

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA
PERSONALIZADA EM SISTEMA DE INFORMAÇÕES
GEOGRÁFICAS, PARA IDENTIFICAR ÁREAS DE RISCO A
INUNDAÇÃO EM OBRAS LINEARES: UMA APLICAÇÃO
PRÁTICA EM DUTOVIAS

FABIANO FELIPE CUCOLO

Orientador: Prof. Dr. Juécio Tavares de Mattos

Rio Claro (SP)
2008

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Juércio Tavares de Mattos
Prof. Dr. Elias Carneiro Daitx
Dra. Alessandra Acorsi

FABIANO FELIPE CUCOLO
Aluno

Rio Claro, 10 de dezembro de 2008

Resultado: APROVADO

Agradecimentos:

A meus pais que sempre apoiaram neste projeto.

A família que sempre esteve ao lado nos momentos para que ele fosse concluído com êxito,

Aos amigos que reconheceram o potencial profissional

As empresas Imagem Geossistemas, Cognatis Geomarketing, Diagonal Urbana e Unibanco S.A, que possibilitaram recursos e tempo para que pudesse me dedicar a este estudo.

E aos professores Elias e Juércio que foram meus mentores na execução deste projeto, dando a oportunidade dentro da UNESP para que ele se realizasse.

ÍNDICE

	<i>pág</i>
1. INTRODUÇÃO.....	6
2. OBJETIVOS.....	7
2.1 Objetivo Principal.....	7
2.2 Objetivos Específicos.....	7
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
3.1 Aplicações dos SIG em Bacias Hidrográficas.....	8
3.2 Formas de Disponibilização e Exploração de Dados Hidrometeorológicos Integrados a um SIG.....	20
4. ÁREA DE ESTUDO.....	24
4.1 Caracterização Geomorfológica.....	25
4.2 Clima.....	25
5. BASE DE DADOS.....	26
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
6.1 Recursos de informática e Geoprocessamento.....	28
6.2 Diagrama de fluxos de trabalho.....	29
6.3 Método de Elaboração de MNT para análise hidrológica.....	30
6.4 Método Curva Número.....	33
6.5 Obtenção do Mapa de Risco de Inundação.....	35
7. RESULTADOS OBTIDOS.....	45
8. CONCLUSÕES.....	46
9. BIBLIOGRAFIA.....	52

RESUMO

Este trabalho atende projetos que pretendem utilizar análises hidrológicas em sistemas de informação geográfica até então pouco exploradas. Análises hidrológicas para inundação são realizadas a anos, porém ainda pouco exploradas quando o assunto é voltado ao mapeamento. Este projeto tem como objetivo determinar uma análise geográfica sobre inundação, explorando os métodos disponíveis para sistema de informações geográficas, assim como explorá-los detalhadamente. Neste estudo a aplicação se deu em uma obra linear – dutovia.

ABSTRACT

This work meets projects that intend to use hydrological analysis in geographic information systems, today few explored. Hydrologic analysis for flooding are carried out to years, but still poorly exploited when it is back to mapping. This project to determine a geographical analysis of flood, exploring the methods available for geographic information systems, and exploit them further. In this study the application was in a pipeline

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos recursos computacionais ao longo dos últimos 40 anos vem permitindo esforços contínuos no desenvolvimento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Inúmeras transformações estão acontecendo em todas as áreas, em decorrência do processo de integração com os softwares de Sistemas de Informação Geográfica.

O fato que realmente justifica todas estas transformações é a maneira como as abordagens dos temas diretamente relacionados à natureza espacial de determinadas variáveis podem ser realizadas. De modo sinótico, variáveis e espaço podem ser analisados e visualizados com maior riqueza de interpretação, além de proporcionar rapidez e eficiência nas avaliações.

Na área de Recursos Hídricos esta demanda também se repete. A exigência cada vez maior de decisões rápidas no planejamento e gerenciamento dos Recursos Hídricos, a necessidade de centralização das informações hidrológicas, e de ferramentas de suporte à decisão são alguns dos fatores primordiais da necessidade de se utilizar os softwares SIG. Neste trabalho, o termo “ferramentas” é utilizado para designar uma função ou conjunto de funções específicas, geradas por programação.

Este trabalho foi idealizado aproveitando-se a fase de desenvolvimento e aplicações de softwares SIG no Brasil. Objetiva auxiliar, esclarecer e propor formas de utilização de software SIG em análises hidrológicas, especialmente no propósito específico de identificar áreas com risco de inundação ao longo de dutovias.

