



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.14.19.05-TDI

**MAPEAMENTO DE PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO A
PARTIR DE DADOS SRTM: CONTRIBUIÇÃO PARA
ANÁLISE DE EXPOSIÇÃO A INUNDAÇÃO NA BACIA
DO RIO ITAJAÍ**

Viviana Aguilar Muñoz

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Marcio de Morisson Valeriano, aprovada em 28 de abril de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3G5LL8E>>

INPE
São José dos Campos
2014

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.14.19.05-TDI

**MAPEAMENTO DE PLANÍCIES DE INUNDAÇÃO A
PARTIR DE DADOS SRTM: CONTRIBUIÇÃO PARA
ANÁLISE DE EXPOSIÇÃO A INUNDAÇÃO NA BACIA
DO RIO ITAJAÍ**

Viviana Aguilar Muñoz

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Marcio de Morisson Valeriano, aprovada em 28 de abril de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3G5LL8E>>

INPE
São José dos Campos
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Muñoz, Viviana Aguilar.

M926m Mapeamento de planícies de inundação a partir de dados srtm: contribuição para análise de exposição a inundação na bacia do rio Itajaí / Viviana Aguilar Muñoz. – São José dos Campos : INPE, 2014.

xxvi + 86 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/04.14.19.05-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientador : Dr. Marcio de Morisson Valeriano.

1. Mapeamento de planícies de inundação. 2. Geomorfometria. 3. SRTM-DEM. 4. Exposição a inundações. 5. Análise do Terreno. I. Título.

CDU 551.435.12(816.4)

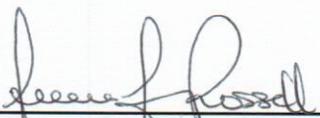


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Sensoriamento Remoto

Dra. Dilce de Fátima Rossetti



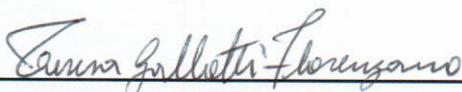
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Márcio de Morisson Valeriano



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Teresa Gallotti Florenzano



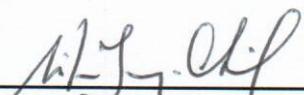
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Cláudia Maria de Almeida



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Sílvio Jorge Coelho Simões



Convidado(a) / UNESP / São José dos Campos - SP

Dra. Noemia Bohn



Convidado(a) / FURB / Blumenau - SC

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Viviana Aguilar Muñoz**

São José dos Campos, 28 de Abril de 2014

“God, help me to tell the truth to the strong and to avoid telling lies to get the weak's applause. If you give me fortune, do not take away my reason. If you give me success, do not take away my humility. If you give me humility do not take away my dignity. God, help me to see the other side of the medal. Don't let me blame others of treason just because they don't think like me. God, teach me to love people as I love myself and to judge me as I judge others. Please, don't let me be proud if I succeed, or fall in despair if I fail. Remind me that failure is the experience that precedes triumph. Teach me that forgiving is the most important in the strong and that revenge is the most primitive sign in the weak. If you take away my success, let me keep my strength to succeed from failure. If I fail people, give me courage to apologize and if people fail me, give me courage to forgive them. God, if I forget you, please do not forget me”.

Mahatma Gandhi

"As tempestades só aterram os fracos, os fortes enrijam-se e fitam o trovão".

Machado de Assis.

*A mi bien amado Denílson.
Y a mis preciosos sobrinos, que yo pueda ser su faro.*

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi possível graças à bolsa de estudos concedida pelo Ministério de Relações Exteriores (MRE), do governo brasileiro, por intermédio do Departamento de Cultura (DC), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através do Programa de Estudantes-Convênio de Pós-graduação (PEC-PG).

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelo conhecimento fornecido, pela disposição de recursos e de infraestrutura para o desenvolvimento desta pesquisa, e pelo apoio institucional e financeiro nas iniciativas de difusão das investigações. Agradeço especialmente ao Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto.

Devo a maior gratidão ao Dr. Márcio de Morisson Valeriano pela excelente orientação, motivação e apoio em todas as etapas desta pesquisa. Em especial, quero reconhecer sua constante preocupação com a formação dos seus alunos baseada no respeito e no reconhecimento das nossas plenas potencialidades individuais.

Agradeço às professoras e professores membros da banca examinadora, por aceitar o convite para avaliar este trabalho. Suas contribuições enriqueceram este documento. Agradeço em especial às professoras Dilce de F. Rossetti e Teresa Galiotti Florenzano, pelo acompanhamento ao longo da pesquisa, além da sua preocupação com minha formação e maturidade profissional.

As investigações na bacia do rio Itajaí teriam sido mais difíceis sem a colaboração e valioso apoio de Frederico Rudorff (EPAGRI) e da Defesa Civil de Santa Catarina durante o trabalho de campo e levantamento de informações na área de estudo.

Quero agradecer aos meus colegas da pós-graduação do INPE, pelos ensinamentos e experiência compartilhada. Devo a eles grande parte da maturidade profissional e pessoal adquirida nestes anos de estudo e dedicação. Entre todas as pessoas que gostaria mencionar, devo escolher só algumas por sua valiosa contribuição com o desenvolvimento e encerramento desta pesquisa, além do carinho: Eliana Pantaleão, Rogério Ribeiro Marinho, Sergio Rossini, Alexandre Copertino Jardim, Eymar Lopes, Carolina Moutinho Duque de Pinho, Giovana Mira de Espindola, Andressa D'Agostini Silva, Haron e Maristela Xaud, Allan Yu Iwama de Mello, Clódis Andrades Filho e Vassiliki Boulomytis. A todas elas, Namasté.

Gratidão enorme às belas e amorosas Thamy Gioia, Liliam César de Castro Medeiros, Regina Nakamura e a todas as maravilhosas do círculo de mulheres e da Clínica Flor de Lótus, que trazem cura, leveza e alegria à minha vida. Agradeço a Denílson Ribeiro Viana, meu surpreendente amor, que acredita em mim, me apoia sempre e contribui com o desenvolvimento da minha pesquisa. Por fim dedico um agradecimento especial aos meus pais, a minha família e meus amigos na Colômbia, pelo carinho persistente e pela torcida.

RESUMO

Esta pesquisa apresenta a aplicação de dados de Modelo Digital de Elevação (MDE) da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) na delimitação automática de planícies de inundação na bacia hidrográfica do rio Itajaí, Santa Catarina, que pode contribuir com mapeamentos em escalas entre 1:100.000 e 1:250.000. Mostra-se o processo de extração de informações topográficas de caráter regional a partir desses dados e o potencial da altura topográfica como indicadora de planícies de inundação. Na falta de dados de controle apropriados, foi necessário o desenvolvimento de uma metodologia para a delimitação manual de planícies de inundação pelo uso de recursos disponíveis em Google Earth. A precisão foi avaliada por tabela de contingência para dados dicotômicos (2x2) para selecionar o limiar de fatiamento da altura topográfica adequado à delimitação das planícies e para determinar a escala na qual melhor respondem os resultados. O experimento mostrou que, na área de estudo, a altura pode ser fatiada na faixa entre 8m e 13m e o ajuste entre o dado de controle e o dado automático se manteve constante e independente da escala. Observou-se que as planícies de inundação estão distribuídas em várias faixas de elevação. Foi conduzida uma análise de lineamentos estruturais cujos resultados sugerem origem tectônica na criação de espaços de acomodação de sedimentos e, conseqüentemente, na formação das planícies de inundação em várias faixas de altitude na bacia. A partir de métricas da drenagem, foi analisado o potencial de inundação das sub-bacias, sem resultados satisfatórios. Porém, a partir da análise da distribuição dos solos e do perfil longitudinal do canal principal das sub-bacias foi possível concluir que a região tem alto potencial de inundação. Em paralelo, foi analisada a distribuição territorial da área construída de cidades localizadas sobre as planícies de inundação e próximas ao canal principal das sub-bacias para verificar seu grau de exposição a inundações. Foi observado que pelo menos 24 cidades da bacia do Itajaí estão expostas a inundações ou alagamentos em algum nível de gravidade, que não pode ser determinado no escopo desta pesquisa. As observações sugerem que devem ser consideradas prioritárias investigações mais detalhadas sobre exposição a inundações em todas as 24 cidades, com destaque para Rio do Sul, Apiuna, Blumenau, Itajaí e Navegantes, devido à maior área de contribuição nesses locais, diretamente relacionada com maior volume de água e sedimento potencialmente danoso para sua população.

FLOODPLAINS MAPPING FROM SRTM DATA: CONTRIBUTIONS TO FLOODS EXPOSURE ANALYSIS IN RIVER BASIN ITAJAÍ

ABSTRACT

This research shows the application of Shuttle Radar Topography Mission model (SRTM) data for the automatic delineation of floodplains in the Itajaí river basin, Santa Catarina, which can help mapping at scales between 1:100.000 and 1:250.000. It is shown that the process of extracting topographic regional information from DEM (Digital Elevation Model) and the potential of the topographic height as an indicator of floodplains. In the absence of appropriate control data, it was necessary to develop a methodology for the manual delineation of floodplains by using resources available on Google Earth. The accuracy was evaluated through 2x2 contingency table for dichotomous data for both selecting the appropriate threshold of the topographic height for floodplain delimitation and determining the scale at which best results are obtained. The experiment showed that, in the study area, the topographic height could be sliced in the range between 8m and 13m and the fit between data control and automatic data remained constant and scale-independent. It was observed the floodplains are distributed in various ranges of elevation. An analysis of structural lineaments was conducted and the results suggest tectonic origin in the creation of accommodation spaces for sediment inflow and subsequent formation of floodplains in several elevation ranges within the basin. The sub-basin inundation potential was evaluated through the analysis of drainage metrics, without satisfactory results. In contrast, by the analysis of the occurring soils and the distribution of the main sub-basin longitudinal channel profile, it was possible to conclude that the region has high flood potential. In parallel, we analyzed the distribution of constructed area in cities located on the floodplains and near to the main channel of the sub-basins, to verify the exposure to floods. It was observed that at least 24 cities in the Itajaí basin are exposed to floods or urban floods in some level of severity, which cannot be determined in the extent of this research. The observations suggest that more priority should be given for detailed investigations of exposure to flood events in all those 24 cities, especially to Rio do Sul, Apiuna, Blumenau, Itajaí and Navegantes, because of the major contribution area related to these sites, which is directly related to a higher volume of water and sediment potentially harmful to its population.

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| Figura 1.1 - Mudanças de vazão dos rios em função da cobertura do solo. | 2 |
| Figura 3.1 – Distribuição proporcional de desastres por tipo de fenômeno deflagrador | 12 |
| Figura 3.2 – Distribuição da malha urbana e de ocorrências de inundações na bacia | 14 |
| Figura 3.3 - Componentes de um sistema fluvial hipotético..... | 17 |
| Figura 3.4 – Planície de Inundação: bloco diagrama de sistema fluvial meandrante..... | 18 |
| Figura 3.5 - Padrões da drenagem controlados pela estrutura ou a declividade..... | 20 |
| Figura 3.6 - Esquema gráfico das informações do banco de dados Topodata. | 24 |
| Figura 3.7 - Esquema simplificado das variáveis topográficas regionais do banco Toporeg..... | 25 |
| Figura 3.8 - Resolução de grade regular e escala de mapeamento em SIG. | 26 |
| Figura 3.9 - Hierarquia taxonômica das formas geomorfológicas..... | 27 |
| Figura 3.10 - Tabela de contingência para dados dicotômicos, matriz 2×2 | 28 |
| Figura 4.1 – Localização da bacia do rio Itajaí.. | 31 |
| Figura 4.2 – Sub-bacias, canais principais e barragens da bacia do rio Itajaí. | 32 |
| Figura 4.3 - Normais da precipitação na estação Indaial, 1961 – 1990. | 34 |
| Figura 4.4 – Arcabouço geológico da bacia do rio Itajaí..... | 36 |
| Figura 4.5 - Geomorfologia da bacia do rio Itajaí. | 37 |
| Figura 4.6 – Altitudes da bacia do rio Itajaí: MDE. | 38 |
| Figura 4.7 - Solos da bacia do rio Itajaí..... | 39 |
| Figura 5.1 - Metodologia para delimitação de planícies de inundação..... | 44 |
| Figura 5.2 – Detalhe de recursos usados na delimitação manual.. | 45 |
| Figura 5.3 - Metodologia para obtenção de variáveis topográficas regionais | 46 |
| Figura 5.4 - Metodologia para extração de informações geomorfométricas das planícies | 48 |
| Figura 5.5 - Metodologia para o cálculo de informações morfométricas da drenagem | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 6.1 - Resultado da delimitação manual de planícies de inundação nas subáreas. | 52 |
| Figura 6.2 - Detalhe da topografia regional das planícies de inundação em Itajaí..... | 54 |
| Figura 6.3 - Variáveis topográficas regionais em Taió, obtidas a partir da altitude | 55 |
| Figura 6.4 - Dispersão das variáveis: altura, altitude e amplitude | 56 |
| Figura 6.5 - Dispersão das variáveis: dissecação, elevação-relevo e predominância | 58 |
| Figura 6.6- Detalhe da topografia local das planícies de inundação em Itajaí. | 59 |
| Figura 6.7 – Processamento para delimitação de planícies de inundação..... | 60 |
| Figura 6.8 - Curvas da tabela de contingência para avaliação do fatiamento..... | 61 |
| Figura 6.9 - Planície de inundação na subárea Taió | 62 |
| Figura 6.10 – Carta enchente sobreposta à planície de inundação..... | 63 |
| Figura 6.11 - Curvas da tabela de contingência para avaliação da escala | 64 |
| Figura 6.12 - Planícies de inundação na subárea Taió em três resoluções | 65 |
| Figura 6.13 - Detalhe de escala na delimitação de planícies de inundação. | 65 |
| Figura 6.14 – Rede da drenagem | 66 |
| Figura 6.15 – Perfil de altitude no canal principal das sub-bacias do rio Itajaí | 69 |
| Figura 6.16 – Lineamentos morfoestruturais..... | 70 |
| Figura 6.17 – Diagramas de roseta de lineamentos morfoestruturais..... | 71 |
| Figura 6.18 – Área exposta à inundação nas subáreas | 73 |
| Figura 6.19 – Área construída sobreposta à planície de inundação..... | 74 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|--------------------|
| Tabela 3.1 – Relação de perdas por eventos naturais no Brasil, período 1900-2014. | 11 |
| Tabela 3.2 - Municípios que pertencem ao Comitê da bacia do rio Itajaí. | 15 |
| Tabela 3.3 - Métricas da drenagem indicadoras de susceptibilidade a inundação. | 19 |
| Tabela 3.4 -Variáveis topográficas locais do banco de dados Topodata. | 23 |
| Tabela 3.5 - Variáveis topográficas regionais do banco de dados Toporeg. | 25 |
| Tabela 6.1 - Métricas da drenagem obtidas para a bacia do rio Itajaí e sub-bacias. | 67 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|----------|---|
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| CPRM | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais |
| DNAEE | Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| EM-DAT | <i>International Disaster Database</i> |
| EPAGRI | Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina |
| FATMA | Fundação do meio ambiente, Santa Catarina |
| GE | <i>Google Earth</i> |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| JPL | <i>Jet Propulsion Laboratory</i> |
| KML | <i>Keyhole Markup Language</i> (em Google Earth) |
| LANDSAT | <i>Program for acquisition of satellite imagery of Earth</i> |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| NBR | Norma Brasileira |
| SIBCS | Sistema Brasileiro de Classificação de Solos |
| PEC | Padrão de Exatidão Cartográfica |
| SIG | Sistemas de Informação Geográfica |
| SR | Sensoriamento Remoto |
| SRTM | <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> |
| TOPODATA | Banco de dados geomorfométricos do Brasil |
| TOPOREG | Banco de dados de variáveis topográficas regionais (esta pesquisa) |

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|--------|---|
| 1 | INTRODUÇÃO 1 |
| 1.1. | Importância das planícies de inundação 1 |
| 1.2. | Danos decorrentes de inundação 2 |
| 1.3. | Importância de se estudar planícies de inundação por sensoriamento remoto (SR) 3 |
| 2 | OBJETIVOS..... 7 |
| 2.1. | Objetivos específicos do desenvolvimento 7 |
| 3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... 9 |
| 3.1. | Risco de inundação 9 |
| 3.1.1. | Perigo de inundação: Brasil no âmbito global..... 11 |
| 3.1.2. | Perigo de inundação: Itajaí no âmbito do Brasil 12 |
| 3.1.3. | População afetada por inundação na bacia do rio Itajaí..... 14 |
| 3.2. | O sistema fluvial no estudo de inundação 16 |
| 3.2.1. | Planícies de inundação 18 |
| 3.2.2. | Indicadores morfométricos de susceptibilidade a inundação 19 |
| 3.3. | Mapeamento de planícies de inundação com recursos de SIG e SR 21 |
| 3.3.1. | Modelagem do relevo em SIG a partir de dados de SR..... 22 |
| 3.3.2. | Escala de produtos cartográficos em SIG..... 25 |
| 3.3.3. | Avaliação de produtos cartográficos em SIG 28 |
| 4 | ÁREA DE ESTUDO 31 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.1. | Localização | 31 |
| 4.2. | Clima | 33 |
| 4.3. | Arcabouço geológico | 34 |
| 4.4. | Geomorfologia | 37 |
| 4.5. | Altitude | 38 |
| 4.6. | Solos | 39 |
| 5 | MATERIAL E MÉTODOS | 42 |
| 5.1. | Dados e recursos de processamento | 42 |
| 5.2. | Delimitação de planícies de inundação | 43 |
| 5.2.1. | Delimitação manual | 44 |
| 5.2.2. | Delimitação automática | 45 |
| 5.2.3. | Análise da dispersão topográfica | 48 |
| 5.3. | Análise da susceptibilidade da bacia e da exposição da população..... a inundações..... | 48 |
| 5.3.1. | Caracterização morfométrica da drenagem | 49 |
| 5.3.2. | Interpretação e traçado de lineamentos morfoestruturais | 50 |
| 5.3.3. | Análise da exposição à inundação..... | 50 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 51 |
| 6.1. | Delimitação de planícies de inundação..... | 51 |
| 6.1.1. | Delimitação manual | 51 |
| 6.1.2. | Seleção de variável indicadora de planícies fluviais..... | 53 |
| 6.1.3. | Delimitação automática | 60 |
| 6.2. | Análise da susceptibilidade da bacia e da exposição da população..... a inundações..... | 66 |

| | | |
|--------|---|----|
| 6.2.1. | Fatores hidrológicos da susceptibilidade | 66 |
| 6.2.2. | Fatores geológicos e pedológicos da susceptibilidade..... | 68 |
| 6.2.3. | Análise da exposição à inundação..... | 72 |
| 7 | CONCLUSÕES..... | 75 |

1 INTRODUÇÃO

1.1. Importância das planícies de inundação

As planícies de inundação (*floodplain* em inglês; várzeas na toponímia popular brasileira) são unidades homogêneas da paisagem que desempenham um importante papel ambiental. Funcionam, por exemplo, como corredores ecológicos, como abrigo de espécies endêmicas de ecossistemas terrestres e aquáticos e como fornecedoras de grande diversidade de serviços ecossistêmicos e de recursos naturais.

Planícies naturais (não desflorestadas nem urbanizadas) dissipam as forças erosivas do escoamento superficial; a água e os sedimentos transportados pelos rios distribuem-se na superfície criando condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas. A riqueza natural desses ambientes atrai sua exploração, e, ao mesmo tempo sua topografia plana estimula a urbanização. Em consequência, apresentam-se situações de conflito entre o potencial de uso do solo e seu uso efetivo, que afetam os ciclos naturais e se constituem em perigo de desastre para a sociedade, em contraste com a necessidade de preservar esses ecossistemas (SBPC; ABC, 2011; COUTO et al., 2010; RENÓ et al., 2011; PINEDO-VASQUEZ; SEARS, 2011). Como se observa na Figura 1.1, entre as consequências imediatas da urbanização dessas áreas está o aumento da vazão dos rios, que aumenta a probabilidade de inundação (YATES et al., 2003).

Países em desenvolvimento, como o Brasil, estão em fase de urbanização em ritmo acelerado. Muitas das suas cidades principais foram criadas para funcionar como postos comerciais regionais ou centros administrativos do poder colonial. Por tal motivo, é possível pensar que a localização dessas cidades foi definida em termos econômicos e não físicos. Assim, elas se distribuem em uma ampla gama de condições ambientais inadequadas, como, por exemplo, planícies aluviais e pântanos costeiros (GUPTA; AHMAD, 1999).

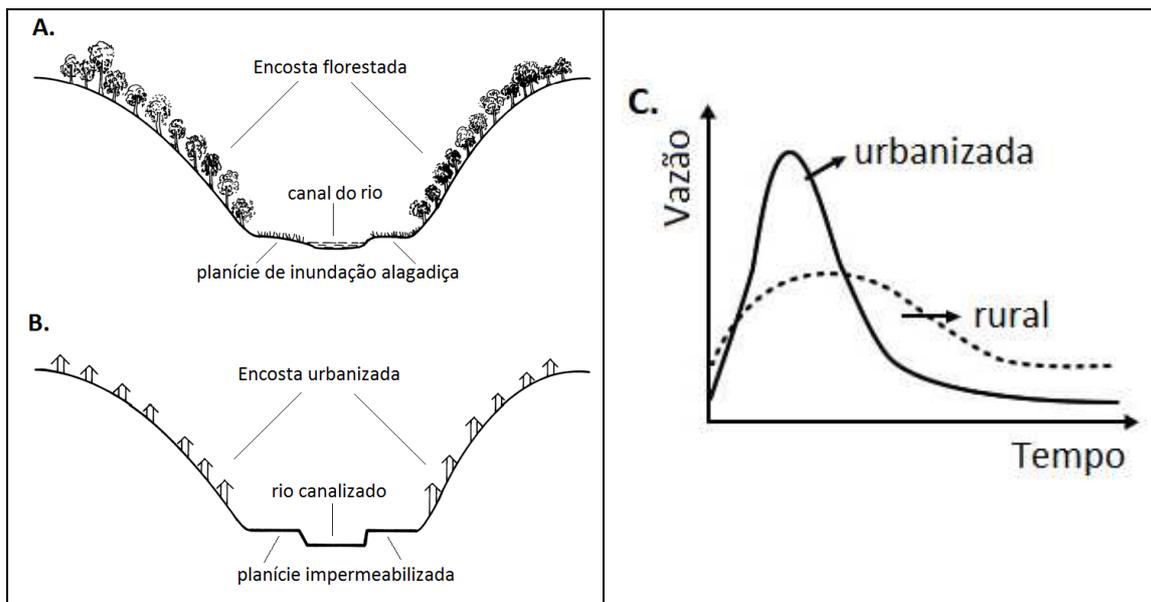


Figura 1.1 - Mudanças de vazão dos rios em função da cobertura do solo.

A) Estágio pré-urbanização. B) Estágio pós-urbanização. C) Curva chave.

Fonte: Adaptada de Gupta e Ahmad (1999).

1.2. Danos decorrentes de inundação

Nesta pesquisa foram consultados dados do Banco Internacional de Dados de Desastres (*International Disaster Database*, EM-DAT) do Centro para a Pesquisa Sobre Epidemiologia de Desastres (*Center for Research on the Epidemiology of Disasters*, CRED). Observou-se que, entre todos os tipos de fenômenos naturais considerados em EM-DAT como deflagradores de desastres, as inundações causaram a maior proporção de perdas materiais e humanas, em âmbito global, no período de 1900 a 2014. Nesse banco de dados consta que as inundações reportadas nesse mesmo período pelo Brasil (121) representaram perdas de quase 9 bilhões de dólares para o país, mais de 19 milhões de pessoas afetadas e quase 8 mil óbitos (CRED, 2014). Esta tendência do impacto das inundações sobre a população no Brasil foi constatada no Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2012a; 2012b) e no Anuário Brasileiro de Desastres Naturais (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2012; 2013). Nestes dois documentos, que apresentam o resultado de pesquisas recentes sobre a distribuição e comportamento dos desastres no âmbito nacional, se observa ainda que as regiões sul e sudeste foram as mais afetadas por inundações no período de 1991 a 2012.

Na região sul do Brasil, destaca-se a bacia do rio Itajaí pela quantidade de desastres decorrentes de inundações ocorridas ao longo de sua história de ocupação (AUMOND et al., 2009; CEPED, 2012b). Os primeiros registros datam de 1850; em um período de 160 anos foram registradas mais de 70 ocorrências, entre as que sobressaem os episódios de 1911, 1983, 2008 e 2011. Dados da Defesa Civil, consultados no início desta pesquisa, mostram que, em 2011, 43 dos 50 municípios da bacia foram afetados por inundações e 32 deles decretaram situação de emergência, com alagamentos em mais de 50% de sua área urbana.

1.3. Importância de se estudar planícies de inundação por sensoriamento remoto (SR)

A delimitação e mapeamento de planícies de inundação podem contribuir de forma substancial: (i) em pesquisas ecológicas e sobre as componentes do meio físico de todo o sistema fluvial; (ii) na avaliação da exposição da população a inundações; e (iii) na criação de políticas públicas que visem sua proteção e manejo. Desenvolvimentos metodológicos que incorporam dados de sensoriamento remoto (SR) e utilizam recursos de sistemas de informação geográfica (SIG) apresentam resultados promissores para este tipo de estudos em escalas local, nacional e global (COBBY et al., 2001; SHIMABUKURO; NOVO, 2002; STRYKER; JONES, 2009; COUTO et al., 2010; SHAN et al., 2010; RENÓ et al., 2011; RUDOFF et al., 2012; WESTERHOFF et al., 2012).

Muitos dos trabalhos com aplicação de dados de SR incluem o mapeamento de planícies a partir de elementos da superfície, como, por exemplo, vegetação ripária, que as indicam indiretamente. É o caso do mapeamento de áreas de preservação permanente (APP) obtido pelo processamento de imagens de sensores óticos. Este tipo de mapeamento é indicado para áreas naturais ou rurais, mas restrito em áreas urbanizadas e ou impermeabilizadas, pois nestas últimas a vegetação, indicadora de planícies, pode ter sido removida. Outro enfoque que utiliza recursos de SR e SIG é o mapeamento de áreas já inundadas ou alagadas a partir de dados de radar. Este é um recurso valioso de apoio a atividades de atenção a emergências em locais carentes de mapeamentos prévios (MARINHO et al., 2012).

Em etapas prévias a emergências, é necessário dispor de mapeamentos que proporcionem informação sobre as condicionantes naturais a inundação, com o intuito de contribuir com a

preparação da população exposta a esse tipo de perigo. A preparação inclui atividades de prognóstico de ocorrências, o planejamento da resposta à emergência e de atividades de recuperação, assim como a articulação das instituições de proteção como a Defesa Civil e o Corpo de Bombeiros. Da mesma forma, sistemas de monitoramento dos eventos naturais deflagradores de inundação, como chuvas intensas, precisam desse mapeamento para modelar cenários de inundação e emitir as alertas correspondentes.

As condicionantes naturais a inundação são o regime de precipitação, que controla a quantidade de água que entra no sistema fluvial, por período do ano; o tipo de solo, que determina a capacidade de retenção e transporte da água, a disponibilidade de nutrientes assim como o tipo e a distribuição da vegetação; a geologia, que controla a configuração da rede da drenagem, a sedimentação e o desenvolvimento e distribuição do solo; e o relevo, que reflete o tipo e distribuição espacial de quase todas as outras condicionantes, exceto a precipitação. Assim, esperam-se contribuições importantes da modelagem da superfície topográfica para mapeamento de planícies de inundação.

Os dados usados para modelagem do relevo em ambiente computacional são modelos digitais de elevação (MDE), essencialmente, cujas fontes podem ser diversificadas quanto à forma de levantamento topográfico (desde levantamento por teodolito até aquisição por sensoriamento remoto) e preparação do modelo (fotogrametria, interferometria, geoestatística, etc.). A disponibilidade de MDEs de cobertura global oriundos de SR tem motivado o desenvolvimento de métodos quantitativos para análise do relevo em grande escala. Por exemplo, a liberação de dados da missão topográfica por radar interferométrico *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), motivou o desenvolvimento do banco de dados Topodata, que disponibilizou um conjunto de variáveis topográficas locais, em resolução 30m, para todo o Brasil (INPE, 2008; VALERIANO, 2008).

O potencial dos dados topográficos para análise ambiental depende da relação entre a escala em que ocorrem os processos do meio físico e a escala do MDE (GUISAN; ZIMMERMANN, 2000). Diversas pesquisas têm verificado que o MDE-SRTM atende a mapeamentos em escalas que variam de 1:100.000 a 1:250.000 (RABUS et al., 2003; RODRÍGUEZ et al., 2005; 2006; SLATER et al., 2006; ZANDBERGEN, 2008). Portanto, espera-se que seus produtos derivados, como os Topodata, atendam a mapeamentos nas mesmas escalas. Nessas escalas, a topografia e a rede

de drenagem refletem efeitos de processos que operam sobre longos períodos de tempo, como na formação de planícies de inundação (DIKAU, 1990).

Em análise exploratório dos dados topográficos para esta pesquisa, o perigo de inundação na bacia do rio Itajaí pode ser observado a priori ao mapear os setores censitários do IBGE (2010b) e "cartas enchente" do Departamento Nacional de Energia Elétrica (DNAEE, ano desconhecido) sobre os produtos Topodata: declividade em classes Embrapa (Sc) e curvatura vertical em cinco classes (V5). Verificou-se notável correlação espacial entre áreas planas, áreas mapeadas como inundáveis e áreas urbanizadas. Assim, pela só observação destes dados, reconheceram-se áreas suscetíveis e expostas a inundação distribuídas por toda a bacia.

2 OBJETIVOS

Esta pesquisa teve por objetivo principal desenvolver uma metodologia para delimitação de planícies de inundação na bacia do rio Itajaí, Santa Catarina, a partir de dados de elevação disponíveis no Topodata. Com isto, espera-se contribuir com o mapeamento automático de áreas inundáveis em escalas de 1:100.000 a 1:250.000, e ainda com estudos sobre exposição a inundações. Este trabalho é favorecido pela disponibilidade de dados de elevação homogêneos para toda a área de estudo e pela potencialidade desses dados para o mapeamento de unidades da paisagem nas escalas pretendidas da pesquisa.

2.1. Objetivos específicos do desenvolvimento

1. Propor metodologia para obtenção manual do dado de controle à delimitação automática de planícies de inundação, que atenda às especificações de qualidade indicada para a escala cartográfica pretendida no estudo;
2. Identificar, dentro de um conjunto de opções de variáveis topográficas locais e regionais, aquela a partir da qual poderiam ser delimitadas melhor as planícies de inundação de forma automática em ambiente SIG;
3. Propor metodologia para tratamento da variável identificada, que inclui atividades de preparação, processamento, pós-processamento e controle dos resultados; e
4. Discutir a susceptibilidade a inundações na bacia do rio Itajaí, em termos de suas condicionantes topográficas, geológicas e pedológicas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Risco de inundação

Entende-se por desastre natural ao conjunto de perdas humanas, materiais e ambientais deflagradas por um fenômeno natural. O risco de inundação é a probabilidade de acontecer um desastre natural como consequência de uma inundação. As perdas são indesejáveis, mas inerentes a projetos urbanos desenvolvidos em território susceptível a inundação, portanto suas causas devem ser identificadas e soluções devem ser previstas.

À maneira do gerenciamento de projetos de engenharia (Valeriano, 1998), o gerenciamento de riscos naturais é necessário ao planejamento urbano. Sua finalidade é administrar informação sobre componentes desses riscos, de forma a promover um ambiente favorável ao investimento econômico e à sustentabilidade ambiental. No modelo para a estimativa de risco de desastres adotado pelas Nações Unidas (VARNES, 1984; UNITED NATIONS, 2011), contemplam-se dois aspectos condicionantes: a componente humana, determinada por fatores de vulnerabilidade, e a componente física, determinada por fatores de ameaça (ou perigo), como se observa a seguir, nas Equações 3.1 e 3.2.

$$RT = E \times \Sigma RS \quad (3.1)$$

$$RS = E \times H \times V \quad (3.2)$$

em que:

- **RT. Risco total.** Perdas humanas, pessoas afetadas, danos materiais, ou perturbação da atividade econômica, esperadas em decorrência da somatória de fenômenos (de origem natural, sócio-natural ou tecnológico) potencialmente perigosos;
- **Rs. Risco específico.** Conjunto de perdas esperadas em decorrência de um fenômeno específico potencialmente perigoso;
- **V. Vulnerabilidade.** Componente humana do risco. É o conjunto de condições que determina o impacto, sobre as populações, de perdas decorrentes de fenômenos perigosos. Os conceitos “elementos expostos” e “resiliência” estão ligados ao conceito de vulnerabilidade. O primeiro faz referência tanto ao indivíduo humano como aos objetos e paisagens desenvolvidas por ele. A resiliência (HOLLING, 1973) indica a capacidade da população de responder ao fenômeno, de absorver o dano e de se recuperar das perdas;

- **E. Exposição.** Pode ser definida como a correlação espacial entre o elemento exposto e o perigo, observados em uma escala específica (SGCA, 2009);
- **H. Ameaça ou perigo** (*Hazard* em inglês). Componente física do risco. É um fenômeno, ou conjunto de fenômenos, de origem natural, sócio natural ou tecnológico, potencialmente perigosos para uma população. A ameaça pode ser biológica (epidemias), hidrológica (inundações, movimentos de massa úmida), climática (temperaturas extremas, secas, queimadas florestais), meteorológica (tempestades, tornados) e geofísica (terremotos, erupções vulcânicas, movimentos de massa seca) (GUHA-SAPIR et al., 2011).

