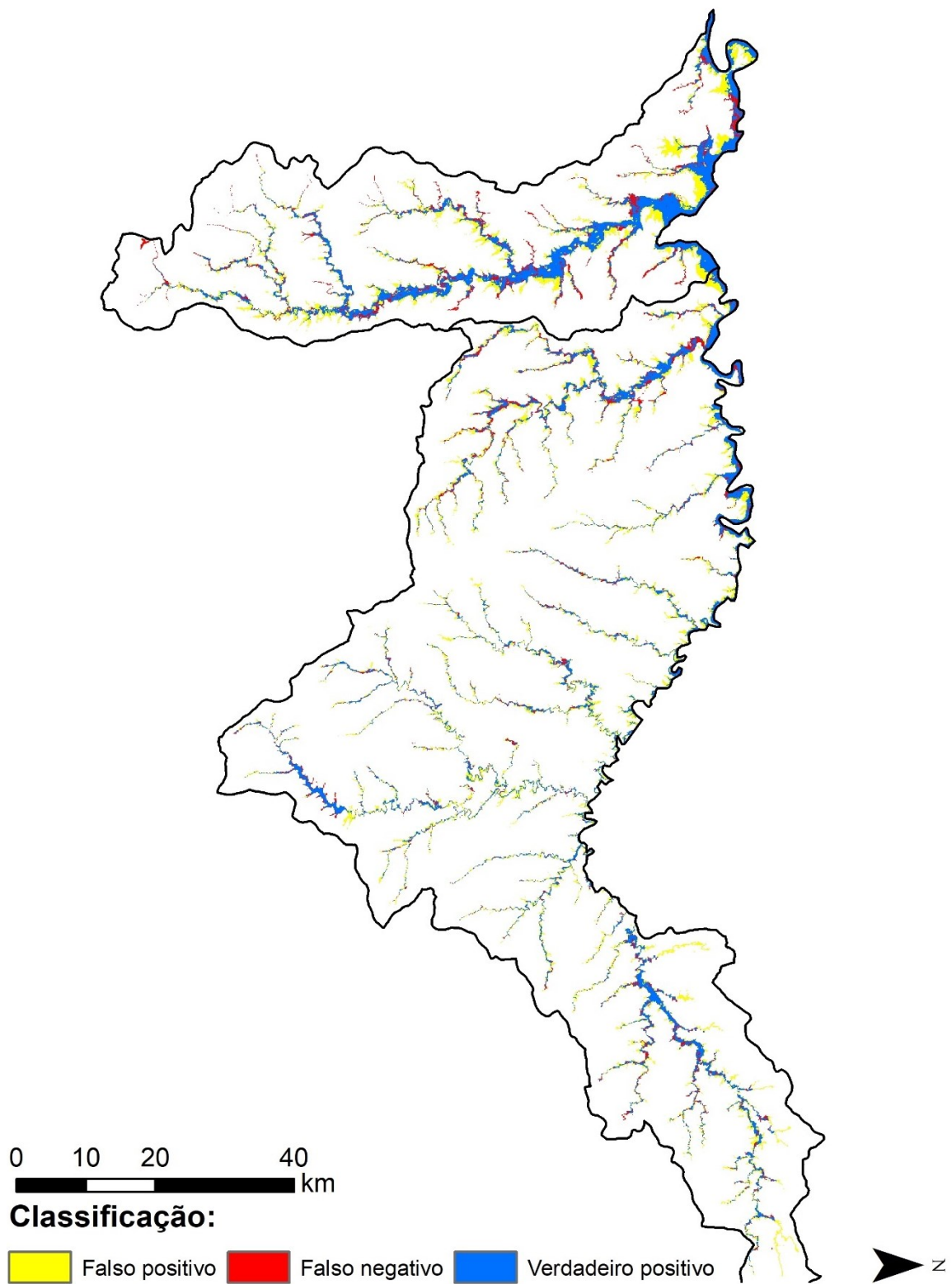


Figura A7: Mapa de classificação linear das bacias do rio Negro e rio Canoinhas.

