

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

Joana Nery Giglio

**CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE INUNDAÇÃO EM RIO
NEGRINHO-SC**

Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa Catarina para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Masato Kobiyama.

Florianópolis

2010



Joana Nery Giglio

**CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE INUNDAÇÃO EM RIO
NEGRINHO-SC**

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 10 de dezembro de 2010.

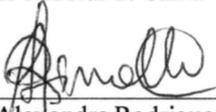
Banca Examinadora:



Prof., Dr. Masato Kobiyama

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.^a, Dr.^a Alexandra Rodrigues Finotti

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.^a, Dr.^a Regina Rodrigues Rodrigues

Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Ao professor Masato, a quem devo a descoberta da beleza da hidrologia e a oportunidade de participar do Laboratório de Hidrologia da UFSC.

Ao Pedro - cuja paixão pela ciência me motiva - pelas sugestões, ajuda e correções.

Aos amigos do LabHidro, pela paciência e ajuda de todos os dias, e pelas discussões valiosas nos churrascos e Ninas.

À família, pelo carinho e apoio, especialmente ao Gabriel, por me aturar todas as manhãs.

Às professoras Alexandra e Regina pelas importantes críticas e sugestões durante a defesa deste trabalho.

À SEPLAN, especialmente à Leoni pela recepção sempre calorosa e pelas informações valiosas, e ao Nino, pelos dados cedidos e ajuda em campo.

Ao Eng.º Nagashima, da SUDERSHA, pela pronta e atenciosa ajuda.

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro.

RESUMO

As inundações são frequentes em Rio Negrinho, município catarinense situado na confluência dos rios Negrinho e Negro. Desastres como os de 1983 e 1992 ainda são vivos na memória da população, e a cada inundação a população teme a repetição desses desastres. O objetivo desse trabalho é caracterizar as áreas inundadas no centro urbano do município. As áreas de inundação foram obtidas a partir da digitalização de registros de áreas inundadas da Prefeitura e de levantamentos em campo. As vazões foram estimadas a partir dos registros de cota, quando existentes, ou com o Tank Model. Para cada inundação, foram calculados índices de precipitação antecedente (API) e acumulados de chuva para 7, 10 e 30 dias. A vazão estimada para as inundações de 1983 e 1992 é de 56,2 m³/s e 62,8 m³/s, respectivamente. A correlação entre API e área inundada se mostrou moderada e, portanto, este não é o indicador mais apropriado de inundação em Rio Negrinho. O acumulado de chuvas de 10 dias apresentou forte correlação com a área inundada ($R^2 = 0,88$). Portanto, a precipitação acumulada de 10 dias se mostrou o melhor indicador para a gestão de inundações no município.

Palavras-chave: Inundação; Levantamento de áreas inundadas; API; Tank Model.

ABSTRACT

Floods occur frequently in Rio Negrinho city, located close to the confluence between Negrinho and Negro rivers, in Santa Catarina state. Disasters such as the 1983 and 1992 floods are still alive in the inhabitant's memory. Every flood occurrence, people fear the recurrence of such disasters. The aim of this study is characterize the flooded area in the urban zone of the city. Flooded areas were obtained through digitalizing the flood area reports of the city hall and through field surveys. Flood discharges were estimated from the water level data when they exist or with the Tank Model. For each flood event, antecedent precipitation index (API) and cumulative rainfall were calculated for 7, 10 and 30 days. Discharge estimated for the 1983 and 1992 floods were 56.2 m³/s and 62.8 m³/s, respectively. Correlation between API and flood area is moderate and the API was not the most appropriate indicator for Rio Negrinho floods therefore. In the other hand, cumulative rainfall of 10 days have shown a strong correlation ($R^2 = 0.88$). Hence, it is the best indicator, useful to flood management in the city.

Keywords: Flood; Flood area survey; API; Tank Model.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Inundação em setembro de 2009, na captação da SAMAERN no Rio Negrinho. Em destaque, as marcas das inundações de 1992 (acima) e 1983 (abaixo). A linha vermelha representa a margem esquerda do rio em condições normais..... | 23 |
| Figura 2 – Marcas das inundações no centro de Rio Negrinho. Em destaque, marcas de 1983 e 1992; a seta indica a altura que a água atingira no dia 13/01/2010. | 23 |
| Figura 3 – Representação esquemática do significado físico do modelo Tank Model..... | 31 |
| Figura 4 – Mapa de localização de Rio Negrinho..... | 37 |
| Figura 5 – Mapa da zona urbana de Rio Negrinho e seus principais rios. | 38 |
| Figura 6 – Serraria A. Ehrl & Cia, em 1923, onde hoje é o centro de Rio Negrinho. | 38 |
| Figura 7 – Levantamento em campo dos marcos das inundações de 83 e 92; (a) na igreja de Santo Antônio de Pádua e (b) na captação de água do SAMAERN..... | 43 |
| Figura 8 – Retângulo limitando o espaço de trabalho, e as inundações de janeiro de 2010 (em cinza escuro) e de 2009 (em cinza claro). | 44 |
| Figura 9 – Configuração do Tank Model utilizado..... | 45 |
| Figura 10 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado para 2009. | 51 |
| Figura 11 – Comparação entre vazão observada e vazão simulada, para 2009. | 51 |
| Figura 12 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado de 2010. | 52 |
| Figura 13 – Comparação entre vazão observada e vazão simulada, para 2010. | 52 |
| Figura 14 – Hietograma e hidrograma simulado de 1983; (a) estação Campo Alegre, e (b) estação Corredeira..... | 54 |
| Figura 15 – Hietograma e hidrograma simulado de 1992; (a) estação Campo Alegre e (b) estação Corredeira..... | 55 |
| Figura 16 – Inundação de Janeiro/2010. Pontos do levantamento em campo e polígono da área inundada. | 69 |
| Figura 17 – Inundação de Abril/2010. Pontos do levantamento em campo e polígono da área inundada. | 71 |

| | |
|---|----|
| Figura 18 – Mapa de áreas inundadas. Cada polígono colorido corresponde à área inundada em um evento. | 73 |
| Figura 19 – API x Área inundada. (a) API em 7 dias (b) API em 10 dias (c) API em 30 dias..... | 75 |
| Figura 20 – Precipitação acumulada x Área inundada. (a) 7 dias (b) 10 dias (c) 30 dias..... | 76 |
| Figura 21 – Vazão x Área inundada. | 77 |
| Figura 22 – Precipitação do dia x Área inundada. | 77 |
| Figura 23 – Jornal Perfil, 30 de setembro de 2009, p.8. | 81 |
| Figura 24 – Jornal Perfil, 27 de abril de 2010, p.7..... | 83 |
| Figura 25 – Excerto do levantamento da inundação de Outubro de 2004, realizado pela SEPLAN em lápis colorido sobre o mapa do município..... | 85 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Definição do termo ‘inundação’ (ou ‘enchente’, por alguns autores). | 28 |
| Tabela 2 – Síntese dos registros históricos das inundações. | 40 |
| Tabela 3 – Características das estações pluviométricas. | 41 |
| Tabela 4 – Parâmetros de calibração do Tank Model. | 47 |
| Tabela 5 – Conjunto de parâmetros escolhidos na calibração..... | 50 |
| Tabela 6 – Área, API, precipitação do dia e acumulada e vazão para cada inundação..... | 57 |
| Tabela 7 – Correlações lineares entre área inundada e os API, precipitação do dia e acumulada e vazão | 57 |
| Tabela 8 – Anos de ocorrência de El Niño | 79 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional das Águas

API – Índice de Precipitação Antecedente

ENOS - El Niño - Oscilação Sul

EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S/A

HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas da ANA

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

LabHidro – Laboratório de Hidrologia da UFSC

MDT – Modelo digital do terreno

PMRN - Prefeitura Municipal de Rio Negrinho

SAMAERN – Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Rio Negrinho

SEPLAN – Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SUDERHSA - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

SWAT – *Soil and Water Assessment Tool*

TIN - Rede irregular triangular

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

WRF - *Weather Research and Forecasting Model*

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Descrição | Unidade |
|----------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| A | Área da bacia | [L ²] |
| API_7 | API de 7 dias | [L] |
| API_{10} | API de 10 dias | [L] |
| API_{30} | API de 30 dias | [L] |
| C_1U | Parâmetro do Tank Model | [T ⁻¹] |
| C_1D | Parâmetro do Tank Model | [T ⁻¹] |
| C_1I | Parâmetro do Tank Model | [T ⁻¹] |
| C_2D | Parâmetro do Tank Model | [T ⁻¹] |
| C_2I | Parâmetro do Tank Model | [T ⁻¹] |
| C_3D | Parâmetro do Tank Model | [T ⁻¹] |
| C_3I | Parâmetro do Tank Model | [T ⁻¹] |
| C_4D | Parâmetro do Tank Model | [T ⁻¹] |
| E | Erro médio de simulação | [L ³ .T ⁻¹] |
| h | Cota fluviométrica | [L] |
| H_1U | Parâmetro do Tank Model | [L] |
| H_1D | Parâmetro do Tank Model | [L] |
| H_2D | Parâmetro do Tank Model | [L] |
| H_3D | Parâmetro do Tank Model | [L] |
| N | Número de observações da variável | - |
| $Nash$ | Coefficiente de Nash-Sutcliffe | - |
| P | Precipitação do dia | [L] |
| P_{acum} | Precipitação acumulada | [L] |
| P_7 | Precipitação acumulada de 7 dias | [L] |
| P_{10} | Precipitação acumulada de 10 dias | [L] |

| Símbolo | Descrição | Unidade |
|----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| P_{30} | Precipitação acumulada de 30 dias | [L] |
| Q | Vazão | [L ³ .T ⁻¹] |
| Q_{obs} | Vazão observada | [L ³ .T ⁻¹] |
| \overline{Q}_{obs} | Média das vazões observadas | [L ³ .T ⁻¹] |
| Q_{sim} | Vazão simulada | [L ³ .T ⁻¹] |
| R^2 | Coefficiente de correlação linear | - |
| $RMSE$ | Raiz do erro médio quadrático | [L ³ .T ⁻¹] |
| t | Tempo | [T] |
| ΔT | Unidade temporal | [T] |
| ΔV | Erro na estimativa do volume | % |
| Θ | Conjunto de parâmetros | - |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 21 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 24 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 24 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 24 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA | 24 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 27 |
| 2.1 | INUNDAÇÃO | 27 |
| 2.2 | MODELAGEM EM HIDROLOGIA | 29 |
| 2.3 | TANK MODEL | 30 |
| 2.4 | ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO ANTECEDENTE | 32 |
| 2.5 | SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS..... | 33 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 35 |
| 3.1 | ÁREA DE ESTUDO | 35 |
| 3.2 | COLETA DE DADOS..... | 39 |
| 3.2.1 | Registros históricos..... | 39 |
| 3.2.2 | Base cartográfica | 41 |
| 3.2.3 | Dados pluviométricos | 41 |
| 3.2.4 | Dados fluviométricos..... | 41 |
| 3.2.5 | Mapas de áreas inundadas..... | 42 |
| 3.3 | LEVANTAMENTOS EM CAMPO | 42 |
| 3.4 | PROCESSAMENTO DOS DADOS ESPACIAIS | 43 |
| 3.5 | ESTIMATIVA DE VAZÕES COM O TANK MODEL | 45 |
| 3.5.1 | Calibração..... | 46 |
| 3.5.2 | Validação | 48 |
| 3.6 | API E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA | 48 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 49 |
| 4.1 | MAPAS DE ÁREAS INUNDADAS..... | 49 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2 | ESTIMATIVA DE VAZÃO COM TANK MODEL | 50 |
| 4.2.1 | Calibração..... | 50 |
| 4.2.2 | Validação..... | 51 |
| 4.2.3 | Estimativa de vazões | 53 |
| 4.3 | API E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA..... | 56 |
| 5 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 59 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 63 |
| | APÊNDICE A – Levantamento da inundação de Janeiro/2010..... | 69 |
| | APÊNDICE B – Levantamento da inundação de Abril/2010..... | 71 |
| | APÊNDICE C – Mapa de áreas inundadas | 73 |
| | APÊNDICE D – Diagramas de dispersão e correla o linear..... | 75 |
| | ANEXO A – Ocorrências de El Niño..... | 79 |
| | ANEXO B – Fotos da inunda o de setembro de 2009..... | 81 |
| | ANEXO C – Fotos da inunda o de abril de 2010..... | 83 |
| | ANEXO D – Exemplo de mapa de inunda o da SEPLAN | 85 |

1 INTRODUÇÃO

As inundações são fenômenos naturais de transbordamento das águas de um rio, ocupando as planícies de inundação. Elas são essenciais para a bacia hidrográfica, atuando como agentes modificadores da paisagem e fertilizando as planícies. No entanto, muitas vezes as águas da inundação atingem a sociedade e causam danos à mesma, caracterizando um desastre natural. No Brasil, entre todos os desastres naturais, as inundações têm maior número de ocorrências, sendo os principais responsáveis por perdas de vida e danos materiais, sociais e econômicos (TASCA *et al.*, 2010).

O município de Rio Negrinho-SC, situado no planalto norte catarinense, tem seu centro urbano instalado muito próximo às margens do rio de mesmo nome e sofre inundações frequentemente. Algumas trazem danos e prejuízos, outras não. Desde 1891, ao menos 22 inundações já foram registradas no município: 1891, 1911, 1913, 1920, 1925, 1926, 1937, 1946, 1983, 1984, 1992, 1995, 1997, 1998, 1999, 2004, 2005, 2007, 2008, 2009 e duas em 2010. (DALAGNOL, 1999; OLIVEIRA, 2009; PM DEFINE, 2010; FUERST¹).

A primeira inundação registrada, em 1891, remonta do início da colonização da região. Naquela ocasião, o Rio Negrinho alcançou 7,75 m acima do seu normal, e a cota atingida pela água foi utilizada posteriormente como referência para a construção da ferrovia que hoje corta o município (DALAGNOL, 1999). As inundações ocorridas entre 1946 e 1983 e também as de 1995, 1997, 1998 atingiram algumas casas, mas a água não chegou a submergir as pontes. Esses eventos ficaram conhecidos, entre os moradores, como inundações “lambe-ponte” (DALAGNOL, 1999). Em 1894, o município chegou a decretar estado de calamidade pública, mas não há registro dos danos (DALAGNOL, 1999).

As mais desastrosas e mais lembradas pela população foram as inundações de 1983 e 1992, quando o Rio Negrinho esteve 9,3 m e 9,37 m acima do seu nível normal, respectivamente. Na ocasião dessas inundações, foi decretado estado de calamidade pública, e inúmeros danos foram registrados ao comércio, à indústria, à agropecuária e ao sistema viário. Muitas localidades do município ficaram isoladas, e o único hospital da cidade foi submerso até o segundo andar. Também nos eventos de 1983 e 1992 houveram muitas residências danificadas (350 e

¹ Leoni Pacheco Fuerst, da SEPLAN, em comunicação pessoal.

778, respectivamente), destruídas (120 e 27, respectivamente), muitos habitantes desabrigados (6.090 e 10.000, respectivamente), e a última teve uma vítima fatal (DALAGNOL, 1999; SCHOEFFEL, 2004).