No estudo específico de ameaças naturais, são avaliadas duas componentes: o conjunto de condicionantes do meio físico, relacionadas à susceptibilidade, e o período de retorno do evento específico. Embora nossa pesquisa focalizasse na avaliação de condicionantes do meio físico a inundação, a motivação do estudo esteve fundamentada em dois aspectos: (i) na frequência de inundações na região sul do Brasil, observada em registros do banco de dados internacional de desastres EM-DAT, do Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres (CEPED), do Ministério da Integração Nacional e da Defesa Civil Brasileira; e (ii) na exposição a inundações observada na bacia do rio Itajaí, localizada nessa região.

Inventários sistemáticos de desastres, baseados em metodologias padronizadas e de acesso livre, são de importância fundamental para verificação da frequência desses desastres e para previsão de períodos de retorno das ameaças naturais. O banco de dados internacional de desastres EM-DAT proporciona informações desse tipo em escala global. São registrados nesse banco, desde 1988, eventos com pelo menos uma das seguintes características: dez ou mais pessoas mortas, 100 ou mais pessoas afetadas, declaração de estado de emergência ou solicitação de assistência internacional.

Para estudos no âmbito nacional compatíveis com as especificações internacionais, o Brasil se propôs desenvolver classificação própria de desastres com base em critérios da classificação EM-DAT. Assim, em 2012 a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC) passou a adotar a Codificação Brasileira de Desastres – COBRADE (MINISTERIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2012). Na classificação COBRADE inundações, enxurradas e alagamentos são tidos como desastres naturais hidrológicos, como apresentado a seguir. Note-se que nesta classificação não foi considerado o conceito de enchente.

Inundação. Submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas em áreas de planície.

Enxurrada. Escoamento superficial de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente em pequenas bacias de relevo acidentado. Caracterizada pela elevação súbita das vazões de determinada drenagem e transbordamento brusco da calha fluvial. Apresenta grande poder destrutivo.

Alagamento. Extrapolação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem urbana e consequente acúmulo de água em ruas, calçadas ou outras infraestruturas urbanas, em decorrência de precipitações intensas.

Observa-se que, na codificação COBRADE, o evento ainda é tido como desastre, mas é necessário destacar que uma inundação (ou qualquer outra ameaça natural) não é desastre, mas um fenômeno natural que pode deflagrar perdas humanas, materiais e ambientais.

3.1.1. Perigo de inundação: Brasil no âmbito global

Os registros EM-DAT do período 1900-2014 mostram que o perigo de inundação é o mais frequente entre os tipos de ameaça natural considerados nesse banco de dados (Figura 3.1). Nesse período foram registradas 121 inundações ocorridas no Brasil, que resultaram em 7.753 óbitos, 19.089.166 afetados e perdas materiais que representaram um custo total acumulado de U\$8.962.254.000. Constatou-se, a partir dessa informação, que as inundações são uma das causas principais de desastre natural no território brasileiro (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Relação de perdas por eventos naturais no Brasil, período 1900-2014.

| Fenômeno deflagrador (tipo) | # Registros | # Óbitos | # Afetados | Custo (000 US\$) |
|-----------------------------|-------------|----------|------------|------------------|
| Inundação | 121 | 7.753 | 19.089.166 | 8.962.254 |
| Movimento de massa úmida | 23 | 1.656 | 4.237.484 | 86.027 |
| Tempestade | 18 | 352 | 226.956 | 531.000 |
| Seca | 17 | 20 | 47.812.000 | 6.183.100 |
| Epidemia | 16 | 2.217 | 1.982.376 | 0 |
| Temperatura extrema | 8 | 355 | 600 | 1.075.000 |
| Queimada | 3 | 1 | 12.000 | 36.000 |
| Abalo sísmico | 2 | 2 | 23.286 | 5.000 |
| Infestação de insetos | 1 | 0 | 2.000 | 0 |

Fonte: EM-DAT (CRED, 2014).

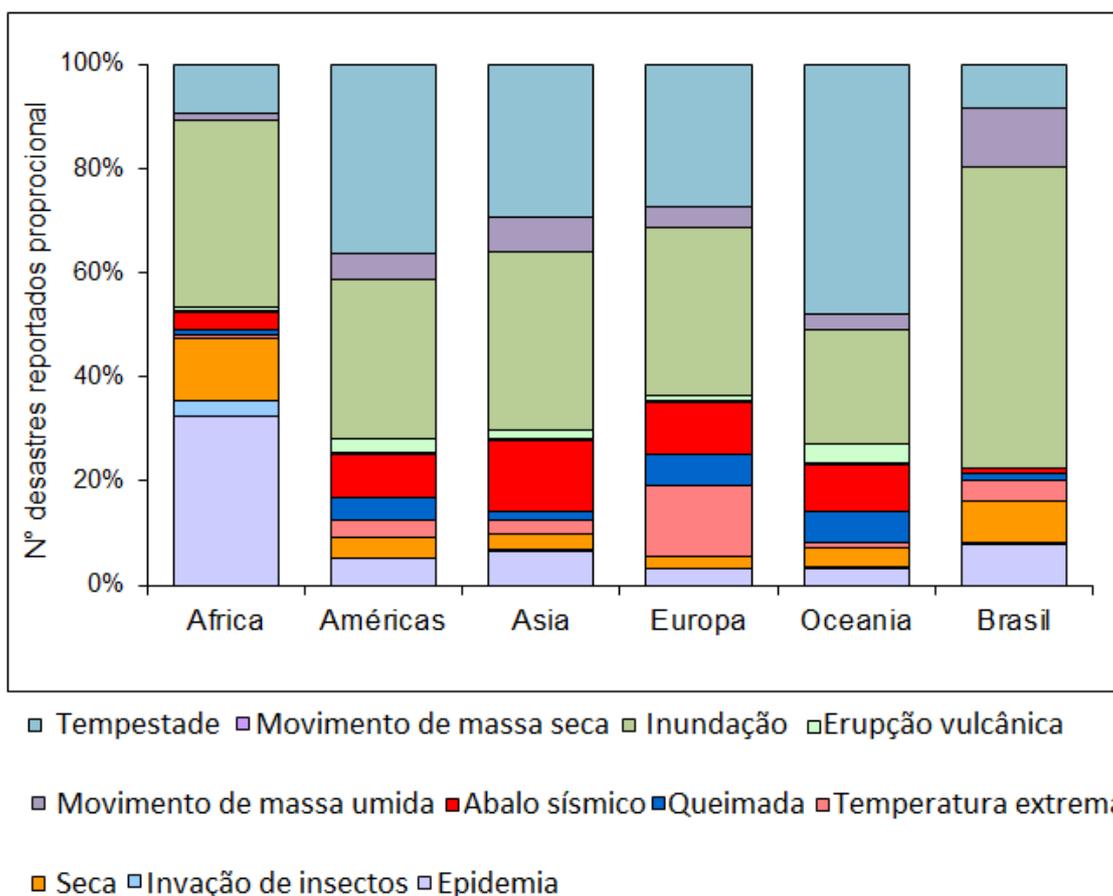


Figura 3.1 – Distribuição proporcional de desastres por tipo de fenômeno deflagrador
 Fonte: Figura composta a partir de dados EM-DAT, período 1900-2014.
 (CRED, 2014).

3.1.2. Perigo de inundação: Itajaí no âmbito do Brasil

As informações oficiais atualizadas sobre ocorrência de desastres no Brasil constam no Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, período 1991-2010 (CEPED, 2012a; 2012b), e no Anuário Brasileiro de Desastres Naturais 2011 e 2012 (MINISTERIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2012; 2013). Uma vez que a classificação COBRADE é mais recente do que estes documentos, são esperadas algumas imprecisões conceituais que poderiam ter influenciado essas pesquisas e comprometido à comparação entre o Atlas, o Anuário e os registros EM-DAT. No entanto, destaca-se a grande contribuição e pioneirismo destes empreendimentos para a pesquisa de desastres no Brasil. Mas chama a atenção o fato de, nesses documentos, não ter sido referida informação sobre o custo das perdas, dado muito necessário para a gestão de risco no país.

Na composição do Anuário de desastres, versões 2011 e 2012, foram considerados eventos no âmbito nacional com, pelo menos, uma das seguintes características: um ou mais óbitos, 50 ou mais afetados, declaração de situação de emergência ou declaração de estado de calamidade pública. A partir desses dados observaram-se as seguintes tendências nacionais: (i) predomínio de desastres decorrentes de fenômenos hidrológicos, no período de verão, sobre os outros tipos de fenômeno considerados no Anuário; e (ii) destaque das regiões Sul e Sudeste pelo número de eventos registrados e de pessoas afetadas por fenômenos hidrológicos.

Os dados do Atlas, volume Brasil, (CEPED, 2012a), que se referem a um período de 20 anos (1991-2010), mostram que as inundações são o tipo de ameaça mais recorrente no Brasil, depois da seca, e que causa o maior número de óbitos. As mesorregiões mais afetadas por inundações nesse período foram o Sudeste, o Sul e o Nordeste. Entre estas três, a região Sul destacou-se pelo número de registros de ocorrência: 832 inundações e 3195 alagamentos, sobretudo o Estado de Santa Catarina, com um total de 1578 registros. As inundações na região Sul refletem uma sazonalidade relativa ao regime pluviométrico, com maior recorrência nos meses de primavera e verão, Agosto até Janeiro, e picos em Setembro e Janeiro.

Os dados do Atlas, volume Santa Catarina, (CEPED, 2012b) as inundações prevalecem como a causa de desastre mais recorrente no Estado, totalizando 40% dos registros do período 1991-2010. O maior número de ocorrências foi registrado entre os meses de primavera e verão, o que evidencia mais uma vez a sazonalidade do fenômeno. A região mais afetada por inundações no Estado nesse período foi a bacia do rio Itajaí.

Em estudos e fontes locais de dados sobre desastres na bacia do rio Itajaí (por exemplo, AUMOND et al., 2009; GPCG, 1986; SEVERO, 1994 e 2009; ALVES, 2013; e SNDC, 2011), verifica-se que há registros de inundações que afetaram a população nessa bacia desde a década de 1850, nos primórdios da colonização. Tomando como referência o município de Blumenau, em um período de 160 anos foram registradas aproximadamente 70 ocorrências. Os episódios de 1911, 1983, 1984, 2008 e 2011 se destacam no registro histórico por terem provocado inundações excepcionais associadas a fenômenos meteorológicos extremos e à destruição de áreas significativas da infraestrutura rural e urbana em toda a bacia do rio Itajaí.

3.1.3. População afetada por inundação na bacia do rio Itajaí

Uma observação mais apurada que considere tanto as ocorrências de inundação na bacia do rio Itajaí como a população afetada, permite dimensionar *a priori* a exposição ao perigo de inundação na bacia. Na Figura 3.2 apresenta-se o mapa da distribuição geográfica de municípios localizados na bacia que foram afetados por inundação em 2011. Entre os episódios considerados mais destrutivos na região, este é o mais recente, e aconteceu a exatamente 100 anos de aquele ocorrido em 1911. Foi deflagrado por chuvas intensas entre os dias 7 e 9 de setembro de 2011, e favorecido por valores de precipitação acima da média nos meses precedentes. Entre os 50 municípios localizados na bacia (Tabela 3.2), 43 reportaram-se afetados e 32 decretaram situação de emergência ou estado de calamidade pública, com alagamentos em mais de 50% de sua área urbana (ALVES, 2013; SNDC, 2011).

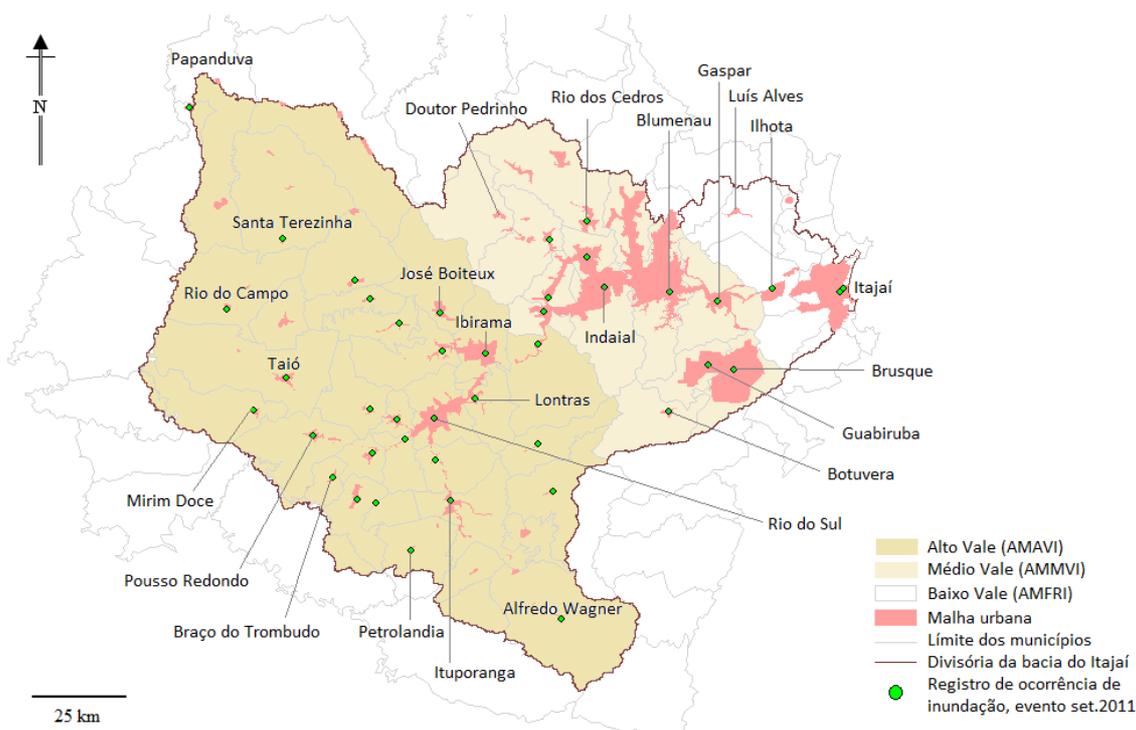


Figura 3.2 – Distribuição da malha urbana e de ocorrência de inundações na bacia do rio Itajaí. Os cinquenta municípios da bacia estão associados em três microrregiões administrativas: Alto Vale do Itajaí (AMAVI), Médio Vale do Itajaí (AMMVI) e Foz do Itajaí (AMFRI).

Fonte: Mapa composto a partir de dados do Comitê da Bacia do rio Itajaí (2010), da Secretaria Nacional de Defesa Civil (SNDC, 2011), do IBGE (2010a) e do Comitê da Bacia do Rio Itajaí (CBRI, 1998).

Tabela 3.2 - Municípios que pertencem ao Comitê da bacia do rio Itajaí.

| | | | |
|-------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 1. Agrolândia | 14. Dona Emma | 27. Lontras | 40. Rio do Sul |
| 2. Agronômica | 15. Doutor Pedrinho | 28. Luís Alves | 41. Rio dos Cedros |
| 3. Alfredo Wagner | 16. Gaspar | 29. Mirim Doce | 42. Rodeio |
| 4. Apiúna | 17. Guabiruba | 30. Navegantes | 43. Salete |
| 5. Ascurra | 18. Ibirama | 31. Penha | 44. Santa Teresinha |
| 6. Atalanta | 19. Ilhota | 32. Petrolândia | 45. Taió |
| 7. Aurora | 20. Imbuia | 33. Piçarras | 46. Timbó |
| 8. Benedito Novo | 21. Indaial | 34. Pomerode | 47. Trombudo Central |
| 9. Blumenau | 22. Itaiópolis | 35. Pouso Redondo | 48. Vidal Ramos |
| 10. Botuverá | 23. Itajaí | 36. Presidente | 49. Vitor Meireles |
| 11. Braço do Trombudo | 24. Ituporanga | Getúlio | 50. Witmarsum |
| 12. Brusque | 25. José Boiteux | 37. Presidente Nereu | |
| 13. Chapadão do Lageado | 26. Laurentino | 38. Rio do Campo | |
| | | 39. Rio do Oeste | |

Fonte: Comitê da Bacia do rio Itajaí (1998)

Na atualidade, a bacia do rio Itajaí é habitada por aproximadamente 1.244.592 pessoas, com densidade populacional de 80,8 hab/km² (IBGE, 2011c). Em Google Earth observa-se que, nessa região, a malha urbana se distribui predominantemente nas planícies de inundação, que ocorrem tanto na serra como no litoral. Observa-se também uso agrícola de áreas planas não urbanizadas. Isto significa alto grau de exposição a inundação da sociedade na bacia.

Desde a época de colonização da bacia do rio Itajaí, em meados do século XIX, teve início o processo de ocupação das suas planícies. A região foi colonizada por imigrantes europeus vindos principalmente de Itália, Bélgica, Alemanha e Portugal. Estes se estabeleceram nas chamadas "terras baixas", consolidando uma cultura de exploração madeireira, desenvolvimento industrial, agrícola e pecuário (SIEBERT, 2009). Pesquisas indicam que a exploração exaustiva da floresta tem agravado o perigo de inundação na bacia, ao contribuir com diminuição da capacidade de infiltração do solo, aumento da vazão dos rios e mudanças significativas do balanço hídrico induzidas pela alteração nos volumes da evapotranspiração (FRANK et al., 2000).

3.2. O sistema fluvial no estudo de inundação

A unidade fundamental de um sistema fluvial é o canal. Este pode ser caracterizado a partir da sua morfometria, relativa às características geométricas de suas componentes, do fluxo de água e de sedimentos, relativo às características da rede da drenagem, ou dos processos de ajuste controlados pelas entradas e saídas do sistema. Quanto aos processos de ajuste, uma bacia hidrográfica pode ser subdividida em três regiões (Figura 3.3): zona de produção de sedimentos nas nascentes, zona de transferência de água e sedimentos nos declives, e zona de deposição de sedimentos ao longo dos canais e nas planícies de inundação (CHARLTON, 2008).

Na zona de produção de sedimentos, delimitada à montante pelo divisor da água, se formam terraços pela ruptura de declives das encostas (Figura 3.3 a e c). Pontos de ruptura do declive funcionam como inflexões retardadoras da velocidade de fluxo, e afetam a distribuição espacial dos sedimentos transportados pelo rio. Na zona de transferência diminui a produção e os sedimentos são transportados pela drenagem ou depositados ao longo do canal. A distribuição das forças de transporte de água e sedimentos é controlada pelo comprimento e a declividade do canal, no perfil longitudinal. Na zona de deposição diminuem a declividade e a energia disponível para o transporte de sedimentos, assim há maior acúmulo desse material (GUERRA, 1994; CRISTOFOLETTI, 1980; 1981).

Na seção transversal do canal fluvial (Figura 3.3 b e d) o talvegue é a linha de maior profundidade onde flui a água em períodos de estiagem; o leito vazante é a capacidade máxima de preenchimento do canal e determina o nível de cheia; o leito menor é marginado pelos diques laterais e determina o nível de enchente, o qual varia sazonalmente com a chuva; e o leito maior configura a planície de inundação do rio, se refere à área plana que é preenchida quando o escoamento superficial atinge um volume excepcional (GUERRA, 1994; CRISTOFOLETTI, 1980; 1981).

A quantidade total instantânea de água que passa por uma seção transversal do rio é conhecida como escoamento superficial (em inglês *run-off*). O tempo de concentração em um ponto é o tempo necessário para que toda a área à montante contribua para o escoamento superficial na seção considerada. O escoamento superficial varia ao longo do ano entre os níveis de estiagem, cheia e enchente. Enchentes podem ocorrer ao longo do ano, quando o

volume da água transborda o leito vazante, comumente nas estações com mais chuva. Níveis de inundação são mais raros e destrutivos, acontecem quando o volume da água é suficiente para transbordar os diques marginais do leito menor e preencher o leito maior. Para prevenir inundações é necessário observar o comportamento do escoamento superficial em períodos mais longos do que um ano. O período de retorno para uma inundação é o intervalo de tempo entre episódios da mesma magnitude, que pode chegar a ser maior a 50 anos (WISLER; BRATER, 1959; VILLELA; MATTOS, 1975).

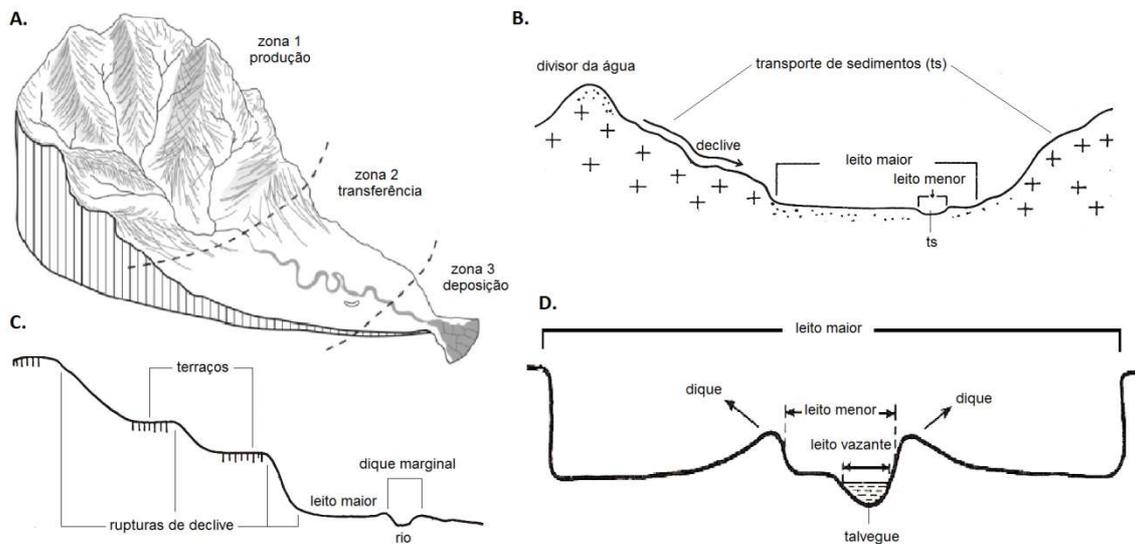


Figura 3.3 - Componentes de um sistema fluvial hipotético: A) bacia hidrográfica. Destacam-se na figura a zona de produção de sedimentos, a zona de transferência desse material e a zona de deposição; B) perfil transversal da bacia. Destacam-se o divisor da água, ou linha que separa a contribuição do escoamento superficial entre bacias vizinhas; o declive das encostas, que também contribui com água e sedimentos para o canal principal; o leito maior do canal, que determina a região potencialmente inundável na bacia; o leito menor, que determina a região de enchente; e o talvegue (ts), ou linha de maior profundidade do canal. C) detalhe do declive. Destacam-se os terraços, superfícies de acumulo de sedimentos. D) detalhe de perfil transversal do canal. Destacam-se o leito maior, que determina a planície e área de inundação; o leito menor que determina a área de enchente, é delimitada pelos diques marginais; e o leito vazante, que determina o nível máximo das águas no canal do rio.

Fonte: Figura composta a partir de: Christofolletti (1981); Guerra (1994); Huggett (2007) e Charlton (2008).

3.2.1. Planícies de inundação

Planícies de inundação (em inglês *floodplains*) são áreas predominantemente planas que bordejam os canais fluviais e conformam seu leito maior. São superfícies de acúmulo de sedimentos transportados pelos rios, onde a declividade do terreno e a velocidade do fluxo diminuem (Figura 3.4). Na toponímia popular brasileira, as planícies de inundação são conhecidas como várzeas (CHRISTOFOLETTI, 1980; HUGGETT, 2007; CHARLTON, 2008).

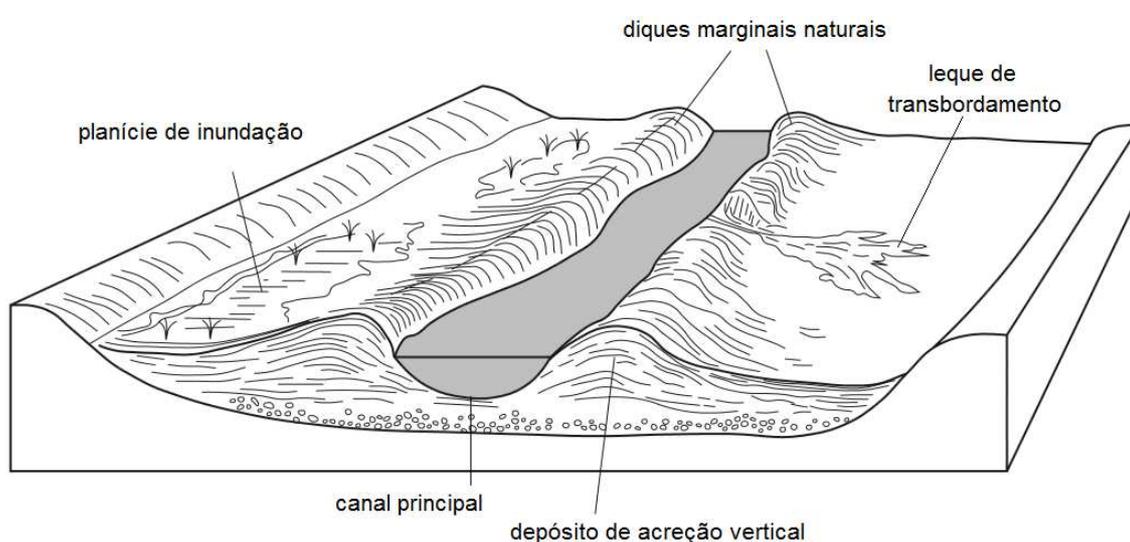


Figura 3.4 – Planície de Inundação: bloco diagrama de sistema fluvial meandrante ilustrando canal, dique marginal e planície de inundação em seu entorno natural. Fonte: Charlton (2008).

A morfologia das planícies está relacionada com o desenvolvimento do canal principal que lhe deu origem e com processos de deposição e erosão, ocorridos na sua gênese. De modo geral, grandes planícies de inundação são largas e com seção transversal convexe. A forma convexe ocorre porque a carga sedimentar transportada pelo rio se distribui lateralmente desde o canal, formando diques marginais ao longo do seu fluxo. Em planícies pequenas a medias, a seção transversal pode ser plana ou ligeiramente côncava. A forma côncava ocorre em áreas propensas a aumento da descarga e alargamento de canais (HUGGETT, 2007; CHARLTON, 2008).

3.2.2. Indicadores morfométricos de susceptibilidade a inundação

O termo “morfometria do sistema fluvial” é referido neste trabalho como o conjunto das componentes geométricas do sistema fluvial, nos planos horizontal e vertical, passíveis de serem modeladas por SIG a partir MDE. Estas componentes refletem as condições fisiográficas da bacia e permitem dimensionar a eficiência do sistema no transporte de água e de sedimentos. Algumas são indicadoras de susceptibilidade a inundações (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Métricas da drenagem indicadoras de susceptibilidade a inundação.

| Métrica | Algoritmo | Descrição |
|--------------------------------------|------------------------------|--|
| Comprimento do canal principal | L | Comprimento do canal de maior ordem na bacia. |
| Distância entre os extremos do canal | Dv | Distância medida em linha reta entre a nascente e o exutório do canal principal da bacia. |
| Comprimento total da drenagem | $C_T = \sum Sd$ | Somatória do comprimento de todos os segmentos da drenagem na bacia. |
| Índice de sinuosidade | $I_s = L/Dv$ | Medida, em projeção horizontal, da sinuosidade do canal principal do rio. Um canal reto tem $I_s = 1$. |
| Perímetro da bacia | P | Comprimento da linha divisória de águas da bacia. |
| Área da bacia | A | Projeção horizontal da área drenada pelo sistema fluvial, confinada dentro da linha divisória de águas. |
| Densidade da drenagem | $D_d = C_T/A$ | Comprimento total da drenagem do sistema fluvial em relação a sua área. |
| Área de contribuição | $A_c = A$ | Área da bacia. Determina a capacidade máxima de contribuição de fluxo e sedimentos do sistema fluvial. |
| Coefficiente de compactidade | $K_c = 0.28 * [P/A^{(1/2)}]$ | Relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual a A. Em uma bacia circular ideal, o valor deste índice é um (1) e toda a água chegará ao exutório ao mesmo tempo. Quanto mais irregular for a bacia, tanto maior seu K_c . |
| Fator de forma | $F = A/L^2$ | Razão entre a largura média (A/L) e o comprimento axial da bacia (L). F baixo é menos sujeito a inundações porque o comprimento do rio é maior e há menor probabilidade de ocorrer uma precipitação intensa que cubra toda sua extensão. |
| Índice de circularidade | $I_c = 4 * \pi * A/P^2$ | Relação entre a área da bacia e a área do círculo com o mesmo perímetro da bacia. |

Fonte: Strahler (1964); Villela e Mattos (1975) e Christofolletti (1980)

No plano vertical pode ser considerado o perfil longitudinal do canal principal, a partir do qual é analisada a conformação de terraços, além de aspectos do relevo como, por exemplo, amplitude e a declividade. Estes aspectos topográficos serão abordados no capítulo sobre modelagem do relevo.

No plano horizontal podem ser consideradas a forma e o tamanho da bacia, a densidade da drenagem e o padrão planimétrico. A forma e o tamanho influenciam diretamente o volume de água no sistema; podem ser verificadas a partir do perímetro, da área, do fator de forma, do coeficiente de compacidade e/ou do índice de circularidade. A densidade da drenagem é uma medida do grau de dissecação fluvial e varia inversamente com o tamanho dos segmentos da rede. As áreas escarpadas bem drenadas geralmente apresentam numerosos tributários de pequena extensão, tempos curtos de concentração e vazão rápida. Nas regiões planas, cujo solo é profundo e permeável, somente os tributários relativamente largos permanecem sob a forma de curso perene. Estes cursos de água em planícies de inundação costumam ter um alto índice de sinuosidade, que controla a velocidade de escoamento nesses locais.

O padrão planimétrico da drenagem se refere à disposição geométrica da rede em projeção horizontal. Os padrões típicos da drenagem são dendrítico, paralelo, treliça, radial, centrífugo, centrípeto, distributário, retangular e anular (Figura 3.5). Estes padrões refletem as condições lito-estruturais do sistema fluvial, e podem também indicar a contribuição potencial de água e sedimentos de uma bacia. Os padrões paralelo, treliça e retangular refletem forte controle estrutural do sistema. Este controle também pode ser identificado a partir de mudanças abruptas no padrão da drenagem (HUGGETT, 2007).

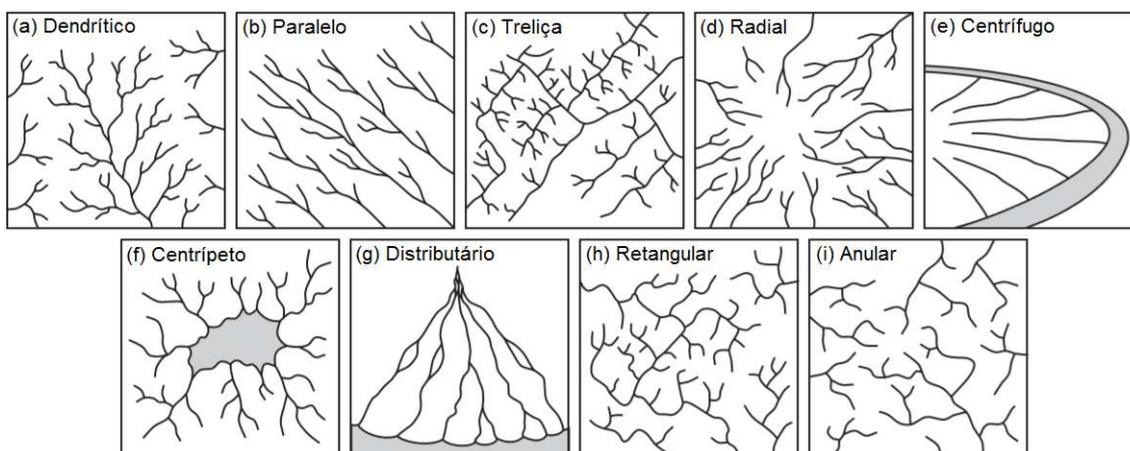


Figura 3.5 - Padrões da drenagem controlados pela estrutura ou a declividade.
Fonte: Huggett (2007).

3.3. Mapeamento de planícies de inundação com recursos de SIG e SR

Em estudos do meio físico são esperadas contribuições expressivas da utilização de dados de SR, favorecidas pela oferta crescente deste tipo de produto e pelo desenvolvimento de recursos e de metodologias para seu processamento (OLAV, 2001; ALMEIDA et al., 2005; VALERIANO; ROSSETTI, 2007; RENNÓ et al., 2008; VAN WESTEN et al., 2008; JENSEN, 2009; ZHUANG et al., 2013).

Mapas de áreas alagadas, por exemplo, podem ser gerados em várias escalas a partir do processamento de imagens de satélites como LANDSAT e CBERS, que funcionam na faixa do espectro ótico, ou de produtos como os do sensor MODIS (NOVO et al., 2000; SHIMABUKURO; NOVO, 2002; VILA DA SILVA et al., 2009; SAWADA et al., 2013). Em muitos casos, estas áreas são mapeadas a partir do reconhecimento na imagem de elementos indicadores, como espelhos da água ou vegetação ripária (RUDORFF et al., 2012). Este tipo de mapa também pode ser produzido a partir de imagens de radar, como as de RADARSAT, que funciona na faixa das micro-ondas (MARINHO et al., 2012).

Embora complementares, a utilização de um ou outro tipo de dado depende da disponibilidade e do interesse da pesquisa. Dados óticos podem se tornar a melhor alternativa em projetos que envolvem o mapeamento de extensas áreas geográficas, análise de períodos longos e/ou análise multiescala (COUTO et al., 2010; RENÓ et al., 2011). A utilização de imagens de radar pode ser a melhor alternativa para mapeamento emergencial de áreas inundadas, que não contam com mapeamento prévio (MARINHO et al., 2012; SHAN et al., 2010). Isto porque as nuvens são transparentes às micro-ondas e a interferência das gotas de chuva nos produtos obtidos por radar é mínima (RANEY, 1998). Desde a formação do Consórcio Espacial Internacional e Desastres Maiores (*International Charter - Space and Major Disaster*), dados óticos e de radar são utilizados simultaneamente para atender situações de emergência decorrentes de desastres naturais, entre eles inundações, no âmbito global (STRYKER; JONES, 2009; SHAN et al., 2010).