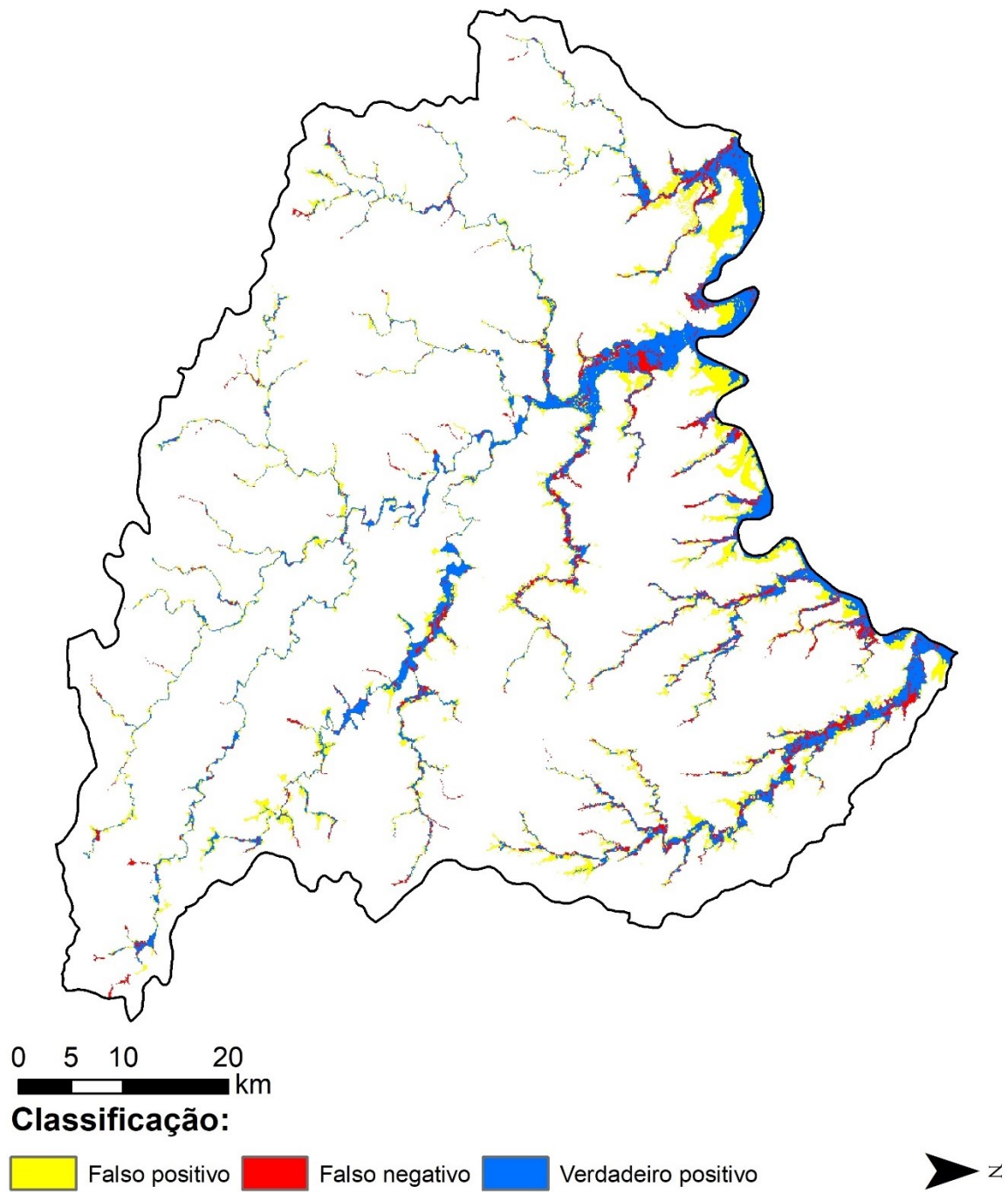


Figura A8: Mapa de classificação linear da bacia do rio Timbó.