As três inundações mais recentes atingiram o município em um pequeno intervalo de tempo, entre setembro de 2009 e março de 2010. No dia 30 de setembro de 2009 a cidade teve muitos pontos de alagamento e cerca de 160 residências atingidas pelas águas inundadas (RIO, 2009; DEFESA, 2009). Em janeiro de 2010, outra inundação ocorreu no município, mais uma vez gerando problemas para a população (RIO NEGRINHO, 2010a). E em 26 de abril de 2010 mais uma inundação ocorreu, causando diversos pontos de alagamento e deslizamentos, residências e comércios alagados e trânsito caótico (CHUVAS, 2010; PM DEFINE, 2010). As Figura 1 e Figura 2 ilustram as inundações recentes e as marcas históricas no município.

Desde o início da colonização dos entornos do Rio Negrinho, há registros de inundação nesse rio. Ainda assim, o município desenvolveu seu centro urbano muito próximo às margens do rio e de seus afluentes, Serrinha e dos Bugres. Como consequência, as inundações frequentemente provocam danos materiais a residências, comércio e infra-estruturas da cidade, e trazem prejuízos sócio-econômicos à população. Agora que o centro urbano já está instalado, é necessário caracterizar as áreas de perigo de inundação nessa área para possibilitar uma adequada gestão do município e assim reduzir os riscos de futuros desastres e minimizar futuros danos à população local.

Nesse contexto, o presente trabalho caracterizou as áreas de inundação na área urbana do município de Rio Negrinho-SC, como forma de subsidiar a gestão das inundações do município.



Figura 1 – Inundação em setembro de 2009, na captação da SAMAERN no Rio Negrinho. Em destaque, as marcas das inundações de 1992 (acima) e 1983 (abaixo). A linha vermelha representa a margem esquerda do rio em condições normais.



Figura 2 – Marcas das inundações no centro de Rio Negrinho. Em destaque, marcas de 1983 e 1992; a seta indica a altura que a água atingira no dia 13/01/2010.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo do trabalho é caracterizar as áreas de inundação na área urbana do município de Rio Negrinho-SC.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Reunir os registros históricos e levantamentos de inundações de Rio Negrinho em um banco de dados em SIG;
- Estimar a vazão e a área inundada correspondentes a cada evento de inundação;
- Verificar a relação entre área inundada de cada evento e as características da chuva: precipitação acumulada do dia, de 10 dias e do mês, índices de precipitação antecedente e vazão.

1.2 JUSTIFICATIVA

As inundações afetam a saúde humana, causando mortes, injúrias, epidemias, doenças crônicas e psicológicas (HAJAT *et al.*, 2003). Em Santa Catarina, inundações são eventos freqüentes, e desastres como os de 1983 e 2008 chamam a atenção para a importância da prevenção e mitigação de danos. Após as inundações de novembro de 2008, além das vítimas fatais, muitos casos de leptospirose e diarreia foram registrados (GOVERNO, 2008). Naquele ano, a incidência de leptospirose no estado foi o dobro da média dos anos 2003 a 2007 (SANTA CATARINA, 2010). Hajat *et al.* (2003) associam essas epidemias pós-inundação principalmente à falta de saneamento ambiental. Portanto, em Santa Catarina, onde o saneamento é reconhecidamente deficiente, a gestão das inundações urbanas é essencial para alcançar um saneamento ambiental adequado.

O município de Rio Negrinho é freqüentemente atingido por inundações urbanas. A população local muitas vezes relaciona essas inundações à substituição da Floresta Ombrófila Mista por plantações de pinus e à instalação de barragens na região. Desde 2006, o Laboratório de Hidrologia (LabHidro) da Universidade Federal de Santa Catarina

realiza estudos no município e entorno para verificar se essas relações existem (KOBİYAMA *et al.*, 2009). Recentemente, surgiu o interesse da Prefeitura Municipal de Rio Negrinho em realizar um mapeamento das áreas de perigo de inundação no município. O presente trabalho é, então, uma resposta a essa necessidade. Nesse sentido, o trabalho contribuirá com o gerenciamento das inundações em Rio Negrinho e com o saneamento ambiental do município, beneficiando a população local.

O trabalho poderá servir como exemplo de metodologia de baixo custo para a organização de registros de inundações em SIG e de caracterização de áreas inundadas a partir de registros históricos. Essa metodologia poderá ser utilizada em outros municípios catarinenses.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INUNDAÇÃO

A *International Strategy for Disaster Reduction* considera as inundações como desastres hidrológicos, ou seja, relacionados a desvios no ciclo hidrológico. A mesma iniciativa divide as inundações em três tipos de evento: as inundações ribeirinhas, bruscas e costeiras (BELOW *et al.*, 2009). No entanto, antes de serem desastres, as inundações são fenômenos naturais, intrínsecas ao regime dos rios. Quando esse fenômeno entra em contato com a sociedade, causando danos, passa a ser um desastre.

As inundações ribeirinhas ocorrem quando o fluxo de água em um trecho do rio é superior à capacidade de drenagem de sua calha normal, então as águas transbordam os bancos e se espalham pela planície de inundação - onde ela existe (TUCCI, 1993; LEOPOLD, 1994). A planície de inundação, por sua vez, é uma faixa de terreno relativamente suave, contornando um curso de água e frequentemente inundada. Os fundos de vale, frequentemente chamados de planície de inundação, são, na verdade, formados por diferentes processos geomorfológicos daqueles que originam as verdadeiras planícies de inundação (LEOPOLD *et al.*, 1995). Tucci (1993) explica que a ocorrência de inundações depende das características físicas e climatológicas da bacia hidrográfica – especialmente a distribuição espacial e temporal da chuva.

Há uma frequente confusão entre os termos ‘enchente’ e ‘inundação’. Guerra & Guerra (1997), por exemplo, utilizam ‘enchente’ para o evento que aqui se refere como ‘inundação’. Os mesmos autores definem ‘inundação’ como sinônimo de alagado (Tabela 1). Apesar de popular o uso de ‘enchente’ com o significado de inundação, considera-se aqui ‘enchente’ como o fenômeno de ocupação plena da calha do rio pela água, sem transbordamento. Frequentemente utiliza-se o termo em inglês *bankfull* em substituição a ‘enchente’ para evitar tal confusão.

O transporte fluvial, a fertilidade dos solos ribeirinhos, a disponibilidade de água para uso doméstico e agrícola, a facilidade de disposição de resíduos e a planeza dos terrenos, entre outros fatores, atraíram as civilizações a se estabelecer nas proximidades dos rios (DUNNE & LEOPOLD, 1943). Assim, desde o contato entre as

civilizações e os rios, grandes inundações foram observadas e estão presentes em registros históricos ou em mitologias. (LEOPOLD, 1994).

Tabela 1 – Definição do termo ‘inundação’ (ou ‘enchente’, por alguns autores).

| Autor | Definição |
|-------------------------------|--|
| Magalhães (1970) | Inundação é “a cheia de um rio, cujas águas crescendo de volume, transbordam, alagando os territórios circunjacentes. A inundação é causada pela abundante precipitação pluviométrica aliada a causas fisiográficas, tais como a configuração especial das zonas ribeirinhas e a largura e a profundidade dos leitos dos rios, bem como a estrutura da barra, ou a desembocadura das correntes. Os prejuízos econômicos estão associados à ocupação humana”. (p. 93) |
| Tucci (1993) | Inundação é o fenômeno que ocorre “quando a água que chega ao rio é superior à capacidade de drenagem de sua calha normal, as águas transbordam o leito normal e ocupam a planície de inundações”. A ocorrência de inundações depende das características físicas e climatológicas da bacia hidrográfica – especialmente a distribuição espacial e temporal da chuva. (p. 621) |
| Leopold (1994) | “Inundação é a ocorrência de um fluxo de tal magnitude que transborda os bancos naturais ou artificiais em um trecho de um rio. Onde existe uma planície de inundação, inundação é qualquer fluxo que se espalha por essa planície.” (p. 113) |
| Guerra & Guerra (1997) | Inundação é o mesmo que alagado, i.e. “área alagadiça após a enchente”. (p. 29) ‘Enchentes’ são grandes chuvas ² que ocorrem nos rios e geralmente causam verdadeiros desastres, causando perdas na agricultura, pecuária, cidades próximas, etc. O que as caracteriza é a sua irregularidade, não ocorrem todos os anos. (p. 220) |
| Below <i>et al.</i> (2009) | Inundações estão inseridas no grupo de desastres hidrológicos, ou seja, relacionados a desvios no ciclo hidrológico. As inundações são subdivididas em: inundações ribeirinhas, bruscas e costeiras. (p. 6) |

Após experienciar inundações, a população começou a procurar habitar áreas mais altas, menos frequentemente inundadas (TUCCI, 1993; PLATE, 2002). Com o aumento da urbanização, as planícies inundáveis também foram ocupadas, principalmente pela população de

2 Aqui provavelmente houve uma troca acidental do termo “cheias” por “chuvas”.

baixa renda, gerando problemas sociais que se repetem a cada inundação (TUCCI, 1993).

Magalhães (1970) e Leopold (1994) concordam que os danos causados pelas inundações são consequência da ocupação humana das planícies inundáveis. Comprovando essa idéia, Silveira *et al.* (2009) mostraram que os desastres das inundações em Joinville, SC, estão mais relacionadas com o avanço da ocupação das planícies de inundação do que com o comportamento das chuvas e, portanto, são desastres mais humanos que naturais.

Flemming (2002) relembra que as inundações são fenômenos naturais que não podem ser evitados, mas seus danos podem ser mitigados. Para essa tarefa, ressalta a importância da elaboração e atualização de mapas de inundação.

2.2 MODELAGEM EM HIDROLOGIA

Modelos são ferramentas comuns em toda iniciativa científica. Por definição, modelos são representações simplificadas da realidade de (SILBERSTEIN, 2006). Aproveitando a analogia do mesmo autor, desde os simples carrinhos de brinquedo usados por crianças para explorar os efeitos da velocidade e de corpos se chocando, até complicadas equações matemáticas que descrevem o comportamento de astros, estamos sempre tentando representar com modelos o que não conseguimos entender, medir ou prever.

O processo de modelagem hidrológica pode ser descrito por cinco etapas, de acordo com Beven (2001), que seguem uma ordem decrescente de complexidade: (1) modelo de percepção, i.e., a percepção pelo hidrólogo dos processos da bacia; (2) modelo conceitual, a descrição matemática dos processos; (3) modelo de procedimento, ou seja, a implementação do modelo em um computador para suprir a falta de solução analítica do modelo conceitual; (4) calibração, a etapa onde se ajusta os valores dos parâmetros dos quais o modelo é dependente para aproximar a série simulada à observada; e (5) validação, ou a aplicação do modelo para outra série de dados da mesma bacia para testar se o modelo descreve adequadamente o comportamento da mesma.

Os modelos hidrológicos podem ser uma representação do ciclo hidrológico completo, como o Tank Model, ou de apenas um dos processos desse ciclo, como o modelo de infiltração de Horton (SINGH & WOOLHISER, 2002). Mas Beven (1989) enfatiza que os modelos

são sempre aproximações da realidade, mesmo o mais complexo deles. Assim, os modelos não substituem dados observados, embora sejam uma maneira rápida e barata de fazer experimentos. Em geral, são usados para: (a) entender os processos e sua influência no sistema, (b) testar os dados, procurar inconsistências e erros, e preencher falhas; (c) simular cenários (SILBERSTEIN, 2006). Ou seja, os modelos são úteis para suprir nossa incapacidade em medir detalhadamente os processos hidrológicos e a impossibilidade de medir o futuro, como coloca Beven (2001).

Tate & Maidment (1999) colocam que uma deficiência de muitos dos modelos utilizados para a análise de planícies de inundação é a impossibilidade de se comparar a localização de infra-estruturas impactadas com a localização da área inundável. Segundo os mesmos autores, os sistemas de informações geográficas (SIG) têm se mostrado ambientes efetivos para a análise e mapeamento de planícies de inundação. Assim, o uso do SIG associado à modelagem de áreas de inundação, através da comparação de mapas cadastrais ou fotos aéreas com as áreas inundáveis simuladas, possibilita o conhecimento de quais infra-estruturas estão em risco. Portanto, a associação *SIG + modelagem* é uma importante ferramenta para a gestão de inundações.

2.3 TANK MODEL

O Tank Model é um modelo de chuva-vazão simples, considerado concentrado, determinístico e paramétrico (SUGAWARA *et al.*, 1984; SUGAWARA, 1995). Singh & Woolhiser (2002) classificam o modelo como concentrado ou semi-distribuído. Smith (2005) classifica o modelo como fisicamente baseado, concentrado e paramétrico.

Sugawara *et al.* (1984) questionam a classificação de seu modelo como ‘caixa-preta’, e argumenta que o modelo tem significado físico. O modelo é composto por tanques alinhados verticalmente e em série. A cada uma das saídas laterais dos tanques corresponde um processo de escoamento (Figura 3).

O Tank Model também é considerado versátil: simula com sucesso situações de vazões máximas e mínimas e apresenta bons resultados para diferentes tipos de bacias hidrográficas (SUGAWARA *et al.*, 1984). Os mesmos autores colocam que apesar de o modelo ter sido desenvolvido no Japão, uma região muito úmida, já mostrou bom

desempenho em regiões áridas e semi-áridas. Essa versatilidade em representar diferentes tipos de hidrogramas se dá devido à sua estrutura não-linear, possibilitada pelo posicionamento das saídas laterais de cada tanque (SUGAWARA, 1995).

Para a calibração do modelo, Sugawara *et al.* (1984) desenvolveram métodos automáticos e semi-automáticos. No entanto, os autores afirmam que o método da tentativa e erro, com julgamento subjetivo pelo modelador, ainda é o mais importante.

Em Santa Catarina, o modelo já foi utilizado em estudo de interceptação em uma bacia de 10 ha em Rio Negrinho (CHAFFE *et al.*, 2010) e na proposição de um índice de umidade para previsão de secas e inundações na bacia do Rio do Peixe (LINDNER & KOBAYAMA, 2009). O modelo também já foi utilizado no cálculo de chuva crítica para estimativa de índices de perigo de desastres causados por fluxos de escombros e ruptura de encostas (KOBASHI & SUZUKI, 1987).

Smith (2005) menciona duas vantagens do Tank Model: cálculos rápidos e capacidade de modelar inundações. O mesmo autor sugere a utilização do modelo de forma distribuída como uma opção de baixo custo para tomadores de decisão estimarem níveis de inundação.

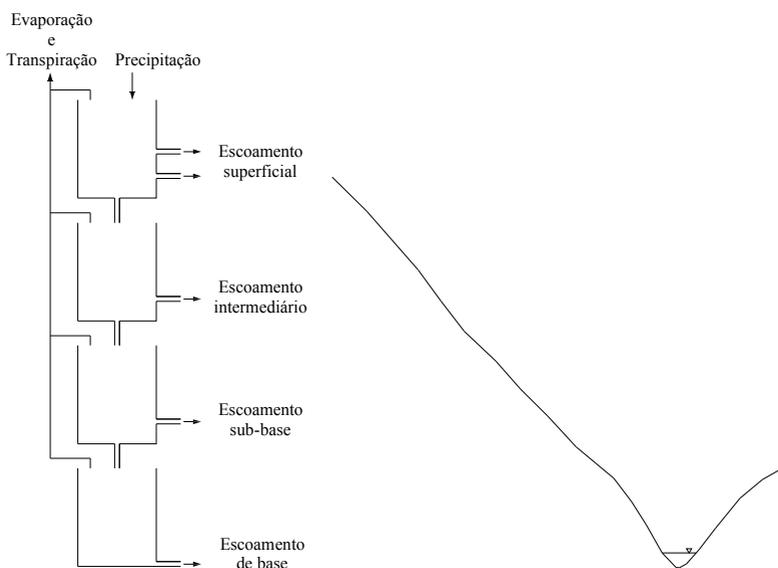


Figura 3 – Representação esquemática do significado físico do modelo Tank Model.