Mapas de planícies de inundação podem ser obtidos pela classificação da bacia de drenagem em unidades fisiográficas homogêneas, em termos das suas características ambientais (OLLIER, 1977). Nessa abordagem, dados de Sensoriamento Remoto são utilizados junto com dados de

campo para mapear a distribuição espacial das componentes do meio físico (geologia, solos, vegetação, geomorfologia, relevo, etc.) e inferir, a partir da análise desse conjunto de dados, as linhas divisórias que definem as unidades. Geralmente usa-se a componente topográfica como o primeiro critério de classificação.

3.3.1. Modelagem do relevo em SIG a partir de dados de SR

O conceito “geomorfometria” refere-se à medida das propriedades geométricas da superfície topográfica. A ciência geomorfométrica se estabeleceu como uma resposta à demanda de modelos topográficos em ambiente digital para estudos do meio físico, herdando conhecimento de outras ciências como a matemática, a computação e a geomorfologia (PIKE; WILSON, 1971; EVANS, 1972; MARK, 1975; PIKE, 2000). O conjunto de propriedades geométricas da superfície da terra é passível de ser obtido pela manipulação computacional da altitude com métodos quantitativos (SHARY et al., 2002; PIKE et al., 2009). Estas propriedades têm sido referenciadas na literatura como variáveis topográficas, morfométricas ou geomorfométricas (FLORINSKY; KURIAKOVA, 1996; SHARY et al., 2002; FLORINSKY, 2005). Em SIG, estas variáveis são obtidas a partir de MDE.

A representação mais comum de MDE em SIG é a matriz de altitude, que é um arquivo digital organizado em formato de linhas e colunas e referenciado à sua posição geográfica. A estrutura matricial desses dados permite sua manipulação computacional à maneira de imagens de SR (BURROUGH; MCDONNELL, 1998). Em SR, os MDES a partir de dados no espectro ótico são criados por técnicas como a estereoscopia (por exemplo, ASTER-GDEM, SPOT, IKONOS e QuickBird); na faixa das microondas, MDES podem ser criados por clinometria, interferometria ou polarimetria (por exemplo RADARSAT, SRTM e TERRA-SAR TanDEM) (DEILAMI; HASHIM, 2011; FUJISADA et al., 2005; HUBER et al., 2010; RABUS et al., 2003; TOUTIN; GRAY, 2000). Dados MDE obtidos a partir de tecnologia LIDAR são indicados para projetos de modelagem hidrodinâmica, que exigem produtos de resolução fina (COBBY et al., 2001; 2003; SANDERS, 2007), ainda que representem maiores custos. Enfim, a utilização de um ou outro produto no mapeamento de unidades da paisagem depende dos objetivos do projeto e das características do dado, tais como disponibilidade, custo, resolução, cobertura espacial e qualidade.

Entre os modelos de altitude atualmente disponíveis, o MDE-SRTM, representou um avanço de grande impacto para a comunidade internacional devido à sua cobertura espacial (quase global: todas as latitudes menores de 60°), ao acesso livre via internet, à resolução (90m) e ao bom desempenho do modelo (para América do Sul em 90% dos dados: erro absoluto de localização 9m; erro absoluto da altitude 6,2m; erro relativo da altitude 5,5m) (RODRÍGUEZ et al., 2005; FARR et al., 2007). A partir deste produto foi desenvolvido o projeto Topodata, que teve por objetivo disponibilizar um modelo de resolução mais fina (30 m) de todo o território brasileiro, além de um conjunto de variáveis topográficas locais, em um banco de dados com acesso gratuito alocado na internet (INPE, 2008). Detalhes sobre este projeto podem ser consultados em Valeriano (2008), Valeriano e Albuquerque (2010) e Valeriano e Rossetti (2012). Na Tabela 3.4 e Figura 3.6, apresentam-se, de forma resumida, a definição e representação gráfica das informações topográficas contidas em Topodata.

Tabela 3.4 - Variáveis topográficas locais do banco de dados Topodata.

| Dado topográfico | Descrição |
|---|--|
| Altitude (Z) | Derivação de ordem zero do MDE. Valores expressos em metros sobre o nível médio do mar (MSL: <i>Mean Sea Level</i>). |
| Declividade (S) | Primeira derivada da elevação em relação à distância horizontal. Valores expressos em graus (entre 0° e 90°) ou em percentagem. |
| Orientação de vertentes (O) | Ângulo azimutal da maior inclinação do terreno, no sentido descendente, expressa em graus entre 0° e 360°. |
| Curvatura vertical (V) | Primeira derivada da declividade. Representa o formato da vertente quando observada em perfil. Valores expressos em graus por metro (°/m). |
| Curvatura horizontal (H) | Primeira derivada da orientação das vertentes. Representa o formato da vertente quando observada em projeção horizontal. Valores expressos em graus por metro (°/m). |
| Relevo sombreado (Rs) | Modelo baseado no fator cosseno da iluminação solar. A orientação de vertentes compõe, com a declividade, a geometria de exposição à iluminação incidente. |
| Modelo Divisor - Drenagem - Orientação (<i>Aspect, Drainage and Divides, ADD</i>) | Delineamento de talvegues e divisores da água, sobreposto a uma representação apropriada da orientação de vertentes. |
| Modelo de formas do terreno (Ft) | Modelo que expressa a variação independente das curvaturas horizontal e vertical. |

Fonte: Valeriano (2008).

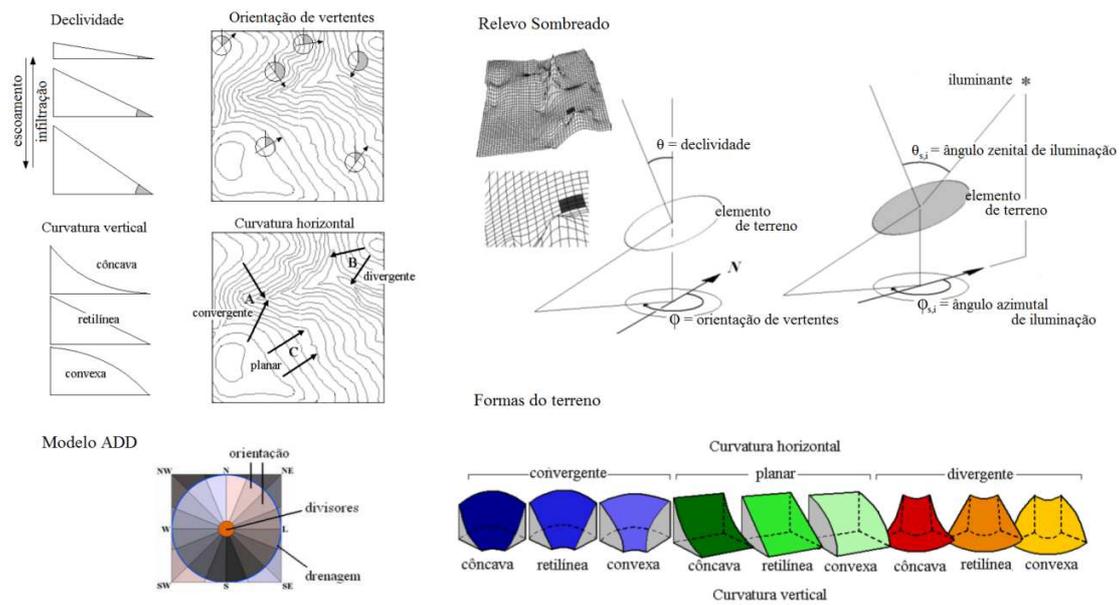


Figura 3.6 - Esquema gráfico das informações do banco de dados Topodata.

Fonte: Valeriano (2008).

Em estudos da distribuição de solos em São Carlos, Estado de São Paulo, foi desenvolvida uma metodologia específica para o cálculo das variáveis topográficas regionais: altura, amplitude, profundidade da dissecação e predominância altimétrica (MUÑOZ, 2009), a partir do MDE de Topodata. Posteriormente, a metodologia foi adaptada ao cálculo do índice elevação-relevo (MUÑOZ, 2013). Resultados preliminares sobre a aplicação destas variáveis no mapeamento de outras variáveis do meio físico têm-se mostrado promissores, como verificado em estudos de distribuição florestal na Amazônia (BISPO, 2012), de cobertura vegetal no Pantanal (MUÑOZ et al., 2013) e no mapeamento geológico da bacia Paraíba (ANDRADES FILHO, et al., 2013). Estas variáveis topográficas regionais, organizadas no banco de dados Toporeg, apresentam-se na Tabela 3.5 e Figura 3.7.

Tabela 3.5 - Variáveis topográficas regionais do banco de dados Toporeg.

| Dado topográfico | Descrição |
|---------------------------------|--|
| Altura topográfica (A) | Distância vertical entre um ponto localizado sobre a superfície topográfica e sua projeção horizontal no plano de altitudes mínimas. |
| Amplitude do relevo (I) | Distância vertical entre um ponto localizado no plano das altitudes máximas e sua projeção horizontal no plano das altitudes mínimas. |
| Índice elevação-relevo (E) | Razão da distância vertical entre um ponto localizado no plano de altitudes médias e sua projeção horizontal em um plano de altitudes mínimas, à amplitude I do relevo no mesmo ponto. |
| Predominância topográfica (P) | Distância vertical entre um ponto localizado sobre a superfície topográfica e sua projeção horizontal no plano de altitudes médias. |
| Profundidade da dissecação (Dp) | Distância vertical entre um ponto localizado sobre a superfície topográfica e sua projeção horizontal no plano de altitudes máximas. |

Fonte: Modificado de Muñoz e Valeriano (2013).

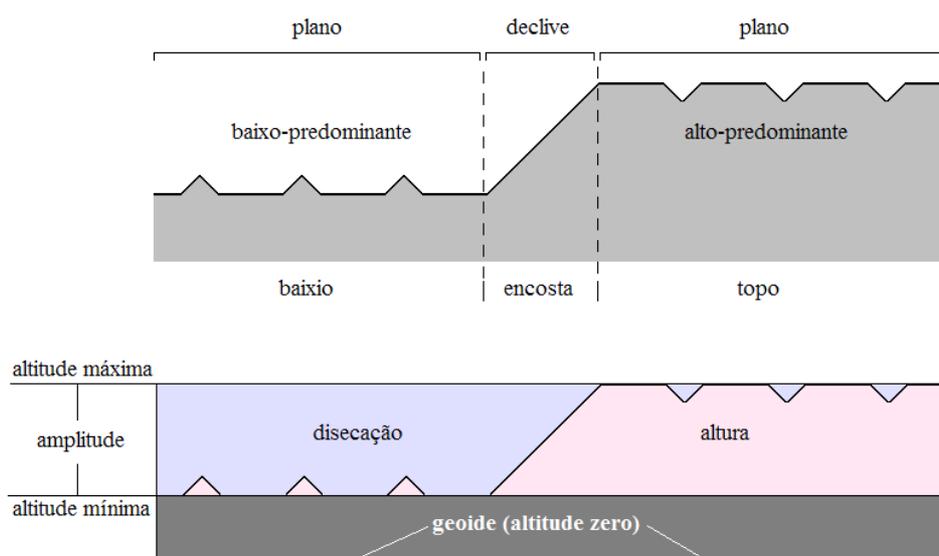


Figura 3.7 - Esquema simplificado das variáveis topográficas regionais do banco Toporeg.

Fonte: Modificado de Muñoz (2009).

3.3.2. Escala de produtos cartográficos em Sig

Em estudos que envolvem modelagem espacial em Sig deve-se atentar para o tamanho do pixel, que está estreitamente relacionado com a escala. Malhas regulares de resolução grosseira derivam em produtos de pequena escala e aquelas de resolução fina em produtos de

grande escala. Na generalização obtêm-se produtos em escalas pequenas a partir de agregação de pixels finos. Ao contrário, mesmo que possível afinar o pixel grosseiro a partir de expansão, o produto deste processamento não atende escalas maiores (Figura 3.8).

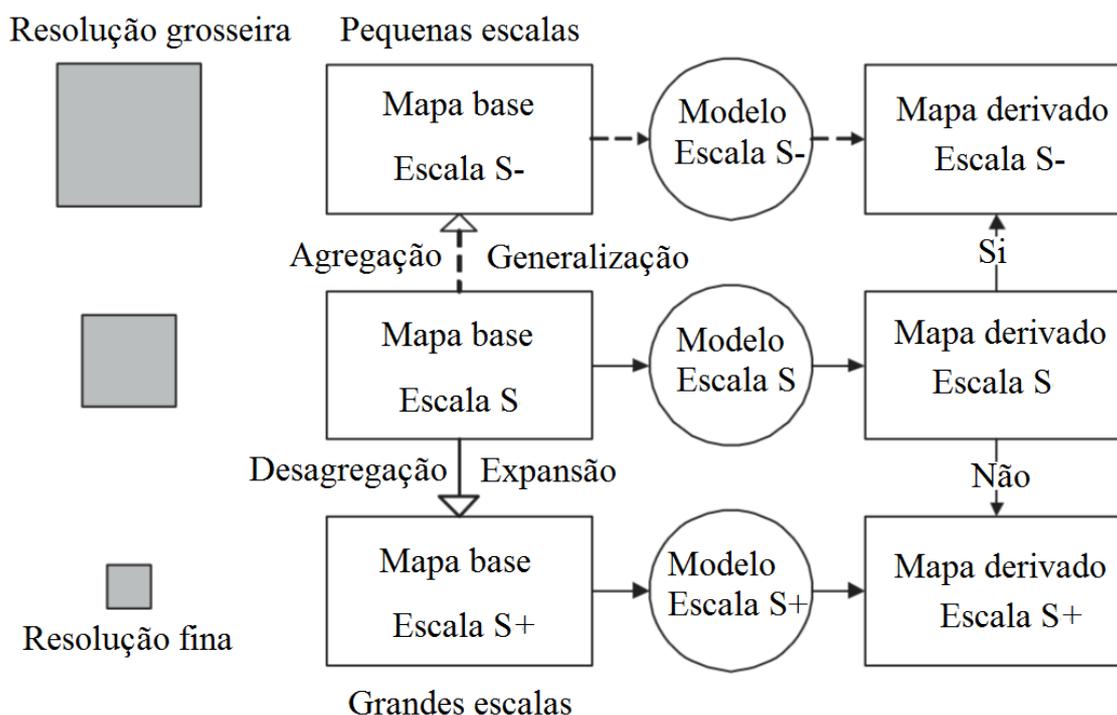


Figura 3.8 - Resolução de grade regular e escala de mapeamento em SIG.

Fonte: Hengl (2006).

A superfície topográfica é uma mistura de geoformas de diferente tamanho e complexidade, acopladas seguindo uma hierarquia que depende dos processos genéticos e do tempo de formação (Figura 3.9). Nesse sentido, a escala de mapeamento das geoformas depende da escala espacial e temporal do fenômeno que está sendo estudado (DIKAU, 1990; SULEBAK; HJELLE, 2003). Por exemplo, em escalas menores a topografia e a rede da drenagem refletem efeitos de processos que operam sobre longos períodos de tempo, como a formação de planícies de inundação (mesoforma). Em escalas médias, as formas dos segmentos de canais meandantes podem ser examinadas no contexto da história geológica da bacia. O fluxo hidráulico e a dinâmica de sedimentos em suspensão, que operam sobre curtos períodos de tempo, são observados em escala bem mais detalhada (CHARLTON, 2008).

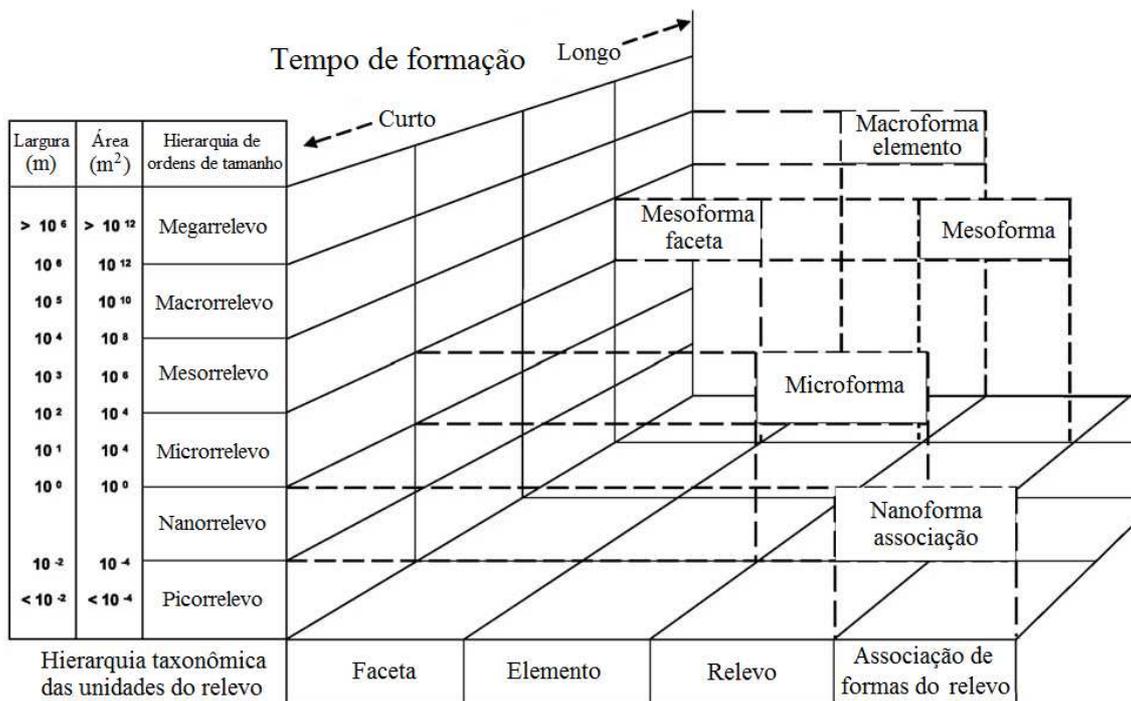


Figura 3.9 - Hierarquia taxonômica das formas geomorfológicas.

Fonte: Dikau (1990).

A missão SRTM foi planejada para suprir mapeamentos em escalas entre 1:100.000 e 1:250.000, a partir de MDE de 30m e 90m, com base em especificações cartográficas norte-americanas. Os produtos SRTM foram submetidos a extensivas validações por parte do Laboratório de Propulsão a Jato dos Estados Unidos (*Jet Propulsion Laboratory, JPL*), e de uma comunidade científica mais ampla. Como parte da validação interna, o JPL comparou as elevações do SRTM com pontos de controle em escala continental, levantados por sistema de posicionamento global cinemático (*GPS long track kinematic*) ao longo de estradas principais em todos os continentes. A exatidão vertical absoluta obtida para o conjunto de dados continentais foi estimada em 9m, ou melhor, com base no percentil de 90% da distribuição de erros, que corresponde a uma exatidão global de 16m (RABUS et al., 2003; RODRÍGUEZ et al., 2005; 2006; SLATER et al., 2006). Em estudos complementares, pesquisadores têm utilizado diversas outras técnicas de validação dos dados SRTM, que variam entre a cobertura geográfica, a fonte dos dados de controle e a característica de qualidade examinada. Os resultados geralmente confirmam aqueles do JPL: exatidão vertical que excede as

especificações do projeto, erro vertical muito maior em áreas de relevo acidentado e fortemente correlacionado com a declividade, e elevação tipicamente superestimada, em particular nas áreas de floresta (ZANDBERGEN, 2008).

3.3.3. Avaliação de produtos cartográficos em SIG

A avaliação de um dado estimado é o processo de verificação da sua qualidade. Esta envolve fundamentalmente a investigação das propriedades de distribuição conjunta entre estimativas e observações, sendo ambas variáveis discretas. Convencionalmente, a verificação é disposta em uma tabela de contingência $i \times j$ com $i \times j$ combinações possíveis entre estimativas e observações. A situação mais simples é para casos dicotômicos, onde $i = j = 2$ (Figura 3.10).

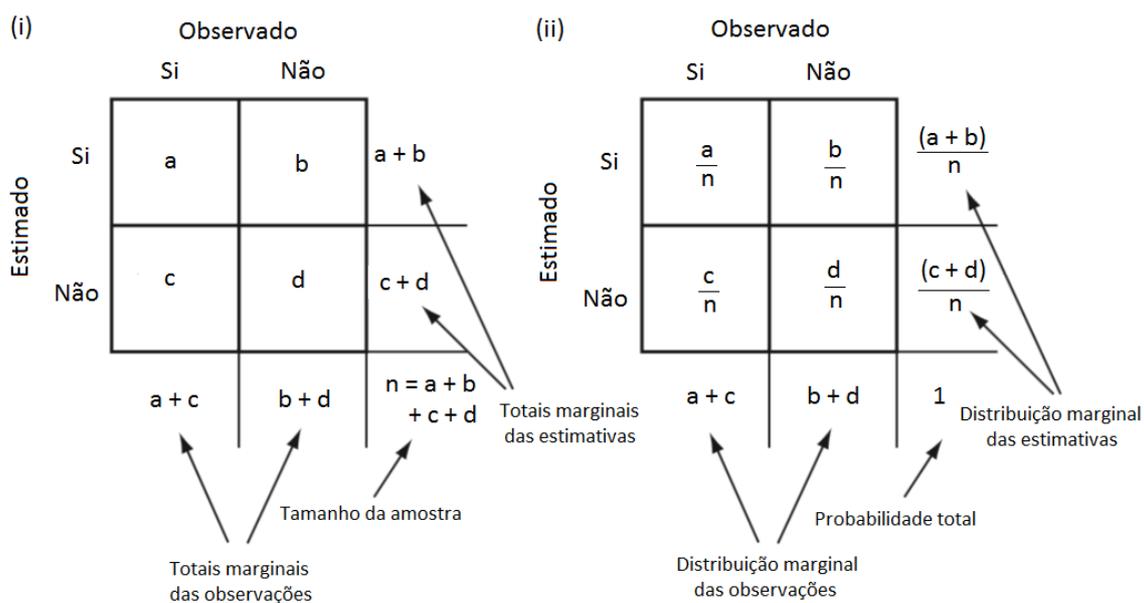


Figura 3.10 - Tabela de contingência para dados dicotômicos, matriz 2×2 . Acertos **a**: valor estimado e observado. Falso alarme **b**: valor estimado, mas não observado. Erro **c**: valor observado mas não estimado. Rejeições corretas **d**: valor não estimado e não observado. Fonte: Wilks (2006).

Para a completa avaliação do desempenho das estimativas, requer-se um conjunto mínimo de medidas (*scores* em inglês), que no caso de variáveis dicotômicas é três. Entre os *scores* mais utilizados estão a exatidão e o viés. A exatidão (*accuracy* em inglês) indica a proporção de acertos e rejeições corretas, representada na Figura 3.8 (ii) como a distribuição marginal das estimativas corretas $[(a+b)/n]$. Quando **a** é muito menor que **b**, é recomendado utilizar o *critical succes index* (Csi) como medida de exatidão; este corresponde ao número de acertos (**a**) dividido pelo número total de estimativas e observações (**a+b+c**). O pior valor possível de Csi é zero e o melhor é um. O viés (*bias* em inglês), B, é a razão entre estimativas e observações $[(a+b)/(a+c)]$. Estimativas não tendenciosas exibem $B = 1$, indicando que o evento foi previsto o mesmo número de vezes do que foi observado. $B > 1$ indica que o evento foi estimado um maior número de vezes do que observado (*overforecasting*) e $B < 1$ indica que o evento foi estimado um menor número de vezes do que foi observado (*underforecasting*). O índice *Heidke Skill Score* (Hss) é uma medida de exatidão relativa. Trata-se da proporção correta que deveria ser alcançada por estimativas aleatórias estatisticamente independentes das observações. Para estimativas perfeitas $Hss = 1$, valores negativos de Hss indicam as piores estimativas. O coeficiente *phi* é um estimador obtido a partir do coeficiente linear de Pearson que indica a proporção de variância comum entre variáveis ordinais ou dicotômicas. Os resultados de *phi* são semelhantes a Hss, variando entre -1 e 1.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1. Localização

A região objeto desta pesquisa é a bacia hidrográfica do rio Itajaí. Esta bacia ocupa uma área de aproximadamente 15000km² no território do Estado Santa Catarina (Sc), sul do Brasil, entre as longitudes 50°11'53"W e 48°36'54"W, e as latitudes 26°22'33" S e 27°52'32"S. Está definida por perímetro de aproximadamente 1100km. Devido ao tamanho desta bacia, foram escolhidas cinco áreas menores para desenvolver os experimentos. Estas subáreas selecionaram-se por estarem localizadas nas planícies de inundação da bacia.

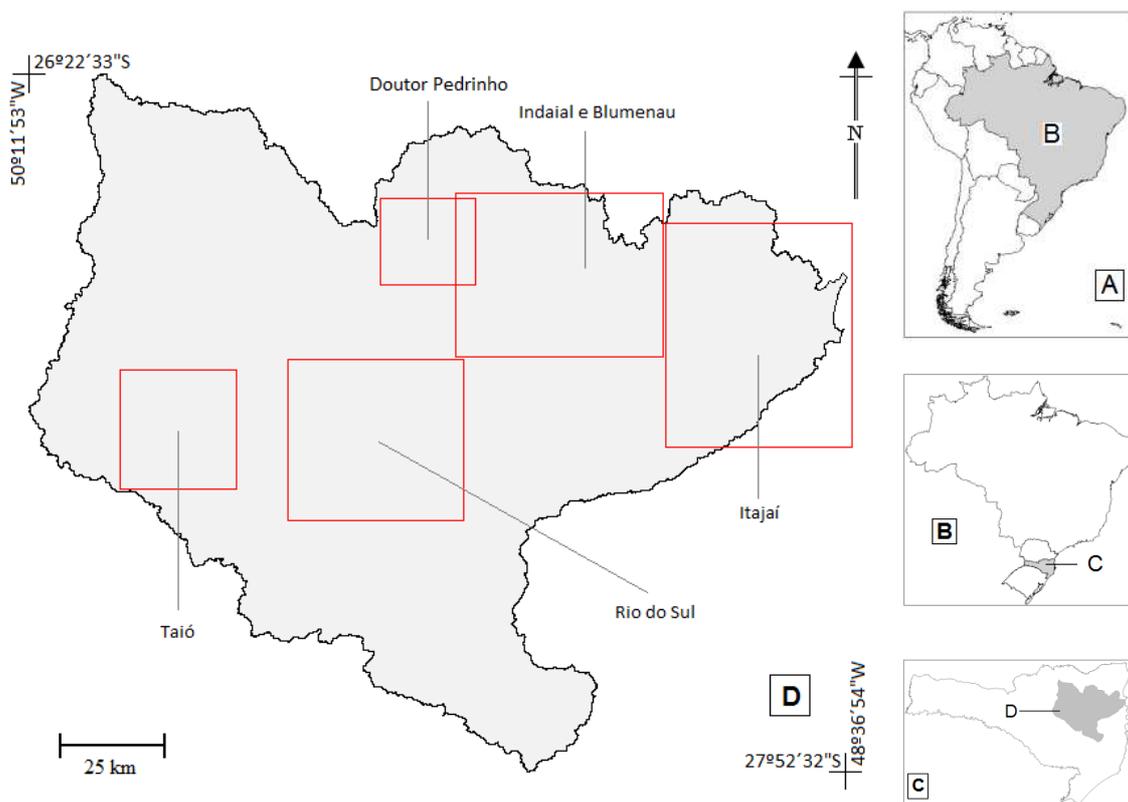


Figura 4.1 – Localização da bacia do rio Itajaí. A) América do Sul. B) Brasil. C) Estado Santa Catarina. D) Bacia hidrográfica do rio Itajaí, com destaque em vermelho das cinco subáreas do experimento.

No território catarinense, esta bacia faz parte da região hidrográfica do Atlântico Sul (ANA, 2001), cujos rios nascem ao leste da Serra Geral e têm sua foz no Oceano Atlântico. O maior canal é o rio Itajaí Açú, formado pela confluência dos rios Itajaí do Oeste e Itajaí do Sul. No seu percurso desde a cidade do Rio do Sul até a foz, na cidade de Itajaí, encontra os rios Itajaí do Norte (também conhecido como Hercílio), Benedito, Luís Alves e Itajaí Mirim. O último trecho do canal, desde o encontro dos rios Itajaí Açú e Itajaí Mirim até a foz, leva o nome de Itajaí. A região conta com três barragens construídas para controle de inundação (Figura 4.2).

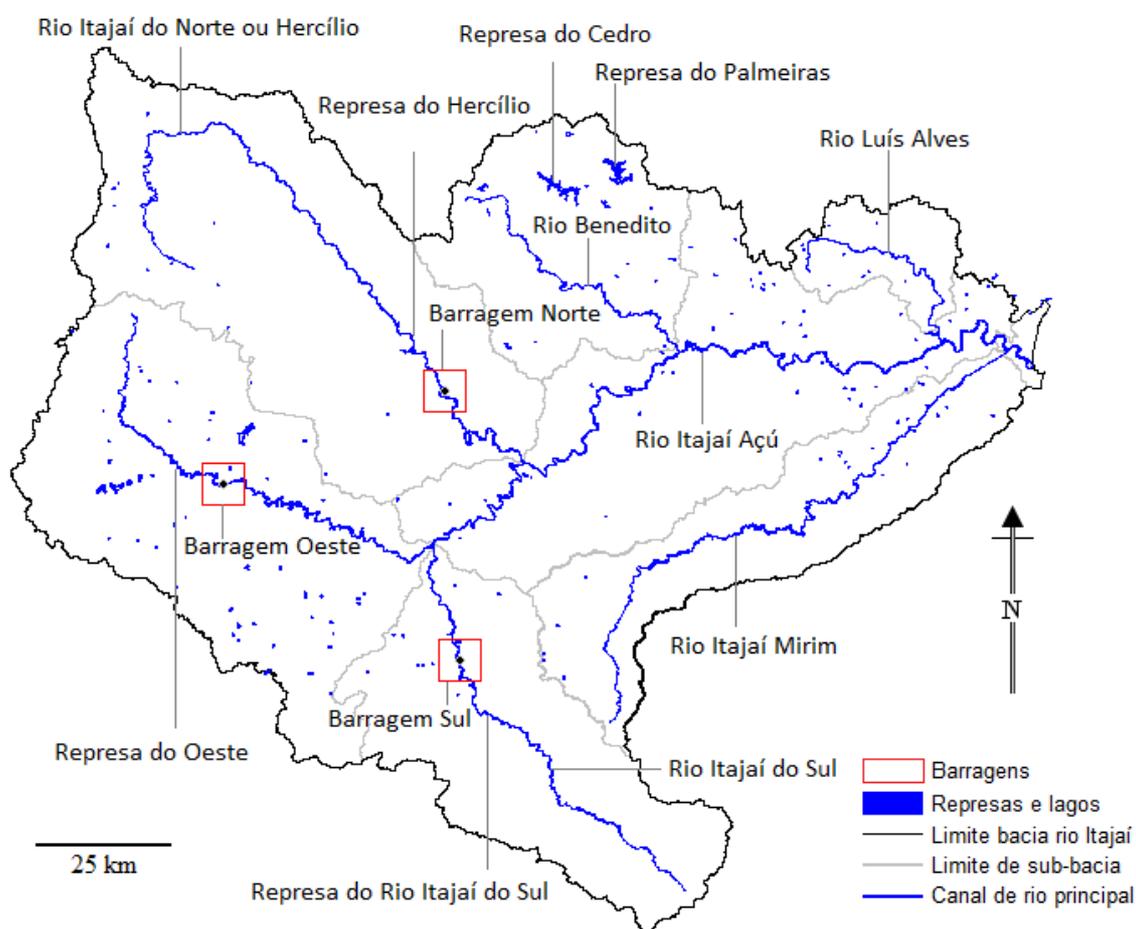


Figura 4.2 – Sub-bacias, canais principais e barragens da bacia do rio Itajaí.

Fonte: Mapa composto a partir de dados da Fundação do Meio Ambiente (GEOAMBIENTE, FATMA/PPMA-SC, 2008) e de produtos obtidos por processamento de MDE no desenvolvimento desta pesquisa.

4.2. Clima

O clima atual do Estado de Santa Catarina é classificado como subtropical ou mesotérmico-úmido (GPCG, 1986), com quatro estações bem marcadas, temperaturas e precipitações condicionadas pela latitude e a altitude, e influenciadas pelas massas tropical e polar atlântica. No verão (dezembro, janeiro e fevereiro), é favorecida a formação de convecção tropical que resulta em pancadas de chuva; quando há passagem de frentes frias esta convecção pode deflagrar tempestades de forte intensidade. No outono (março, abril, maio) ocorrem bloqueios atmosféricos que impedem a passagem de frentes frias, o que pode resultar na diminuição no volume de chuvas e o conseqüente estabelecimento de massas de ar seco. As condições de tempo no inverno (junho, julho, agosto) são influenciadas por sucessivas massas de ar polar provenientes do continente antártico; sendo o período com os menores volumes de precipitação. A primavera (setembro, outubro, novembro) apresenta tempo mais instável, associado à ocorrência de sistemas convectivos, entre os quais se destacam os Complexos Convectivos de Mesoescala, CCM (MONTEIRO, 2001).

Na Figura 4.3 se observa a distribuição de duas normais da precipitação na estação Indaial, localizada na bacia do rio Itajaí Açú (26°54'S, 49°13'W e altitude de 86.1m), para o período 1961 - 1990: precipitação máxima em 24h e média mensal. Nota-se que a maior parte da precipitação está concentrada nos meses de verão, período durante o qual há maior probabilidade de inundações. Porém, pesquisas apontam que esta região é atingida por sistemas meteorológicos diversos em outros períodos ao longo do ano, que podem produzir grandes quantidades de precipitação e deflagrar episódios de inundação (SEVERO, 1994; MONTEIRO, 2001; MARCELINO, 2003).