A aplicação em dutovias proposta neste trabalho pretende servir também de referencia para outros tipos de empreendimentos lineares, como rodovias e ferrovias.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Principal

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um aplicativo personalizado em Sistema de Informações Geográficas, para identificar e quantificar áreas de risco à inundação.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- A partir de dados topográficos, elaborar modelo numérico de terreno (MNT) apropriado para finalidades hidrológicas.
- Simular a taxa de escoamento superficial, utilizando o método Curva Número.
- Determinar períodos de chuvas máximas a partir de uma coleta temporal obtidas por estações meteorológicas.
- Apresentar métodos de espacialização de dados pluviográficos e pluviométricos.
- Definir o processo analítico para operacionalização de áreas de risco a inundação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão é apresentada em duas partes. A primeira expõe a evolução das aplicações dos SIG em análises hidrológicas. A segunda parte da revisão, considera as formas de disponibilização e exploração dos dados hidrometeorológicos integrados em ambiente SIG.

3.1 Aplicações dos SIG em análises hidrológicas

A revisão deu-se através do levantamento de trabalhos desenvolvidos que utilizam a modelagem digital de terreno como forma de explorar as características topográficas das bacias hidrográficas, determinar os caminhos de maior fluxo e fazer a delimitação das bacias e em consequência a análise espacial. Moore, Grayson e Ladson (1991) fazem uma revisão sobre a importância da modelagem digital de terreno nas aplicações hidrológicas, levando-se em consideração a deficiência de muitos modelos hidrológicos ainda em uso, que não representam os efeitos do fluxo d'água tridimensionalmente. O grande desafio atual são os métodos que estão sendo desenvolvidos para representar o Modelo Numérico do Terreno (MNT) em modelos hidrológicos.

A maioria dos MNT são produzidos são gerados por interpolação linear de mapas com curvas de nível e têm um erro de estimativa de meio intervalo de contorno e um erro absoluto inferior a dois intervalos de contorno. Os modelos digitais têm imprecisões inerentes não somente quando representam uma superfície, mas também nos seus dados constituintes.

Moore, Grayson e Ladson (1991) também fizeram uma análise dos dados de elevação. Os atributos topográficos de uma determinada região podem ser calculados diretamente de um modelo digital de terreno usando-se somente os valores pontuais, sem que seja necessário o ajuste de uma superfície. Essa consideração é restrita aos modelos digitais baseados em malhas e não produzem resultados fisicamente realísticos, principalmente no cálculo das direções de fluxo em áreas planas. O método mais comum de estimativa dos atributos topográficos é

feito através da superfície de terreno ajustada. O ajuste é realizado através de interpolação linear ou não linear.

Um grande problema na análise dos dados digitais de elevação nas aplicações hidrológicas é a definição dos caminhos de drenagem, quando o modelo digital contém depressões ou áreas planas. Algumas depressões podem existir devido a dados errados e outras podem ser características naturais ou escavações (Jenson e Domingue, 1988; Hutchinson, 1989). O'Callaghan e Mark (1984) e Jenson (1987) propuseram algoritmos para gerar modelos digitais de terreno sem depressões, obtidos de dados de elevação em malhas regulares. Se as depressões são hidrológicamente significantes o volume pode ser calculado. Jenson e Domingue (1988) também usaram um modelo digital de terreno sem depressões para o cálculo das direções de fluxo. O procedimento de Jenson e Domingue foi baseado no algoritmo discutido por Mark (1983) e O'Callaghan e Mark (1984).

Moore, Grayson e Ladson (1991) ressaltam que em muitos países desenvolvidos, há falta de dados para o planejamento de projetos e normalmente a primeira informação obtida é o mapa topográfico da região. Destes, os dados de elevação e os atributos topográficos podem ser calculados e utilizados no planejamento das redes de dados, isto é, no monitoramento hidrológico, pesquisas de solo e biológicas.

Moore, Grayson e Ladson (1991) também comentam sobre as propriedades do solo. Em 1989, o Soil Conservation Service numa discussão sobre a utilidade das unidades de solo numa região, concluíram que as futuras pesquisas de solo devem incluir mais informações sobre a forma da superfície da terra e que os parâmetros de forma deveriam refletir nos efeitos combinados dos processos hidrológicos e de erosão. Os modelos digitais de terreno são vistos como os dados básicos para fornecer estas informações que devem ser fornecidas através dos SIG. Uma das razões da tecnologia SIG ser prontamente adotada é porque permite que a informação espacial seja mostrada de maneira interativa, compreensível e de forma visual. A distribuição espacial dos atributos topográficos e índices podem ser mostrados como isolinhas ou mapas planimétricos coloridos, projeções isométricas coloridas ou numericamente na forma de distribuições de freqüências acumuladas.