2.4 ÍNDICE DE PRECIPITAÇÃO ANTECEDENTE

O índice de precipitação antecedente (API) é um índice hidrológico que consiste em uma função de decaimento. O índice é útil por permitir, de maneira simples, a consideração das condições antecedentes de umidade do solo ao ser utilizado em modelos de chuva-vazão.

Segundo Boughton & Droop (2003), o índice foi desenvolvido a partir da necessidade de se prever inundações a partir de um método simples e prático. Então, Linsley *et al.* (1949, apud KOHLER & LINSLEY (1951)), do *U.S. Weather Service*, propuseram o *Antecedent Precipitation Index* (API). Em seguida, Kohler & Linsley (1951) sugeriram o índice para prever o início do escoamento superficial após um evento de chuva. Duas décadas depois, Sittner *et al.* (1969) utilizaram o API como base de um modelo de chuva-vazão para a simulação contínua de hidrograma sintético.

Para estimar o escoamento superficial a partir de informações de chuva, a aplicação direta da teoria de infiltração é considerada a abordagem mais racional, segundo Kohler e Linsley (1951). No entanto, os autores colocam duas desvantagens dessa abordagem: (1) possibilita estimar apenas o escoamento superficial, e (2) esbarra na heterogeneidade do solo. A primeira é uma desvantagem para a previsão de inundações, quando é necessário também conhecer os escoamentos subsuperficial e de base. A segunda é uma dificuldade principalmente para bacias com área superior a alguns acres. Essas bacias têm características hidrológicas muito heterogêneas, e aplicação da teoria da infiltração se torna muito complexa. A alta variabilidade espacial da chuva pode ser superada com uma densa rede de estações pluviométricas, mas as condições de umidade do solo são muito difíceis de determinar. Portanto, para a modelagem com fins de predição, a modelagem chuva-vazão demanda uma abordagem mais simples, principalmente em uma bacia com rede pluviométrica esparsa. Como alternativa a essa abordagem, o API pode ser aplicado em qualquer tipo de bacia, e dá bons resultados se aplicado em conjunto com a estação do ano ou a temperatura.

2.5 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Sistema de Informações Geográficas (SIG) é o sistema que realiza tratamento computacional de dados geográficos. Um SIG armazena a geometria e atributos de informações que estão localizadas na superfície terrestre e em uma projeção cartográfica (CÂMARA & MEDEIROS, 1998). Os SIG são úteis para a o uso de dados em quantidade muito grande para manipulação por processos convencionais (SIMÕES, 1993).

Oliveira (2003) destaca a utilidade do uso associado do SIG e de modelos hidrológicos para o planejamento urbano e controle de enchentes, já que o SIG tem como característica a análise espacial e possibilita a integração de informações espaciais e não-espaciais. O mesmo autor coloca que o procedimento mais comum para essa associação é através de ferramentas de pré- e pós-processamento que permitam a compatibilização das informações entre o SIG e o modelo, em ambos os sentidos *SIG* → *modelo* e *modelo* → *SIG*. O autor ainda coloca as vantagens do uso desses sistemas na hidrologia: interatividade entre o usuário e os sistemas computacionais; possibilidade de vários usuários terem acesso ao banco de dados simultaneamente; possibilidade de entrada e saída de dados gráficos em diversos formatos; volume de dados e velocidade de tratamento; uso simultâneo de dados de origens diferentes; e baixo custo.

Uma das informações espaciais utilizadas nos SIG é o modelo digital do terreno (MDT). Segundo Simões (1993), o MDT é a representação de superfícies a partir de processos matemáticos. Essa representação se dá sob a forma de grades regulares ou irregulares, constituídas de polígonos que juntos cobrem toda a superfície de interesse. A modelagem digital do terreno procura determinar a superfície que melhor representa um conjunto de dados pontuais, através de ajuste por funções ou interpolações.

Um exemplo de MDT é o *triangular irregular network* (TIN), uma grade do tipo irregular, que cobre a superfície de interesse com triângulos. Para a representação das elevações do terreno, o TIN é gerado a partir de dados georreferenciados de elevação. Segundo Carter (1988³, apud TATE & MAIDMENT, 1999), essa estrutura permite uma rede mais densa de pontos nas porções do terreno onde a superfície é

3 Carter, J.R. (1988). "Digital Representations of Topographic Surfaces". **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 54(11), 1577-1580.

mais complexa, e uma rede menos densa onde a o terreno é mais suave. Por essa razão, Tate & Maidment (1999) defendem que o uso do TIN para a análise hidráulica de cursos de água é preferível a outros tipos de MDT.

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O município de Rio Negrinho está localizado no Planalto Norte catarinense, entre as latitudes $26^{\circ}11'48''\text{S}$ e $26^{\circ}42'05''\text{S}$ e as longitudes $49^{\circ}45'56''\text{W}$ e $49^{\circ}26'17''\text{W}$. O município faz divisa com os municípios catarinenses Mafra, Itaiópolis, Doutor Pedrinho, Rio dos Cedros, Corupá e São Bento do Sul, e com o município de Rio Negro, do estado do Paraná, sendo separado desse último pelo Rio Negro (Figura 4). O município de Rio Negrinho tem 908 km^2 , sendo $33,4 \text{ km}^2$ (4%) dentro do perímetro urbano.

O município de Rio Negrinho está inserido nas bacias hidrográficas do Rio Negrinho e Rio Preto. A porção urbana do município está inserida na bacia do Rio Negrinho, cujo rio principal é o que dá nome à bacia e os principais afluentes são os rios do Bugres e Serrinha (Figura 5).

O município está sobre embasamento de rochas sedimentares dos grupos Itararé e Guatá, Super-grupo Tubarão. O grupo Itararé é representado, ao norte do município, pela formação Mafra, com arenitos finos e grosseiros, diagmititos areno-argilosos, conglomerados, ritmititos, argilitos e varvitos. Na parte central do município, o grupo Itararé é representado pela formação Rio do Sul, com folhelhos, argilitos e arenitos. O grupo Guatá, na porção sul do município, é representado pela formação Rio Bonito, com arenitos intercalados com argilitos e folhelhos, representando depósitos litorâneos e fluvio-deltaicos (SANTA CATARINA, 1986).

O município está inserido na unidade geomorfológica Patamar de Mafra, no Patamar Oriental da Bacia do Paraná, e é caracterizado por superfície regular, quase plana, de baixa energia de relevo (SANTA CATARINA, 1986).

O clima é do tipo úmido, mesotérmico, com pouco ou nenhum déficit de água, e concentração no verão da evapotranspiração potencial abaixo de 48%, segundo classificação de Thornthwaite (SANTA CATARINA, 1986). O clima do município sofre influência do sistema El Niño - Oscilação Sul (ENOS). Dalagnol (1999) observou que existe um aumento na precipitação média no município em anos de El Niño. Observando os anos de ocorrência de El Niño (Anexo A), nota-se que das 22 inundações registradas no município, 16 ocorreram em ano de El

Niño (7 delas em anos de El Niño forte, 3 em anos de El Niño moderado e 6 em anos de El Niño fraco) (CPTEC,2010).

A vegetação do Planalto Norte é, originalmente, Floresta Ombrófila Mista, do tipo Montana. Essa floresta, também conhecida como Mata de Araucárias, é caracterizada por um estrato superior com pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia*) como espécie exclusiva, e estrato sub-bosque predominado por lauráceas, principalmente imbuia (*Ocotea porosa*) e canela-lajeana (*Ocotea pulhella*). Atualmente, a vegetação é predominantemente secundária (SANTA CATARINA, 1986).

A colonização da área onde hoje está instalado o município de Rio Negrinho se iniciou em 1873, com a fundação da Colônia São Bento (RIO NEGRINHO, 2010b). Além das inundações, a história de Rio Negrinho está também intimamente ligada à indústria madeireira. Desde a construção do ramal da Estrada de Ferro São Paulo-Rio Grande que passa por Rio Negrinho e da estação de mesmo nome, entre 1911 e 1913, se iniciou um intenso comércio de toras e madeiras serradas. Entre 1913 e 1914 foi instalada na região a Serraria Salto, que depois mudou de lugar e passou a chamar A. Ehrl & Cia e, posteriormente, Móveis Cimo, empresa esta que chegou a ser considerada uma das maiores fábricas de móveis da América Latina (Figura 6). (KORMANN, 1989; RIO NEGRINHO, 2010b) Apesar da atividade industrial do município já ter se diversificado, a economia do município ainda é bastante dependente da indústria madeireira e de papel.

Assim, desde o início da colonização da região houve extração intensiva de madeira, principalmente araucárias e imbuia. Hoje, os segmentos de florestas na região são secundários, com poucos exemplares de grande porte, e florestas plantadas de pinus e eucalipto. Essa mudança da cobertura vegetal da região desperta desconfiança da população quanto à influência das florestas plantadas nas inundações do município.

Para as análises desse trabalho foi considerada apenas a área urbana do município, onde se têm registros de inundações. As estimativas de vazão foram realizadas para a bacia hidrográfica do Rio Negrinho, com a estação fluviométrica como exutório.

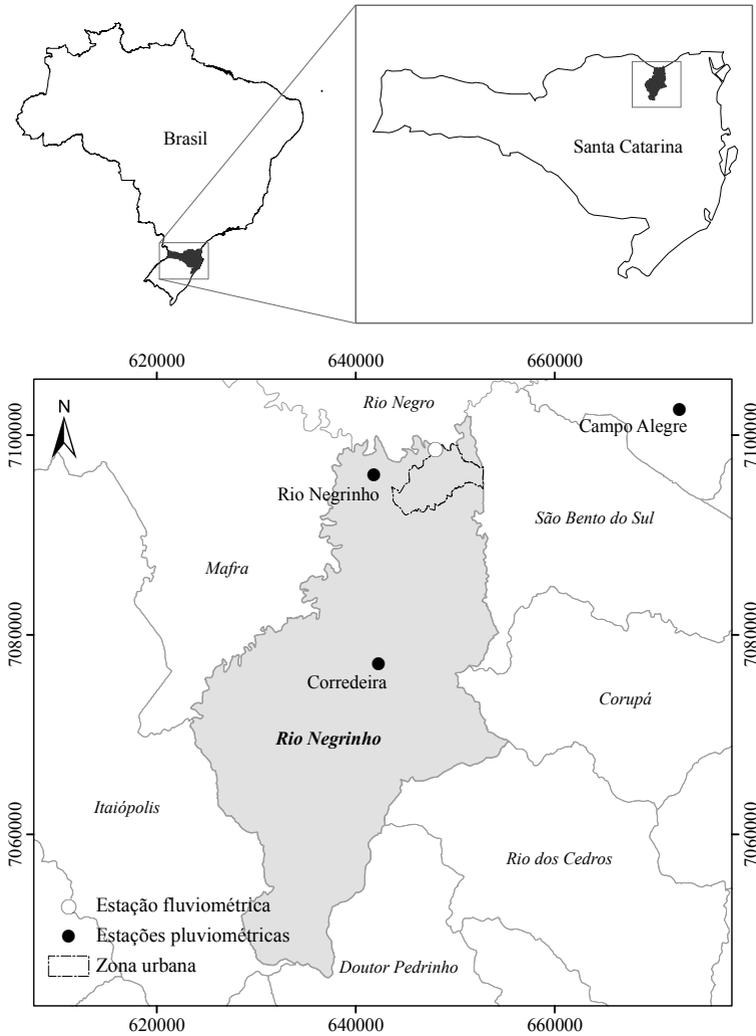


Figura 4 – Mapa de localização de Rio Negrinho.



Figura 5 – Mapa da zona urbana de Rio Negrinho e seus principais rios.



Figura 6 – Serraria A. Ehrl & Cia, em 1923, onde hoje é o centro de Rio Negrinho.

Fonte: Prefeitura Municipal de Rio Negrinho (RIO NEGRINHO, 2010b).

3.2 COLETA DE DADOS

Os dados utilizados para este trabalho são, em linhas gerais: registros históricos de inundações, levantamentos de áreas inundadas, dados pluviométricos e fluviométricos, dados cartográficos e ortofoto.

A coleta dessas informações se deu por três meios: (1) visitas ao município e à Prefeitura Municipal de Rio Negrinho (PMRN) para coleta de registros históricos oficiais e não oficiais, base cartográfica e levantamentos de inundação; (2) pesquisa nos bancos de dados online da Agência Nacional das Águas (ANA) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para coleta de séries históricas pluviométricas e fluviométricas; e (3) levantamento em campo das áreas alagadas.

Na PMRN fez-se contato com a Secretaria Municipal de Planejamento e Meio Ambiente (SEPLAN) e com o Consórcio Ambiental Quiriri, através dos funcionários Emerson Schoeffel e Leoni Pacheco Fuerst. O primeiro é responsável pelo setor de mapeamento da SEPLAN, e a segunda é responsável pelo Consórcio Quiriri em Rio Negrinho.

3.2.1 Registros históricos

Os registros históricos das inundações no município foram buscados junto à SEPLAN, moradores locais, jornais da cidade e marcos históricos.

As inundações sobre as quais se encontrou informações estão listadas na Tabela 2. Na coluna “ano” estão destacadas com “*” as inundações consideradas para este estudo. A coluna “datas possíveis” apresenta as possíveis datas de ocorrência das inundações. A coluna “data adotada” corresponde à data escolhida para o cálculo dos API e das chuvas acumuladas. A coluna “Mapa de área inundada” apresenta a existência ou não de mapa de área inundada para a inundação correspondente e, se sim, qual a origem: “1” significa que o mapa foi cedido pela SEPLAN; “2” significa que as áreas inundadas foram levantadas em campo.

A inundação de 1983 está registrada na parede lateral da igreja matriz Santo Antonio de Pádua com a data de 11/07/1983 (Figura 2 e Figura 7(a)). Portanto, para esse estudo se adota essa data como a mais provável.

O caso da inundação de 1992 é semelhante à de 1983: no marco da igreja consta a data 31/05/1992, que é, portanto, a data adotada como a mais provável.

Não há registro histórico de levantamento de áreas inundadas nos eventos de 83 e 92. No entanto, devido à importância histórica dos mesmos, essas áreas foram estimadas. Esse levantamento é descrito na seção 3.3.

Em 1999, sabe-se que houve uma inundação, provavelmente no mês de maio, mas não se tem maiores informações. Esse evento foi, portanto, desconsiderado neste estudo.