Severo (1994) identificou cinco tipos diferentes de configurações sinóticas (escala meteorológica de longitude horizontal maior ou igual a 1000km), ou mecanismos dinâmicos, envolvidas na geração de chuvas intensas que podem deflagrar inundações no Vale do Itajaí: um sistema estacionário sobre a região sul, um vórtice ciclônico nos altos níveis provenientes dos Andes, uma corrente de jato nos altos níveis com curvatura anticiclônica, uma deflexão no escoamento zonal nos altos níveis durante a fase madura do desenvolvimento dos episódios (destaque: episódio *El Niño* 1983) e um sistema frontal que passa pela região sul e retrocede como frente quente, estacionando sobre Santa Catarina e Paraná. Na maioria dos episódios

analisados no referido estudo (21), foi identificado um fluxo de ar úmido que se tornou a fonte alimentadora da convecção quando da aproximação de sistemas frontais e vórtices na região.

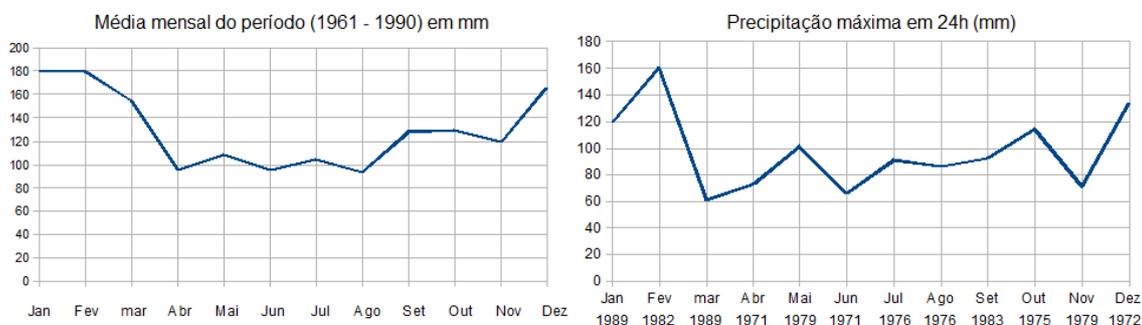


Figura 4.3 - Normais da precipitação na estação Indaial, 1961 – 1990.

Fonte: gráfico composto a partir de dados INMET (2009).

4.3. Arcabouço geológico

A bacia do rio Itajaí está inserida no Escudo Atlântico, que é delimitado a oeste pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná e a leste pelo Oceano Atlântico (GPCG, 1986). Sua formação pode remontar à fase de cratonização (cicatrização) das rochas do embasamento cristalino, tendo continuado com os eventos intra-cratônicos (dentro da crosta antiga) da Bacia Sedimentar do Paraná. Este evento culminou com o soergimento tectônico do lado oriental da bacia, que resultou na esculturação da Serra do Mar e no consequente preenchimento das planícies fluviais (AUMOND, 2005).

A base litoestratigráfica da bacia é composta por rochas do embasamento cristalino, da sequência sedimentar gondwânica e por sedimentos cenozoicos (Figura 4.4). Conforma o embasamento material de idade Arqueana (mais de 2600 m.a.) e Proterozóica (entre 500 e 2600 m.a.) composto por gnaisses, xistos, granitos, arenitos e riolitos. A sequência sedimentar é datada entre 120 e 435 m.a., e composta por arenitos, folhelhos, conglomerados, argilitos, siltitos e lavas basálticas. Os sedimentos cenozóicos, depositados nos últimos dois milhões de anos, são cascalho, areias, siltes e argilas. Poderão ser continentais, transicionais e/ou marinhos. Os primeiros podem ser depósitos de encosta, flúvio-lagunares e residuais, resultantes do intemperismo *in situ*, tanto em rochas do embasamento antigo como sobre rochas sedimentares gondwânicas no planalto. Os depósitos fluviais e aluviais formam as

planícies dos rios Itajaí Açú e Itajaí Mirim. Depósitos transicionais são encontrados no litoral até Ilhota e Gaspar.

A bacia do rio Itajaí localiza-se em uma região de marcada expressão de estruturas geológicas. No embasamento cristalino, há dois lineamentos principais relacionados a faixas cataclásticas, o mais antigo de direção aproximada W-E, e outro com direção N25°E, mais jovem. As falhas na sequência sedimentar compõem quatro sistemas: NE-SW, NW-SE, NNE-SSW e ENE-WSW. (GPCG, 1986). Destacam-se na bacia quatro estruturas principais: (1) Lineamento do Rio Itajaí do Norte (~150km de comprimento), orientação N30°W; (2) Lineamento Blumenau (~130km), orientação entre N55°E e N70°E; (3) Falha Perimbó (~120km), orientação entre N40°E e N60°E; e (4) Lineamento de Major Gercino (~60km) na direção N50° – 60°E (Figura 4.4).

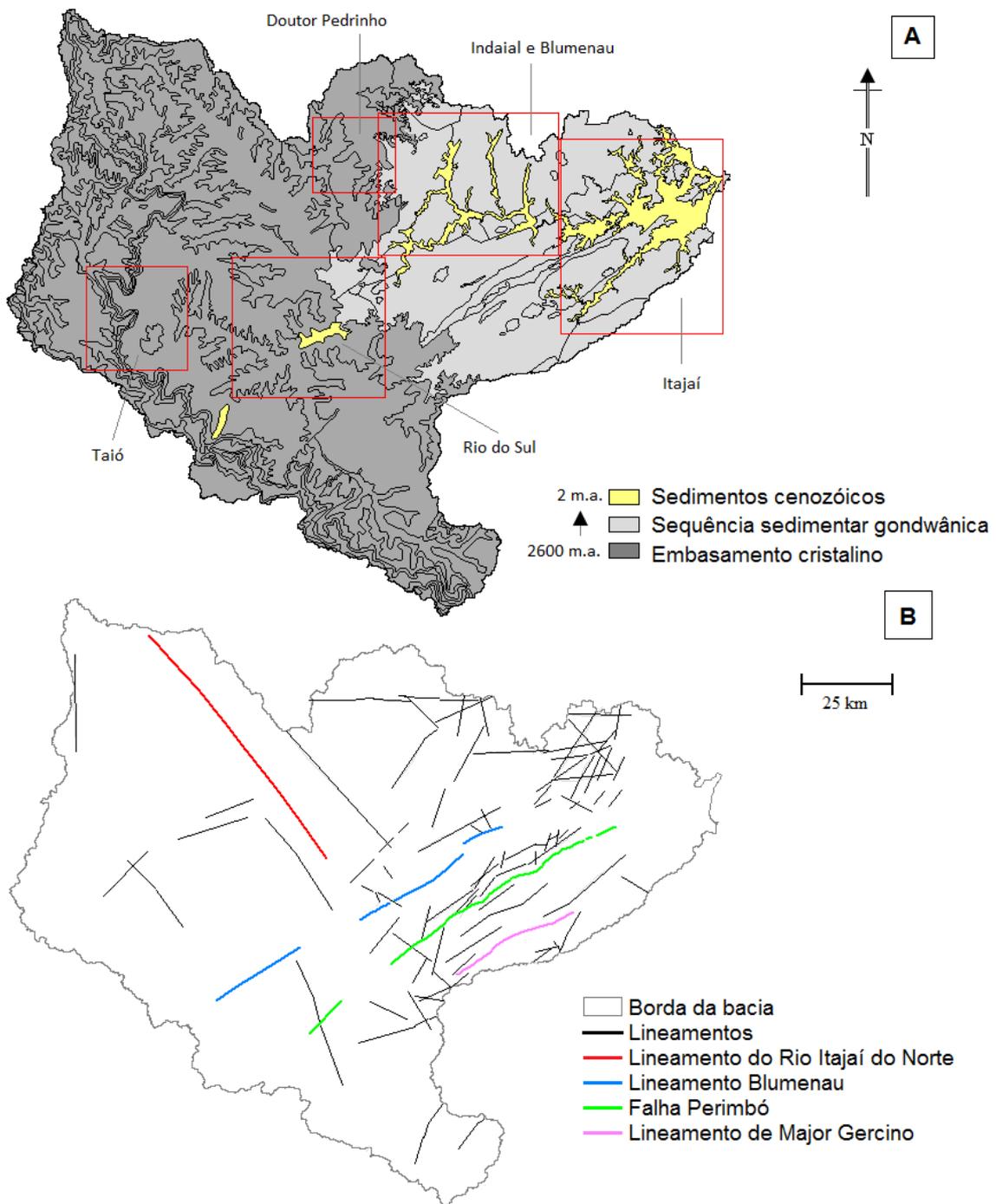


Figura 4.4 – Arcabouço geológico da bacia do rio Itajaí. A) Base litoestratigráfica. B) Estruturas principais.
 Fonte: Figura composta a partir de dados CPRM (2004), DNPM (1986) e Santa Catarina (GPCG, 1986).

4.4. Geomorfologia

Na bacia do rio Itajaí se observam três domínios morfoestruturais, seis regiões geomorfológicas e 12 unidades geomorfológicas (GPCG, 1986). Os domínios são relacionados principalmente a fatos geotectônicos e grandes arranjos estruturais e estão agrupados em depósitos sedimentares, bacias e coberturas sedimentares e embasamentos em estilos complexos. As regiões geomorfológicas estão ligadas a fatores climáticos e/ou litológicos. Distinguem-se as Planícies Costeiras, o Planalto dos Campos Gerais, os Patamares do Alto Rio Itajaí, o Planalto de Lages, o Patamar de Mafra e a Serra do Tabuleiro/Itajaí. As unidades geomorfológicas se referem às formas do relevo e se classificam, pelo tipo de modelado, em superfícies de acumulação (A), de aplanamento (P) ou de dissecação (D) (Figura 4.5).

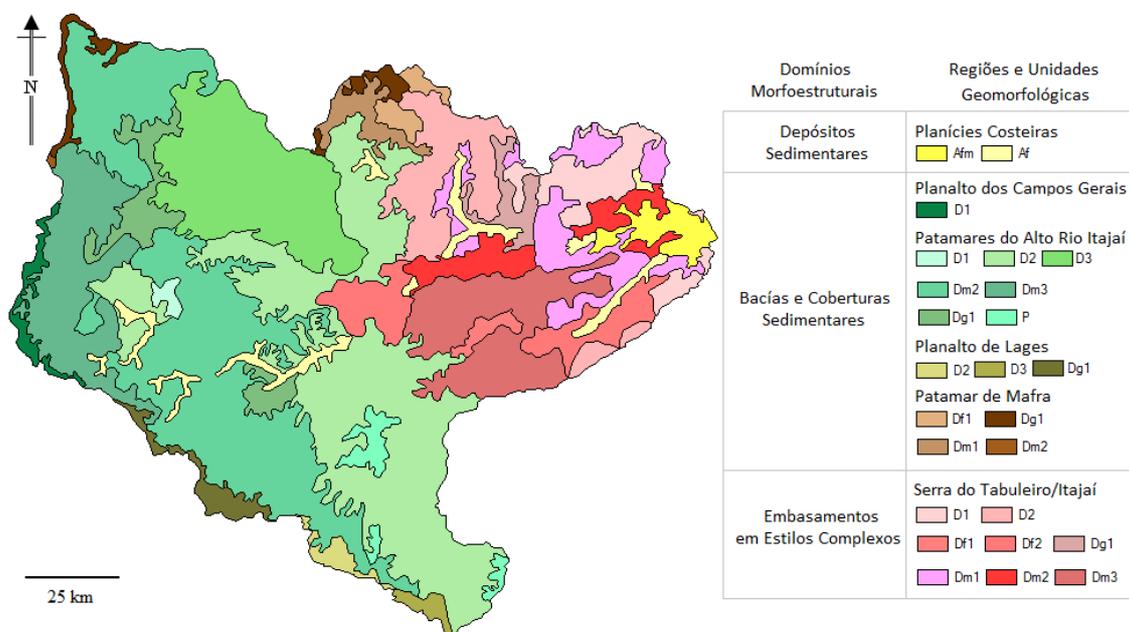


Figura 4.5 - Geomorfologia da bacia do rio Itajaí. Modelado de acumulação (A); fluvial (f) ou fluviomarinho (fm). Modelado de aplanamento (P). Modelado de dissecação (D); homogêneo, quando derivado da ação fluvial ou diferencial, quando marcado pelo controle estrutural. Aprofundamento (em metros): raso (1), médio (2) e profundo (3); os valores para cada faixa variam dependendo do domínio morfoestrutural e do tipo de dissecação. Quando a dissecação é homogênea, determina-se ainda a densidade da drenagem: fina (f) média (m) ou grosseira (g).
Fonte: mapa digitalizado e composto a partir de dados do Atlas de Santa Catarina (GPCG, 1986).

4.5. Altitude

No MDE Topodata da área de estudo observa-se que as altitudes se distribuem entre 0m e 1750m aproximadamente. As menores altitudes ocorrem nas Planícies Costeiras, entre 0m e 30m. Valores entre 800m e 1750m ocorrem no Planalto dos Campos Gerais, no Planalto de Lages, e de maneira isolada em alguns topos dos patamares do Alto Rio Itajaí. Além dessa singularidade, nestes patamares as altitudes se distribuem entre 100m e 800m. No Patamar de Mafra ocorrem as maiores amplitudes topográficas, com valores entre 100m e 1100m. As altitudes na Serra do Tabuleiro variam entre 100m e 70m, com áreas isoladas mais baixas no contato com as Planícies Costeiras (Figura 4.6).

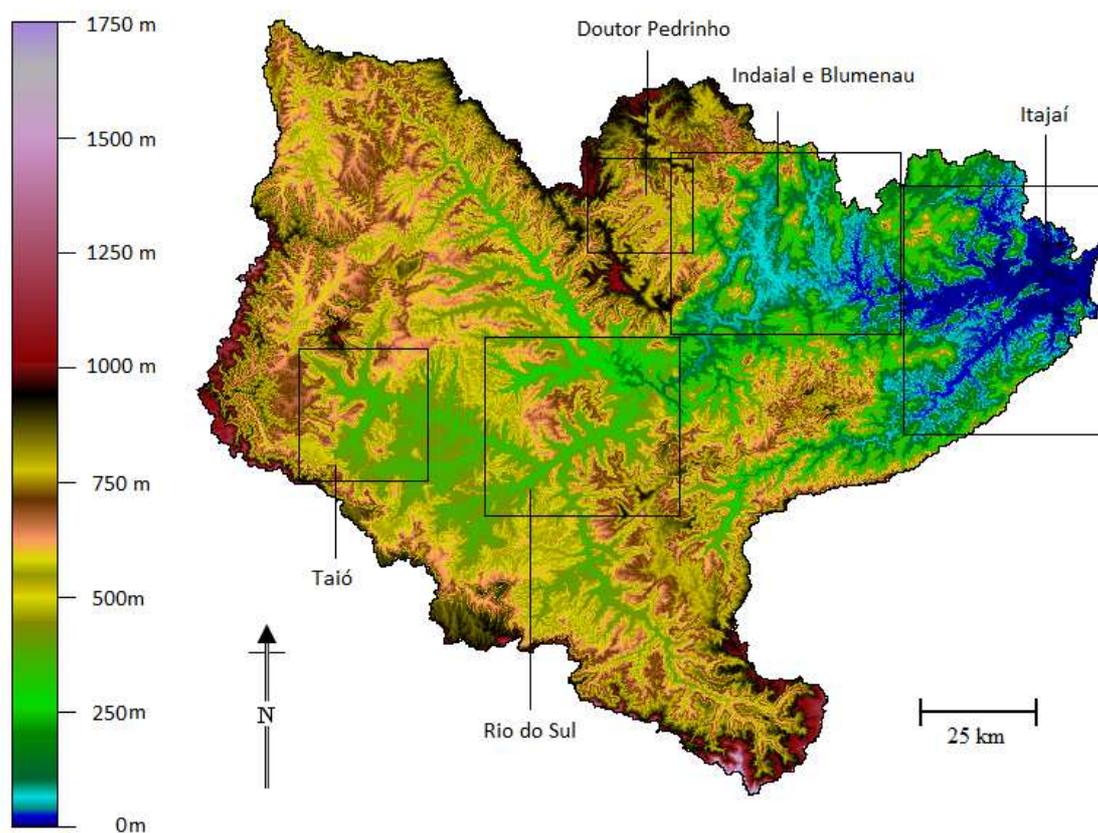


Figura 4.6 – Altitudes da bacia do rio Itajaí: MDE.
Fonte: Mapa composto a partir de dados Topodata (INPE, 2008).

4.6. Solos

Predominam nesta bacia quatro ordens de solos, segundo a classificação do novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) do Centro Nacional de Pesquisa de Solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Solos, 2006): Cambissolo Háplico, Argissolo Vermelho-Amarelo, Neossolo Litólico e Gleissolo Háplico. Em menor proporção ocorrem solos Cambissolo Humico, Nitossolo Háplico, e algumas pequenas manifestações de Latossolo Bruno, Neossolo Flúvico, Neossolo Quartzarênico e Nitossolo Vermelho (Figura 4.7).

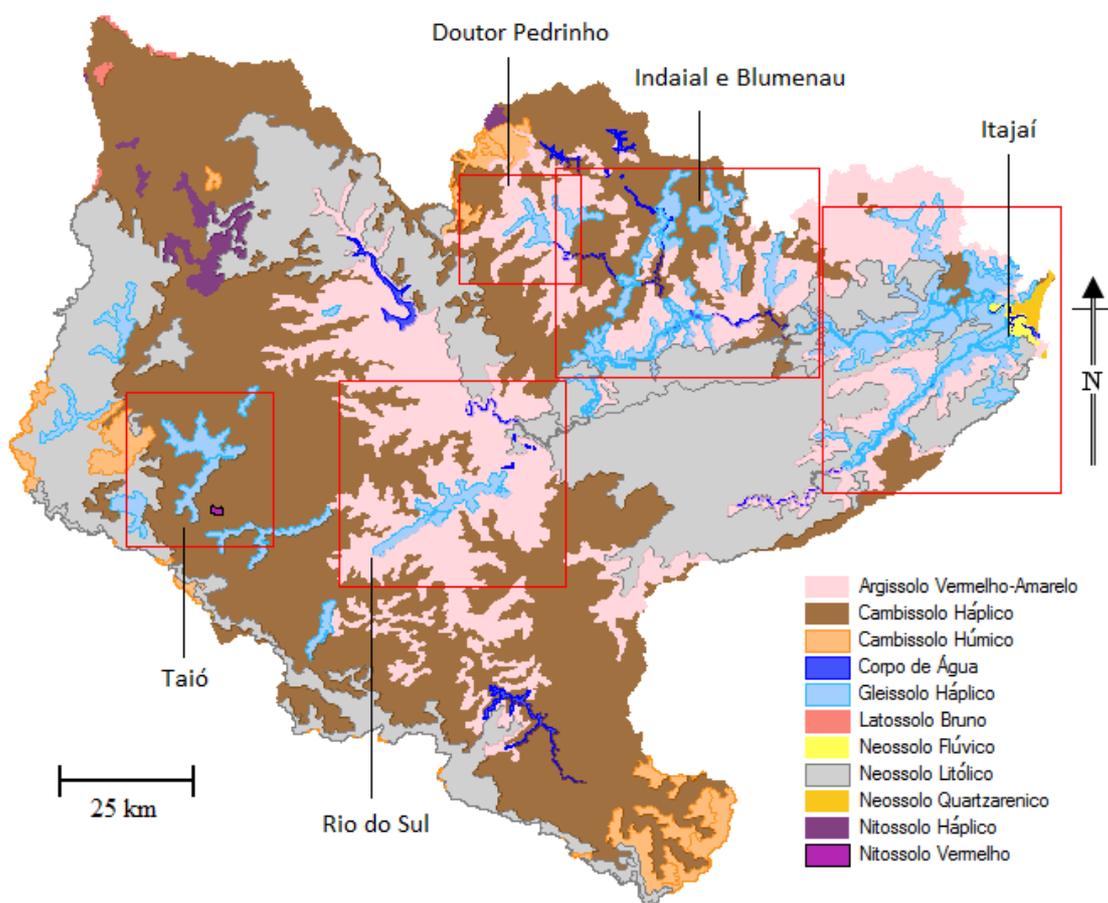


Figura 4.7 - Solos da bacia do rio Itajaí. Classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, SiBCS.

Fonte: Mapa composto a partir de dados da EMBRAPA Solos (1998; 2004).

Cambissolos. São solos minerais, não hidromórficos, derivados de rochas eruptivas e com horizonte B incipiente. Quando situados em planícies aluviais estão sujeitos a inundações (Cambissolo Gleico, na antiga classificação). Os solos Cambissolo Háplico são os mais frequentes na bacia do Itajaí. Dominam nas sub-bacias Itajaí do Sul, Itajaí do Oeste, Benedito, e nas nascentes dos rios Itajaí Mirim e Itajaí do Norte. A textura destes solos é argilosa a média e o relevo varia de suave-ondulado a forte-ondulado e montanhoso. Há pequenas manifestações destes solos em terrenos planos de várzea; são faixas mal drenadas de caráter eutrófico. Os solos Cambissolo Húmico são menos frequentes do que os Cambissolo Háplico na bacia. Ocorrem nas nascentes dos rios Itajaí do Sul, Itajaí do Norte, Itajaí do Oeste e Benedito. A textura destes solos é argilosa a muito argilosa, o relevo varia entre suave-ondulado a forte-ondulado. Os Cambissolos são solos moderadamente drenados, de caráter álico e profundidade entre 60cm e 150 cm.

Argissolos Vermelho-Amarelo. Correspondem aos solos Podzólico Vermelho-Amarelo da antiga classificação. São solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B textural. Ocorrem principalmente na região do Rio do Sul, na margem esquerda do rio Itajaí do Norte, na região do Doutor Pedrinho, na bacia do rio Luís Alves e na foz do Itajaí Mirim. A textura desses solos é argilosa a média e o relevo varia entre suave-ondulado, ondulado e forte-ondulado. São solos moderadamente drenados, de caráter álico e profundidade entre 60cm e 150cm.

Neossolos. São solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso, que não apresentam alterações expressivas em relação ao material de origem devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos. A classe Neossolos Flúvico equivale aos Solos Aluviais, e a classe Neossolo Quartzarênico às Areias Quartzosas da antiga classificação. Ocorrem na foz do rio Itajaí. A textura dos solos Flúvicos é média e se estendem em terrenos de relevo plano. São solos moderadamente drenados, de caráter álico e profundidade de até 60cm. Os solos Quartzarênicos ocupam terrenos planos e suave-ondulados. São solos bem drenados, de caráter álico e profundidade entre 60cm e 150cm. A classe Neossolo Litólico ocorrem no médio e baixo Itajaí Açú, médio e baixo Itajaí Mirim, baixo Luis Alves, ao longo da margem direita e no alto Itajaí do Norte, no alto Itajaí do Oeste e em uma faixa estreita na borda sul da bacia. A textura destes solos é média a argilosa e o relevo forte-ondulado a montanhoso. São solos moderadamente drenados, de caráter álico quando em relevo ondulado, e distrófico quando em montanhoso. Atingem profundidade de até 60cm.

Gleissolos. São solos hidromórficos, constituídos por material mineral, que apresentam horizonte glei dentro dos 150cm da superfície do solo. Os solos desta classe encontram-se permanente ou periodicamente saturados por água. Ocorre na bacia a classe Gleissolo Háptico, que corresponde ao antigo Glei Húmico e pouco Húmico, bem distribuídos nas planícies de inundação (Af) como as regiões de Itajaí, Blumenau, Doutor Pedrinho, Taió e Rio do Sul, em faixas estreitas que acompanham o curso dos rios, no domínio de depósitos sedimentares (Q). A textura destes solos é média a argilosa e o relevo plano. São solos mal ou muito mal drenados, de caráter eutrófico ou distrófico e profundidade que atinge até 60cm.

Nitossolos. São solos constituídos por material mineral, com horizonte B nítico. Na bacia ocorrem as classes Nitossolo Háptico e Vermelho, que correspondem a Terra Bruna Estruturada e Terra Bruno/Roxa Estruturada, respectivamente, na classificação antiga. Ocorrem na nascente do rio Itajaí do Norte, na bacia do rio Benedito e na região de Taió. A textura destes solos é argilosa a muito argilosa e o relevo suave-ondulado a ondulado. São solos bem drenados, de caráter álico e profundidade de até 150cm.

Latossolos. Compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico. São solos em avançado estado de intemperização, com textura muito argilosa, bem drenados, de caráter álico e profundidade de até 150cm. Ocorrem em relevo suave-ondulado.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Dados e recursos de processamento

Os segmentos da drenagem (linhas) e a borda da massa de água (polígonos) dos sete rios principais foram obtidos da Fundação do Meio Ambiente (GEOAMBIENTE, FATMA/PPMA-SC, 2008), Governo do Estado de Santa Catarina. Foram também obtidos dados de bacias hidrográficas (divisórias) do Banco de Dados Georreferenciados da Agencia Nacional de Águas (ANA, 2007). Dentre outros dados disponíveis, estes foram os de melhor qualidade em uma escala geral (1:1.000.000).

Os dados da geologia regional e estrutural correspondem à carta SG-22 (Curitiba), que é um excerto da carta geológica do Brasil ao milionésimo. Esta informação pode ser obtida no banco de dados geológicos do Brasil, Geobank (CPRM, 2004). Informações complementares foram obtidas do Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina, que foi criado a partir de informações do projeto RADAMBRASIL e publicado no Atlas de Santa Catarina (GPCG, 1986). Também foi consultado o Atlas de Itajaí (AUMOND, 2005).

Os dados de geomorfologia foram obtidos pela digitalização do mapa geomorfológico da bacia do rio Itajaí, disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina. Este mapa é um excerto do Mapa Geomorfológico do Estado de Santa Catarina, também criado a partir de informações do projeto RADAMBRASIL, escala 1:1.000.000 (GPCG, 1986).

Os dados de solos correspondem a um excerto do mapa de reconhecimento de solos do Estado de Santa Catarina, escala 1:250.000 (EMBRAPA, 1998), disponível no acervo digital da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA, publicado em 2004. Informações complementares foram obtidas do levantamento exploratório de solos do Estado de Santa Catarina, escala 1:1.000.000, criado a partir de informações do projeto RADAMBRASIL e do Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (SNLCS) da EMBRAPA (GPCG, 1986).

Foram utilizados dados do mapeamento sistemático do Brasil ao milionésimo: limites municipais, área edificada e rodovias (IBGE, 2010b), além dos setores censitários do último censo demográfico (IBGE, 2010a). Foram digitalizados produtos cartográficos, denominados pelos autores como “carta enchente”, dos municípios Itajaí, Indaial, Brusque, Blumenau e

Timbó, obtidas em campo através de funcionários da Defesa Civil da região. A autoria destes dados é o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), mas não se teve informação sobre o projeto de origem, ano de publicação ou escala. No entanto, estima-se que a escala seja próxima de 1:5000.

Os dados de altitude (Modelo Digital de Elevação: MDE), variáveis geomorfológicas locais [curvaturas vertical (V) e horizontal (H), orientação de vertentes (O) e declividade (S)], além dos modelos Divisor - Drenagem - Orientação (*Aspect, Drainage and Divide, ADD*), formas do terreno (FT) e relevo sombreado (RS), foram obtidos do banco de dados topográficos Topodata (Tabela 5.1, Figura 5.1). As folhas deste banco que compõem a área de estudo são 26S51, 26S495, 27S51 e 27S495 (INPE, 2008; VALERIANO, 2008; VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010). Esses dados foram estruturados em um banco de dados com o mesmo nome do banco de origem. Esta estruturação consistiu na construção de um mosaico para cada variável, e em sua organização em um *workspace* (espaço de trabalho).

Para geoprocessamento, mapeamento, interpretação e análise geográfica utilizaram-se vários recursos SIG, explorando as vantagens de cada um para a solução das questões desta pesquisa. Nesse sentido, procurou-se atribuir um valor sobressalente aos critérios e interpretações do analista. Entre os recursos utilizados estão: ENVI (EXELIS VISUAL INFORMATION SOLUTIONS, 2009), Global Mapper (BLUE MARBLE GEOGRAPHICS, 2011), Google Earth (GOOGLE Inc., 2013), Idrisi (CLARK LABS, 2000), SAGA (GLP, 2013), Spring (INPE/DPI, 2013) e TerraHidro (INPE/DPI, 2012). Para as análises estatísticas foi utilizado o pacote R-statistics (R CORE TEAM, 2013).

5.2. Delimitação de planícies de inundação

A metodologia desenvolvida para delimitação de planícies de inundação na bacia do rio Itajaí constou de três fases: delimitação manual, delimitação automática e avaliação (Figura 5.1) Estas foram executadas para cinco subáreas da área de estudo (ver Figura 4.1). A avaliação foi transversal a todo o processamento: em cada fase os dados de entrada e os produtos de saída foram avaliados de forma qualitativa e quantitativa.

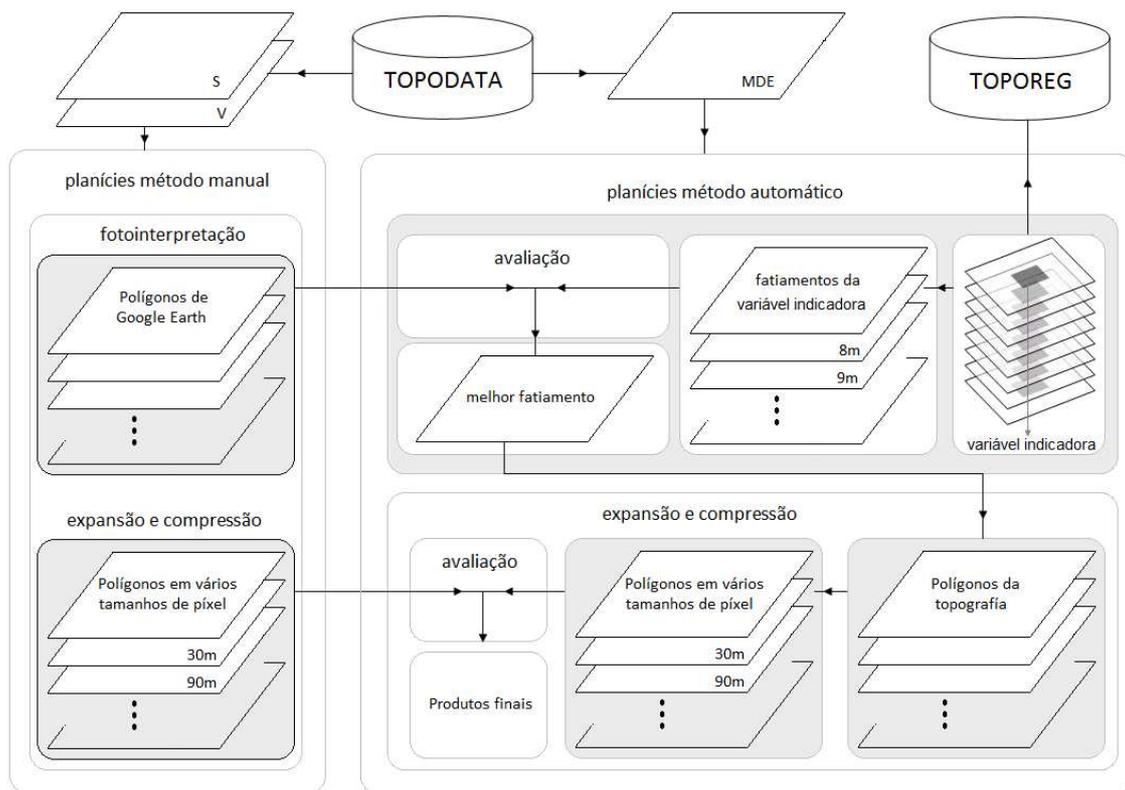


Figura 5.1 - Metodologia para delimitação de planícies de inundação. Variáveis topográficas do banco Topodata utilizadas no processo de delimitação manual: declividade (S) e curvatura vertical (V). A partir da elevação (MDE) foram obtidas variáveis topográficas regionais que não constam no Topodata. Uma destas foi selecionada como variável indicadora para o processo de delimitação automática das planícies. Os polígonos de planícies obtidos pelos dois processos foram comparados em várias resoluções de pixel.

5.2.1. Delimitação manual

A delimitação manual se refere à fotointerpretação e digitalização das planícies de inundação. Ela foi feita traçando-se segmentos vetoriais, na escala mais detalhada possível ao fotointérprete, sobre imagens óticas em ambiente Google Earth. Para isto foram aproveitados vários recursos desse ambiente, entre eles a observação multiescala. Imagens óticas de diversas fontes e resoluções são exibidas sequencialmente a cada aproximação ou *zoom*, mudando o detalhe percebido ao olho humano em sincronicidade com a resolução da imagem. O recurso de exagero vertical, que utiliza dados de elevação do modelo SRTM, aliado aos recursos de mudança de ângulo de visada (nos planos horizontal e vertical), auxiliou na fotointerpretação para o melhor delineamento das quebras de declividade no pé das encostas

(Figura 5.2, A e B). Quando necessário, esses segmentos foram sobrepostos aos modelos de declividade em seis classes (Sc) e curvatura vertical em cinco classes (V5) de Topodata (INPE, 2008) (Figura 5.2, C e D). Os segmentos traçados foram exportados em formato KML (*Keyhole Markup Language*), importados em SIG, transformados em polígonos e transformados em raster, tipo booleano. O produto final deste processamento, denominado “mapa de controle”, foi utilizado como referência na avaliação dos produtos da delimitação automática.