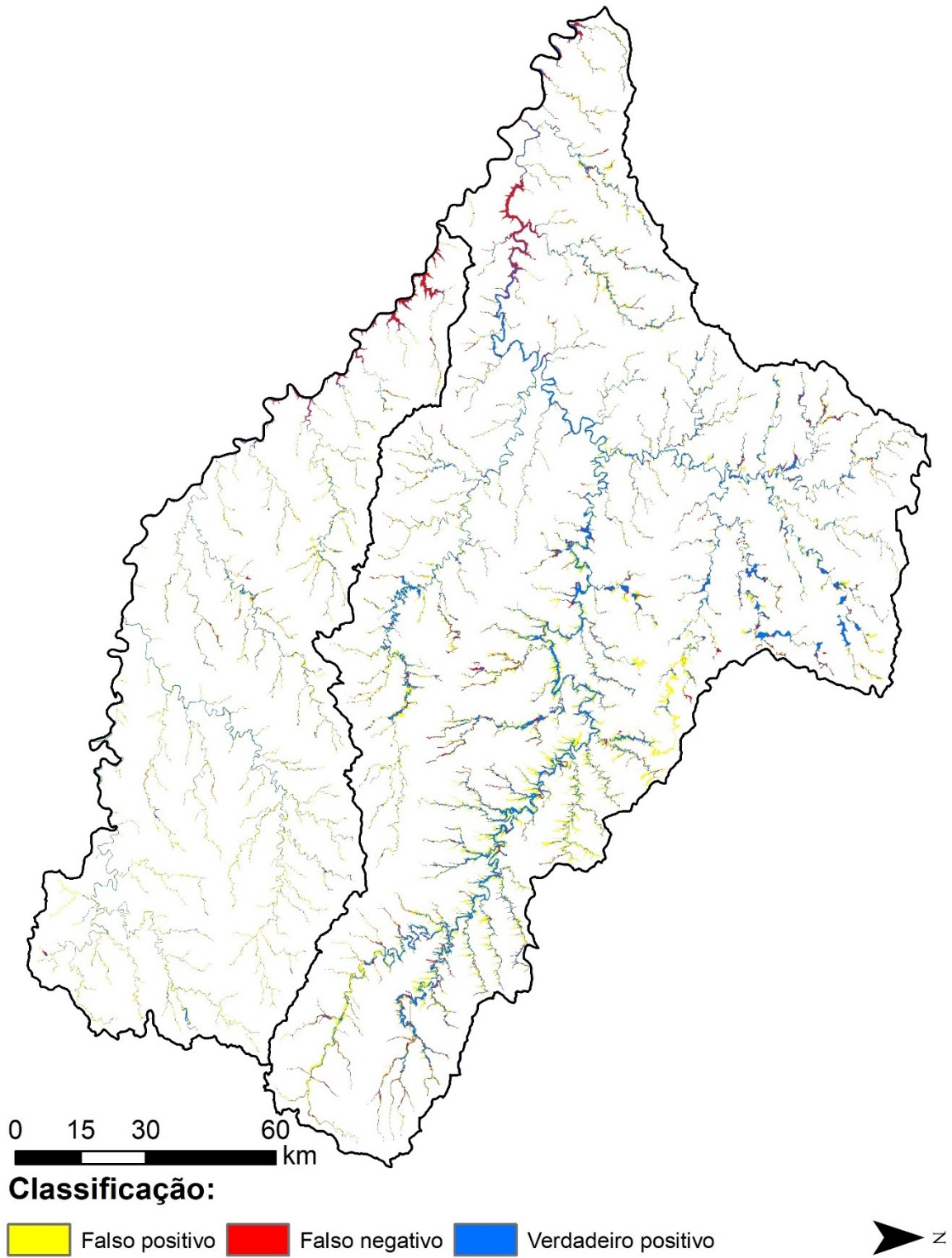


Figura A9: Mapa de classificação linear das bacias do rio Pelotas e rio Canoas.