Em 2004, no mapa das áreas inundadas consta a data 25/10/2004. No entanto, os dados fluviométricos indicam que a vazão máxima ocorreu no dia 19 do mesmo mês (27,22 m³/s), enquanto no dia 25 a vazão obtida a partir dos mesmos dados é de apenas 4,52 m³/s. Por essa razão, adota-se 19/10/2004 como a data da ocorrência dessa inundação.

O evento do ano de 2005 não foi utilizado no presente estudo porque a incerteza quanto à sua data é de quase 60 dias. A escolha equivocada de uma data pode alterar em grandes proporções os resultados do trabalho.

Não existe levantamento das áreas inundadas nos anos de 2007 e 2008. Por outro lado, há um mapa de áreas inundadas cuja data não consta. Esse mapa pode corresponder a uma das inundações de 2007 a 2008. Como essa informação não pôde ser confirmada, esses eventos foram desconsiderados.

Tabela 2 – Síntese dos registros históricos das inundações.

| Ano | Datas possíveis | Data adotada | Mapa de área inundada |
|--------------|------------------------|---------------------|------------------------------|
| 1983* | 10 ou 11/07 | 11/07/1983 | 2 |
| 1992* | 29 ou 31/05 | 31/05/1992 | 2 |
| 1999 | Maio | - | Não |
| 2004* | 19 ou 25/10 | 19/10/2004 | 1 |
| 2005 | 01/09 ou 30/10 | - | 1 |
| 2007 | 23/05 | - | Não |
| 2008 | 05/10 | - | Não |
| 2009* | 29/09 | 29/09/2009 | 1 |
| 2010* | 14/01 | 14/01/2010 | 1,2 |
| 2010* | 26 ou 27/04 | 27/04/2010 | 1,2 |
| Desconhecido | 2007 ou 2008 | - | 1 |

* Inundações consideradas neste estudo; 1 Mapa cedido pela SEPLAN;
2 Levantamento em campo de áreas inundadas.

3.2.2 Base cartográfica

As ortofotos e a base cartográfica digital da zona urbana do município, em escala 1:2.000, foram cedidas pela SEPLAN. A escala da cobertura aerofotogramétrica é 1:8.000, com vôo realizado em 09/2004 e restituição em 11/2004.

3.2.3 Dados pluviométricos

Foram utilizados dados de chuva das estações Rio Negrinho, Corredeira e Campo Alegre, disponíveis no HidroWeb. O HidroWeb é o sistema de informações hidrológicas da ANA (<http://hidroweb.ana.gov.br>). As características das estações estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características das estações pluviométricas.

| Estação | Código | Posição | | Altitude | Operadora | Dados utilizados |
|--------------|---------|-----------|-----------|----------|-----------|------------------|
| | | Lat. S | Long. O | | | |
| Campo Alegre | 2649057 | 26°11'11" | 49°16'24" | 870 m | SUDERHSA | 1983 |
| | | | | | | 1992 |
| | | | | | | 2004 |
| Corredeira | 2649055 | 26°25'10" | 49°34'23" | 750 m | SUDERHSA | 1983 |
| | | | | | | 1992 |
| | | | | | | 2004 |
| Rio Negrinho | 2649015 | 26°14'52" | 49°34'48" | 862 m | EPAGRI | 2009 2010 |

3.2.4 Dados fluviométricos

Foram utilizados os dados de cota da estação Rio Negrinho Montante (65093000), operada pela SUDERHSA. A estação está localizada no Rio Negrinho, na latitude 26°13'30" oeste e longitude 49°31'06" sul, a 750 m de altitude, e com uma área de drenagem de 176,6 km². Os dados da estação estão disponíveis no HidroWeb. A série histórica da estação se inicia em 2002 e se estende até o presente momento. Foram utilizadas as séries diárias de cotas às 7 h dos anos de 2004, 2009 e 2010.

Para essas séries, vazões diárias foram extraídas utilizando-se a curva-chave da estação (Eq.3.1) cedida pela SUDERHSA.

$$Q = 4,4621 \cdot (h + 0,01)^{1,3022} \quad (3.1)$$

onde Q é a vazão em m³/s e h é a cota em cm.

3.2.5 Mapas de áreas inundadas

Os levantamentos das áreas inundadas fornecidos pela SEPLAN, simplificados até o momento por “mapas de áreas inundadas”, consistem, na realidade, em três diferentes tipos de informação.

O primeiro deles são os mapas da área urbana do município, em papel, com anotações à mão livre das áreas inundadas (aproximadas) observadas em campo pela equipe da SEPLAN. A esse tipo de informação correspondem os eventos de 2004, 2005, 2009 e um cujo ano é desconhecido (ver exemplo desses mapas no Anexo D).

Outro tipo de informação é o polígono das áreas inundadas (aproximadas) em 13/01/2010. Esse polígono foi digitalizado por Emerson Schoeffel (SEPLAN) sobre a base cartográfica digital do município, a partir de observações em campo e das cotas altimétricas.

O terceiro tipo de informação é o polígono das áreas inundadas em 26/04/2010, em arquivo digital. Esse polígono foi gerado tomando-se por base: os pontos de GPS de navegação coletados em campo por Emerson na ocasião da inundação; e a cota altimétrica atingida pela água, segundo observações de campo do mesmo funcionário.

3.3 LEVANTAMENTOS EM CAMPO

Foram realizados levantamento em campo das áreas inundadas com o intuito de aperfeiçoar os levantamentos de janeiro e abril de 2010 fornecidos pela SEPLAN. Para isso, realizaram-se coletas dos pontos que definem a interface entre as áreas inundada e não inundada. Os levantamentos foram realizados com GPS de precisão, em levantamento do tipo *FastStatic*, com tempo de coleta de 2 minutos por ponto. Para orientação em campo, utilizou-se mapa com foto aérea da área urbana e o levantamento preliminar de cada evento sobreposto. Este tipo de levantamento foi realizado com acompanhamento de Emerson Schoeffel (SEPLAN) nos dias 03, 04 e 11/02/2010 (levantamento da inundação de janeiro/2010) e 18 e 19/07/2010 (levantamento da inundação de abril/2010). Como os levantamentos foram realizados depois dos

eventos de inundação, os pontos a serem coletados foram escolhidos com orientação dos moradores e do funcionário Emerson.

Para estimar a área inundada nos eventos de 1983 e 1992, foram levantados com GPS um ponto ao lado de cada um dos dois marcos existentes na cidade: um na captação de água do SAMAERN e outro na parede da igreja matriz Santo Antonio de Pádua. Esses pontos foram levantados com GPS de precisão, em levantamento do tipo *FastStatic*, com tempo de coleta de 20 minutos. Mediu-se com trena as diferenças de cota altimétrica entre os pontos e os marcos das duas inundações. À cota altimétrica de cada um dos pontos foi acrescida a diferença de cota entre o ponto e os marcos das duas inundações. Com a cota resultante, foi extrapolado o polígono de inundação para 1983 e 1992.



Figura 7 – Levantamento em campo dos marcos das inundações de 83 e 92; (a) na igreja de Santo Antônio de Pádua e (b) na captação de água do SAMAERN.

3.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS ESPACIAIS

Os dados foram organizados e processados no SIG ArcGIS 9.3. Uma vez introduzidos no SIG, os dados foram trabalhados dentro do *software* e produtos intermediários foram criados, tais como: MDT e polígonos áreas inundadas. O MDT em formato de TIN foi gerado para a zona urbana do município, a partir de interpolação das curvas de nível da base cartográfica mencionada na seção 3.2.2.

O mapa de áreas inundadas foi gerado a partir das ortofotos do município, do TIN e dos polígonos de áreas inundadas em 1983, 1992, 2004, 2005, 2009 e 2010.

Os polígonos das áreas inundadas em 2004, 2005 e 2009 foram digitalizados a partir dos mapas disponibilizados pela SEPLAN. Os polígonos das áreas inundadas de janeiro e abril de 2010 foram criados primeiramente a partir dos levantamentos preliminares da SEPLAN; posteriormente foram detalhados e corrigidos com a adição dos pontos dos levantamentos de precisão; e, finalmente, esses polígonos foram comparados com o MDT, para confecção dos polígonos finais.

A área total inundada em cada evento foi calculada no ArcGIS. Os polígonos originais de áreas inundadas não abrangem sempre a mesma área na cidade, i.e., alguns levantamentos foram mais abrangentes, e outros mais pontuais. Portanto, a área desses polígonos não representa, necessariamente, a magnitude da inundação, já que um levantamento mais abrangente tem capacidade de resultar numa área inundada maior que um levantamento pontual. Para eliminar essa influência, foi necessário adotar um espaço de trabalho fixo, correspondente   abrangência do levantamento menos abrangente, i.e., o de janeiro de 2010. O espaço de trabalho foi delimitado por um retângulo de área 2,8 km². A Figura 8 exemplifica essa etapa. As informa es existentes fora desse espaço foram, portanto, desconsideradas. O cálculo da área total inundada em cada evento foi então realizado, subtraindo-se a área ocupada pelos rios da soma das áreas inundadas dentro do espaço de trabalho.



Figura 8 – Retângulo limitando o espaço de trabalho, e as inunda es de janeiro de 2010 (em cinza escuro) e de 2009 (em cinza claro).

3.5 ESTIMATIVA DE VAZÕES COM O TANK MODEL

No intuito de conhecer a vazão correspondente a cada inundação contemplada neste estudo, foram estimadas com o Tank Model as vazões correspondentes às inundações de 1983 e 1992, visto que são anteriores aos registros fluviométricos disponíveis.

Para utilizar o Tank Modelo para análise de inundações, é desejável ter uma série de dados que contenha pelo menos 10 inundações, de diferentes magnitudes: pequenas, médias e grandes (SUGAWARA *et al.*, 1984). A unidade temporal recomendada pelos autores é dada pela Eq.3. 2:

$$\Delta T \cong 0,05\sqrt{A} \quad (3.2)$$

onde ΔT é a unidade temporal em horas; e A é a área da bacia em km^2 .

Portanto, para a bacia do Rio Negrinho, cuja área de drenagem, até a estação fluviométrica, é de 176 km^2 , a unidade temporal ideal seria a hora. No entanto, os dados que temos disponíveis têm resolução diária.

Utilizou-se o Tank Model com 4 tanques: o primeiro com duas saídas laterais e os seguintes com uma saída lateral. O modelo tem, portanto 12 parâmetros: C_1U , C_1D , C_1I , C_2D , C_2I , C_3D , C_3I , C_4D , H_1U , H_1D , H_2D e H_3D (Figura 9). Essa configuração foi escolhida por ser recomendada por Sugawara (1985) para a análise de dados diários, e por já ter sido mostrada adequada anteriormente, em uma bacia experimental em Rio Negrinho (CHAFFE *et al.*, 2010).

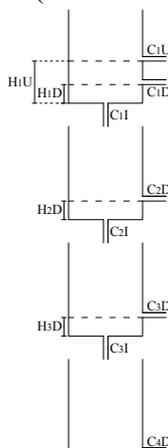


Figura 9 – Configuração do Tank Model utilizado.

Como dados de entrada para o modelo, são necessários dados de chuva e evapotranspiração. Os dados de chuva utilizados são os já mencionados na seção 3.2.3. Para anos com dados de mais de uma estação pluviométrica, foram realizadas simulações com os dados de cada estação, separadamente.

Foram utilizados dados de evapotranspiração gerados com o *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) por Malutta⁴.

3.5.1 Calibração

A calibração do modelo foi realizada para o período de 01/01/2009 a 31/12/2009. Esse período foi escolhido por ter série consistente e contínua de cota e de chuva, além de abranger um evento de inundação. Essa abrangência é interessante, visto que o objetivo das simulações é estimar as vazões para os eventos de inundação mapeados. É, portanto, importante verificar se o modelo está representando adequadamente os picos de vazão.

Realizou-se calibração manual do modelo, i.e., partiu-se de valores atribuídos inicialmente para cada parâmetro e para as condições de contorno e então os parâmetros foram alterados, um a um, até que o desempenho do modelo fosse o melhor possível.

Os valores dos parâmetros foram atribuídos inicialmente dentro de intervalos utilizado em estudo prévio (CHAFFE *et al.*, 2010). Os intervalos e os valores iniciais da calibração são apresentados na Tabela 4.

Para avaliar o desempenho do modelo, foram utilizadas as funções-objetivo: (1) coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH & SUTCLIFFE, 1970) (Eq. 3.3); (2) o erro relativo total na previsão dos volumes (Eq. 3.4); (3) a raiz do erro médio quadrático (Eq. 3.5); (4) o erro médio total de simulação (Eq. 3.6); e (5) o coeficiente de regressão linear R^2 da dispersão dos dados observados e simulados. O desempenho também foi avaliado subjetivamente, a partir de comparação visual dos hidrogramas observado e simulado, dando-se preferência para as simulações que melhor representassem os picos do hidrograma.

⁴ Malutta, S. estuda, com o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), a produção de água e sedimento da bacia do Rio Negrinho. O SWAT utiliza o WRF para simular evapotranspiração a partir de dados meteorológicos. A autora ofereceu os dados de evapotranspiração.

Tabela 4 – Parâmetros de calibração do Tank Model.

| Parâmetro | Intervalo | | Valor inicial | Unidade |
|-----------|-----------|--------|---------------|-------------------|
| | mín | máx | | |
| C_1U | 0,001 | 0,5 | 0,05 | dia ⁻¹ |
| C_1D | 0,001 | 0,5 | 0,05 | dia ⁻¹ |
| C_1I | 0,001 | 0,5 | 0,1 | dia ⁻¹ |
| C_2D | 0,0001 | 0,1 | 0,01 | dia ⁻¹ |
| C_2I | 0,0001 | 0,1 | 0,01 | dia ⁻¹ |
| C_3D | 0,00005 | 0,002 | 0,001 | dia ⁻¹ |
| C_3I | 0,00005 | 0,002 | 0,002 | dia ⁻¹ |
| C_4D | 0,00001 | 0,0005 | 0,0001 | dia ⁻¹ |
| H_1U | 10 | 30 | 10 | mm |
| H_1D | 0 | 10 | 5 | mm |
| H_2D | 0 | 40 | 5 | mm |
| H_3D | 0 | 40 | 5 | mm |

O coeficiente de Nash-Sutcliffe é descrito por:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t | \Theta))^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (3.3)$$

onde: $Nash$ é o coeficiente de Nash-Sutcliffe, que varia de $-\infty$ a 1, sendo que quanto mais seu valor se aproximar de 1, melhor a simulação; $Q_{obs}(t)$ é a vazão observada no tempo t ; $Q_{sim}(t|\Theta)$ é a vazão calculada no tempo t , dado um conjunto de parâmetros Θ ; e $\overline{Q_{obs}}$ é a média das N observações da variável.

O erro relativo total na previsão dos volumes é descrito por:

$$\Delta V = \frac{\left| \sum_{t=1}^N Q_{obs}(t) - \sum_{t=1}^N Q_{sim}(t | \Theta) \right|}{\sum_{t=1}^N Q_{obs}(t)} \quad (3.4)$$

onde ΔV é o erro relativo total na previsão dos volumes.

A raiz do erro médio quadrático é descrito por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Q_{sim}(t | \Theta) - Q_{obs}(t))^2} \quad (3.5)$$

onde $RMSE$ é a raiz do erro médio quadrático.