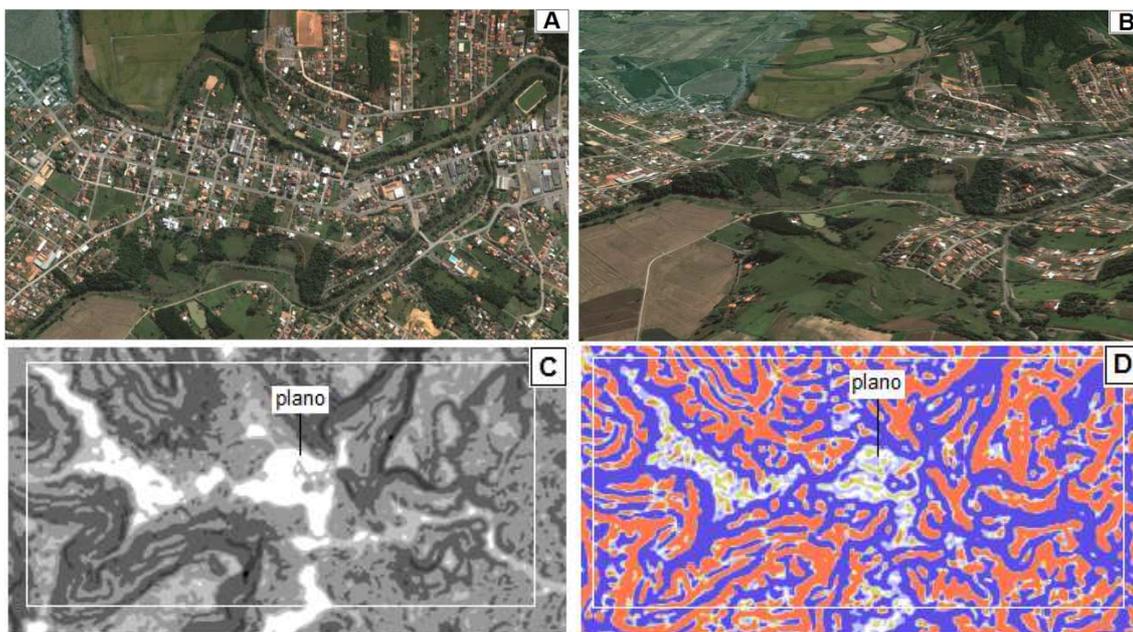


Figura 5.2 – Detalhe de recursos usados na delimitação manual. A) Imagem ótica GE, ortogonal. B) Imagem ótica GE, vista em perspectiva e exagero vertical (3x). C) Detalhe da declividade (Sc) na mesma área das figuras A e B. D) Detalhe da curvatura vertical (V5) na mesma área das figuras A e B.

5.2.2. Delimitação automática

A delimitação automática se refere à detecção das planícies pelo fatiamento em SIG de uma variável topográfica indicadora, escolhida entre aquelas do Topodata e outras de tipo regional. Com base nos desenvolvimentos de Muñoz (2009), obtiveram-se em SIG a partir do MDE, para a área de estudo, as variáveis topográficas regionais altura topográfica, profundidade da dissecação, amplitude do relevo, predominância de altitudes e índice elevação-relevo, todas com resolução de 30m. Estas se armazenaram em um banco de dados denominado aqui Toporeg. O processo consistiu: (i) no deslocamento de todas as cotas de elevação (considerando oito direções cardinais) para um pixel central; (ii) na comparação destes produtos, inclusive o MDE (pixel central, não deslocado) para identificação dos valores máximo,

médio e mínimo da altitude; e (iii) na aplicação de operações aritméticas para a obtenção de cada variável (Figura 5.3). Neste processo acrescentaram-se à metodologia proposta por Muñoz (2009) algumas melhorias: correção de erros do algoritmo nas fases de deslocamentos direcionais e de sobreposição e incorporação do índice elevação-relevo.

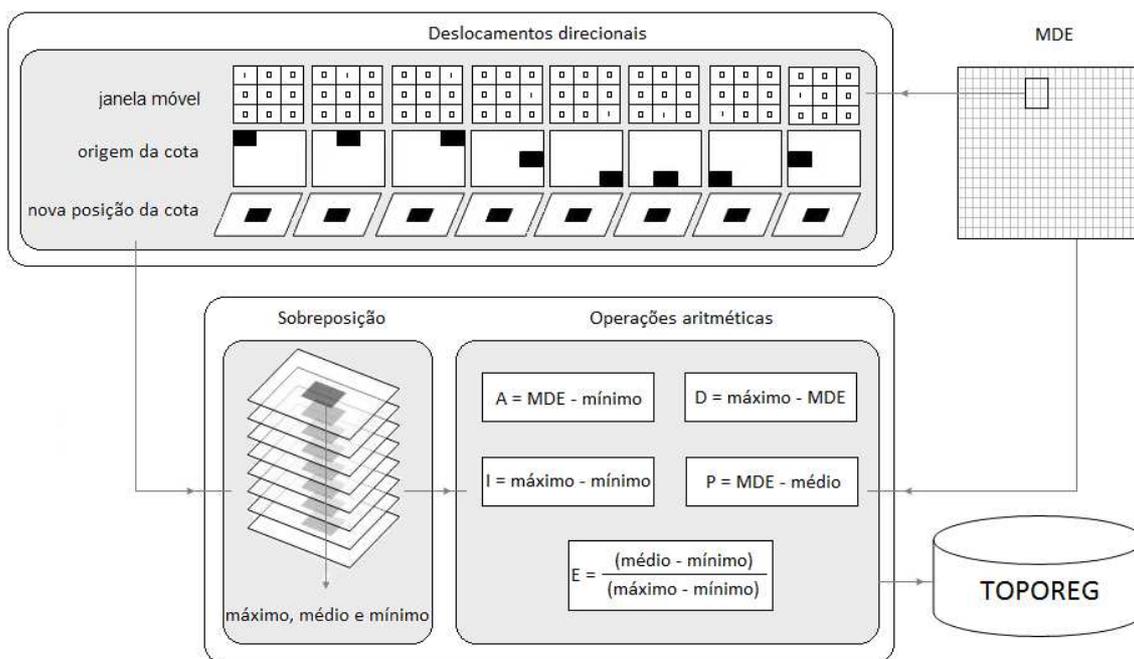


Figura 5.3 - Metodologia para obtenção de variáveis topográficas regionais: altura (A), profundidade da dissecação (D), amplitude do relevo (I), predominância das altitudes (P) e índice elevação-relevo (E).

Figura composta a partir de informações em Muñoz et al. (2009) e Muñoz e Valeriano (2013).

A escolha da variável topográfica indicadora esteve baseada em (i) critério qualitativo: aquela a partir da qual as planícies de inundação seriam facilmente identificadas pelo analista; uma vez que se pretende mapear uma característica regional da paisagem, espera-se que a variável indicadora esteja entre as do tipo regional; (ii) critério quantitativo: aquela cujos valores mostrassem um padrão de dispersão regional.

Para ajudar na fotointerpretação e escolha da variável indicadora, foram criadas paletas em níveis de cinza com contraste apropriado à visualização. Como será apresentado no capítulo de resultados e discussões, escolheu-se como variável indicadora à altura topográfica. Na sequência, foram gerados mapas booleanos (planície e não planície) pelo fatiamento desta variável. Cada fatiamento foi feito em intervalos de 0m até uma altura hp para representar a

planície sob o rótulo “1”, enquanto se atribuiu o rótulo “0” para as demais áreas, acima de hp. Os níveis de hp aplicados variaram em metros inteiros entre 1m e 15m. O resultado deste fatiamento foi filtrado com o propósito de eliminar feições que representavam ruído dentro e fora dos polígonos de interesse, e gerar polígonos homogêneos. Para eliminar o ruído dentro dos polígonos, foi aplicado o filtro morfológico denominado *closing* (VINCENT, 1992; EXELIS, 2014). Este filtro suaviza os contornos, funde objetos estreitos e feições longas e finas, elimina pequenos orifícios dentro de polígonos maiores e preenche lacunas nos contornos. Aos polígonos resultantes desta primeira filtragem foi atribuído um identificador e depois aplicada um segundo processo, que consistiu em descartar aqueles polígonos cujo tamanho estivesse abaixo de um limiar de área mínimo. A escolha do limiar foi estabelecida com base na observação do resultado de vários testes.

A partir deste processamento, obteve-se um mapa raster booleano por cada altura fatiada, somando quinze mapas, de 1m até 15m, para cada subárea, e o total de 75 mapas. Com o propósito de determinar um nível de fatiamento adequado para a obtenção das planícies, estimou-se o ajuste (precisão) entre cada um dos produtos do fatiamento e o mapa de controle correspondente, ambos produtos na resolução 30 m. As estimativas foram feitas por tabela de contingência $i = j = 2$, a partir de um conjunto de amostras aleatórias por cada mapa. Estimaram-se os atributos apropriados para avaliação de variáveis dicotômicas (LIRA; NETO, 2006; WILKS, 2006): exatidão, através dos índices *Critical Success Index* (CSI) e *Heidke Skill Score* (HSS); viés, através do *Bias* (B); e o coeficiente de correlação *phi*. O ajuste em outras escalas entre o mapa de controle e o mapa final da delimitação automática foi avaliado pela aplicação do mesmo método estatístico sobre esses mapas nas resoluções de 10m, 30m, 60m, 90m, 120m, 270m e 540m.

Conforme a norma NBR 13133/1994, “exatidão é o grau de aderência das observações em relação ao seu valor verdadeiro” e “precisão é o valor que expressa o grau de aderência das observações entre si” (ABNT, 1994). Assim, os resultados da análise de contingência estão indicando o grau de precisão atingido entre os produtos da delimitação manual e automática obtidos no desenvolvimento desta pesquisa. Neste documento, a referência à exatidão é estritamente decorrente da definição das medidas CSI (exatidão) e HSS (exatidão relativa) referenciadas como *accuracy score* na literatura (por exemplo, WILKS, 2006).

5.2.3. Análise da dispersão topográfica

Foram criados excertos das variáveis topográficas regionais e do MDE para cada subárea da Figura 4.1. Estes arquivos foram amostrados para verificar sua distribuição de frequências. Em seguida, os produtos finais da delimitação automática foram utilizados como máscara para amostrar estas variáveis somente nas planícies (Figura 5.4). A partir destas amostras foi verificada a distribuição de frequência das variáveis topográficas regionais nas planícies de inundação. Por fim, a distribuição de frequências dos dois conjuntos de dados foi comparada. Os mesmos excertos foram criados para as variáveis topográficas locais, mas neste caso utilizaram-se as variáveis no seu formato categórico.

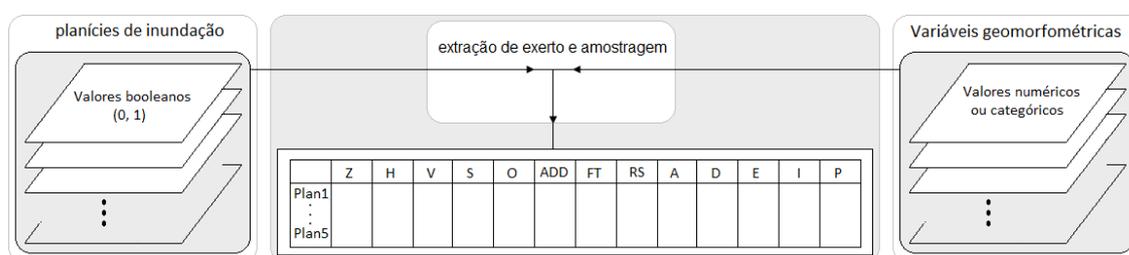


Figura 5.4 - Metodologia para extração de informações geomorfométricas das planícies de inundação. Variáveis geomorfométricas locais (Topodata): elevação (Z), curvaturas horizontal (H) e vertical (V), declividade (S) e orientação das vertentes (O). Modelos do relevo (Topodata): azimuth-divisores-drenagem (ADD), formas do terreno (FT) e relevo sombreado (RS). Variáveis topográficas regionais (Toporeg): altura (A), dissecação (D), índice elevação-relevo (E), amplitude (I) e predominância (P).

5.3. Análise da susceptibilidade da bacia e da exposição da população a inundações

Para avaliar a susceptibilidade a inundações da bacia do rio Itajaí, foram estudadas condicionantes a inundações a partir de variáveis do meio físico, cujas informações foram levantadas e/ou produzidas ao longo desta pesquisa: drenagem, clima, arcabouço geológico, geomorfologia, solos, e topografia. Deu-se particular destaque à morfometria da drenagem, que diz respeito à capacidade de produção de água e sedimentos da bacia, à configuração de lineamentos morfoestruturais, que diz respeito à gênese desses sedimentos, e à topografia, que diz respeito às condições do relevo que favorecem inundações: morfologia de planícies. Já a exposição da população a inundações foi avaliada em termos da distribuição da malha urbana em zonas susceptíveis a inundações.

5.3.1. Caracterização morfométrica da drenagem

Para o cálculo das métricas da drenagem indicadoras de susceptibilidade a inundações, as informações de fontes oficiais (FATMA e ANA) tiveram de ser melhoradas. O processo de extração da rede e delimitação de bacias esteve baseado na metodologia de Jiménez-Fernández (2011), que recomenda o uso do MDE de Topodata e o algoritmo de fluxo múltiplo DEMON para gerar redes de drenagem coerentes compatíveis com a escala 1:100.000. Pelo processamento desses dados foi possível ajustar a borda da bacia e das sub-bacias, assim como homogeneizar os segmentos da rede da drenagem. O limiar utilizado para extração da drenagem de toda a bacia foi 15000 pixels de 30m x 30m (13.500km²). Os resultados foram avaliados, e editados quando necessário, junto a duas variáveis do relevo indicadoras de aspectos da drenagem: modelo *Aspect, Drainage and Divides* (ADD) e a variável topográfica curvatura horizontal (H).

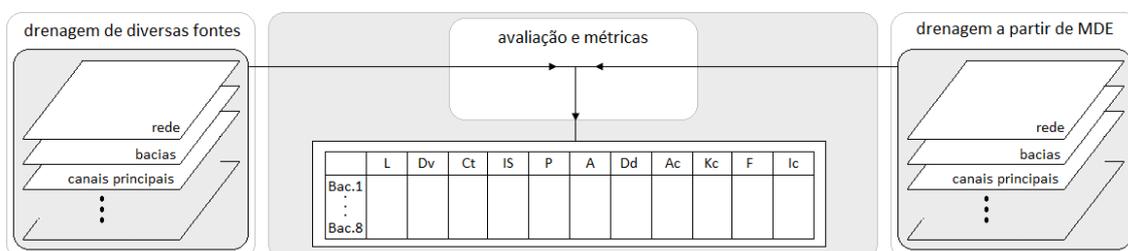


Figura 5.5 - Metodologia para o cálculo de informações morfométricas da drenagem. Métricas calculadas: comprimento do canal principal (L), distância entre os extremos do canal medida em linha reta (Dv), comprimento total dos cursos da água (Ct), índice de sinuosidade (IS), perímetro da bacia (P), área da bacia (A), densidade da drenagem (Dd), área de contribuição (Ac), coeficiente de compacidade (Kc), fator de forma (F) e índice de circularidade (Ic).

Com base nos produtos deste processamento calcularam-se as seguintes métricas para cada sub-bacia, indicadas para avaliar suscetibilidade a inundações (Tabela 3.3; Figura 5.5): comprimento do canal principal (L), distância entre os extremos do canal medida em linha reta (Dv), comprimento total dos cursos da água (Ct), índice de sinuosidade (Is), perímetro da bacia (P), área da bacia (A), densidade da drenagem (Dd), área de contribuição (Ac), coeficiente de compacidade (Kc), fator de forma (F) e índice de circularidade (Ic) (STRAHLER, 1964; VILLELA;

MATTOS, 1975; CHRISTOFOLETTI, 1980). Por fim, foi observado o perfil longitudinal da altitude do canal principal das sub-bacias junto à localização de cidades com histórico de ocorrência de inundações.

5.3.2. Interpretação e traçado de lineamentos morfoestruturais

Foram interpretados lineamentos morfoestruturais segundo o método proposto por Andrades Filho e Rossetti (2012) em três das cinco subáreas de estudo. Assim, sobre a rede da drenagem e a curvatura horizontal (H) foram traçados os “lineamentos da drenagem” e sobre a orientação de vertentes (O), com ajuda do relevo sombreado (Rs), foram traçados os “lineamentos do relevo”. Para que diferenças do detalhe de observação não promovessem viés na distribuição das direções, foram mantidos constantes a escala em 1:100.000 e o tamanho mínimo de segmento em 1 cm, o que representa aproximadamente 1km no terreno. A partir dos segmentos foram gerados os diagramas de roseta correspondentes.

5.3.3. Análise da exposição à inundação

A exposição a inundação na bacia do rio Itajaí foi analisada de forma sucinta com base na metodologia proposta pela *Secretaria General de la Comunidad Andina* (SGCA, 2009). Esta consiste na avaliação da distribuição espacial de elementos urbanos em zonas de influência de um fenômeno natural perigoso, neste caso, em planícies suscetíveis a inundação.

Foram compostos mapas com informações de setores censitários, área construída e trechos rodoviários (IBGE, 2010a; 2010b) para toda a bacia do rio Itajaí. Estes mapas foram sobrepostos às planícies de inundação obtidas no desenvolvimento desta pesquisa. A observação pode ser feita em escalas mais detalhadas nos municípios com carta enchente: Itajaí, Indaial, Brusque, Blumenau e Timbó. Os produtos “carta enchente” passaram por um processo de avaliação, georreferenciamento e digitalização em ambiente de SIG.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Delimitação de planícies de inundação

6.1.1. Delimitação manual

O processo de fotointerpretação de imagens em ambiente Google Earth (GE) foi semelhante ao processo de fotorrestituição a partir de fotografias aéreas, com a vantagem do detalhe acrescentado nas aproximações ao objeto; ao mesmo tempo, a delimitação manual exigiu poucos recursos computacionais. O maior custo esteve relacionado com o tempo de processamento, determinado pela experiência, treinamento e disposição do fotointérprete. Em média, foram necessárias duas semanas de trabalho para cada uma das cinco subáreas analisadas. A subárea mais difícil de delimitar manualmente foi Indaial-Blumenau, pois embora fosse um terreno com predomínio de altitudes baixas (baixo-predominante), a superfície topográfica na área de planície apresenta ondulações mais altas que o entorno, formando pequenas e múltiplas ilhas na planície de inundação. Todas as outras áreas foram fáceis de fotointerpretar, com pequenas dificuldades derivadas da baixa qualidade das imagens disponíveis em Google Earth, na época da interpretação, para algumas escalas; por exemplo, houve dificuldade com imagens de Doutor Pedrinho e Rio do Sul disponíveis em janeiro de 2014 na escala 1:300 (a mais detalhada da interpretação). Os resultados deste processamento são apresentados na Figura 6.1.

A decisão de utilizar imagens de alta resolução e recursos do GE foi motivada pela necessidade de um dado de controle para validar os produtos da delimitação automática de planícies de inundação. Inicialmente pensou-se utilizar como controle cartas enchente, mas as disponíveis foram insuficientes para avaliar a bacia como um todo, pois se limitaram a poucas e pequenas áreas. Contudo, os recursos disponibilizados em GE mostraram-se valiosos para a produção de dados detalhados, superando limitações de acesso, homogeneidade e custo de aquisição de dados de controle.

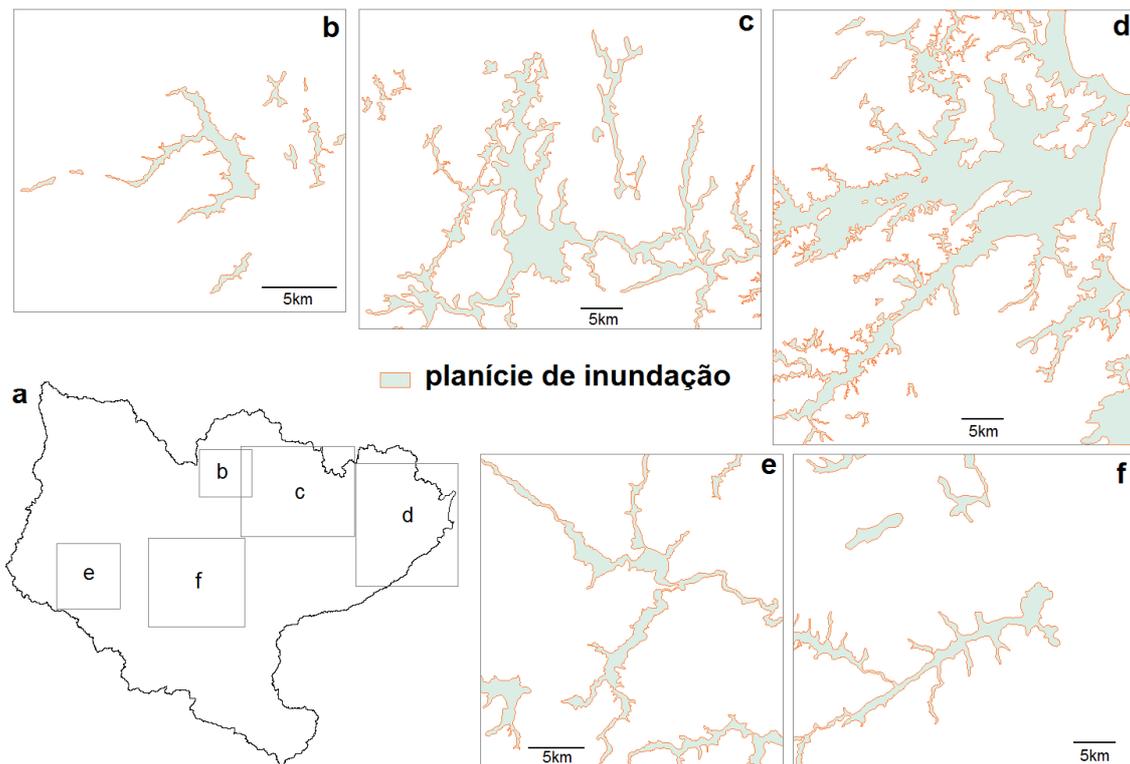


Figura 6.1 - Resultado da delimitação manual de planícies de inundação nas subáreas.
 a) Localização das subáreas na bacia do rio Itajaí; b) Doutor Pedrinho;
 c) Indaial-Blumenau; d) Itajaí; e) Taió; f) Rio do Sul.

O padrão de qualidade que é exigido a fornecedores de imagens de SR no ambiente GE sugere boa qualidade cartográfica de produtos derivados. Silva e Nazareno (2009) conduziram uma pesquisa com o propósito de avaliar o padrão de exatidão cartográfica (PEC) da imagem do GE disponível para Goiânia em 2007. Pelas características da imagem, esta poderia atender ao mapeamento em escala 1:5000. Analisadas as discrepâncias entre pontos de controle Gps e seus homólogos na imagem do GE, a pesquisa indicou um PEC classe A na escala 1:5000, com 90% de confiança. Apesar de ser promissor este resultado, os autores chamam a atenção sobre mudanças permanentes do dado oferecido no GE e a necessidade de que a análise de qualidade PEC seja um procedimento rotineiro em projetos que envolvam a produção de documentos cartográficos.

Uma vez que a escala pretendida nesta pesquisa é 1:100.000, não é necessário que os produtos obtidos da delimitação manual atendam esse grau de exatidão. Em todo caso, espera-se que produtos derivados da interpretação de imagens em GE atendam mapeamentos em escalas tão detalhadas quanto 1:5000. Este dado é adequado como controle para a delimitação automática por processamento de dados derivados de SRTM, pois erros cartográficos em escalas grandes são imperceptíveis nas escalas menores. Por outro lado, erros inerentes à subjetividade do fotointérprete (por exemplo, reconhecimento de quebras da declividade na região de fronteira entre planícies e encostas) eventualmente são compensados na generalização.

6.1.2. Seleção de variável indicadora de planícies fluviais

Detalhes dos produtos do banco de dados de variáveis topográficas regionais, Toporeg, apresentam-se nas Figuras 6.2 e 6.3, para sua avaliação qualitativa. A primeira figura é uma amostra da subárea Itajaí (no litoral), na qual foi destacada a planície. Na segunda figura apresentam-se os resultados para toda a subárea Taió.

No âmbito qualitativo, a altura topográfica mostrou-se mais adequada à delimitação automática do que as outras variáveis, dado que as planícies de inundação são percebidas com maior facilidade neste produto. No âmbito quantitativo, pela distribuição de frequências das variáveis, verificou-se a facilidade de delimitação das planícies pela classificação dos valores da altura (Figuras 6.4 e 6.5).

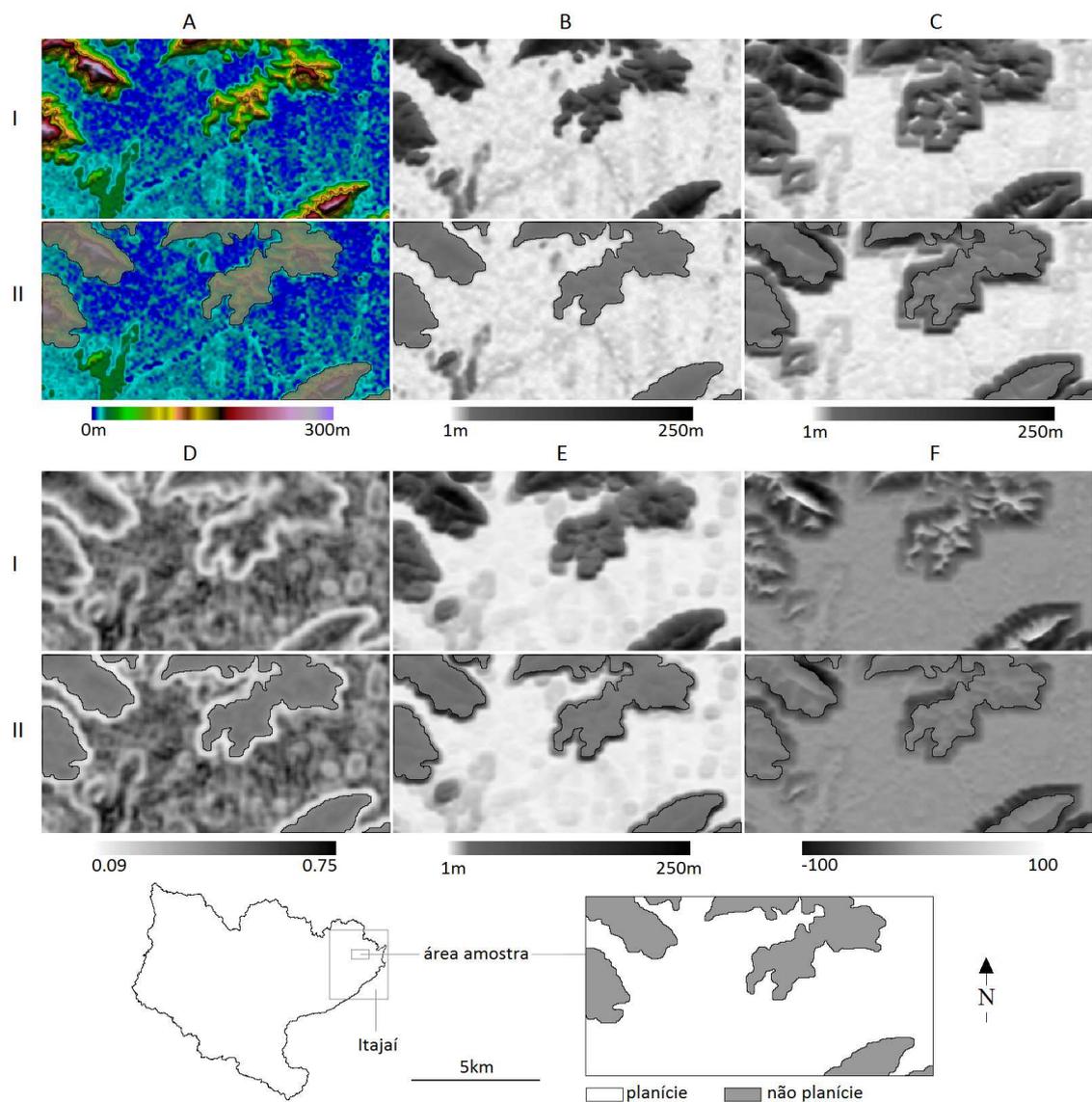


Figura 6.2 - Detalhe da topografia regional das planícies de inundação em Itajaí.
 Colunas: (A) Elevação, MDE. (B) Altura. (C) Profundidade da dissecação.
 (D) Índice elevação-relevo. (E) Amplitude. (F) Predominância.
 Linhas: (I) Variáveis topográficas sem máscara. (II) Variáveis com máscara para destaque das planícies.

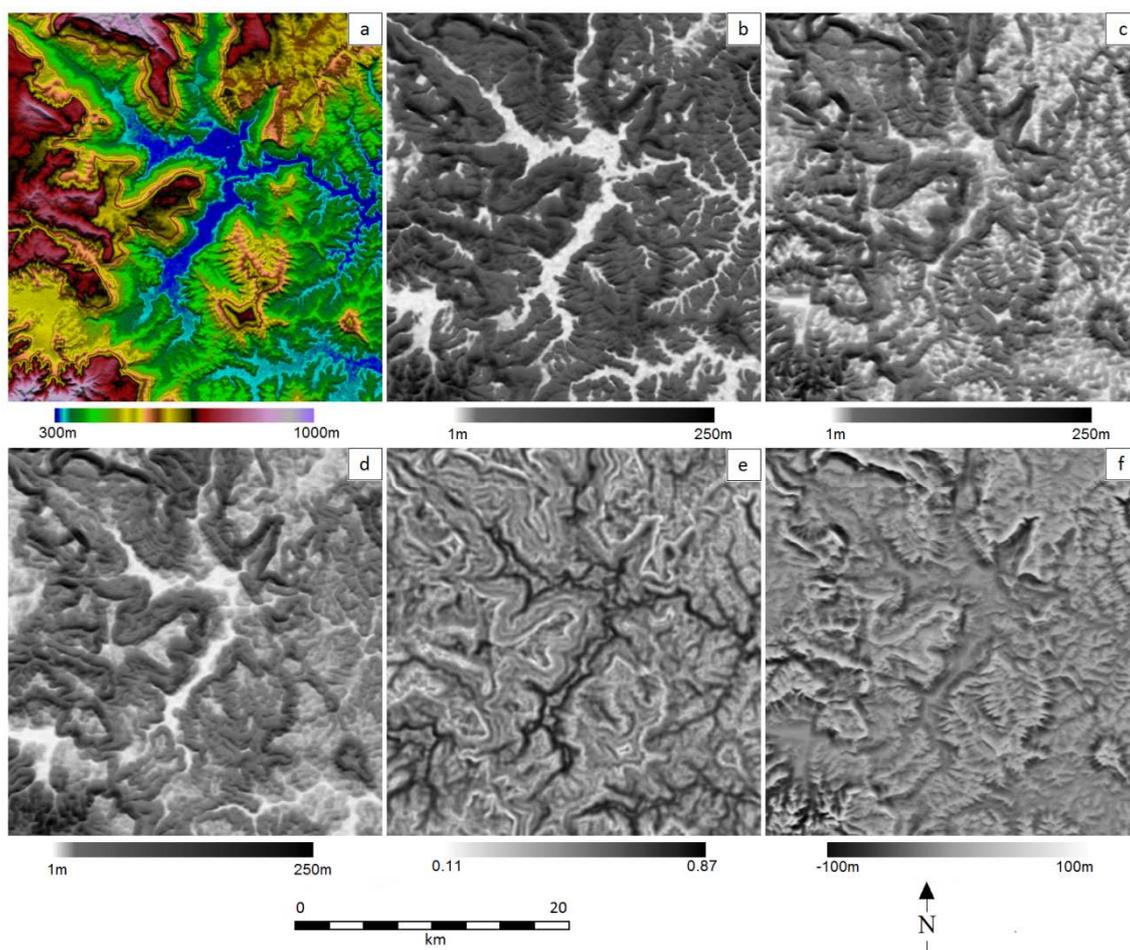


Figura 6.3 - Variáveis topográficas regionais em Taió, obtidas a partir da altitude (a): altura (b): profundidade da dissecação (c), amplitude (d), índice elevação-relevo (e), predominância (f). Resolução de 30m.

Na Figura 6.4 observa-se que a distribuição de frequências da classe planície (indicada por P) está bem diferenciada da distribuição geral (indicada por Ta) na variável altura topográfica. Isto ocorre nas cinco subáreas e permite supor que as planícies podem ser delimitadas por esta variável estabelecendo-se um único limiar de corte para toda a bacia.

As planícies também podem ser diferenciadas pelos valores da amplitude e da altitude. Embora a distribuição de frequência da amplitude apresente um comportamento regional dessa variável (mesma tendência nas cinco subáreas), observa-se também maior confusão da classe “planícies” com as outras classes, o que pode significar maior custo de pós-processamento.

As planícies não podem ser descritas regionalmente em termos da altitude, pois estas se distribuem na bacia em estratos: Doutor Pedrinho, entre 600m e 850m, Indaial-Blumenau, entre 50m e 400m, Itajaí, entre 0m e 170m, e Rio do Sul e Taió, entre 400m e 600m.