Estas apresentações permitem ler rapidamente e sentir a variabilidade espacial de uma série de processos que ocorrem na bacia.

Segundo as avaliações de Moore, Grayson e Ladson (1991), os últimos dez anos têm sido de grandes esforços em direção ao desenvolvimento de modelos computacionais baseados em dados de elevação digital como entrada básica.

Mark (1988) identificou vários algoritmos para a determinação da drenagem, baseando-se em modelos digitais de terreno ajustados com malhas quadradas regulares. Os algoritmos mais comumente usados na determinação de áreas de drenagem e redes de fluxo foram propostos por O'Callaghan e Mark (1984).

Outros métodos operacionalmente viáveis e mais rápidos foram desenvolvidos por Jenson (1985) e Jenson e Domingue (1988), este é o que está sendo mais usado. Inclusive pelo módulo Spatial Analyst do aplicativo ArcGIS. Outra variação de O'Callaghan e Mark (1984) também está sendo usada.

Moore, Grayson e Ladson (1991) também fazem uma caracterização importante do desenvolvimento dos modelos hidrológicos em alguns períodos:

O período de 1960-1975 pode ser visto como a era da modelagem hidrológica por causa do crescente conhecimento das deficiências dos métodos antigos e a crescente disponibilidade dos computadores. Isto proporcionou a utilização dos métodos numéricos em hidrologia e na modelagem hidrológica. Em 1962 foi desenvolvida a primeira versão do Stanford Watershed Model (SWM).

Os modelos hidrológicos desenvolvidos nesta época geralmente eram utilizados para a previsão de vazões. Houve um rápido desenvolvimento de algoritmos matemáticos para a descrição de processos hidrológicos que foram incorporados em muitos modelos hidrológicos. A maioria dos modelos era essencialmente formada por modelos concentrados, ou seja, os parâmetros e variáveis variam somente com o tempo.

O período de 1975-1985 pode ser visto como a era da modelagem de transporte. Durante esta época os problemas com o meio ambiente tornaram-se de grande prioridade, incluindo-se todas as formas de poluição. Estes modelos eram muito pobres com relação aos efeitos da topografia da bacia, sendo incapazes de fornecer estimativas distribuídas espacialmente. As características de fluxo que variam espacialmente, tais como, profundidade e velocidade são as que dirigem os mecanismos para transporte de sedimentos e nutrientes. Os resultados destes modelos podem ser impróprios no planejamento do uso da terra e nas decisões de gerenciamento.

Nos últimos anos tem-se dado mais ênfase à necessidade de prever os processos hidrológicos variáveis espacialmente em resoluções mais precisas. É a chamada era da modelagem espacial. Os dados de elevação digital e as características das bacias sensoriadas remotamente, tais como, cobertura vegetal, tipo de solo, são dados de entrada essenciais para a nova geração de modelos hidrológicos e de qualidade da água. A estrutura básica dos modelos hidrológicos permite que se usem os processos distribuídos espacialmente.

Tarboton, Bras e Iturbe (1991) tratam de métodos de extrair uma rede de maior fluxo dos modelos de elevação digital. Eles sugerem um critério para a determinação da densidade de drenagem apropriada. Este critério é o de extrair basicamente a resolução mais alta, ou seja, uma densidade de fluxo que tente se aproximar da drenagem existente. O procedimento adotado neste critério foi apresentado e testado em 21 séries de dados de elevação digital distribuídos pelos Estados Unidos. Segundo os autores desta pesquisa, alguns cuidados devem ser tomados para garantir que as redes de fluxo sejam extraídas dos modelos digitais de terreno em uma escala apropriada.

Os pioneiros na descrição quantitativa de uma rede de fluxos foram os pesquisadores Horton (1932, 1945), Strahler (1952, 1957) e Shreve (1966). Algumas terminologias foram adotadas devido a eles. Como exemplo, a rede de fluxos foi idealizada como uma árvore, onde a raiz é a exutória (o ponto de saída mais à jusante), fontes são pontos a montante, e o ponto onde dois canais se unem formam um canal a jusante e é chamado junção ou nó. Os segmentos de canais têm

algumas propriedades como: comprimento, altura, declividade média e área contribuinte.

A última década foi a do interesse crescente no uso dos dados de elevação digital, em geomorfologia e hidrologia, especificamente para a análise dos canais.