O erro médio total da simulação é descrito por:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |Q_{sim}(t | \Theta) - Q_{obs}(t)| \quad (3.6)$$

onde E é o erro médio total da simulação.

3.5.2 Validação

A validação do Tank Model foi realizada para os dados de 01/01/2010 a 29/06/2010, já que nesse período as séries históricas de chuva e cota são contínuas e abrangem dois eventos de inundação.

3.6 API E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA

O índice de precipitação antecedente (API) é calculado pela equação:

$$API = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{i} \quad (2.1)$$

onde P é o volume precipitado no dia i , com i variando de 1 (para o dia do evento em análise) a n dias que antecedem o evento.

Para cada uma das inundações apresentadas na Tabela 2 foram calculados os API e a precipitação acumulada para 7, 10 e 30 dias antecedentes. Para os anos com dados de mais de uma estação pluviométrica, foram calculados os API correspondentes aos dados de cada uma das estações.

A precipitação acumulada é calculada como:

$$P_{acum} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (3.7)$$

onde P_{acum} é o volume de chuva acumulado entre o i -ésimo dia que antecede o evento e o dia do evento; e n é o número de dias considerado para o acúmulo das chuvas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MAPAS DE ÁREAS INUNDADAS

Os mapas das áreas inundadas em janeiro e abril de 2010 são apresentados nos Apêndices A e B. Esses mapas mostram que o limite da área inundada não coincide com os contornos do terreno, apenas se aproxima dos mesmos. Durante os levantamentos de campo foi possível notar obstáculos ao percurso natural da água, tais como muros, degraus, calçadas e casas. E moradores relataram que a água invadia algumas ruas através de bueiros e bocas de lobo. Esses elementos urbanos interferem no alcance da água e fazem com que a superfície alagada nem sempre corresponda a superfícies de mesma cota. Portanto, informações sobre as elevações do terreno são importantes, mas não são suficientes para estudos de inundações urbanas.

Os trabalhos em campo mostraram claramente a importância de que os levantamentos de áreas inundadas sejam realizados o mais cedo possível após a ocorrência do evento. O levantamento correspondente à inundação de janeiro de 2010 foi realizado cerca de 15 dias após o evento. Esse intervalo de tempo se mostrou adequado. No entanto, o levantamento correspondente à inundação de abril foi realizado quase 3 meses após o evento. Esse intervalo de tempo se mostrou muito longo, e a lembrança dos moradores já não estava clara e precisa. Alguns exageravam ou minimizavam o alcance da água. O funcionário do SEPLAN que acompanhou o levantamento já havia realizado um pré-levantamento, e pôde perceber algumas informações equivocadas.

O mapa das áreas inundadas no centro de Rio Negrinho nos eventos de 1983, 1992, 2004, 2005, 2009, e janeiro e abril de 2010 é apresentado no Apêndice C.

A inundação de 2005, apesar de não ter sido considerada neste estudo, teve sua área inundada delimitada. As inundações de 1983 e 1992 se coincidem entre si no mapa em virtude da metodologia utilizada para delimitá-las. Suas áreas foram extrapoladas pela cota, e a diferença entre a cota atingida em cada uma das ocasiões é inferior à resolução do modelo digital de elevação. Portanto, foram aproximadas à mesma área. A cota atingida pela inundação de 1992 é da ordem de 10 cm superior à de 1983. Essa diferença é pouco significativa em eventos de tal magnitude (o nível da água chegou a aproximadamente 5 m no centro da cidade).

4.2 ESTIMATIVA DE VAZÃO COM TANK MODEL

4.2.1 Calibração

Os parâmetros da melhor calibração obtida são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Conjunto de parâmetros escolhidos na calibração.

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|------------------|--------------|-------------------|
| C_1U | 0,03 | dia ⁻¹ |
| C_1D | 0,1 | dia ⁻¹ |
| C_1I | 0,1 | dia ⁻¹ |
| C_2D | 0,05 | dia ⁻¹ |
| C_2I | 0,1 | dia ⁻¹ |
| C_3D | 0,01 | dia ⁻¹ |
| C_3I | 0,002 | dia ⁻¹ |
| C_4D | 0,0001 | dia ⁻¹ |
| H_1U | 30 | mm |
| H_1D | 10 | mm |
| H_2D | 10 | mm |
| H_3D | 10 | mm |

O hidrograma obtido com a calibração é mostrado na Figura 10. Essa simulação apresentou: $Nash=0,71$; $\Delta V=0,33\%$; $RMSE=0,08$ m³/s; $E=1,02$ m³/s; e $R^2=0,77$ (Figura 11). O *Nash* indica, portanto, um desempenho satisfatório.

Apesar de ter-se priorizado o ajuste dos picos do hidrograma, de maneira geral o hidrograma simulado subestima os picos, com exceção dos eventos de 12/07 e 20/08/2009. Na inundação de 29/09, o modelo simulou 35,8 m³/s, e a vazão observada foi de 40,4 m³/s, i.e., uma diferença de 11%. Além disso, o pico do hidrograma calculado aconteceu em 28/09, i.e., adiantado em 1 dia.

O desempenho do modelo na calibração foi considerado satisfatório para a estimativa de vazão de inundações.

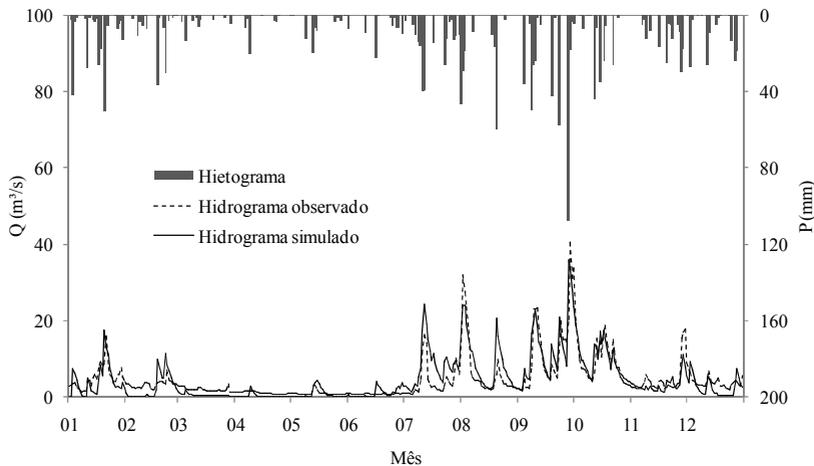


Figura 10 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado para 2009.

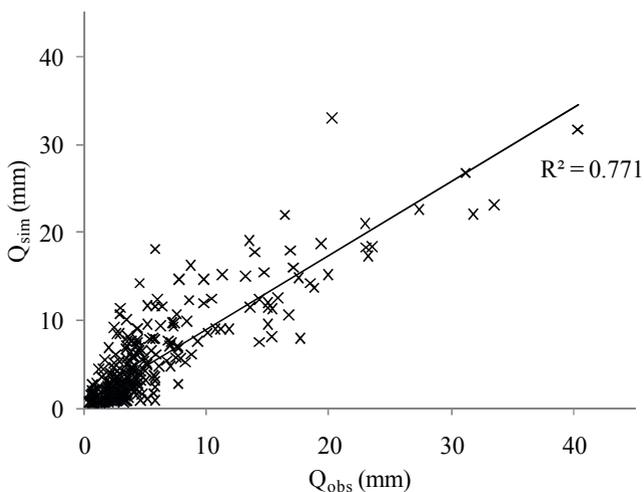


Figura 11 – Comparação entre vazão observada e vazão simulada, para 2009.

4.2.2 Validação

O hidrograma obtido na validação é mostrado na Figura 12. Essa simulação apresentou: $Nash=0,54$; $\Delta V=5,2\%$; $RMSE=0,004 \text{ m}^3/\text{s}$; $E=1,99 \text{ m}^3/\text{s}$; e $R^2=0,70$ (Figura 13).

Na validação, o *Nash* indica um desempenho do modelo não satisfatório, o que pode ser comprovado pela observação do hidrograma.

No entanto, para o objetivo deste trabalho, i.e., estimar a vazão das inundações, o desempenho obtido é considerado válido. Para o evento de 27/04/2010, o modelo calculou uma vazão de 69,5 m³/s, e a vazão observada foi de 59,5 m³/s, i.e., errou em 17%. Nessa simulação, a vazão máxima calculada ocorreu no mesmo dia da observada.

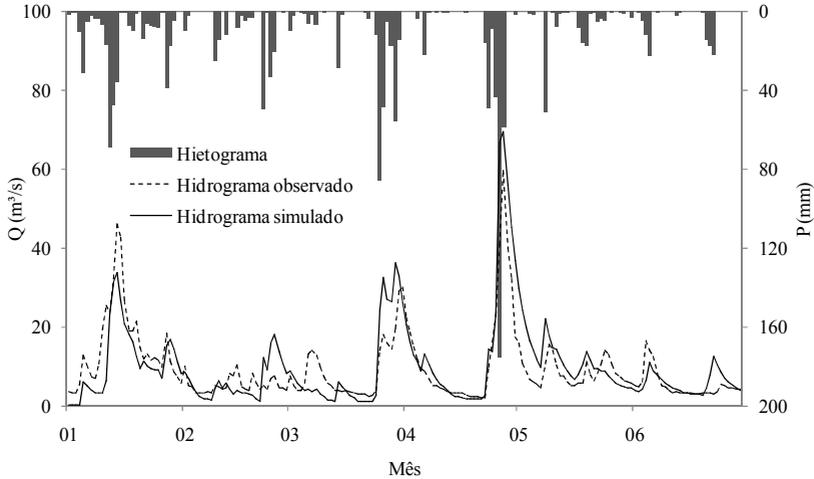


Figura 12 – Hietograma e hidrogramas observado e simulado de 2010.

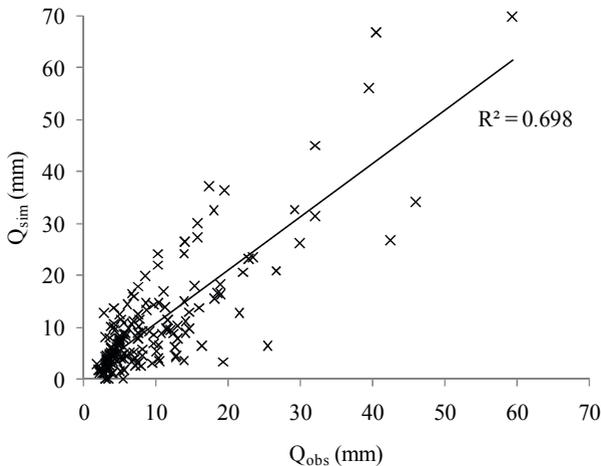


Figura 13 – Comparação entre vazão observada e vazão simulada, para 2010.

4.2.3 Estimativa de vazões

Os hidrogramas simulados para o ano de 1983, utilizando dados de chuva das estações Campo Alegre e Corredeira, são apresentados na Figura 14. É possível notar que os hidrogramas são semelhantes entre si, e que as diferenças entre eles são explicadas pelos hietogramas correspondentes. Essas diferenças no hietograma são esperadas, visto que as estações pluviométricas estão cerca de 40 km distantes uma da outra.

Em ambas as simulações a vazão máxima do ano ocorreu em 10/07/1983. Essa informação difere em um dia da data registrada na parede da igreja de Santo Antonio de Pádua (Figura 2 e Figura 7).

A vazão estimada para essa inundação é de 59,7 m³/s para dados da estação Corredeira e 52,8 m³/s para dados da estação Campo Alegre. Essas vazões são de magnitude igual à vazão observada em abril de 2010 (59,5 m³/s). No entanto, sabe-se que a inundação de 1983 teve magnitude muito maior que a de 2010, o que pode ser comprovado pela altura da água alcançada nessas ocasiões (Figura 2). Portanto, a vazão para a inundação de 1983 foi subestimada. Considerando a magnitude do evento em questão, essa subestimação pode ter origem nos dados de chuva. O volume de chuva precipitado entre duas leituras pode ter superado o volume do pluviômetro e, portanto, a chuva registrada é inferior à chuva real. Ao comparar a precipitação acumulada em 7, 10 e 30 dias em 1983 (ambas as estações) com 2010 veremos que elas têm magnitudes muito parecidas (Tabela 6). Portanto, o resultado da modelagem com o Tank Model está coerente com os dados disponíveis, mesmo sabendo que não corresponde à realidade.

Os hidrogramas simulados para o ano de 1992, utilizando dados de chuva das estações Campo Alegre e Corredeira, são apresentados na Figura 15. Da mesma maneira como já foi comentado para os hidrogramas de 1983, as diferenças existentes entre os hidrogramas correspondentes às duas diferentes estações pluviométricas são explicadas pelas diferenças nos hietogramas de cada estação.

Mas diferentemente da simulação de 1983, a data da vazão máxima em 1992 não são é a mesma nas duas séries de dados. A vazão máxima simulada se dá no dia 31/05 utilizando-se os dados da estação Campo Alegre, mas se dá no dia 29/05 se calculada a partir dos dados da estação Corredeira. A data registrada na parede da igreja é 31/05 (Figura 2 e Figura 7).

As vazões calculadas para a inundação de 92 são 62,8 m³/s (estação Campo Alegre) e 62,7 m³/s (estação Corredeira). Esses valores

são maiores que os da inundação de 83, o que   esperado, já que o nível atingido pela água também   maior em 92. Também a chuva registrada na inundação de 1992   superior   de 1983, o que pode ser notado pela comparação das chuvas acumuladas (Tabela 6).

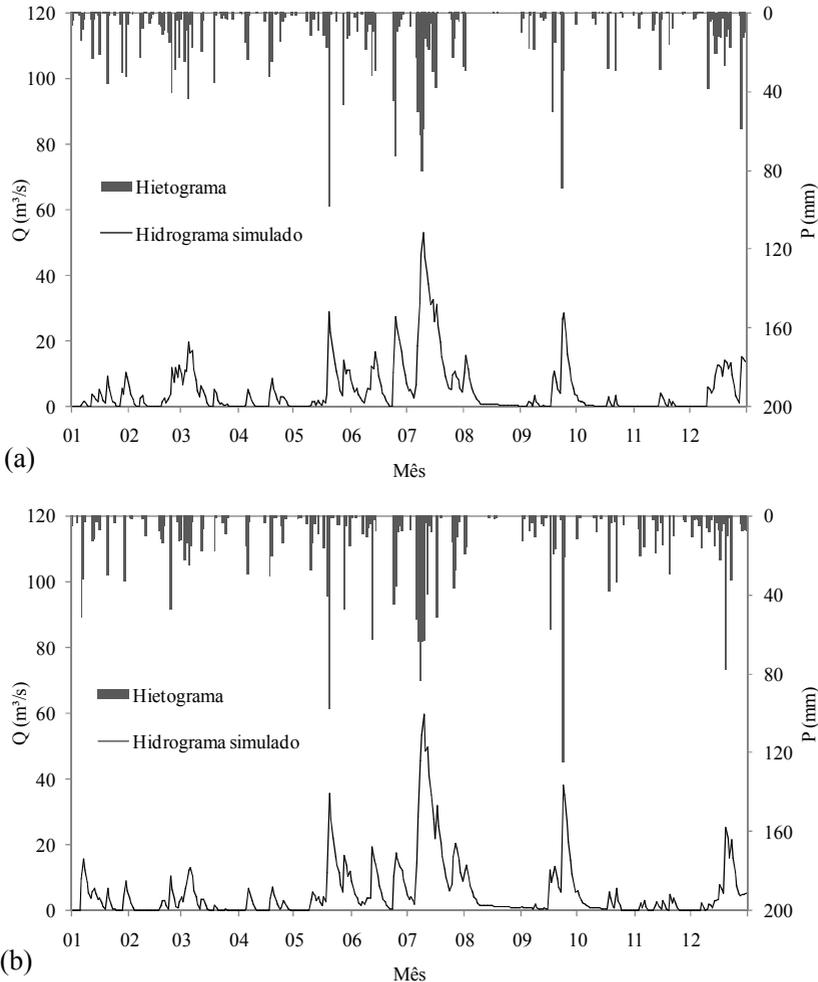


Figura 14 – Hietograma e hidrograma simulado de 1983; (a) estac o Campo Alegre, e (b) estac o Corredeira.