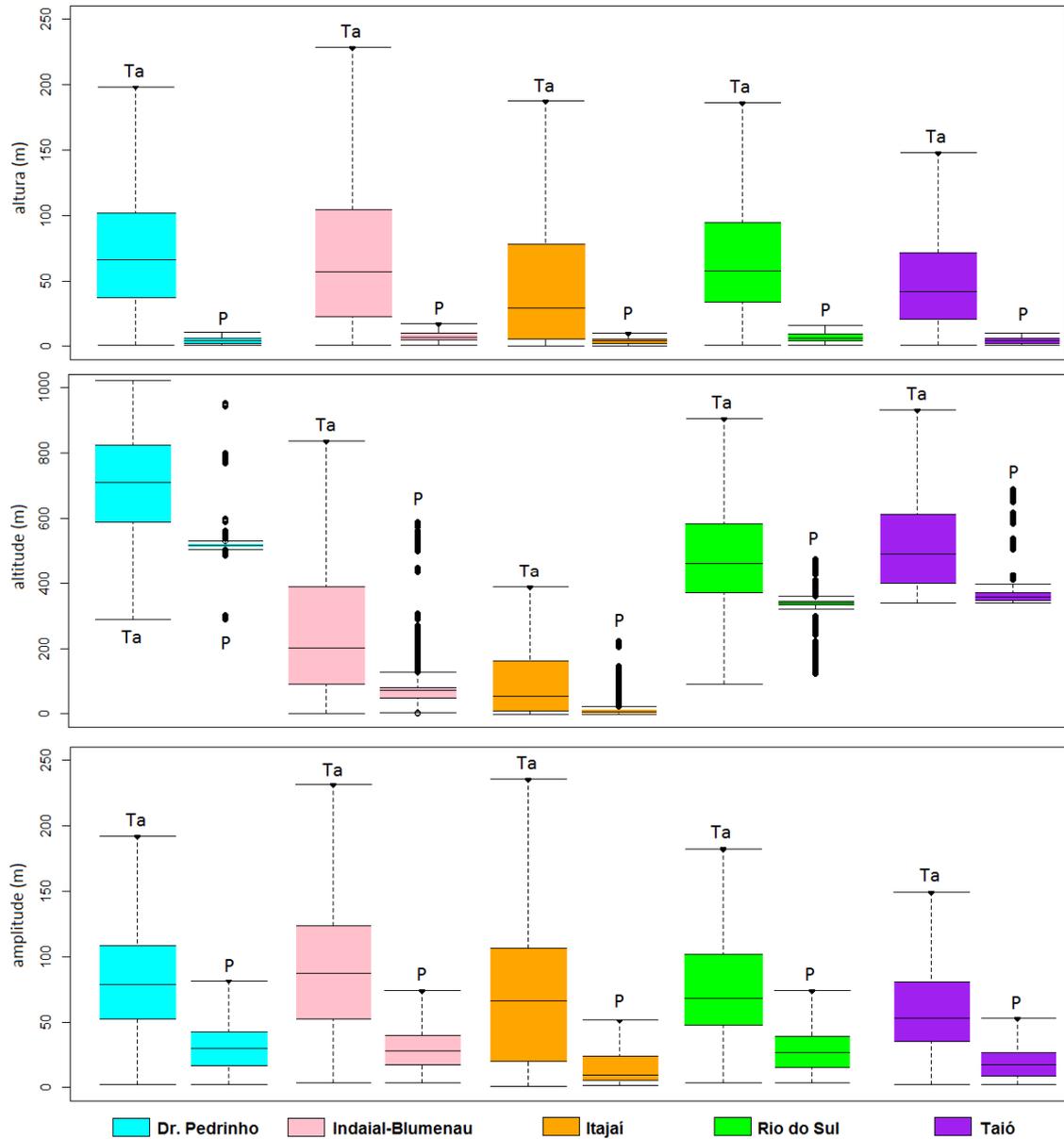


Figura 6.4 - Dispersão das variáveis topográficas: altura, altitude e amplitude nas subáreas. Dados de toda a subárea: Ta. Dados apenas nas planícies: P.

Da mesma forma que a distribuição de frequência da altura e da amplitude, as distribuições da profundidade da dissecação, do índice elevação-relevo e da predominância exibem tendência regional, embora a discriminação das planícies a partir destes valores não se mostre tão clara. Os valores da dissecação variam entre 20m e 150m, aproximadamente, nas cinco subáreas e as distribuições dos valores nas planícies se confundem totalmente com aquelas da totalidade das respectivas subáreas (Figura 6.5).

Os *boxplots* do índice elevação-relevo exibem certo grau de estratificação (Figura 6.5). Podem ser reconhecidos dois estratos: Doutor Pedrinho-Rio_do_Sul-Taió e Indaial-Blumenau-Itajaí. No primeiro estrato, as planícies podem ser separadas claramente. Em Indaial-Blumenau, as planícies se confundem um pouco, dificultando sua discriminação em relação à subárea. Em Itajaí, as planícies se confundem totalmente. Por definição, o índice elevação-relevo expressa a proporção relativa de terrenos altos e terrenos baixos dentro de uma área amostral (WOOD; SNELL, 1960). Como era de se esperar, os valores do índice no primeiro estrato apontam para uma proporção ligeiramente maior de terrenos altos (aproximadamente 0,4% a 0,6%); no segundo estrato se observa uma proporção ligeiramente maior de terrenos baixos (aproximadamente 0,35% a 0,45%); e os valores do índice nas planícies, inclusive em Itajaí, exibem predominante proporção de terrenos baixos (aproximadamente 0,15% a 0,30%).

A predominância evidenciou os mesmos estratos identificados com o índice elevação-relevo (Figura 6.5). As áreas de Dr. Pedrinho, Rio do Sul e Taió, localizados na região do Alto Vale, exibem uma boa distribuição dos valores alto- e baixo-predominante. Em regiões montanhosas é plausível a ocorrência de valores de predominância positivos (alto-predominante). Isto não acontece no Alto Vale do Itajaí devido à ocorrência de planícies largas nessa região. Indaial-Blumenau e Itajaí, por sua vez, exibem valores de predominância negativos (baixo-predominante) devido à localização destas subáreas na região de baixios da bacia.

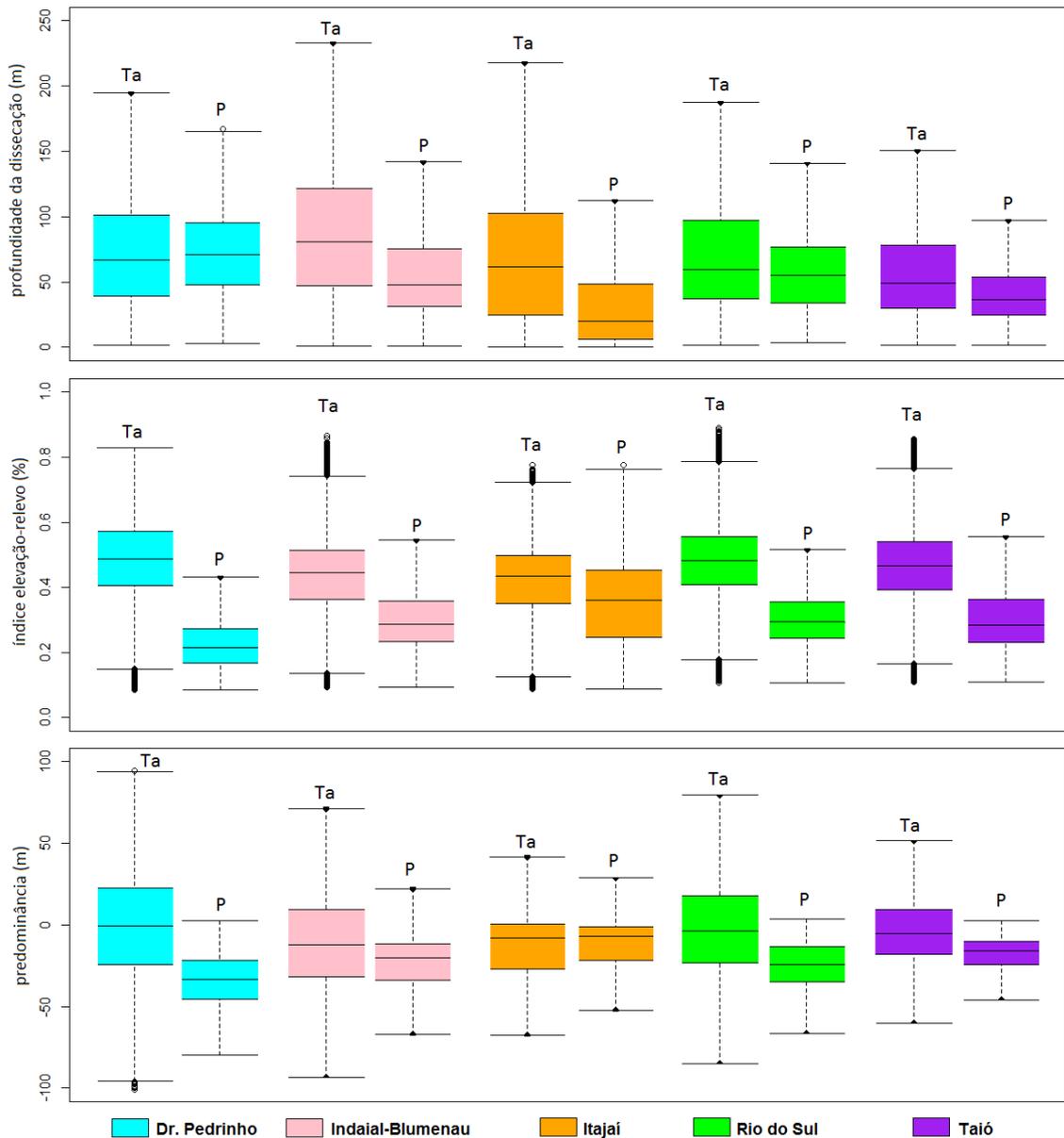


Figura 6.5 - Dispersão das variáveis topográficas: profundidade da dissecação, índice elevação-relevo e predominância nas subáreas.
 Dados de toda a subárea: Ta. Dados apenas nas planícies: P.

Por serem atributos locais, as variáveis Topodata exibem um padrão de confusão numérica que dificulta uma análise quantitativa para classificação automática de unidades homogêneas da paisagem regional. Entretanto, por fotointerpretação é possível reconhecer e delimitar manualmente as planícies a partir desses dados (Figura 6.6), mas os segmentos obtidos serão muito menos exatos do que aqueles obtidos em GE para controle, devido à menor resolução dos dados de Topodata.

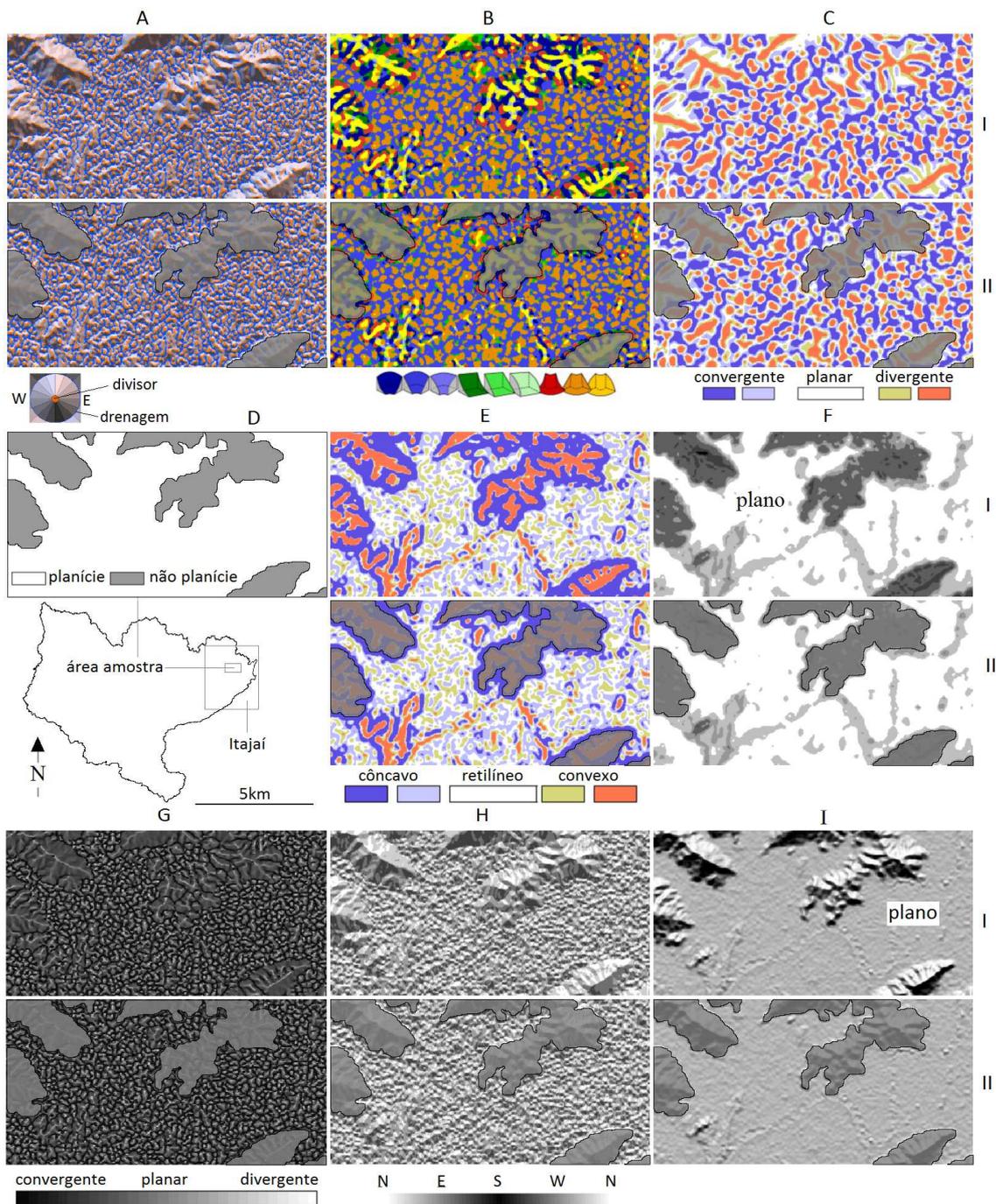


Figura 6.6- Detalhe da topografia local das planícies de inundação em Itajaí. Colunas: (A) Modelo *Aspect Drainage and Divides*. (B) Modelo de formas do terreno. (C) Curvatura horizontal em 5 classes. (D) Máscara para destaque das planícies. (E) Curvatura vertical em cinco classes. (F) Declividade, classificação Embrapa. (G) Curvatura horizontal numérica. (H) Orientação das vertentes em oito classes (I) Relevo sombreado. Linhas (I) Variáveis sem máscara. (II) Variáveis com máscara.

6.1.3. Delimitação automática

Da mesma forma que no processo de delimitação manual, o processo de delimitação automática exigiu poucos recursos computacionais. No entanto, o tempo de processamento diminuiu substancialmente: em média passou de duas semanas para quatro horas.

Na Figura 6.7 apresentam-se, como exemplo, os resultados parciais do processo de delimitação automática na subárea Taió. Observa-se que no primeiro nível de fatiamento (1m) foram gerados poucos e pequenos polígonos da classe planície. No fatiamento pelo limiar 7m obteve-se um mapa muito parecido com o mapa de controle. No último nível (15) foram gerados polígonos maiores e mais numerosos do que no mapa de controle.

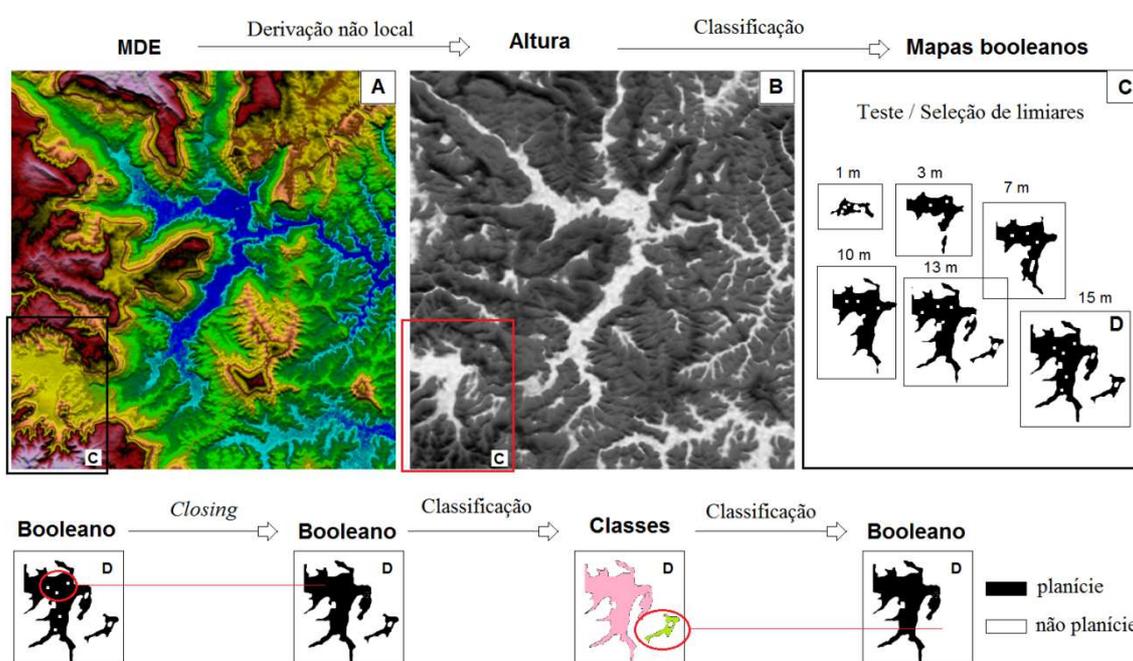


Figura 6.7 – Resumo de processamento para delimitação de planícies de inundação. A) MDE Topodata. B) altura topográfica obtida por processamento em SIG do MDE. C) excerto da altura para exemplificar os seguintes processamentos. Testes para seleção de limiar de fatiamento da altura, entre 1m e 15m. D) mapa booleano do fatiamento em 15m, utilizado para exemplificar o pós-processamento: 1. Aplicação do filtro morfológico *closing* para eliminar discontinuidades dentro da classe “planície”; 2. Individualização de polígonos pela designação de um ID, e cálculo de sua área dos polígonos. A partir dessa área estabelece-se um limiar de área para eliminar os polígonos muito pequenos, mal classificados como planície; 3. Classificação e obtenção de mapa final booleano de planícies de inundação.

A escolha do nível de fatiamento da altura para toda a bacia foi dificultada pelos resultados da tabela de contingência, pois o comportamento assintótico das curvas de ajuste entre o dado de controle e o dado da delimitação automática, nas medidas *Csi*, *Hss* e *phi*, não indicou um valor ótimo e único. Por este motivo, o valor do fatiamento selecionou-se a partir do viés (B). Esta estimativa indicou um único valor não tendencioso para cada subárea, que corresponde ao ponto de cruzamento entre a curva do viés e a linha $B = 1$ (Figura 6.8): Itajaí e Taió 8m, Doutor Pedrinho 9m, Indaial-Blumenau 12m e Rio do Sul 13m. Uma vez que não se obteve o mesmo valor para todas as subáreas, considerou-se que, no âmbito da bacia, o nível de fatiamento ótimo pode ser adotado como algum valor na faixa de 8m até 13m. É notável que no evento excepcional de 1983 o nível máximo da inundação na cidade de Blumenau tenha atingido 15m, altura próxima do limiar de fatiamento indicado pelo viés nessa subárea (12m).

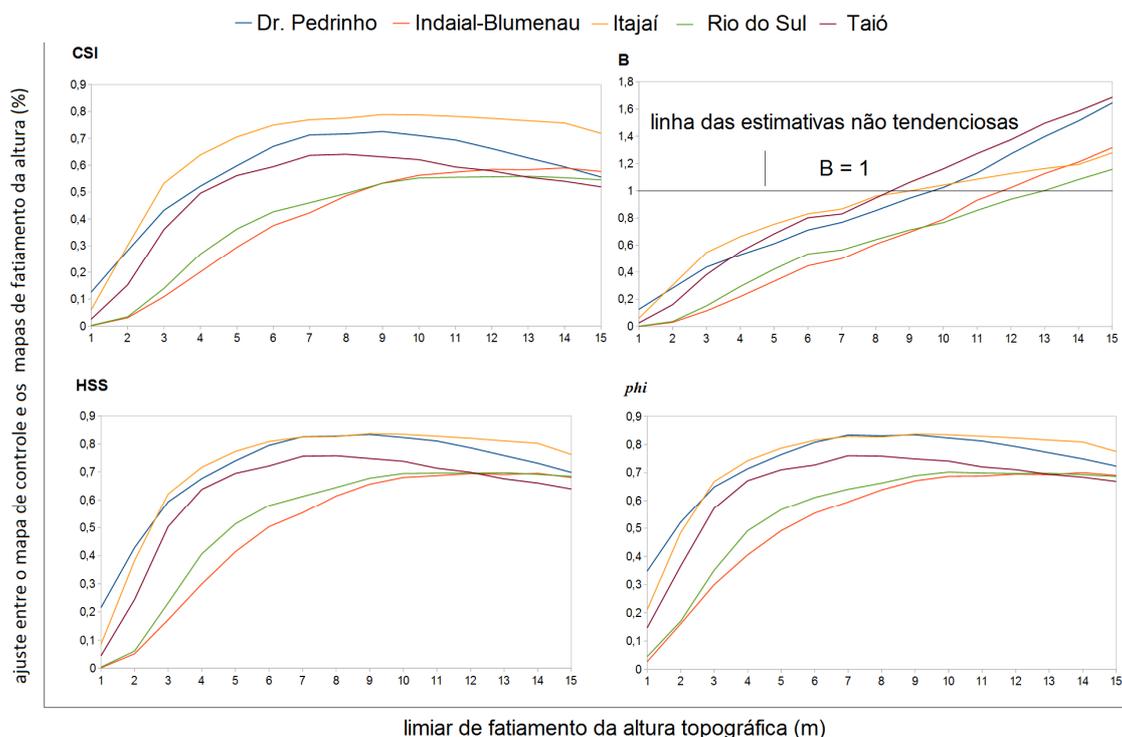


Figura 6.8 - Curvas da tabela de contingência para avaliação do fatiamento. *Critical Success Index* (*Csi*), viés (B), *Heidke Skill Score* (*Hss*) e do coeficiente de correlação *phi*.

Na Figura 6.9 apresentam-se os resultados da delimitação manual e automática de planícies de inundação, junto a polígonos de depósitos sedimentares, na subárea Taió. Observa-se ganho de detalhe em planícies de inundação obtidas nesta pesquisa, quando comparadas com

mapeamentos anteriores extraídos do mapa geológico. Assim, verifica-se que os produtos obtidos nesta pesquisa atendem mapeamentos em escala maior do que 1:1.000.000. Pelo exposto em relação à escala de mapeamento atendida por dados SRTM e derivados (item 3.3.2), pode-se dizer que estes resultados da delimitação de planícies de inundação atendem mapeamento em escala 1:100.000.

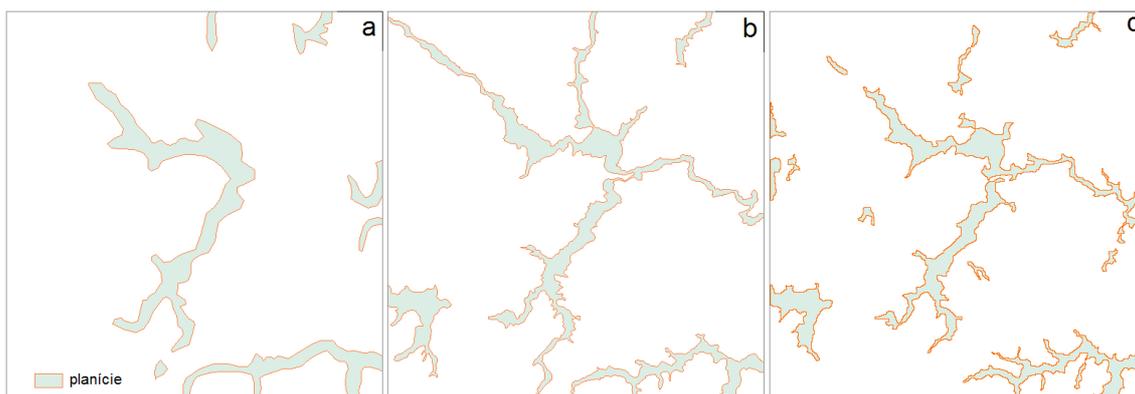


Figura 6.9 - Planície de inundação na subárea Taió: a) depósitos quaternários; b) planície de inundação obtida por delimitação manual; c) planície de inundação obtida por delimitação automática.

Na Figura 6.10 observa-se que os dados da “carta enchente” se ajustam bem ao resultado da delimitação automática de planícies de inundação, nas regiões Timbó, Indaial, Blumenau, Itajaí e Brusque. Note-se que a escala de mapeamento das cartas enchente levantadas é muito mais detalhada do que a escala esperada dos produtos desta pesquisa. Se os dados de enchente estiverem corretos, os resultados mostrados na Figura 6.10 levam a supor que: (i) o método proposto nesta pesquisa para delimitação automática de planícies de inundação é apropriado; (ii) os resultados obtidos a partir de MDE SRTM atingem níveis de detalhamento maiores do que a escala 1:100.000. Propõe-se que trabalhos futuros verifiquem esta hipótese com dados de campo sobre histórico de cotas de inundação nas áreas de planície de toda a bacia do rio Itajaí.

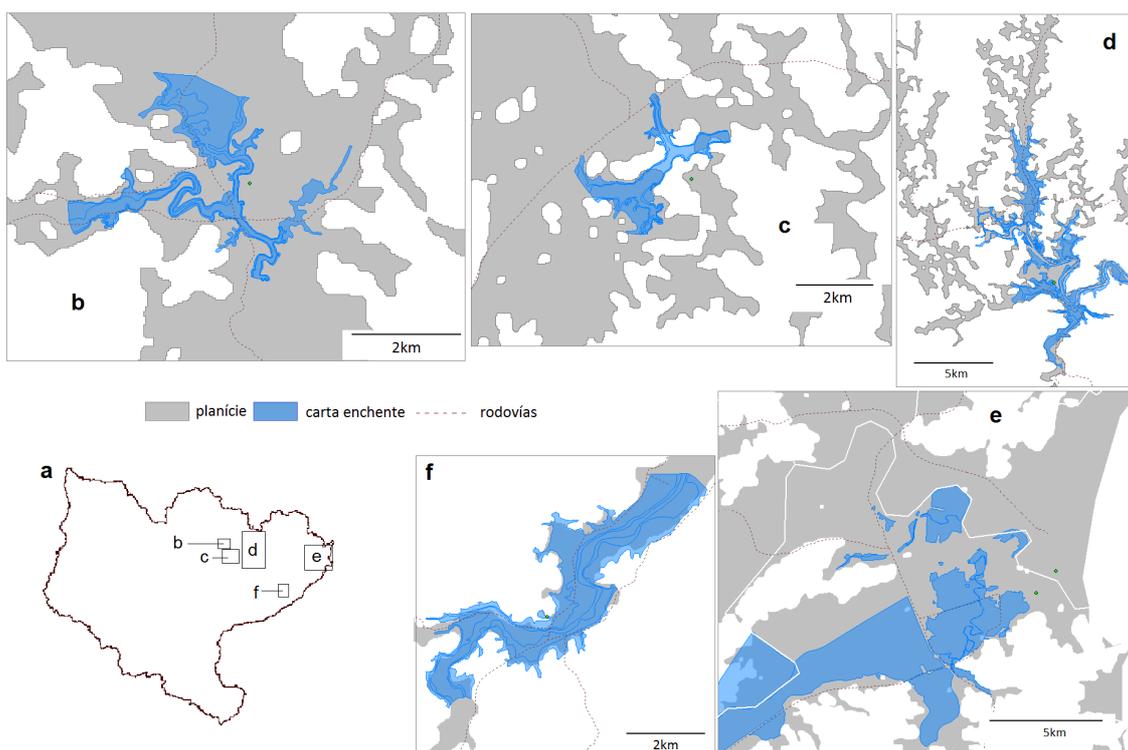


Figura 6.10 – Carta enchente sobreposta à planície de inundação obtida pelo método automático: a) distribuição dados “carta enchente” na bacia do rio Itajaí; b) Timbó; c) Indaial; d) Blumenau; e) Itajaí; f) Brusque.
 Fonte: Figura composta a partir de dados do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE, ano desconhecido) e de informação produzida nesta pesquisa.

O ajuste em outras escalas entre o mapa de controle e o mapa final da delimitação automática apresenta-se na Figura 6.11. O desempenho observado pelas medidas da tabela de contingência foi independente da escala, ao contrário das métricas derivadas da topografia, reconhecidamente dependentes de escala. O desempenho foi constante nas sete resoluções e nas cinco subáreas de estudo. Assim, uma vez que não se observaram variações muito claras entre os graus de generalização, pode-se dizer que a exatidão média foi de 0,75 (CSI e Hss), o ajuste médio foi de 0,75 (ϕ) e o viés foi de 0,95 (B), independentemente da escala de avaliação. Os resultados do ajuste estão exemplificados na Figura 6.12, na qual se apresentam as planícies de inundação, o mapa de controle e a delimitação automática em três das sete resoluções testadas, da subárea Taió.

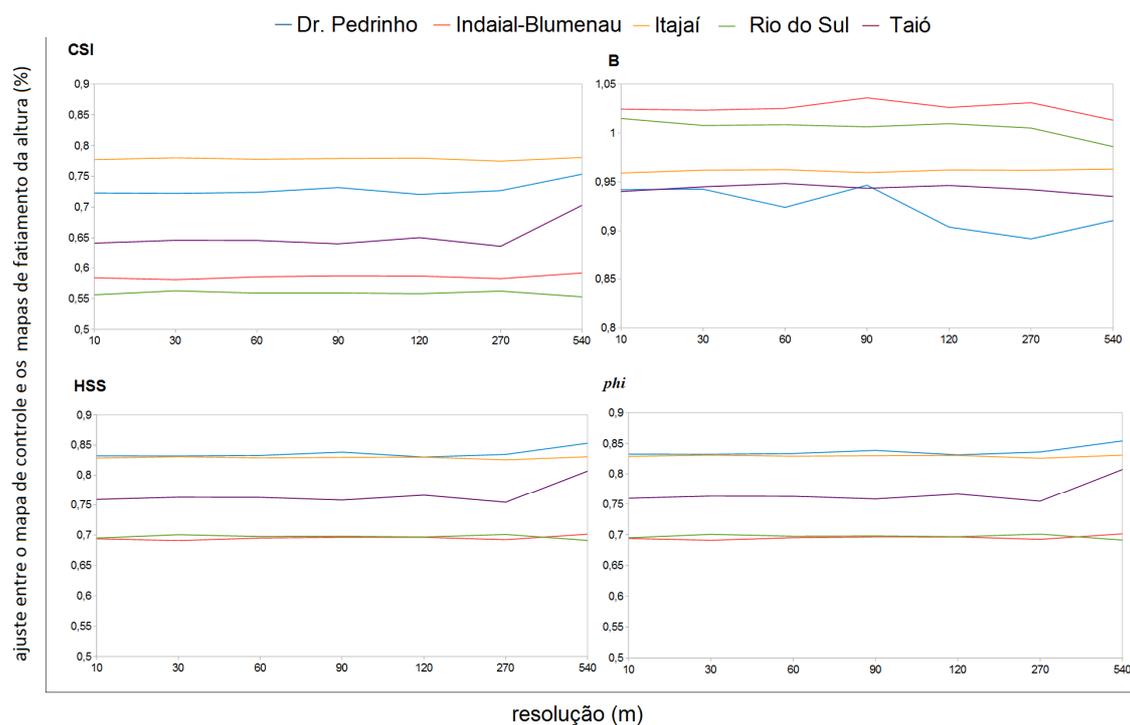


Figura 6.11 - Curvas da tabela de contingência para avaliação da escala. *Critical Success Index* (Csi), viés (B). *Heidke Skill Score* (Hss) e do coeficiente de correlação *phi*.

Na Figura 6.13 apresenta-se uma amostra de escala na delimitação de planícies de inundação. Verifica-se melhor detalhe no produto manual. É claro que a resolução do produto automático derivado de Topodata será menor, pois responde a mapeamentos em escalas mais gerais, mas sua utilidade deriva da maior eficiência deste método em termos operacionais: se houver disponibilidade de modelo de elevação, será necessário menos tempo de mapeamento, em função da resolução e da abrangência espacial do modelo, do que pelo processo manual. E, dado um nível de precisão do MDE disponível e da adequação dos critérios de mapeamento, a metodologia pode ser aplicada extensivamente sem prejuízo deste nível, em virtude da redução de subjetividade no processo.

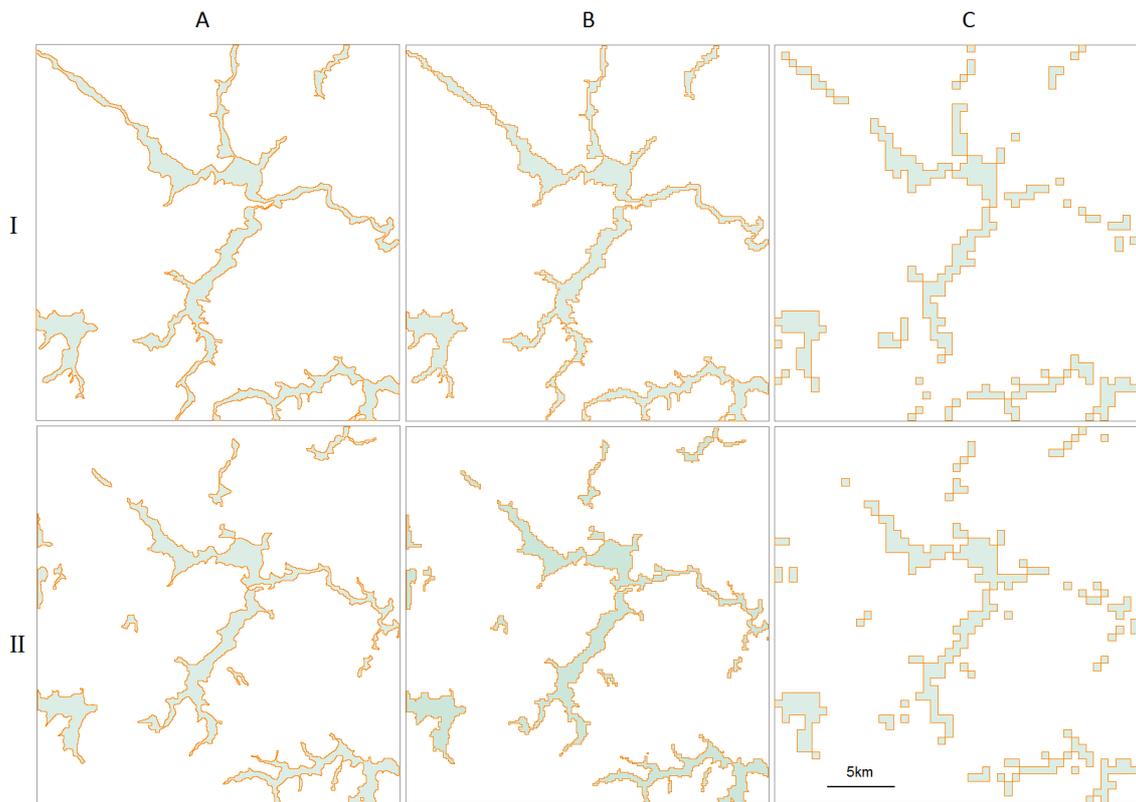


Figura 6.12 - Planícies de inundação na subárea Taió em três resoluções. Coluna A: 10m, B: 120m e C: 540m. Linha I: mapa de controle, II: produto final do fatiamento da altura topográfica.