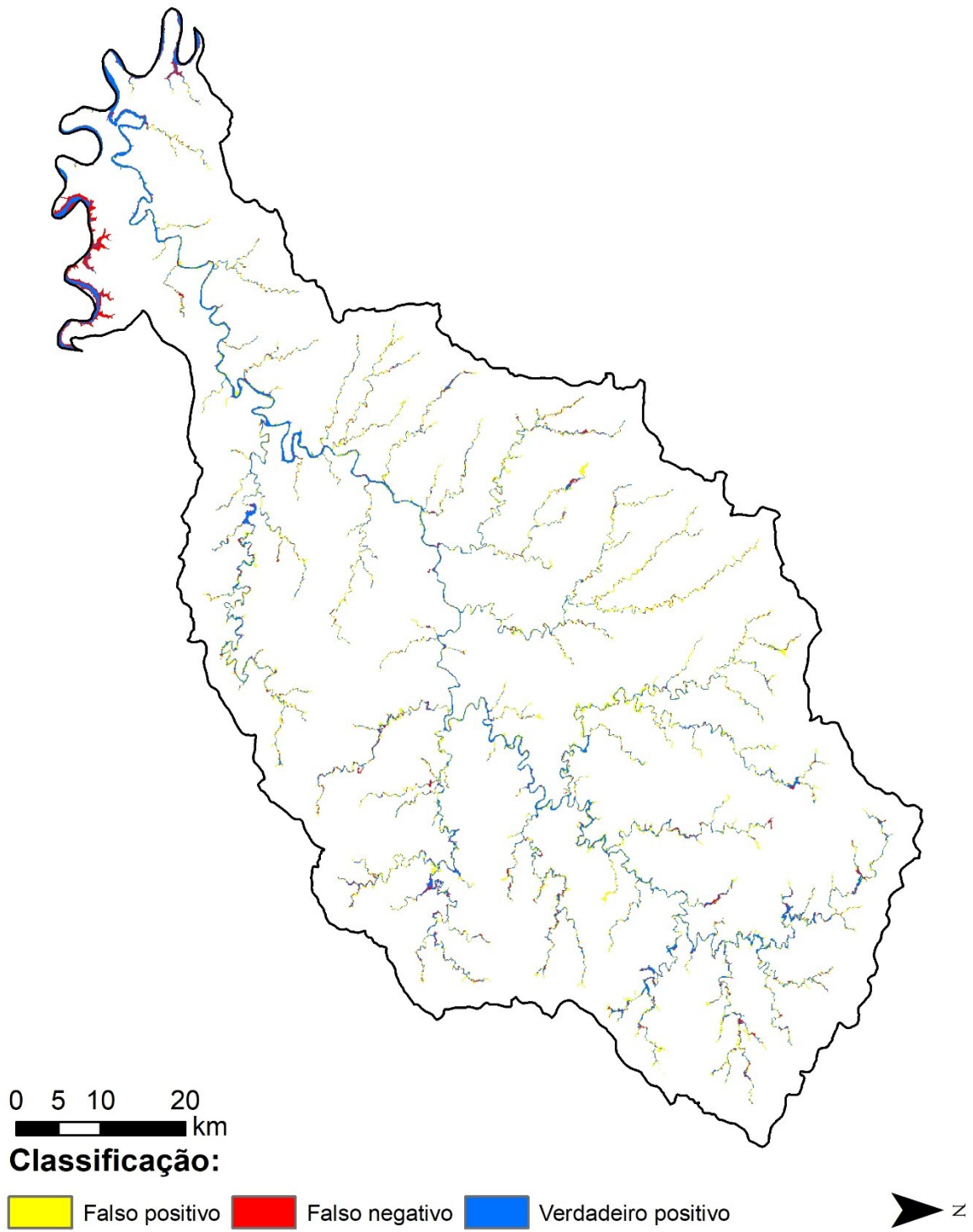


Figura A10: Mapa de classificação linear da bacia do rio Peixe.