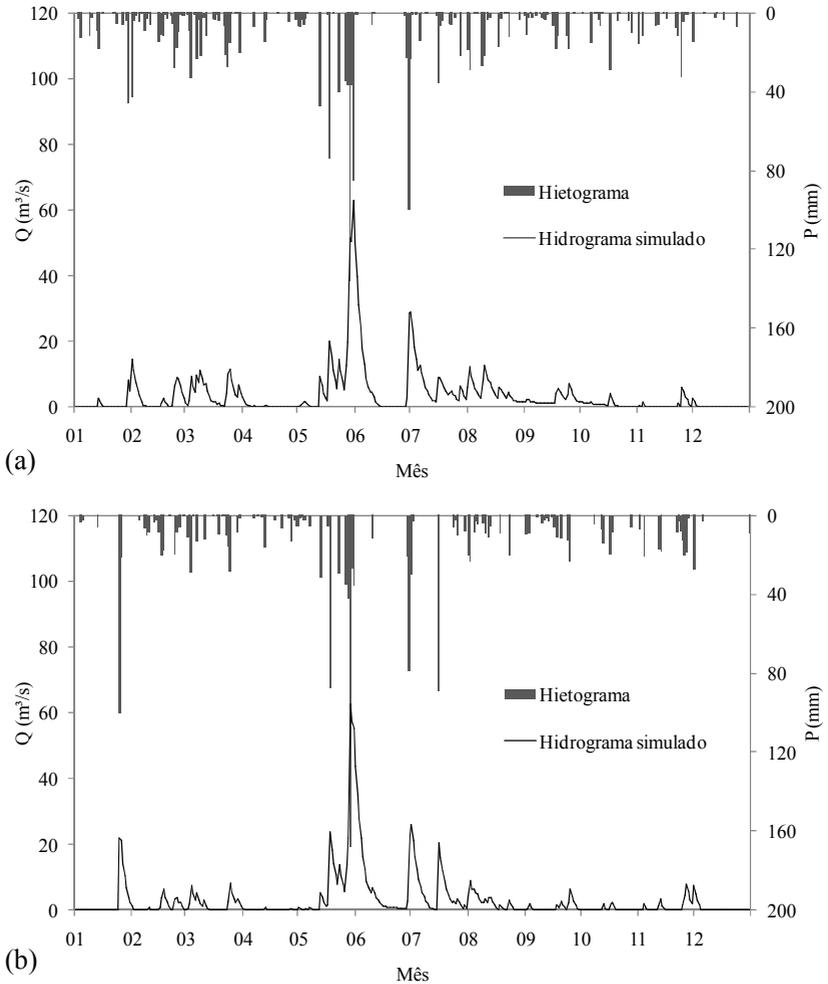


Figura 15 – Hietograma e hidrograma simulado de 1992; (a) estação Campo Alegre e (b) estação Corredeira.

4.3 API E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA

A área inundada, os API para 7, 10 e 30 dias, a precipitação do dia, a precipitação acumulada em 7, 10 e 30 dias, e a vazão correspondentes a cada inundação são apresentados na Tabela 6. A correlação linear entre a área inundada e os API, as chuvas acumuladas e a vazão são apresentadas na Tabela 7. A área e a precipitação do dia não apresentou correlação significativa com intervalo de confiança de 95% (Figura 22).

Os API mostraram correlação moderada com a área inundada API (Figura 19) e, portanto, não são bons indicadores da intensidade da inundação. Uma possível causa para a correlação não ser forte é a grande presença de banhados na bacia do Rio Negrinho. O API é um índice que atribui pesos às chuvas antecedentes a um evento para representar as condições de umidade do solo da bacia. Se a influência de banhados no retardamento do processo de chuva-vazão não consegue ser bem representada pelo API, esse índice não é adequado para ser aplicado na bacia do Rio Negrinho.

A precipitação acumulada de 7, 10 e 30 dias e a área inundada estão fortemente correlacionadas (Figura 20). O acumulado de chuva de 10 dias apresentou o maior coeficiente de correlação ($R^2 = 0,88$). Portanto, pode ser um bom indicador para a gestão de inundações no município.

A vazão e a área inundada estão fortemente correlacionadas. Portanto, ambas as informações são úteis na descrição da magnitude das inundações.

Tabela 6 – Área, API, precipitação do dia e acumulada e vazão para cada inundação

| Ano | Estação pluviom. | Área 10⁵ m² | API₇ mm | API₁₀ mm | API₃₀ Mm | P mm | P₇ mm | P₁₀ mm | P₃₀ mm | Q m³/s |
|-------------|-------------------------|--|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1983 | CA | 8,26 | 99 | 100 | 111 | 5,4 | 256 | 330 | 477 | 52,8 |
| | CO | | 99 | 100 | 109 | 3,8 | 332 | 340 | 516 | 59,7 |
| 1992 | CA | 8,26 | 165 | 169 | 178 | 85,0 | 329 | 370 | 513 | 62,8 |
| | CO | | 123 | 126 | 135 | 35,6 | 309 | 338 | 477 | 62,7 |
| 2004 | CA | 1,76 | 43 | 47 | 53 | 27,3 | 95 | 130 | 226 | 27,2 |
| | RN | | 32 | 36 | 43 | 9,9 | 118 | 149 | 265 | 27,2 |
| 2009 | RN | 1,75 | 81 | 81 | 91 | 18,6 | 184 | 185 | 373 | 40,4 |
| 2010 | RN | 3,67 | 89 | 93 | 98 | 35,7 | 183 | 222 | 298 | 46,1 |
| 2010 | RN | 5,66 | 176 | 176 | 179 | 58,8 | 352 | 352 | 451 | 59,5 |

CA: Campo Alegre; CO: Corredeira; RN: Rio Negrinho

Tabela 7 – Correlações lineares entre área inundada e os API, precipitação do dia e acumulada e vazão

| | API₇ | API₁₀ | API₃₀ | P | P₇ | P₁₀ | P₃₀ | Q |
|-------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| Área | 0,46 | 0,46 | 0,49 | - | 0,74 | 0,88 | 0,83 | 0,81 |

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho caracterizou as inundações de 1983, 1992, 2004, 2009 e 2010 ocorridas em Rio Negrinho, em termos de área inundada, vazão máxima, API e precipitação acumulada. Criou-se um banco de dados de inundações em SIG e produziu-se o mapa de áreas inundadas.

A inundação de 1983 caracteriza-se por área inundada de 82,6 ha e vazão de 56,2 m³/s no dia 10/07/83 (média das vazões calculadas a partir dos dados das duas estações pluviométricas). A inundação de 1992 caracteriza-se por área inundada de 82,6 ha e vazão de 62,8 m³/s, no dia 29 ou 31/05/92 (média das vazões calculadas a partir dos dados das duas estações pluviométricas). A inundação de 2004 caracteriza-se por área inundada de 17,6 ha e vazão de 27,2 m³/s no dia 19/10/04 (vazão observada). A inundação de 2009 se caracteriza por área inundada de 17,5 ha e vazão de 40,4 m³/s (vazão observada) no dia 29/09/09. A inundação de janeiro de 2010 se caracteriza por área inundada de 36,7 ha e vazão de 46,1 m³/s (vazão observada) no dia 14/01/10. A inundação de abril de 2010 se caracteriza por área inundada de 56,6 ha e vazão de 59,5 m³/s (vazão observada) no dia 27/04/10.

É importante notar que todas as áreas aqui mencionadas foram calculadas dentro do limite de trabalho designado, para a comparação das inundações entre si. Não podem ser generalizadas como a área total inundada no município.

A correlação entre API e área inundada se mostrou moderada para os três intervalos testados. Os coeficientes de correlação linear são 0,46, 0,46 e 0,49 para 7, 10 e 30 dias, respectivamente. Portanto, o API não foi o melhor indicador de inundação em Rio Negrinho.

A precipitação do dia não é adequada como único indicador de inundação em Rio Negrinho, porque não apresentou correlação significativa com a área de inundação. Essa correlação insignificante provavelmente deve-se ao tempo de residência da bacia ser maior que um dia. Portanto, informação sobre as chuvas anteriores é necessária.

A precipitação acumulada apresentou forte correlação para os três intervalos testados. A maior correlação se deu para o acumulado de chuvas de 10 dias ($R^2 = 0,88$). Portanto, este é o melhor indicador para a gestão de inundações no município. Se associado ao monitoramento de chuvas em tempo real, pode ser utilizado para sistema de alerta, visto que seu cálculo é extremamente simples e rápido, e pode ser atualizado automaticamente a cada novo dado monitorado.

Uma das principais dificuldades encontradas ao longo deste trabalho foi a incerteza quanto a data precisa da ocorrência de cada uma das inundações. A partir de contatos com a Prefeitura de Rio Negrinho e em pesquisas bibliográficas, tentou-se descobrir a data exata (dia, mês e ano) dos diversos eventos de inundação ocorridos no município. Os dois maiores deles (1983 e 1992) foram os mais fáceis de descobrir, pois suas datas estão pintadas na parede da igreja matriz Santo Antonio de Pádua: 11/07/1983 e 31/05/1992. Ainda assim, essa única informação não foi suficiente para acabar com a dúvida a respeito dessas datas. Como foi comentando anteriormente, os resultados da simulação com o Tank Model a partir dos dados de duas diferentes estações pluviométricas não reproduziram essa informação. Para 1983, ambos os resultados encontrados apontam para o dia 10/07, e para 1992, apenas o resultado encontrado a partir da estação Campo Alegre aponta para a mesma data que a registrada, enquanto o resultado da estação Corredeira indica o dia 29/05. Sem mais fontes de informação para comprovar a precisão das datas pintadas no muro da igreja, é impossível afirmar seguramente que as simulações estão erradas, ou que uma estação pluviométrica representa melhor que a outra os eventos de inundação de Rio Negrinho.

Informações sobre as inundações menores, tais como as de 2004, 2005, 2007 e 2008, são ainda mais raras, o que dificulta a generalização do estudo para eventos de diferentes magnitudes. As dificuldades encontradas oriundas da falta de informações comprovam a importância de toda forma de registro de desastres naturais, mencionada por Goerl (2009).

É importante também que registros históricos sejam feitos com a maior quantidade de informação possível. Sabemos, por exemplo, que em 1891, 1983 e 1992 o nível do Rio Negrinho subiu 7,75 m, 9,3 m e 9,37 m acima do seu nível normal, respectivamente (DALAGNOL, 1999). No entanto, não sabemos qual é o nível normal a que essa informação se refere, nem em que ponto do rio esse nível foi medido. Por ser incompleta, essa informação não tem utilidade para caracterização das inundações e para posteriores estudos.

Outro exemplo de informação incompleta é um dos mapas de inundação da SEPLAN, que não contém nenhuma informação de data, e outros que só contêm o ano, ou o ano e o mês. O registro da data da inundação (dia, mês e ano e, se possível, a hora em que atingiu o nível máximo) precisa ser incorporado como um hábito. Essas informações agregam valor ao registro e dão utilidade científica a eles.

Assim, recomenda-se à prefeitura e órgãos gestores de Rio Negrinho e outros municípios que mantenham registros detalhados e

levantamentos de todas as inundações que ocorram dentro de seus limites, sejam elas de pequena, média ou grande magnitude. E que os índices aqui apresentados sejam recalculados a cada novo levantamento. Ainda, recomenda-se fortemente que estações pluviométricas e fluviométricas existentes sejam mantidas em funcionamento e primem pela coleta de dados de qualidade, e que a rede de monitoramento hidrológico do município e região seja ampliada, para que mais dados estejam disponíveis para futuros estudos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se que levantamentos em campo de áreas inundadas sejam realizados logo após o evento, para evitar distorções devido à percepção dos moradores. Também sugere-se que, na procura do(s) melhor(es) indicador(es) de inundação, sejam testados mais intervalos de tempo para o cálculo do API e precipitação acumulada e outros tipos de correlação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELOW, R.; WIRTZ, A.; GUHA-SAPIR, D. **Disaster Category - Classification and peril Terminology for Operational Purposes**. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters e Munich Reinsurance Company, 2009.
- BEVEN, K.J. Changing ideas in hydrology – The case of physically-based models. **J. Hydrol.**, Amsterdam, v.105, p.157-172, 1989.
- BEVEN, K.J. **Rainfall Runoff Modelling: The Primer**. Chichester: Wiley, 2001. 372p.
- BOUGHTON, W.; DROOP, O. Continuous simulation for design flood estimation - a review. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v.18, p.309-318, 2003.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E.D.; SANO, E.E.(eds.). **Sistema de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura**. 2ªed. Brasília: Embrapa, 1998, p.3-12.
- CHAFFE, P.L.B; KOBIYAMA, M.; YAMASHIKI, Y; TAKARA, K. Is interception information important for rainfall-runoff modeling? **Annual Journal of Hydraulic Engineering**, JSCE, v.54, p.73-78, 2010.
- CHUVAS castigam a cidade. **Jornal Perfil**, Rio Negrinho, 27 abr. 2010. Capa.
- CPTEC. **Ocorrência de El Niño**. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/tab_elnino.shtml>. Acesso em 13 dezembro 2010.
- DALAGNOL, E.F.N. **Caracterização e análise das enchentes em Rio Negrinho – SC no período de 1977 a 1995**. 57p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

DEFESA Civil atende mais de 160 ocorrências. **Jornal Perfil**, Rio Negrinho, 30 set. 2009. Caderno Todo dia, p.5.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L.B. **Water in Environmental Planning**. Nova Iorque: W. H. Freeman, 1943.

FLEMMING, G. How can we learn to live with rivers? The Findings of the Institution of Civil Engineers Presidential Commission on Flood-risk management. **Phil. Trans. R. Soc. Lond.**, v.A, n.360, p.1527-1530, 2002

GOERL, R.F. Reflexões sobre o registro de desastres naturais no Brasil. In: SILVEIRA, W.N.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R.F.; BRANDENBURG, B. **História das Inundações em Joinville: 1851 - 2008**. Curitiba: Ed. Organic Trading, 2009.p.149-153.

GOVERNO confirma 301 casos de leptospirose em Santa Catarina. **G1**, 23 dez.2008. Brasil, Leptospirose. Disponível em: <<http://g1.globo.com/Noticias/Brasil/0,,MUL933660-5598,00-GOVERNO+CONFIRMA+CASOS+DE+LEPTOSPIROSE+EM+SANTA+CATARINA.html>>. Acesso em 31 maio 2010.