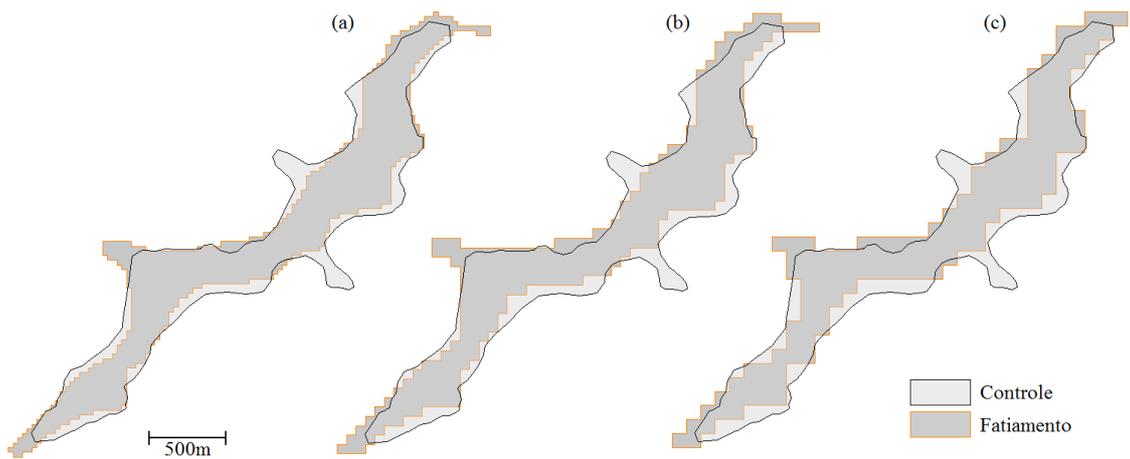
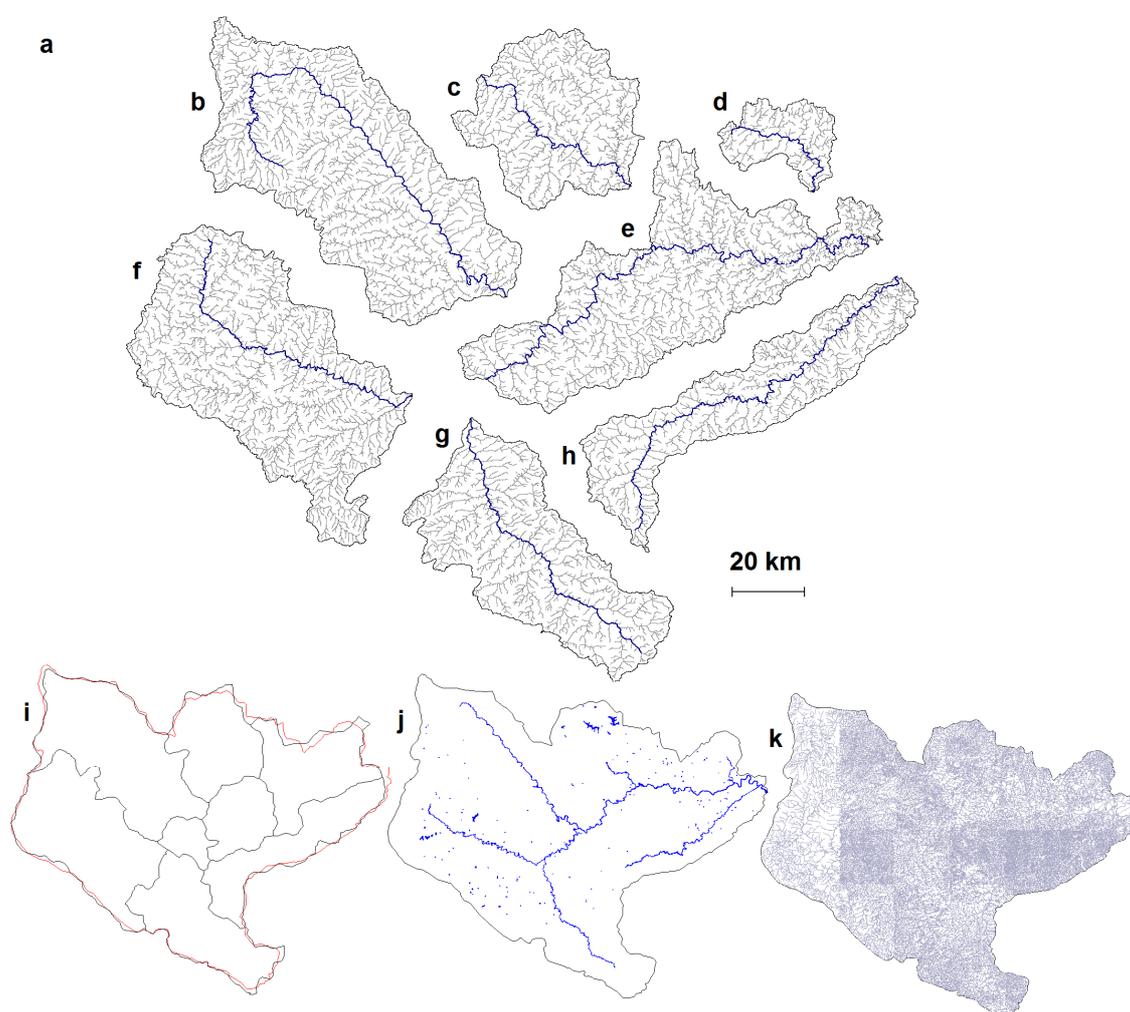


Figura 6.13 - Detalhe de escala na delimitação de planícies de inundação. (a) resolução 30m; (b) resolução 60m; (c) resolução 90m.

6.2. Análise da susceptibilidade da bacia e da exposição da população a inundações

6.2.1. Fatores hidrológicos da susceptibilidade

Na Figura 6.14 apresentam-se os resultados da extração da drenagem da bacia e sub-bacias do rio Itajaí. Comparados com os dados de fontes oficiais, os resultados obtidos nesta pesquisa foram de melhor qualidade (i) na delimitação da bacia e sub-bacias, (ii) no traçado dos canais principais e (iii) no traçado dos segmentos da drenagem.



As métricas da drenagem obtidas a partir dos dados da Figura 6.14 (a até h) são apresentadas na Tabela 6.1. O comprimento do canal principal (L), distância Dv, área e o perímetro são dados de entrada para o cálculo de outras métricas utilizadas para avaliar a susceptibilidade a inundações: Is, Kc, F e Ic. Sinuosidade (Is) próxima de “1” indica canais retos; assim, como se observa na Figura 6.14, todos os canais das sub-bacias deveriam exibir valores de Is próximos da unidade, mas os valores obtidos estão mais próximos de 2. Valores de Kc e Ic próximos da unidade indicam bacias com formato próximo a um círculo, o que favoreceria sua inundabilidade. Os resultados não refletem essa geometria. Do mesmo modo, valores baixos de F estão indicando que, na área de estudo, as bacias não são susceptíveis a inundações. Contudo, como se observa nos registros históricos de inundações na bacia do rio Itajaí, a susceptibilidade a inundações nessa região é alta. Por este motivo, estas métricas não foram apropriadas para avaliar a susceptibilidade a inundações na área de estudo.

Tabela 6.1 - Métricas da drenagem obtidas para a bacia do rio Itajaí e sub-bacias.

| Bacia | PD | L | Dv | Ct | Is | P | A | Dd | Kc | F | Ic |
|-----------------|-----|--------|--------|--------|------|--------|--------|------|------|------|------|
| Itajaí | R-P | 224,71 | 106,03 | 13175 | 2,12 | 1101,1 | 15024 | 0,87 | 2,47 | 0,30 | 0,16 |
| Luís Alves | D-R | 51,30 | 25,74 | 405,7 | 1,99 | 162,05 | 450,82 | 0,89 | 2,14 | 0,17 | 0,22 |
| Benedito | D-R | 80,34 | 47,98 | 1310,5 | 1,67 | 269,72 | 1512,3 | 0,84 | 1,99 | 0,24 | 0,23 |
| Itajaí do Sul | D-R | 110,4 | 77,46 | 1651,8 | 1,43 | 367,57 | 2033,3 | 0,81 | 2,28 | 0,17 | 0,19 |
| Itajaí do Oeste | D-R | 125,7 | 65,99 | 2708,5 | 1,90 | 458,04 | 3018 | 0,90 | 2,33 | 0,19 | 0,18 |
| Itajaí Mirim | D-R | 171,36 | 95,19 | 1482,4 | 1,80 | 403,55 | 1682,1 | 0,88 | 2,75 | 0,06 | 0,13 |
| Itajaí do Norte | D-R | 172,12 | 65,85 | 2754,1 | 2,61 | 443,89 | 3359,2 | 0,82 | 2,14 | 0,11 | 0,21 |
| Itajaí Açú | D-R | 214,33 | 91,57 | 2806,8 | 2,34 | 536,55 | 2917,6 | 0,96 | 2,78 | 0,06 | 0,13 |

PD: padrão da drenagem, R: retangular, P: paralelo, D: dendritico. L: comprimento do canal principal (km); Dv: distância em linha reta deste a nascente até a foz do canal principal (km); Ct: comprimento total da drenagem (km); Is: índice de sinuosidade do canal principal (razão L/Dv, adimensional); P: perímetro da bacia (km); A: área da bacia (km²); Dd: densidade da drenagem (razão Ct/A, km/km²); Kc: coeficiente de compacidade (adimensional); F: fator de forma (razão A/L², adimensional); Ic: índice de circularidade (adimensional).

Numa apreciação imediata, os resultados de comprimento total dos segmentos (Ct), densidade (Dd) e de padrão da drenagem (PD) sugerem alta susceptibilidade a inundações na bacia. Os valores altos de Ct (próximo do valor da área) e valores de Dd próximos da unidade sugerem menores tempos de concentração e vazão rápida, pois com maior disponibilidade de segmentos o fluxo chega mais rápido ao canal principal. Porém, há que se considerar a ressalva em relação às metodologias automáticas de extração da drenagem, em que todos estes valores se mostram dependentes de um limiar arbitrariamente aplicado pelo operador

(JIMÉNEZ-FERNÁNDEZ, 2011). O mesmo aspecto pode explicar porque as métricas da Tabela 6.1 não mostraram diferenças expressivas entre as sub-bacias, uma vez que não se dispunha de outros dados para a escolha de múltiplos limiares. E, quanto ao formato da bacia, é possível ainda que tamanho da área, escala de abrangência ou a ordem da drenagem nas sub-bacias também não estejam adequados aos mecanismos responsáveis pela sua relação com o fenômeno da inundação. Nesse sentido, consideram-se necessários estudos que avaliem a relação entre a aplicabilidade desta metodologia e o tamanho de bacias hidrográficas.

6.2.2. Fatores geológicos e pedológicos da susceptibilidade

A configuração do padrão da drenagem nos canais principais das sub-bacias do rio Itajaí (Tabela 6.1 e Figura 6.14) mostra-se predominantemente retangular e paralelo, o que sugere controle estrutural na gênese do sistema fluvial e a maioria dos perfis longitudinais (Figura 6.15) exhibe padrão que pode estar relacionado com tectônica: (i) segmentos escalonados à montante; (ii) quebras abruptas da declividade em regiões de planície de inundação; e (iii) segmentos côncavos à jusante.

Observa-se no mapa da Figura 4.4-A (base litoestratigráfica da bacia do rio Itajaí), que aluviões estão sobrepostos a uma matriz litológica em configuração geométrica que remete ao preenchimento de espaços de acúmulo. A matriz litológica consiste predominantemente de material resistente à erosão: granitos, arenitos, folhelhos e conglomerados.

Se a distribuição destes aluviões estiver relacionada com controle estrutural, e não com erosão, os lineamentos identificados na drenagem e no relevo deveriam exibir um padrão regional, o que viria a comprovar a existência de falhas. Na Figura 6.16 se observam os lineamentos traçados nas subáreas Dr. Pedrinho, Taió e Itajaí. Dois padrões regionais perpendiculares são evidentes, verificados nos diagramas de roseta da Figura 6.17, nas direções NE-SW \times NW-SE e N-S \times E-W. O primeiro padrão se constata no mapa da Figura 4.4-B (estruturas principais da bacia do rio Itajaí), o segundo é menos evidente e não se observa na cartografia oficial¹. Os polígonos das planícies de inundação seguem esse padrão regional.

¹ Como a informação geológica provém do Projeto RADAMBRASIL, não se descarta que lineamentos nas direções paralelas ao levantamento tenham sido mascaradas, por limitações inerentes à tecnologia de radar.

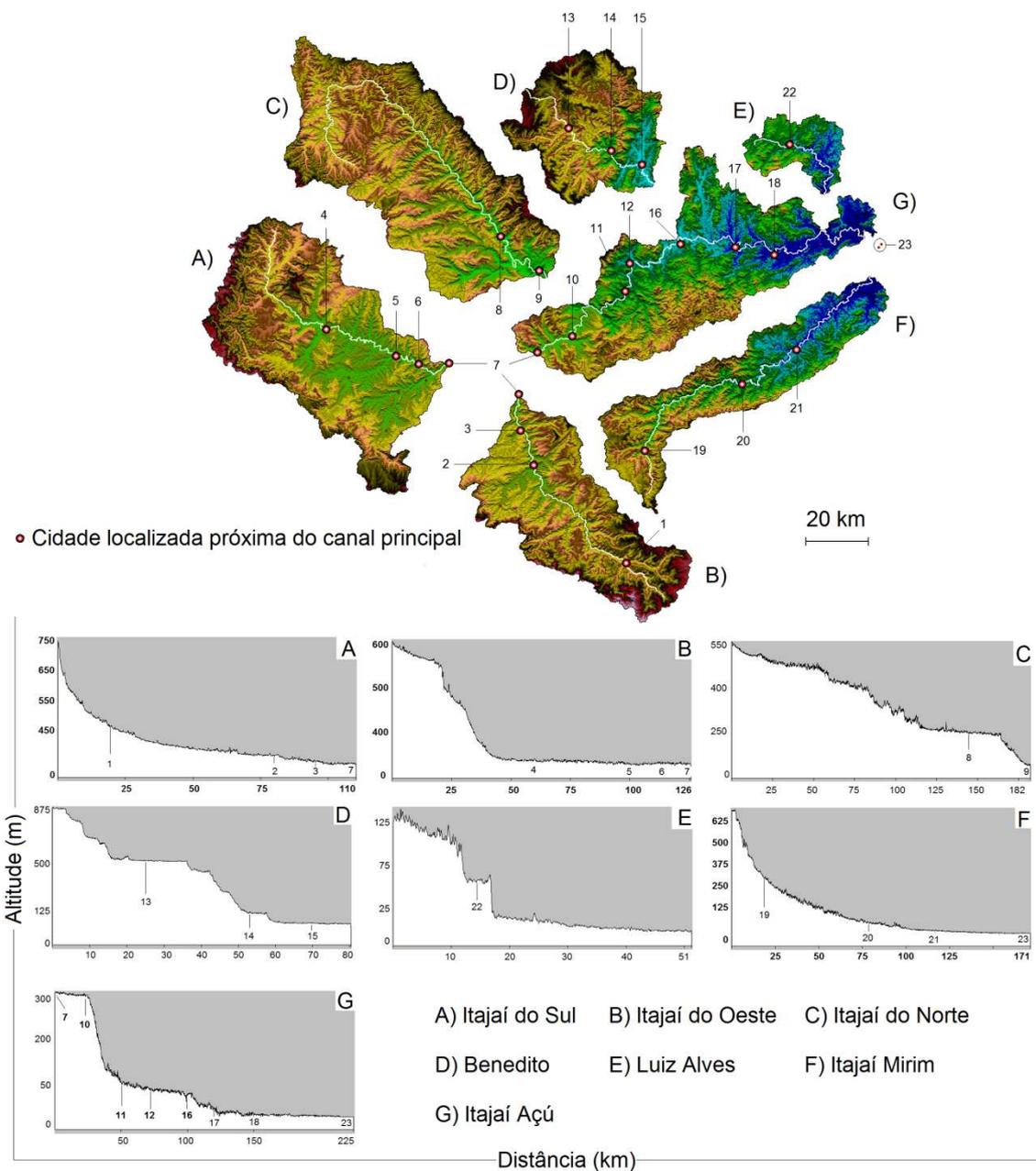


Figura 6.15 – Perfil de altitude no canal principal das sub-bacias do rio Itajaí. Os números indicam as cidades: 1. Alfredo Wagner; 2. Ituporanga; 3. Aurora; 4. Taió; 5. Ró do Oeste; 6. Laurentino; 7. Rio do Sul; 8. José Boiteux; 9. Ibirama; 10. Lontras; 11. Apiuna; 12. Acurra; 13. Doutor Pedrinho; 14. Benedito Novo; 15. Timbó; 16. Indaial; 17. Blumenau; 18. Gaspar; 19. Vidal Ramos; 20. Botuvera; 21. Brusque; 22. Luís Alves; 23. Itajaí/Navegantes.

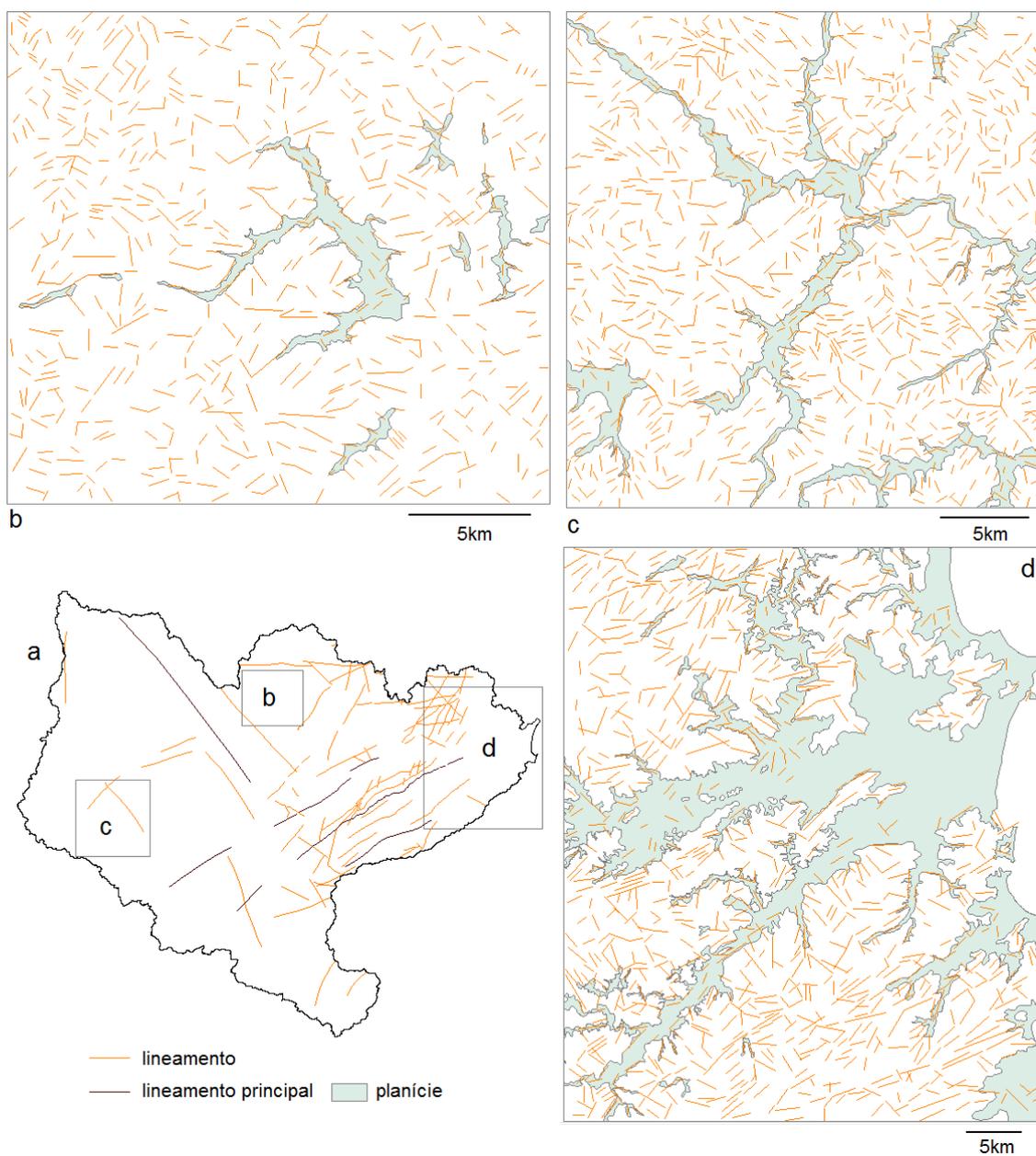


Figura 6.16 – Lineamentos morfoestruturais: a) derivados do banco geobank, escala 1:1000.000 (CPRM, 2004); e b a d, lineamentos morfoestruturais nas subáreas Doutor Pedrinho (b), Taió (c) e Itajaí (d), traçados a partir do relevo e da drenagem no escopo desta pesquisa.

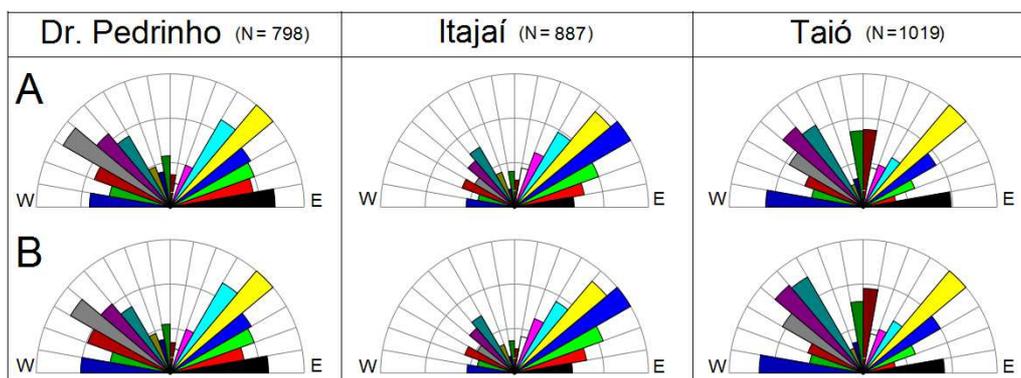


Figura 6.17 – Diagramas de roseta de lineamentos morfoestruturais nas subáreas Doutor Pedrinho, Taió e Itajaí. N: número de segmentos; linha A: frequência absoluta; linha B: comprimento absoluto. Moda principal indica dominância da orientação NE-SW e NW-SE. Moda secundária indica a orientação E-W.

O fato de que há concordância regional entre a orientação dos lineamentos e dos aluviões leva a sugerir que essa configuração não é aleatória. Se os lineamentos traçados na drenagem estiverem corretos (ver os lineamentos sobre as planícies de inundação na Figura 6.16), há de se admitir que exista uma tectônica mais recente. Isto significa que a rocha e o sedimento estariam fraturados e falhados; conseqüentemente haveria maior permeabilidade do material portanto mais facilidade de infiltração, independentemente do tempo de escoamento. Tal mecanismo desfavoreceria o estabelecimento da inundação. Todos esses resultados levam a aventar a hipótese de que a gênese das planícies de inundação na bacia do rio Itajaí é devida a subsidência e abertura, no material consolidado, de espaços propícios ao acúmulo de água e sedimentos. Deverão ser conduzidos estudos geológicos que verifiquem esta hipótese.

Dados pedológicos, no entanto, apresentam condicionantes em outra direção (ver Figura 4.7). É notável a presença de solos Litólicos e Cambissolos nas áreas de captação, estes têm baixa retenção de água devido à presença de material rochoso pouco abaixo da superfície (~1m) o que favorece o movimento horizontal da água em relação à infiltração, quando comparado a outros tipos de solos. Considerando isso, é plausível supor que o aporte de água de toda a área de captação seja mais veloz do que a capacidade de infiltração e escoamento nas planícies. Em toda a bacia, a área das planícies fluviais é menor em relação e de suas respectivas captações, o que representa uma solicitação concentrada de escoamento e infiltração. Esta condição também vem a favorecer o desenvolvimento de Gleissolos nos aluviões, que são solos cuja formação ocorre em ambiente permanentemente ou periodicamente saturado por água, e que se caracterizam por serem mal ou muito mal drenados.

6.2.3. Análise da exposição à inundação

Como se observa na Figura 6.15, há 24 cidades localizadas próximas aos canais principais das sub-bacias, na área de estudo. Este fato é em si mesmo forte indicador de exposição a inundações. No entanto, destaca-se a situação de algumas cidades que devem ser observadas em maior detalhe. A cidade Rio do Sul está localizada em uma planície de inundação onde convergem os canais Itajaí do Sul e Itajaí do Oeste, em trechos de perfil côncavo. Isto significa que essa cidade está afetada por dois rios com grande potencial de descarga de sedimentos. Em Apiuna, o Itajaí Açú traz a descarga procedente do rio Itajaí do Sul, acrescentada pela descarga do rio Itajaí do Oeste, em um trecho de perfil côncavo. Em Blumenau, localizada em uma planície de inundação ampla, o Itajaí Açú traz o acumulado de descargas de todos os rios à montante: Itajaí do Sul, Itajaí do Oeste, Itajaí do Norte e Benedito. Itajaí-Navegantes, localizadas na foz do rio Itajaí, recebem a descarga de toda a bacia.

A Figura 6.18 sugere um panorama geral da exposição a inundações na bacia do rio Itajaí. Nos mapas se observa uma marcada correspondência entre a cartografia urbana e os polígonos de planícies de inundação, gerados no desenvolvimento desta pesquisa. Observa-se também no detalhe da Figura 6.19, que corresponde às áreas da carta enchente (Figura 6.10) . A partir destas evidências locais, e ao se considerar o padrão de similaridade do fenômeno em outras escalas, é possível pensar que, de fato, existe uma notável tendência dos assentamentos urbanos para se estabelecerem em vales e planícies de inundação. Em geral, dessa ocupação decorrem intensas intervenções no sistema natural que afetam o ciclo hidrológico e criam ou intensificam os cenários de risco. Por exemplo, as consequências de remover a floresta em substituição pela agricultura intensiva, fora das áreas de planície e urbana, costuma afetar o equilíbrio entre escoamento e infiltração em toda a bacia. A exposição de solos pouco profundos e com limitações de drenagem (como no caso dos Cambissolos no Alto Vale do Itajaí) implica em forte diminuição da taxa de infiltração, com decorrente aumento do volume de escoamento superficial e redução do tempo de concentração.

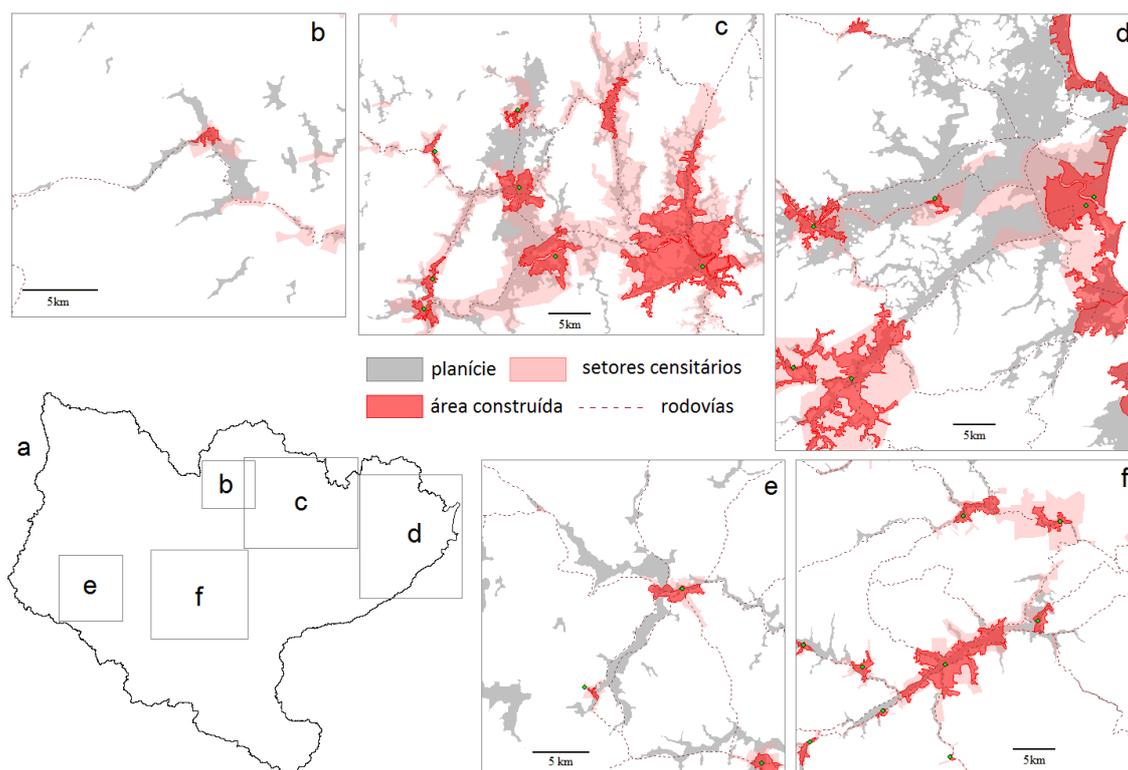


Figura 6.18 – Área exposta à inundação nas subáreas: a) Localiza o das subáreas na bacia do rio Itajaí; b) Doutor Pedrinho; c) Indaial-Blumenau; d) Itajaí; e) Taió; f) Rio do Sul.

Obras civis como barragens, muros marginais de conten o e qualquer outra estrutura levantada ao longo do rio ou nas planícies inundáveis contribuem para o aumento dos níveis do canal e outras consequências na dinâmica geomorfológica das várzeas (SANTOS; PINHEIRO, 2002). Por isto, as obras de controle de cheia são projetadas considerando o período de retorno de uma inunda o de determinada magnitude. Além disso, com o próprio crescimento da área urbanizada, os solos da planície reduzem sua capacidade de infiltra o. Isto também contribui para o aumento dos picos de cheia e, em consequência, da probabilidade de inunda o. Com estas mudanças artificiais cada vez mais intensas, obras de conten o antigas, desenhadas para um período de retorno específico, podem ficar obsoletas. Nesse sentido, projetos de urbaniza o em planícies de inunda o devem considerar o ajuste dessas estruturas às novas condi es, além do controle apropriado de esgoto, de canaliza o da água da chuva e de solu es para diminuir a impermeabiliza o do solo, ou para mitigar seus efeitos. Em paralelo, compete   sociedade investir em educa o sobre desastres naturais e cabe às comunidades localizadas em áreas de risco permanecer em alerta e preparadas para eventuais situa es de emergência.

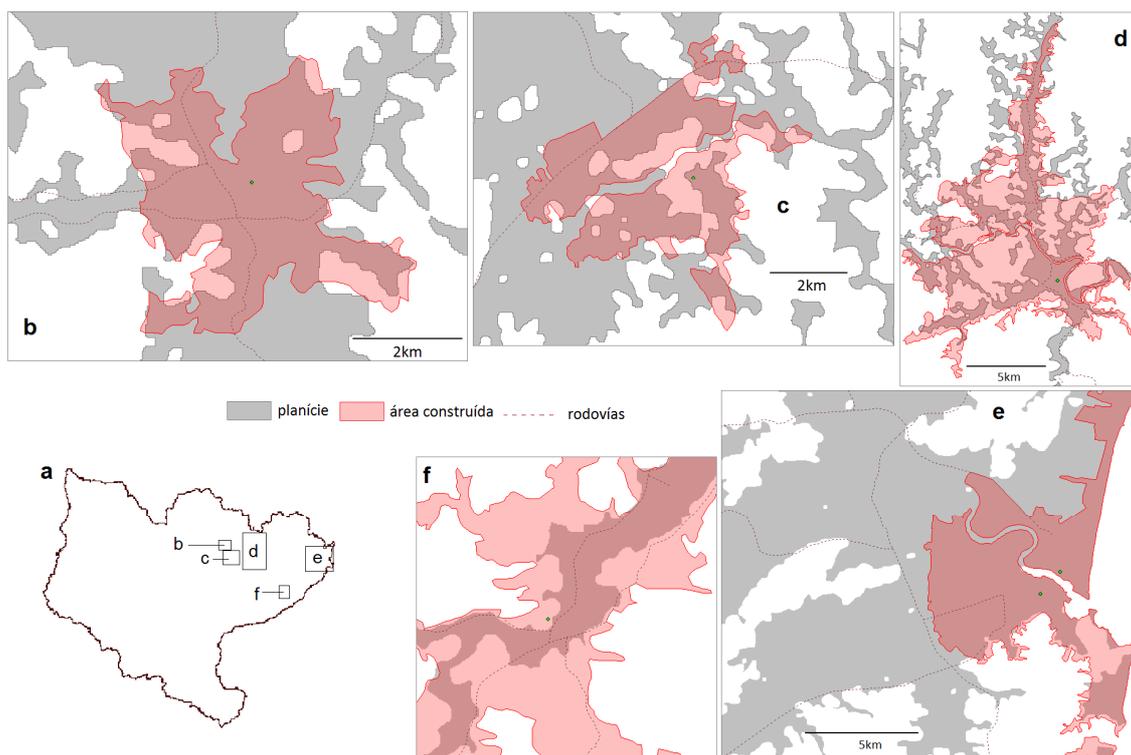


Figura 6.19 – Área construída sobreposta à planície de inundação obtida pelo método automático: a) distribuição dados “carta enchente” na bacia do rio Itajaí; b) Timbó; c) Indaial; d) Blumenau; e) Itajaí; f) Brusque.
 Fonte: Figura composta a partir de dados do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE, ano desconhecido), de dados do IBGE (2010b) (área construída) e de informação produzida nesta pesquisa.