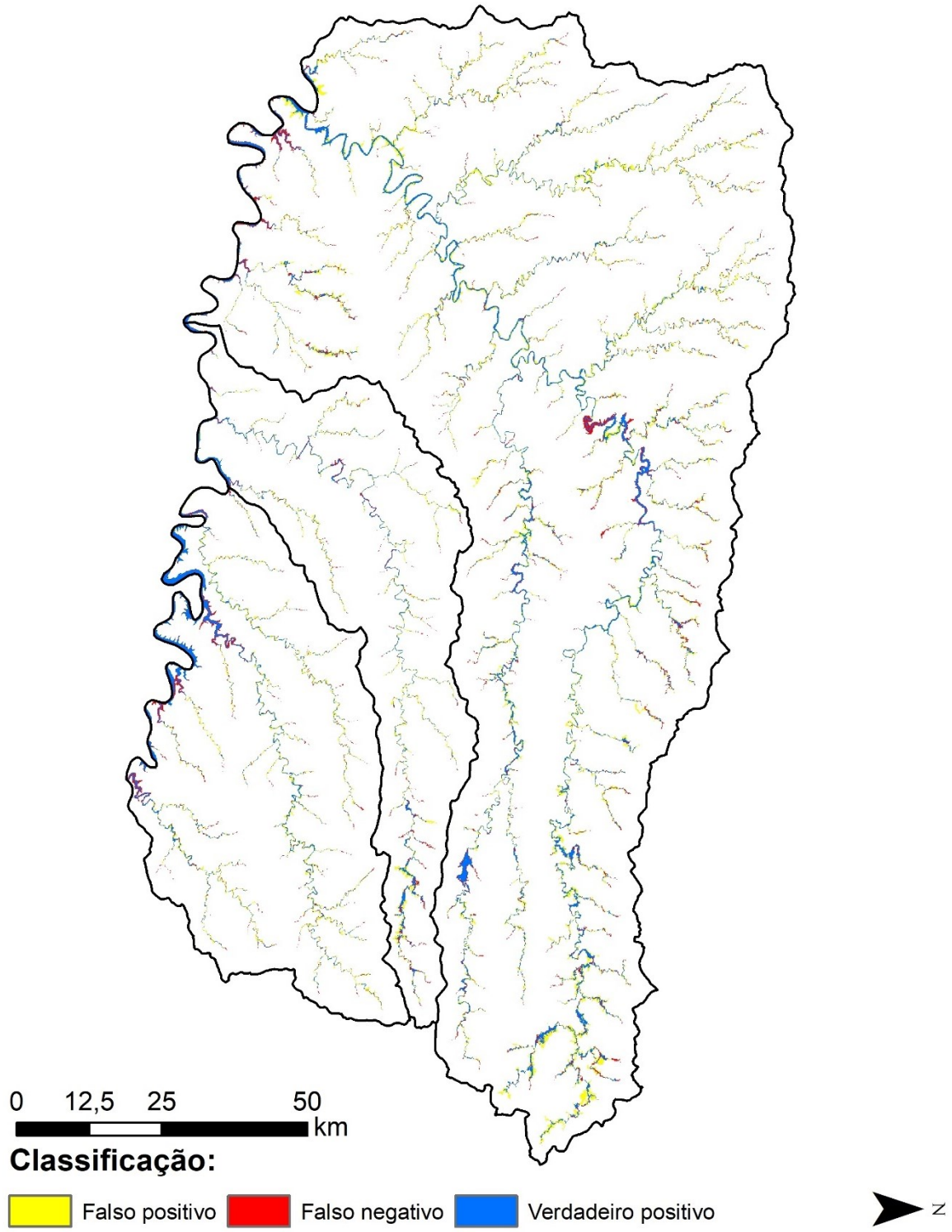


Figura A11: Mapa de classificação linear das bacias do rio Jacutinga, rio Irani e rio Chapecó.