GUERRA, A.T. & GUERRA, A.J.T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997. 652p.

HAJAT, S.; EBI, K.; KOVATS, S.; MENNE, B.; EDWARDS, S.; HAINES, A. The human health consequences of flooding in Europe and the implications for public health: a review of the evidence. **Applied Environmental Science and Public Health**, v.1, n.1, p.13–21, 2003.

KOBASHI, S.; SUZUKI, M. The critical rainfall (danger index) for disasters caused by debris flows and slope failures. Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim (Proceedings of the Corvallis Symposium, August, 1987). **IAHS Publ.**, n. 165, p.201-211, 1987.

KOBAYAMA, M.; CHAFFE, P.L.B.; ROCHA, H.L.; CORSEUIL, C.W.; MALUTTA, S.; GIGLIO, J.N.; MOTA, A.A.; SANTOS, I.; RIBAS JUNIOR, U.; LANGA, R. Implementation of school catchments network for water resources management of the Upper Negro River region, southern Brazil. In: TANIGUCHI, M.; BURNETT, W.C.; FUKUSHIMA, Y. HAIGH, M.; UMEZAWA, Y. (eds.) **From**

Headwaters to the Ocean: Hydrological Changes and Watershed Management, London: Taylor & Francis Group, 2009. p.151-157.

KOHLER, M.A.; LINSLEY, R.K. Predicting the runoff from storm rainfall. **Weather Bureau Research Papers**, no. 34, Washington, 1951.

KORMANN, J. **Histórico da estrada Dona Francisca:** de Joinville por Campo Alegre, São Bento do Sul e Rio Negrinho a Mafra. Florianópolis: Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina, 1989. 29p.

LEOPOLD, L.B. **A View of the River.** Cambridge: Harvard University Press, 1994. p.110-125.

LEOPOLD, L.B.; WOLMAN, M.G.; MILLER, J.P. **Fluvial processes in Geomorphology.** Nova Iorque: Dover Publications, 1995.

LINDNER, E.A.; KOBAYAMA, M. Proposal of Tank Moisture Index to predict floods and droughts in Peixe River watershed, Brazil. Hydroinformatics in Hydrology, Hydrogeology and Water Resources (Proc. of Symposium JS.4 at the Joint IAHS & IAH Convention, Hyderabad, India, September 2009). **IAHS Publ.**, n.331, p.314-323, 2009.

MAGALHÃES, A. (org.) **Dicionário de Geografia.** Porto Alegre: Globo, 1970.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles. **J. Hydrol.**, Amsterdam, v.10, p.282-290, 1970.

OLIVEIRA, V.S. **Integração SIG e modelos de simulação de áreas inundáveis: bacia do Rio Pararangaba.** 124p. Dissertação (Mestre em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2003.

OLIVEIRA, K. Cidade sente o medo de uma nova enchente. **Jornal Perfil**, Rio Negrinho, 30 set. 2009. Caderno Todo dia, p.3.

PM DEFINE trânsito como um caos total na cidade. **Jornal Perfil**, Rio Negrinho, 27 abr. 2010. Caderno Geral, p.3.

PLATE, E.J. Flood risk and flood management. **J. Hydrol.**, Amsterdam, v.267, p.2–11, 2002.

RIO NEGRINHO está com muitos pontos alagados. **Jornal Perfil**, Rio Negrinho, 30 set. 2009. Caderno Todo dia, p.8.

RIO NEGRINHO. **Secretário de Infra-Estrutura relata ações de sua pasta para 2010**. Prefeitura Municipal de Rio Negrinho, Notícias/Infraestrutura, 03 fev. 2010. Disponível em: <http://www.rionegrinho.sc.gov.br/?pagina=noticias_view&id=118>. Acesso em 27/05/2010. 2010a.

RIO NEGRINHO. **Conheça a história da nossa cidade**. Prefeitura Municipal de Rio Negrinho, A cidade/História. Disponível em: <<http://www.rionegrinho.sc.gov.br/index.php?pagina=historia&p=1>>. Acesso em: 28 maio 2010. 2010b.

SANTA CATARINA. **Atlas de Santa Catarina**. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Subchefia de Estatística, Geografia e Informática. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986. 173p.

SANTA CATARINA. **Alerta para casos e óbitos por Leptospirose em Santa Catarina**. Florianópolis: Secretaria de Estado da Saúde/Diretoria de Vigilância Epidemiológica/Gerência de Vigilância de Zoonoses e Entomologia, [2010]. 4p. Disponível em: <http://www.dive.sc.gov.br/conteudos/zoonoses/RoedoresAves/leptospirose/Alerta_%20leptospirose.pdf>. Acesso em: 31 maio 2010.

SCHOEFFEL, E.C. **Relação cidade e natureza na evolução urbana da cidade de Rio Negrinho/SC associada à ocupação de áreas de risco de enchentes**. 76p. Monografia (Especialização em Cidade, Meio Ambiente e Políticas Públicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

SIDLE, R.C. Field observations and process understanding in hydrology: essential components in scaling. **Hydrol. Process.**, v.20, pp.1439–1445, 2006.

SILBERSTEIN, R.P. Hydrological models are so good, do we still need data? **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v.21, p.1340-1352, 2006.

SILVEIRA, W.N.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R.F.; BRANDENBURG, B. **História de Inundações em Joinville 1851 - 2008**. Curitiba: Ed. Organic Trading, 2009. 153p.

SIMÕES, M.G. **Modeladores digitais de terreno em Sistemas de Informação Geográfica**. 158p. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia de Sistemas de Computação) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, 1993.

SINGH, V.P.; WOOLHISER, D.A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.7, n.4, 2002.

SITTNER, W.T.; SCHAUSS, C.E.; MONRO, J.C. Continuous Hydrograph Synthesis with an API-Type Hydrologic Model. **Water Resources Research**, v.5, n.5, p.1007-1022, 1969.

SMITH, P.J. **Probabilistic Flood Forecasting using a distributed rainfall-runoff model**. Thesis. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 2005. 140p.

SUGAWARA, M. Tank Model. In: Singh, V.P. **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995. p.165-214.

SUGAWARA, M.; WATANABE, I.; OZAKI, E.; KATSUYAMA, Y. **Tank Model with snow component**. Tsukuba: National Research Center for Disaster Prevention, 1984. 293p. (Research notes n°65)

TASCA, F.; GOERL, R.; KOBAYAMA, M. **Prevenção de desastres naturais através da educação ambiental com ênfase na ciência hidrológica**. In: Simpósio de Engenharia Sanitária e Meio Ambiente da Zona da Mata Mineira. (2010:Juiz de Fora). Juiz de Fora: SESMAZ, Anais. CD-rom. p. 15.

TATE, E; MAIDMENT, D. **Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcView GIS**. Austin: Center for Research in Water Resources, The University of Texas at Austin, 1999.

TUCCI, C.M. Controle de enchentes. In: TUCCI, C.M. (Org.). **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade/Edusp/ABRH, 1993. 944p.

UN-ISDR. **Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters**. Geneva: United Nations Inter-Agency Secretariat of the International Strategy for Disaster Reduction, 2005. Disponível em: <<http://www.unisdr.org/wcdr/intergover/official-doc/L-docs/Hyogo-framework-for-action-english.pdf>>. Acesso em: 03 abril 2010.

WHO. **Flooding and communicable diseases fact sheet**. Disponível em: <http://www.who.int/hac/techguidance/ems/flood_cds/en/>. Acesso em: 26 abril 2010.

APÊNDICE A – Levantamento da inundação de Janeiro/2010

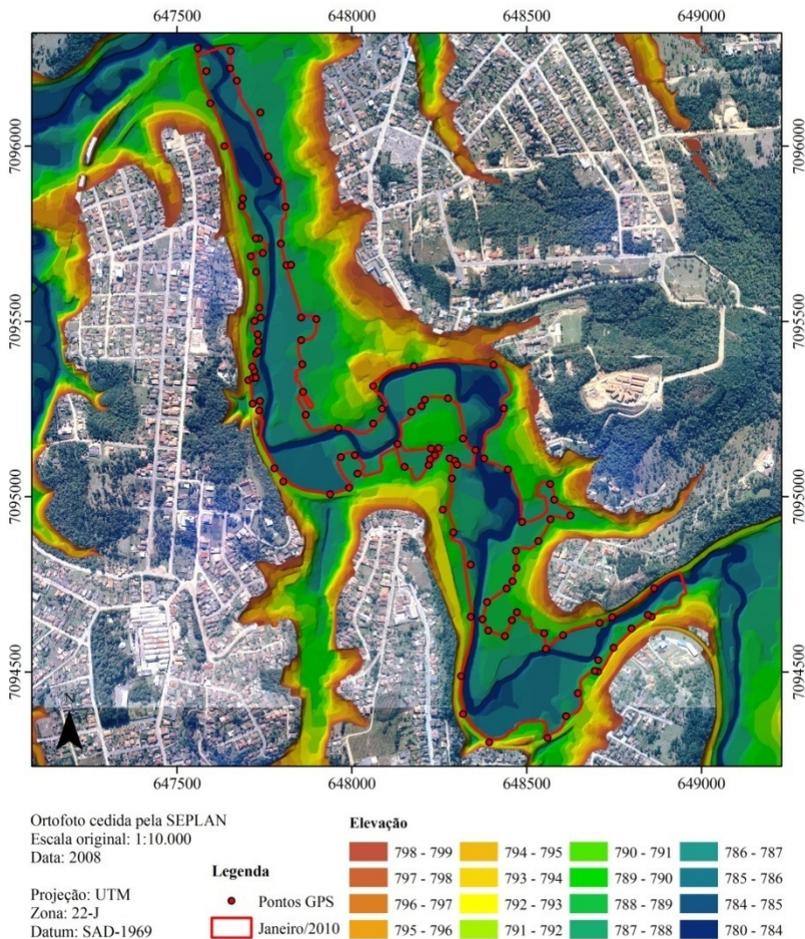


Figura 16 – Inundação de Janeiro/2010. Pontos do levantamento em campo e polígono da área inundada.

APÊNDICE B – Levantamento da inunda o de Abril/2010

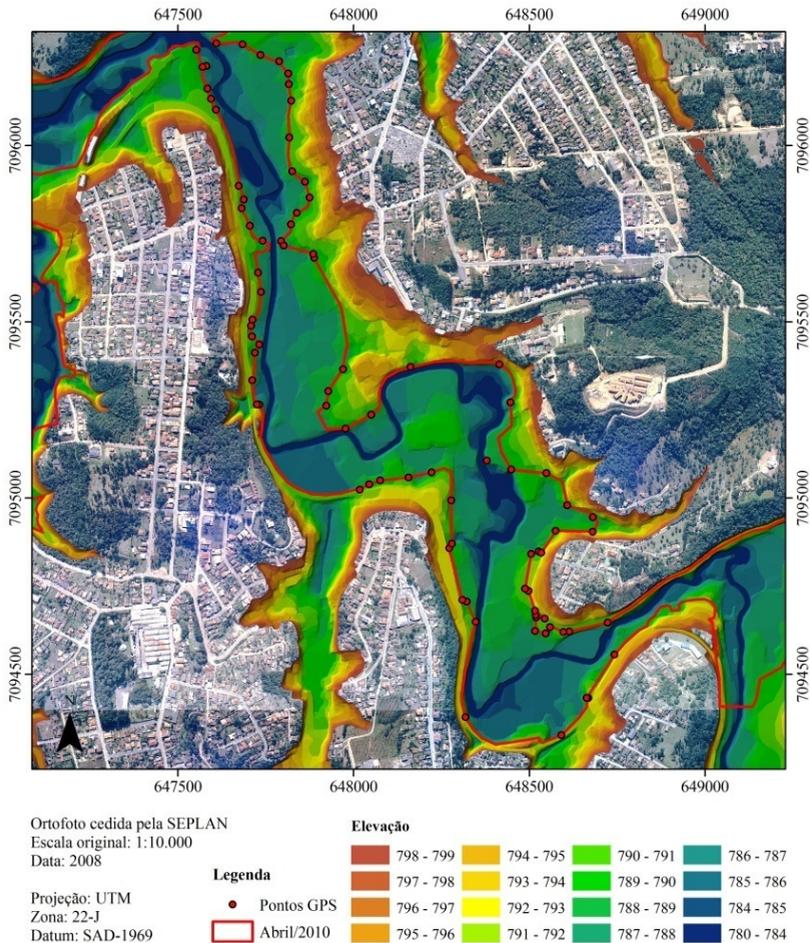


Figura 17 – Inunda o de Abril/2010. Pontos do levantamento em campo e polígono da área inundada.

APÊNDICE C – Mapa de áreas inundadas

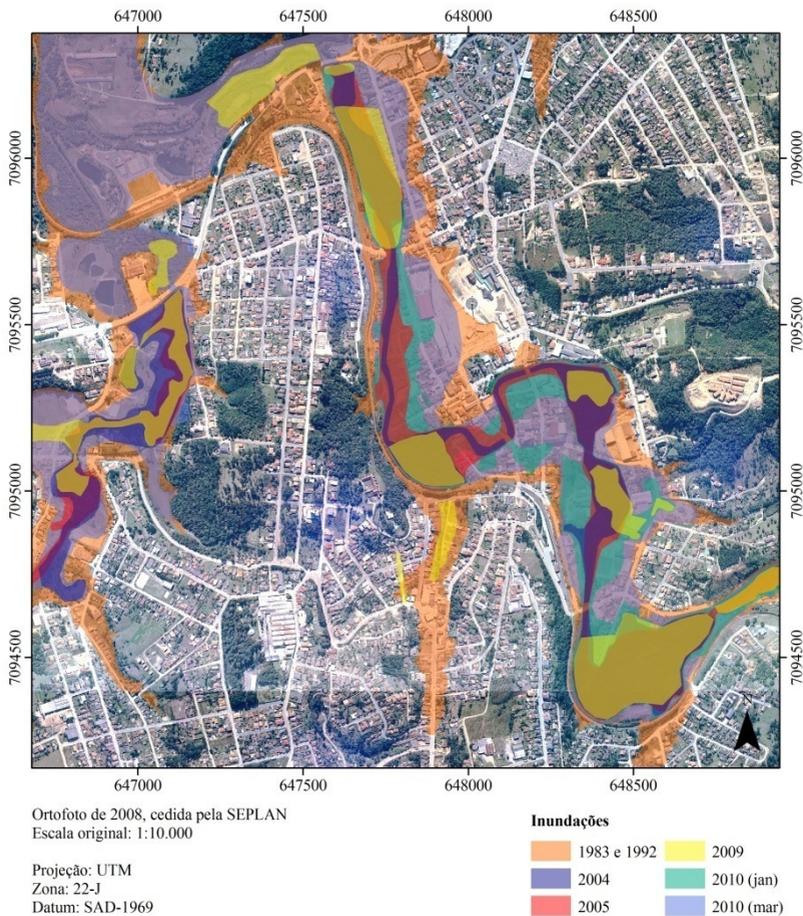


Figura 18 – Mapa de áreas inundadas. Cada polígono colorido corresponde à área inundada em um evento.