Um fato notável é o nível de desenvolvimento da população do Itajaí em face de sua situação de risco. A curva do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) dos municípios da bacia do Itajaí acompanha a tendência de crescimento do Brasil. Enquanto que o IDH brasileiro foi estimado em 0,730 (PNUD, 2013), o correspondente para os municípios da bacia foi estimado em 0,738 (IBGE, 2011). Alguns autores qualificam como paradoxal este nível de desenvolvimento na região, uma vez que a população enfrenta perdas frequentes em decorrência de inundações, mas há necessidade de pesquisa para verificar esta situação em detalhe. Estratégias para prevenção e mitigação de desastres, que fortalecem a resiliência da população, vêm sendo adotadas pelas instituições responsáveis, principalmente a partir do desastre de 1983. Para mais informações neste sentido, pode-se consultar o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Itajaí (COMITÉ DO ITAJAÍ, 2010) e a pesquisa de Fraga e Simas (2010) sobre barragens e controle de inundação.

7 CONCLUSÕES

Foi apresentada uma metodologia para a delimitação manual de planícies de inundação explorando recursos disponibilizados de forma gratuita na plataforma Google Earth. Os resultados mostraram-se adequados para sua utilização como controle de produtos cartográficos na escala 1:100.000. Em paralelo à delimitação manual, foi apresentada uma metodologia para o mapeamento automático de planícies de inundação a partir de informações do relevo regional derivadas de dados SRTM. Dentre todas as variáveis topográficas analisadas, os resultados apontaram a altura topográfica como a de maior potencial para delimitação automática de planícies de inundação. Investigações do JPL e outros indicam que dados SRTM respondem a mapeamentos entre as escalas 1:100.000 e 1:250.000. Em decorrência disso, se espera que os resultados desta pesquisa atendam a mapeamentos dentro desse mesmo intervalo de escalas. Em particular, esta metodologia mostra-se interessante para aplicação extensiva dos dados SRTM na escala 1:100.000 e pode contribuir operacionalmente com melhorias ao estudo e mapeamento do risco de inundação, em relação às informações até então disponíveis.

A metodologia proposta foi testada na bacia hidrográfica do rio Itajaí. Foram escolhidas cinco subáreas com o objetivo de identificar padrões locais e similaridades regionais. No mapeamento automático das planícies de inundação, era esperado que a análise apontasse para um único nível de fatiamento da altura topográfica em toda a bacia. Embora os resultados verifiquem o comportamento regional desta variável, estes não sugerem um limiar específico para o conjunto amostral de cinco subáreas, mas uma faixa de fatiamento entre 8m e 13m. Para mapeamento de áreas de inundação em toda a bacia pode ser adotado um valor de fatiamento dentro dessa faixa, sem comprometer a precisão no resultado.

As métricas do relevo apresentadas nesta pesquisa, relevantes em estudos ambientais, são baseadas em modelos matemáticos relativamente simples e passíveis de resolver em ambiente de SIG. Em particular a altura, a profundidade da dissecação, a amplitude, a predominância e o índice elevação-relevo são variáveis topográficas obtidas a partir de operações aritméticas com MDE e revelam, cada uma a seu modo, padrões regionais que facilitam a classificação do terreno em unidades (ou classes) da paisagem. Como era de se esperar, a distribuição de frequências destas variáveis (exceto da profundidade da dissecação)

nas planícies de inundação concentra-se nos valores abaixo da média, se comparada com a distribuição geral. Isto permite discriminar a classe "planícies" das outras classes do relevo. Por outro lado, confirmou-se que o caráter local das variáveis prontamente disponíveis no banco de dados Topodata limita sua utilidade para classificação de unidades homogêneas da paisagem regional, como as planícies de inundação.

A distribuição da altitude das planícies de inundação na bacia do rio Itajaí, o padrão de lineamentos morfoestruturais, o padrão da drenagem e a disposição planimétrica das planícies (seguindo o padrão de orientação dos lineamentos) indicam controle estrutural, relativo à tectônica regional, na distribuição das planícies de inundação. Sugerem-se estudos geológicos que permitam verificar esta hipótese na área de estudo.

Como pode ser observado no modelo das Nações Unidas (capítulo 3.1), o estudo do risco por fenômenos naturais é amplo e complexo. Este inclui aspectos do meio físico e da sociedade. Nosso interesse principal nesta pesquisa foi propor metodologia de mapeamento de planícies de inundação na bacia do rio Itajaí, Santa Catarina, que contribui com a componente física do estudo do risco nessa região. Entretanto, a observação dos resultados do mapeamento junto a outras informações do meio físico e a dados de ocupação urbana permitiu apresentar uma análise preliminar da componente social do risco de inundação na área de estudo.

O fato de ter predominantemente Cambissolos nas nascentes da sub-bacias do rio Itajaí, junto à alta densidade da drenagem, implica em aumentos rápidos da vazão na rede de toda a bacia. Os lineamentos morfoestruturais e a presença de Gleissolos nas planícies apontam para predisposição ao acúmulo de água e de sedimentos nesses locais. E a distribuição da malha urbana sobre as planícies inundáveis sugere exposição da população a esses processos naturais. Foi observado que pelo menos 24 cidades da bacia do Itajaí estão expostas a inundações e alagamentos. Nesta análise, é notável sua proximidade em relação aos canais principais e sua localização em áreas de concentração de deflúvio, além da localização desfavorável no perfil longitudinal dos rios em setores com grande quantidade de energia disponível para transporte de água e sedimentos. Estas observações levam a supor que devem ser consideradas prioritárias investigações mais detalhadas de exposição a inundações em todas as 24 cidades, em especial para Rio do Sul, Apiuna, Blumenau, Itajaí e Navegantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Regiões hidrográficas do Brasil**: recursos hídricos y aspectos prioritários. Brasília: Ana, 2001. (Edição comemorativa do dia Mundial da Água). Disponível em <http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/Cdoc/CatalogoPublicacoes_2001.asp>. Acesso em 15.jan.2014.

_____. **Bases de dados georreferenciadas**: ottobacias. Brasília, 2007. Disponível em <<http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/login.asp?urlRedir=/bibliotecavirtual/solicitacaoBasesDados.asp>>. Acesso 13.01.2014.

ALMEIDA, C. M., VIEIRA, A. M. M., CÂMARA, G., SOARES-FILHO, B. S., CERQUEIRA, G. C., PENNACHIN, C. L., BATTY, M. Gis and remote sensing as tools for the simulation of urban land-use change. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26 , n. 4, p. 759-774, Feb. 2005. doi:<10.1080/01431160512331316865>.

ALVES, M. P. A. **Análise comparativa dos fatores ambientais nos eventos de inundações na bacia hidrográfica do Vale do Itajaí novembro de 2008 e setembro de 2011**. 2013. 160p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Departamento de Geociências, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em <<http://www.labclima.ufsc.br/trabalhos/>>. Acesso em 19.jan.2014.

ANDRADES FILHO, C. O.; ROSSETTI, D. F. Effectiveness of SRTM and ALOS-PALSAR data for identifying morphostructural lineaments in northeastern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 4, p. 1058-1077, Feb. 2012. doi:<10.1080/01431161.2010.549852>.

ANDRADES FILHO, C. O.; ROSSETTI, D. F.; BEZERRA, F. H. R.; CREMON, É. H.; MUÑOZ, V. A. Geomorfometria e geofísica aplicadas à discriminação de unidades sedimentares na Bacia Paraíba, nordeste do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 3534-3541. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00066-9 (Internet), 978-85-17-00065-2 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW34M/3E7GL4S>>. Acesso em: 14 fev. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13133: **Execução de levantamento topográfico**. Rio de Janeiro, maio. 1994. 35 p. Disponível em: <<http://www.unicep.edu.br/biblioteca/docs/engenhariacivil/NBR%2013133%20-%201994%20-%20Execu%C3%A7%C3%A3o%20de%20Levantamento%20Topogr%C3%A1fico.pdf>>. Acesso em 14.02.2014.

AUMOND, J. J. Geologia e paleoambiente. In: FRANK, B.; REFOSCO J.C. (Ed). **Bacia do Itajaí**: formação, recursos naturais e ecossistemas. Blumenau: EDIFURB, 2005. Cap.II, p.20-47.

AUMOND, J. J. SEVEGNANI, L. TACHINI, M. BACCA, L. E. Condições naturais que tornam o vale do Itajaí sujeito aos desastres. IN: FRANK, B.; SEVEGNANI, L. (Ed). **Desastre de 2008 no vale do Itajaí**: água, gente e política. Blumenau, Sc: Fundação Agência de Água do Vale do Itajaí, 2009. Cap.2. p.22-37. Disponível em <<http://189.73.116.32/xmlui/handle/123456789/710>>. Acesso em 19.jan.2014.

BISPO, P. C. **Efeitos da geomorfometria na caracterização florístico-estrutural da Floresta Tropical na região de Tapajós com dados SRTM e PALSAR**. 2012. 147 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/06.03.13.58-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3C34QC8>>. Acesso em: 14 fev. 2014.

BLUE MARBLE GEOGRAPHICS. **Global Mapper™ v.13.00**. ©2002-2011. www.bluemarblegeo.com.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. 1.ed. New York: Oxford University Press, 1998. 333p.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES, CEPED. **Atlas brasileiro de desastres naturais** 1991 a 2010. Volume Brasil. Florianópolis, Sc., 2012a. 93p. Disponível em <<http://150.162.127.14:8080/atlas/Brasil%20Rev.pdf>>. Acesso em 14.02.2014

_____. **Atlas brasileiro de desastres naturais** 1991 a 2010. Volume Santa Catarina. Florianópolis, Sc., 2012b. 89p. Disponível em <<http://150.162.127.14:8080/atlas/Atlas%20Santa%20Catarina.pdf>>. Acesso em 14.02.2014.

CHARLTON, R. **Fundamentals of fluvial geomorphology**. New York: Routledge. 2008. 234p. ISBN 0-203-37108-9 Master e-book ISBN

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2ª Ed. São Paulo: Edgar Blücher LTDA., 1980. 188p.

_____. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgard BlücherLTDA., 1981.313p.

CLARK LABS. **IDRISI 32 Version I32.02**. Idrisi Source Code ©1987-2000 J. Ronald Eastman. Idrisi Production ©1987-2000 J. Clark University. www.clarklabs.org.

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS, CRED. EM-DAT. The OFDA/CRED International Disaster Database. ©CRED 2009. Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium. Disponível em <<http://www.emdat.be/>>. Acesso em: 26.06.2011.

COMITÉ DA BACIA DO RIO ITAJAÍ, (CBRI). **Plano de recursos hídricos da bacia do Itajaí**. Documento síntese. 2010. Disponível em <<http://www.comiteitajai.org.br/portal/index.php/planorecursoshidricos/plano-da-bacia-em-sintese.html>>. Acesso em 19.jan.2014.

_____. **Regimento do Comitê de gerenciamento da bacia hidrográfica do rio Itajaí**. 1998. Disponível em <<http://www.comiteitajai.org.br/portal/index.php/regimento.html>>. Acesso 19.jan.2014.

COBBY, D. M.; MASON, D.C.; DAVENPORT, I.J. Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. Vol 56, 2001. p.121–138.

COBBY, D. M.; MASON, D.C.; HORRITT, M. S.; BATES, P.D. Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry. **Hydrological Processes**. Vol. 17. 2003. p.1979–2000.

- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM-Serviço Geológico do Brasil). **Geobank**. Carta geológica do Brasil ao milionésimo: folha SG22, Curitiba. Brasília DF, 2004. Geologia geral e geologia estrutural. 2 Mapas. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 19.jan.2014.
- COUTO, E. V.; HAYAKAWA, E. H.; SOUZA-FILHO, E. E. Diagnóstico dos efeitos causados pelas cheias excepcionais de 1982/1983 sobre a planície inundacional do alto Rio Paraná (PR-MS). **Geomae**. Campo Mourão, v.1, n.1. 2010. p.83 – 99.
- DEILAMI, K., HASHIM, M. Very high resolution optical satellites for DEM generation: a review. **European Journal of Scientific Research**, v. 49, n. 4, p.542-554, 2011.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPN). **Mapa geológico do Estado de Santa Catarina**. Brasília, 1986. 1 Mapa. Escala 1:500.000. Disponível em <<http://www.das.ufsc.br/~plucenio/mapa-geologico-SC.jpg>>. Acesso em: 20.jan.2014.
- DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis. In: Raper, j. f. (Ed.) **Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems**. London : Taylor & Francis. p.51-77, 1990.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1998. 722p. Escala 1:250.000. EMBRAPA CNPS, Boletim de pesquisa, n.6. ISSN 1415-3750.
- _____. **Geoportal digital Embrapa**. Projeto Santa Catarina-Solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. Mapa de solos do Estado de Santa Catarina. 1 Mapa. Escala 1:250.000. Disponível em <<http://mapoteca.cnps.embrapa.br/projetos.aspx>>. Acesso em 03.02.2014.
- _____. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, EMBRAPA Solos, 2006. 306p.
- EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial analysis in geomorphology**. London: Harper & Row, Publishers, 1972. 393p. ISBN: 06-041272-0. part I, geral, p.17-90.
- EXELIS VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **ENVI 4.7**. ©2009. www.exelisvis.com
- _____. Convolution and Morphology Filters. **ENVI Docs Center, 2014**. Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/ConvolutionMorphologyFilters.html>> Acesso em: 14.fev.2014.
- FARR, T. G.; ROSEN, P.A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J. The Shuttle Radar Topography Mission, **Rev. Geophys.**, 45, 43p. 2007. doi:10.1029/2005RG000183.
- FLORINSKY, I. V. Artificial lineaments in digital terrain modelling: can operators of topographic variables Cause Them? **Mathematical Geology**, v. 37, n.4, May 2005. DOI: 10.1007/s11004-005-5953-3
- FLORINSKY, I. V.; KURIAKOVA, G. A. Influence of topography on some vegetation cover properties. **Catena**, v. 27, n. 2, p.123-141, 1996.

FRAGA, N. C.; SIMAS, F. DE O. Planejamento de barragens para a navegação fluvial e o controle de enchentes no rio Itajaí-Açú em Blumenau (Sc): uma análise comparativa com a região de Braunschweig na Alemanha. In: Encontro Latinoamericano de Ciências Sociais e Barragens, III, 2010, Belém de Pará. **Anais...** Belém, PR: Universidade Federal do Pará, 2010. 24p. Disponível em <<http://www.ecsbarragens.ufpa.br/site/cd/html/gt5.html#>>. Acesso em 19.jan.2014.

FRANK, B.; PINHEIRO, A.; BOHN, N. Relações entre a gestão de recursos hídricos e uso do solo: o caso da bacia do rio Itajaí- Sc. In: MUÑOZ, H. R. **Interfaces da gestão de recursos hídricos: desafios da lei de águas de 1997**. Santa Catarina, 2000. 422p.

FUJISADA, H., BAILEY, G. B., KELLY, G. G., HARA, S., ABRAMS, M.J. ASTER DEM performance. **IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 43, n. 12, p. 2707-2714, 2005.

GABINETE DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO GERAL , GPCG, SANTA CATARINA. **Atlas de Santa Catarina**. Florianópolis, Sc., 1986. 173p.

GEOAMBIENTE, FATMA/PPMA-SC. **Mapeamento temático geral do Estado de Santa Catarina**. Relatório Técnico: GEO-RLT-C0715-33608-01. Florianópolis, 2008.

GNU GENERAL PUBLIC LICENCE (GPL). **Sistem for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)**, v.2.1.0. 2013. www.saga-gis.org

GOOGLE INC. **Google Earth**. ©2013. www.google.com/earth.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil Ltda, 1994. 472p. Isbn: 85-286-0326-1.

GUHA-SAPIR, D.; VOS, F.; BELOW, R.; WHIT PONSERRE, S. **Annual Disaster Statistical Review 2010: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED, 2011. 50p. Disponível em <http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR_2010.pdf>. Acesso em: jul.2011.

GUISAN A.; ZIMMERMANN, N. E. Predictive habitat distribution models in ecology. **Ecological Modelling**. 135. 2000. p.147–186

GUPTA, A., AHMAD, R. Geomorphology and the urban tropics: building an interface between research and usage. **Geomorphology**, v.31, 1999. p. 133-149.

HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences**, v.32, 2006. p.1283-1298.

HOLLING, C.S. Resilience and stability of ecological systems. **Annual Reviews**. 1973. p.1-23.

HUBER, S., YOUNIS, H., KRIEGER, G. The TanDEM-X mission: overview and interferometric performance. **International Journal of Microwave and Wireless Technologies**, v.2, n. 3-4, p. 379-389, 2010.

HUGGETT, R.J. **Fundamentals of geomorphology**. London: Routledge, Taylor and Francis Group. 2007. 483p. ISBN 0-203-94711-8 Master e-book ISBN.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censos**- censo demográfico 2010a. Sinopse. Agregados por setores censitários: base informações setores 2010 sinopse Sc. Brasília 2010a. Disponível em <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm>. Acesso em 05.04.2014.

_____. **Geociências**. Mapeamento sistemático. Base contínua ao milionésimo. 2_bcim_v3.04_dados. Shapefile. Rio de Janeiro, 2010b. Disponível em <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em 15.jan.2014.

_____. **Sinopse do censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em <http://biblioteca.ibge.gov.br/d_detalhes.php?id=249230>. Acesso em 15.jan.2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais climatológicas do Brasil 1961 – 1990**. Brasília DF, 2009. 253p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil. Variáveis geomorfológicas locais: folhas 26S51, 26S495, 27S51 e 27S495. São José dos Campos, 2008. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em 03.02.2014.

_____. Divisão de Processamento de Imagens (DPI). **Spring 5.2**. DPI/INPE © 1991-2013. www.dpi.inpe.br/spring.

_____. Divisão de Processamento de Imagens (DPI). **TerraHidro 3.8**. Sistema de modelagem hidrológica distribuída do TerraView. Copyright 2001-2012, TECGRAF PUC-Rio e FUNCATE; partner: Leste/Ufmg. Site TerraView: www.dpi.inpe.br/terraview, site TerraHidro: <http://www.dpi.inpe.br/~alexandre/TerraHidro/>

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598p. ISBN 978-85-60507-06-1.

JIMÉNEZ FERNÁNDEZ, D. C. **Avaliação de algoritmos e modelos digitais de elevação para extração automática da drenagem**. 2011. 112 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/05.01.13.51-Tdi). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39K8BSL>>. Acesso em: 06 fev. 2014.

LIRA, S. A.; NETO, A. C. Coeficientes de correlação para variáveis ordinais e dicotômicas derivados do coeficiente linear de Pearson. **Recie**, Uberlândia, v. 15, n. 1/2, p. 45-53, jan./dez. 2006. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/viewFile/529/489..>>. Acesso em 14.fev.2014.

MARCELINO, I. P. V. O. **Análise de episódios de tornados em Santa Catarina**: caracterização sinótica e mineração de dados. 2003. 222 p. (INPE-12145-TDI/969). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/08.19.09.24>>. Acesso em 15.jan.2014.

MARINHO, R. R.; PARADELLA, W. R.; RENNÓ, C. D.; OLIVEIRA, C. G. Aplicação de imagens SAR orbitais em desastres naturais: mapeamento das inundações de 2008 no Vale do Itajaí, SC. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 64, n.3. 2012. p. 317-330. ISSN: 1808-0936.

MARK, D. M. Geomorphometric parameters: a review and evaluation. **Geografiska Annaler**. Series A, Physical Geography, v. 57, n. 3-4, 1975. p.165-177.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Instrução normativa N.01, de 24 de Agosto de 2012.** Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=822a4d42-970b-4e80-93f8-dae395a52d1&groupId=301094>. Acesso em 14.02.2014.

_____. CENTRO NACIONAL DE GERENCIAMENTO DE RISCO DE DESASTRES. **Anuário brasileiro de desastres naturais 2011.** Brasília: CENAD, 80p. 2012. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=e3cab906-c3fb-49fa-945d-649626acf790&groupId=185960>. Acesso em 14.02.2014.

_____. _____. **Anuário brasileiro de desastres naturais 2012.** Brasília: CENAD, 84p. 2013. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=f22cccd-281a-4b72-84b3-654002cff1e6&groupId=185960>. Acesso em 14.02.2014.

MONTEIRO, A. M. Caracterização climática do estado de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. **Geosul**, Florianópolis, v.16, n.31, p. 69-78, jan./jun. 2001. Disponível em <<https://journal.ufsc.br/index.php/geosul/article/viewFile/14052/12896>>. Acesso em 19.jan.2014.

MUÑOZ, V. A. **Análise geomorfológica de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo.** 2009. 112 p. (INPE-15796-TDI/1531). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/352GPK2>>. Acesso em: 14 fev. 2014.

Muñoz, V.A. Espacialização do índice relevo-elevação (E) na bacia do rio Itajaí a partir de MDE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR), 2013, Iguazú (PR). **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013.

MUÑOZ, V.A., VALERIANO, M. M. Mapping of floodplain by processing of elevation data from Remote Sensing. In: Pardo-Igúzquiza, E., Guardiola-Albert, C., Heredia, J., Moreno-Merino, L. Durán, J. J., Vargas-Guzmán, J.A. (Eds.). **Mathematics of Planet Earth: Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences.** Berlin: Springer-Verlag, 2013. part XV. Quantitative hydrology: working across scientific disciplines and time-space scales. p. 481-484. ISBN 9783642324079

MUÑOZ, V. A.; VALERIANO, M. M.; BISPO, P. C. Surveying the topographic height from SRTM data for canopy mapping in Brazilian Pantanal. **Geografia (Rio Claro)**, v. 38, p. 139-155, 2013.

NOVO, E. , SHIMABUKURO, Y., COSTA, M. WFI/CBERS imagery simulation water pathways from Amazon River to the floodplain. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, B7, p.1027-1032, 2000.

OLAV, S. The role of remote sensing in geomorphology and terrain analysis in the Canadian Cordillera. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, JAG**, v.3. Issue 1, p.11-17 2001.

OLLIER, C. D. Terrain classification: methods, applications and principles. In: HAILS, J. R. (Ed.). **Applied Geomorphology: a perspective of the contribution of geomorphology to interdisciplinary studies and environmental management.** Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1977. cap. 8, p.277-316.

- PIKE, R. J. Geomorphometry diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography**, v. 24, n. 1, p. 1-20, 2000.
- PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. Geomorphometry: a brief guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (Ed.) **Geomorphometry: concepts, software, applications**. 1. ed. Oxford: Elsevier B.V., 2009. 765p. Isbn: 978-0-12-374345-9. cap.1, p.3-30.
- PIKE, R.J.; WILSON, S. E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. **Geological Society of America Bulletin**, v.82, p.1079-1084, 1971.
- PINEDO-VASQUEZ M. A., SEARS, R. R. Várzea forests: multifunctionality as a resource for conservation and sustainable use of biodiversity. In: M. Pinedo-Vasquez et al. (Eds.), **The Amazon Varzea: The Decade Past and the Decade Ahead**, DOI 10.1007/978-94-007-0146-5_14. New York: Springer Science plus Business Media B.V. 2011.
- PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). **Relatório do desenvolvimento humano 2013**. A ascensão do sul: progresso humano num mundo diversificado. 2013. Disponível em <<http://www.pnud.org.br/Noticia.aspx?id=3703>>. Acesso em 19.jan.2014.
- PROJETO RADAMBRASIL. Mapas do Estado de Santa Catarina. In: Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral, GPCG, Santa Catarina. **Atlas de Santa Catarina**. Florianópolis, Sc., 1986. 4 Mapas. Geológico geral e esboço estrutural de Santa Catarina. Escalas 1:1.000.000 e 1:3.000.000. p.41. Geomorfológico. Escala 1:1.000.000. p.43. Levantamento Exploratório de solos. Escala 1:1.000.000. p.53.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**, v. **3.0.2**. The R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. © 2013. www.R-project.org.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The Shuttle Radar Topography Mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p. 241-262, 2003.
- RANEY, R. K. Radar fundamentals: technical perspective. In: HENDERSON, F. M., LEWIS, A. J. **Manual of Remote Sensing**. Principles and applications of imaging radar. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1998. chap. 2. p. 9-124.
- RENÓ, V. F., NOVO, E. M. L. M., ALMEIDA-FILHO, R., SUEMITSU, C. Mapeamento da antiga cobertura vegetal de várzea do baixo Amazonas a partir de imagens históricas (1975-1981) do sensor MSS-LANDSAT. **Acta Amazônica**, v. 41, p. 47-56, 2011.
- RENNÓ, C. D., NOBRE, A. D., CUARTAS, L. A., SOARES, J. V., HODNETT, M. G., TOMASELLA, J. WATERLOO, M. J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3469-3481, 2008
- RODRIGUEZ, E., MORRIS, C.S., BELZ, J.E., CHAPIN, E.C., MARTIN, J.M., DAFFER, W., HENSLEY, S. **An assessment of the SRTM topographic products**. Pasadena, California: Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, 2005. 143p. Disponível em <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_D31639.pdf>. Acesso em 14.02.2014.
- RODRÍGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E. A global assessment of the SRTM performance.

Photogrametric Engineering & Remote Sensing, v. 72, n. 3, p.249-260, 2006.

RUDORFF, B. F. T. , et al. **Identificação de áreas de preservação permanente ciliares a partir das feições da paisagem e imagens de Sensoriamento Remoto em regiões produtoras de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 2012. 66p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/08.29.15.46-RPQ). Disponível em: <<http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2012/08.29.15.46/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 02.14.2014.

SANDERS, B. F. Evaluation of on-line Dems for flood inundation modeling. **Advances in Water Resources**, v. 30, p. 1831-1843, 2007.

SANTOS, G. F., PINHEIRO, A. Transformações geomorfológicas e fluviais decorrentes da canalização do rio Itajaí-Açú na divisa dos municípios de Blumenau e Gaspar (Sc). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 3, n.1, p. 1-9, 2002.

SAWADA, H., ENDO, T., SAWADA, Y., OCHI, S. Zoning of Amazon forest based on environmental data using Modis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR), 2013, Iguaçu (PR). **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013.

SECRETARIA GENERAL DE LA COMUNIDAD ANDINA, SGCA. **Atlas de las dinámicas del territorio andino: población y bienes expuestos a amenazas naturales**. Cali: Corporación Osso, 2009. 185p. Isbn: 978-958-99179-0-9.

SECRETARIA NACIONAL DE DEFESA CIVIL, (SNDC). **Banco de dados de Registros de Desastres Sistema Integrado de Informações sobre Desastres - S2ID**. 2011.Disponível em <<http://s2id.integracao.gov.br/>>. Acesso em 19.jan.2014.

SEVERO, D. L. **Estudos de casos de chuvas intensas no Estado de Santa Catarina**. 1994. 118 p. (INPE-5682-TDI/568). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994. Disponível em:<<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/08.26.17.51>>. Acesso em: 17 jan. 2014.

_____. A meteorologia do desastre. In: FRANK, B.; SEVEGNANI, L. (Ed). **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí: água, gente e política**. Blumenau, Sc: Fundação Agência de Água do Vale do Itajaí, 2009. Cap.6. p.70-77. Disponível em <<http://189.73.116.32/xmlui/handle/123456789/710>>. Acesso em 19.jan.2014.

SHAN, J., HUSSAIN, E., KIM, K., BIEHL, L. Flood mapping with satellite images and its web service. **Photogrametric Engineering & Remote Sensing**. Feb. 2010. Disponível em <https://engineering.purdue.edu/~jshan/publications/2010/flood_mapping_PERS_highlight.pdf>. Acesso em 14.02.2014

SHARY, P.A., SHARAYA, L.S., MITUSOV, A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma**, v.107, p.1-32, 2002.

SHIMABUKURO, Y. E., NOVO, E. M. Amazon river mainstream floodplain LANDSAT TM digital mosaic. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 1, p. 57-69, 2002.

SIEBERT, C. (Des) controle Urbano. In: FRANK, B.; SEVEGNANI, L. (Ed). **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí: água, gente e política**. Blumenau, Sc: Fundação Agência de Água do Vale do Itajaí,

2009. Cap.3. p.38-51. Disponível em <<http://189.73.116.32/xmlui/handle/123456789/710>>. Acesso em 19.jan.2014.

SILVA, L. A.; NAZARENO, N. R. X. Análise do padrão de exatidão cartográfica da imagem do Google Earth tendo como área de estudo a imagem da cidade de Goiânia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14., 2009, Natal, RN. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 1723-1730.

SLATER, J. A.; GARVEY, G.; JOHNSTON, C.; HAASE, J.; HEADY, B.; KROENUNG, G.; LITTLE, J. The SRTM data "finishing" process and products. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 237-247, 2006.

SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA, SBPC; ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS, ABC; GRUPO DE TRABALHO DO CÓDIGO FLORESTAL. **O código florestal e a ciência: contribuições para o diálogo**. São Paulo: SBPC, 2011. 121p. 978-8586957-16-1.

STRAHLER, A. N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: CHOW, V. T. (Ed). **Handbook of applied hydrology: a compendium of water-resources technology**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1964. Section 4, Geology. Part II. p. 4.39 - 4.74.

STRYKER, T., JONES, B. Disaster response and the International Charter Program. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. Dec. 2009. Disponível em <<http://asprs.org/a/publications/pers/2009journal/december/highlight.pdf>>. Acesso em 14.02.2014

SULEBAK, J. R., HJELLE, O. Multiresolution spline models and their applications in geomorphology. In: Evans, I. S., Dikau, R., Tokunaga, E., Ohmori, H., Hirano, M. (Eds). **Concepts and modelling in geomorphology: international perspectives**. Tokyo: Terrapub, 2003. p. 221-237.

TOUTIN, T.; GRAY, L. State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. **Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 55, n.1, p.13-33, 2000.

UNITED NATIONS, INTERNATIONAL STRATEGY FOR DESASTER REDUCTION, ISDR. **Global Assessment Report (GAR)**. Geneva: UNISDR, 2011. Disponível em: <<http://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2011/en/home/index.html>>. Acesso em 14.02.2014

VALERIANO, D. L. Gestão de riscos. In: VALERIANO, D.L. **Gerência em projetos: pesquisa, desenvolvimento e engenharia**. 1. ed. São Paulo: Makron Books, 1998. 438p. ISBN: 85-346-0709-5. cap. 12. p.363-373.

VALERIANO, M. M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p. (INPE-15318-RPE/818). Disponível em:<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/33EPEBL>>. Acesso em: 18 mar. 2014.

VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **Topodata: processamento dos dados Srtm**. São José dos Campos: INPE, 2010. 79 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.42-RPQ). Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37FCH9B>>. Acesso em: 17 nov. 2011.

VALERIANO, M. M., ROSSETTI, D. F. Topographic Modeling of Marajó Island With SRTM Data. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 9, n. 1, p. 53-64, 2007.

- _____. TOPODATA: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, 2012. p.300-309.
- VAN-WESTEN, C. J.; CASTELLANOS, E.; KURIAKOSE, S. L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard and vulnerability assessment: an overview. **Engineering Geology**, v.102, p. 112-131, 2008.
- VARNES, D. J. **Landslide hazard zonation: a review of principles and practice**. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 1984. 60p. ISBN: 92-3-101895-7.
- VILA DA SILVA, J. S., ABDON, M. M., ROSSI, M. Padrões de vegetação ciliar em imagens CBERS e indicações do estado de conservação em Mato Grosso do Sul. In: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2, 2009. Corumbá. **Anais...** Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p.980-990.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. 1. ed. Brasil: McGraw-Hill Inc., 1975. 245p.
- VINCENT, L. Morphological area openings and closings for greyscale images. In: NATO Shape in Picture Workshop, 1992, Driebergen, The Netherlands. **Proceedings...** Springer-Verlag, 1992. pp. 197-208. Disponível em: <http://www.vincent-net.com/luc/papers/92shape_areaopen.pdf>. Acesso em 14.fev.2014.
- WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. San Diego: Elsevier Inc., 2006. 649p. ISBN 13: 978-0-12-751966-1. ISBN 10: 0-12-751966-1.
- WISLER, C. O.; BRATER, E. F. **Hidrology**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, I., 1959. 484p.
- WESTERHOFF, R. S., KLEUSKENS, M. P. H., WINSEMIUS, H. C., HUIZINGA, H. J., BRAKENRIDGE, G. R. Automated global water mapping based on wide-swath orbital synthetic aperture radar. **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.** v. 9. 2012. p. 7801–7834. doi:10.5194/hessd-9-7801-2012.
- WOOD, W. F.; SNELL, J. B. **A quantitative system for classifying landforms**. Natick, Massachusetts, 1960. 20 p. (Natick Lab., Tech. Rep. EP-124).
- YATES, R., WALDRON, B., ARSDALE, R. V. Urban effects on flood plain natural hazards: Wolf River, Tennessee, USA. **Engineering Geology**, v. 70, p. 1-15, 2003.
- ZANDBERGEN, P. Applications of Shuttle Radar Topography Mission Elevation Data. **Geography Compass** 2/5. 2008. p1404–1431. DOI 10.1111/j.1749-8198.2008.00154.x
- ZHUANG, Y., LIU, X., NGUYEN, T., HE, Q., HONG, S. Global remote sensing research trends during 1991-2010: a bibliometric analysis. **Scientometrics**, v. 96, p. 203-2019, 2013. DOI 10.1007/s11192-012-0918-z.