APÊNDICE D – Diagramas de dispersão e correlação linear

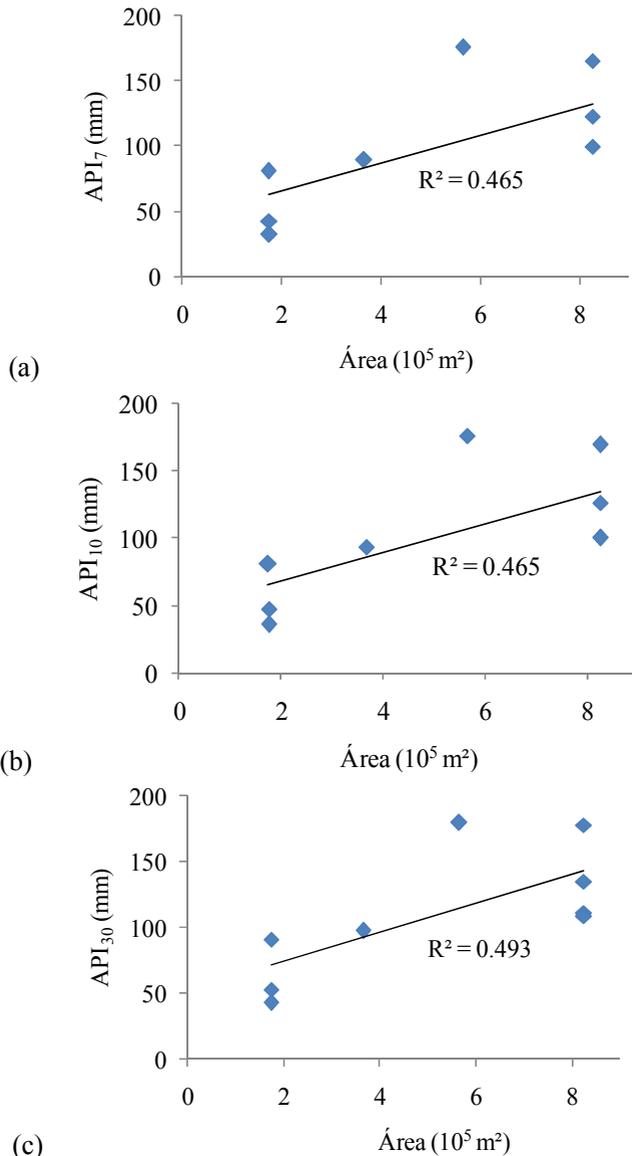
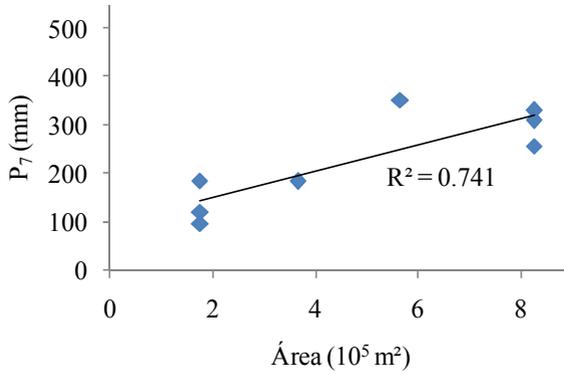
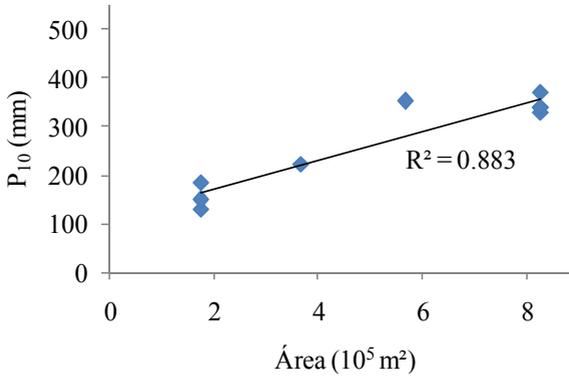


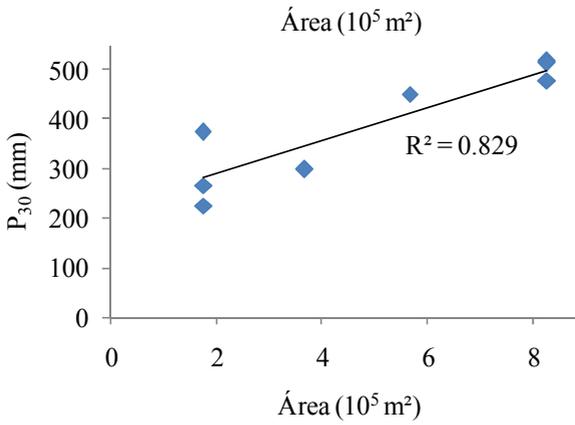
Figura 19 – API x Área inundada. (a) API em 7 dias (b) API em 10 dias (c) API em 30 dias.



(a)



(b)



(c)

Figura 20 – Precipitação acumulada x Área inundada. (a) 7 dias (b) 10 dias (c) 30 dias.

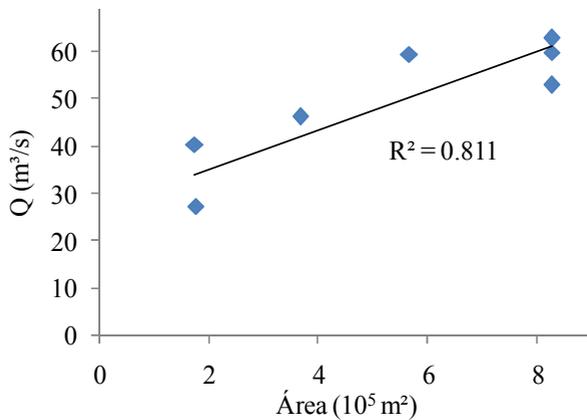


Figura 21 – Vazão x Área inundada.

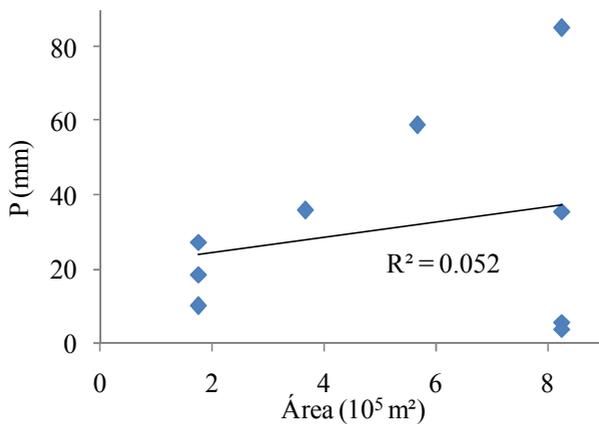


Figura 22 – Precipitação do dia x Área inundada.

ANEXO A – Ocorrências de El Niño

Tabela 8 – Anos de ocorrência de El Niño

| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| 1877 – 1878 | 1888 – 1889 | 1896 – 1897 |
| 1899 | 1902 – 1903 | 1905 – 1906 |
| 1911 – 1912 | 1913 – 1914 | 1918 – 1919 |
| 1923 | 1925 – 1926 | 1932 |
| 1939 – 1941 | 1946 – 1947 | 1951 |
| 1953 | 1957 – 1959 | 1963 |
| 1965 – 1966 | 1968 – 1970 | 1972 – 1973 |
| 1976 – 1977 | 1977 – 1978 | 1979 – 1980 |
| 1982 – 1983 | 1986 – 1988 | 1990 – 1993 |
| 1994 – 1995 | 1997 – 1998 | 2002 – 2003 |
| 2004 – 2005 | 2006 – 2007 | 2009 – 2010 |

Intensidade:  Forte  Moderada  Fraca
Adaptado de CPTEC, 2010.

ANEXO B – Fotos da inundação de setembro de 2009

8 JORNAL PERFIL Rio Negrinho
QUARTA-FEIRA, 30 DE SETEMBRO DE 2009

todo dia

Rio Negrinho está com muitos pontos alagados

Em vários pontos da cidade os rios transbordaram e invadiram ruas e imóveis

Desde a madrugada de terça-feira a movimentação de pessoas foi intensa em diversas áreas da cidade. As chuvas não pararam e com isto os rios não conseguiram dar vazão ao grande volume de água, resultando em alagamentos.

Diante do problema, moradores e comerciantes das regiões que foram atingidas, precisaram se retirar, transportando móveis e demais pertences. A população participou do esforço para minimizar as perdas, auxiliando na retirada, principalmente dos móveis.

O comércio na área central também foi afetado. Muitas lojas localizadas na rua Jorge Zipperer, no centro da cidade, foram esvaziadas, temendo que o nível do rio suba, invadindo suas lojas. O trânsito durante todo o dia ficou bastante complicado, já que ruas já estão interditadas.

Outro problema verificado é em relação às encostas. Deslizamentos de terra podem ser encontrados, mas até o início da noite de ontem, nenhum caso mais grave foi registrado.

Na prefeitura a ordem do prefeito Oni Schroeder é para que haja um acompanhamento permanente da situação. O ginásio de esportes "Camiseta", foi colocado à disposição das famílias afetadas e que não têm para onde ir.

Previsão

Nos sites que disponibilizam previsão do tempo, as informações são de que haverá mais chuva nesta quarta-feira, o que poderá comprometer ainda mais a situação. Apesar disto, no final da tarde de ontem já era possível ver o nível do rio apresentar um leve recuo. Já em outros pontos a situação era bem o contrário, com o nível do rio subindo. O dia de hoje será de muita expectativa.

veja algumas imagens de ontem em Rio Negrinho

Figura 23 – Jornal Perfil, 30 de setembro de 2009, p.8.

ANEXO C – Fotos da inundação de abril de 2010

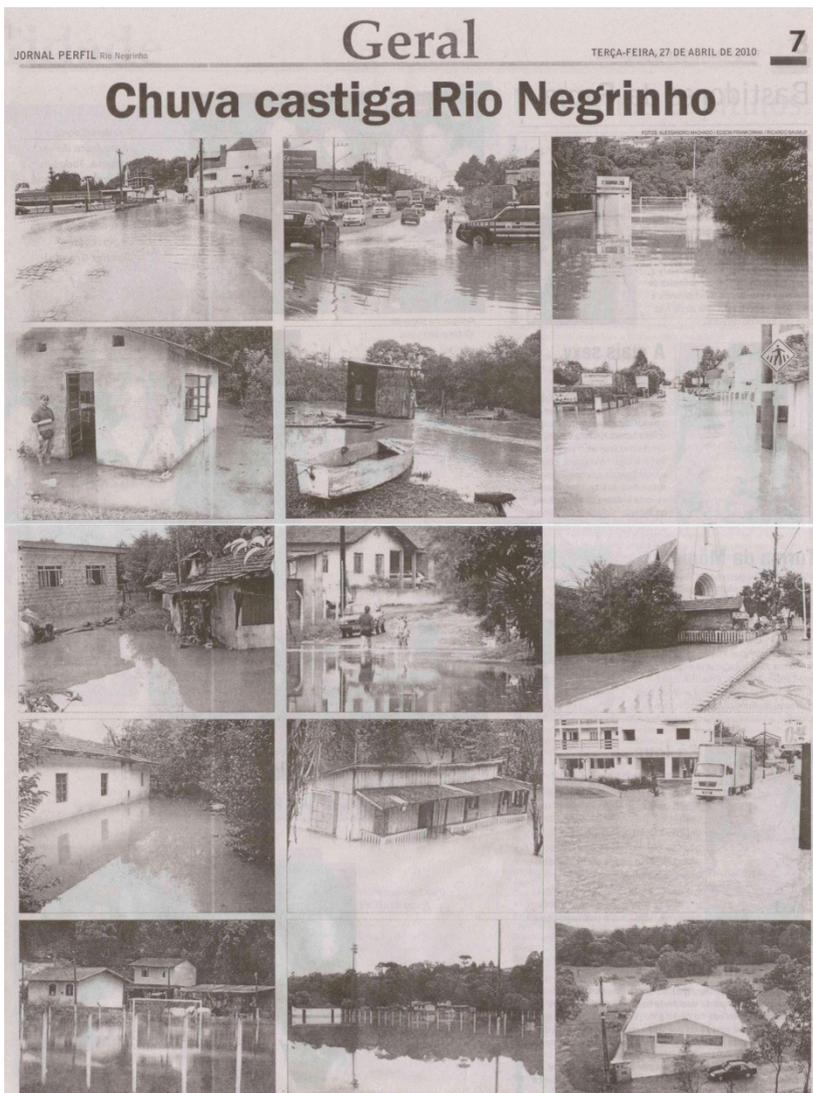


Figura 24 – Jornal Perfil, 27 de abril de 2010, p.7.

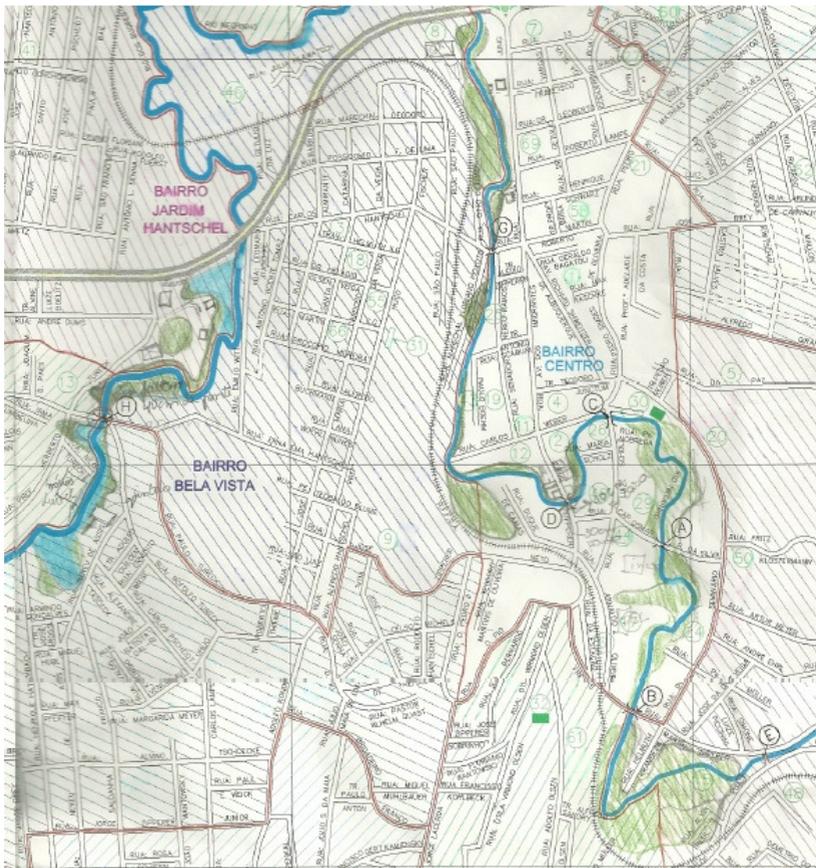
ANEXO D – Exemplo de mapa de inundação da SEPLAN

Figura 25 – Excerto do levantamento da inundação de Outubro de 2004, realizado pela SEPLAN em lápis colorido sobre o mapa do município.