Maidment (1992a) em seu trabalho fez a caracterização de um software SIG para análises hidrológicas, com relação a estrutura dos dados fundamentais. Segundo o autor, o SIG pode ter seis estruturas de dados fundamentais: pontos, linhas, polígonos, malhas (grids), TIN (malhas triangulares irregulares) e redes. Os elementos espaciais básicos na análise hidrológica são as bacias, os aquíferos, os rios, os lagos e os estuários e outros. Estes elementos requerem uma adaptação com a estrutura fundamental dos dados do SIG, para poder se adequar à representação espacial.

Alguns modelos hidrológicos simples podem ser feitos dentro do SIG, tais como o cálculo da vazão de projeto, usando-se o método racional. Mas muitos SIG, atualmente, fazem interfaces com modelos hidrológicos externos, onde o SIG é usado para calcular os valores de alguns parâmetros de entrada dos modelos e mostrar os resultados dos mesmos.

Três formas de representação do terreno podem ser usadas: malhas retangulares, malhas triangulares irregulares (TIN) e contornos topográficos. As linhas de contorno, ou curvas de nível, são as representações mais comuns de terrenos em softwares SIG, mas têm que ser convertidas para malhas ou TIN para se obter uma análise automatizada. Alternativamente, malhas ou TIN podem ser construídos diretamente a partir dos dados de entrada, tais como pelo uso dos modelos de elevação digital fornecidos pelo United States Geological Survey (USGS) para malhas, ou dados de levantamento de solo para TIN. Se os métodos de malha ou TIN são disponíveis, a delimitação da bacia e da rede de drenagem podem ser feitas por rotinas automatizadas.

Definindo-se a bacia e a rede de drenagem, pode-se determinar as características da bacia através de programas externos ao sistema

Maidment (1992b) em seu trabalho comenta as formas de aplicação de SIG na definição de bacias de drenagem e rede de canais. Utilizando-se um espaço geográfico arbitrário, como exemplo a representação topográfica. É possível decompor este espaço em polígonos que compreendem áreas de drenagem e uma rede fluvial. Na definição das áreas de drenagem e redes de rios, o esquema usual é aquele em que a rede fluvial é determinada em primeiro lugar, através de um mapa, ou usando-se o modelo de fluxo em malha ou TIN. A estrutura de dados de uma bacia compreende os seguintes elementos:

- um polígono que envolve a bacia e que fornecerá a sua área total;
- um nó final indicando onde o fluxo d'água sai da bacia;
- uma rede fluvial que é a série de todos os arcos a montante ao nó final.

A estrutura de dados da bacia define os dados geográficos necessários para os modelos hidrológicos parametrizados: área da bacia, comprimento dos rios e a direção do fluxo. A estrutura de dados da bacia fornece um modelo espacial que pode ser usado para determinar os valores de outros parâmetros necessários na modelagem hidrológica.

Shea et al (1993) usaram os softwares (SIG) como uma base de dados para os modelos hidrológicos e hidráulicos, constituindo-se em um mecanismo eficiente para o desenvolvimento de estudos no gerenciamento da água em grandes áreas. Em 1984, foram utilizados computadores pessoais (PC) nas aplicações de tecnologia SIG para o gerenciamento da água superficial no Distrito de Polk, na Flórida Central. Na época do estudo, nenhum pacote de SIG suportava a integração com as modelagens hidrológicas e hidráulicas existentes nos PC. No entanto, uma combinação de tecnologias foi usada, incluindo um sistema de gerenciamento de dados e um pacote de software SIG baseado em informações "raster". Os modelos HEC 1 e 2 foram integrados a estes pacotes através de programação para desenvolver a análise hidráulica e hidrológica requerida. Dez cenários diferentes foram examinados para cada uma das 784 sub-bacias compreendidas nesta área. Um esforço de modelagem grande não teria sido possível sem o suporte do software SIG.

Através do software SIG, pôde-se fazer o armazenamento e a recuperação dos dados básicos. Desta forma, foi possível analisar o Distrito em muitos detalhes e rapidamente avaliar os impactos de diferentes cenários de crescimento e a calibragem do modelo também foi rápida e eficiente. Empregando-se os resultados da análise hidrológica e hidráulica, foi possível identificar áreas onde o crescimento poderia causar cheias localizadas ou poderia ser prejudicial para pontes e outras estruturas ou para a qualidade da água local.

Adinarayama et al (1994) descrevem a metodologia desenvolvida para produzir mapas de uso da terra, usando múltiplas fontes de dados integradas a um SIG. Uma bacia hidrográfica é a unidade de base para o estudo, sendo adicionada à mesma as informações hidrológicas e topográficas. Foram usadas imagens multitemporais de satélites de diferentes estações agrícolas para produzir mapas de cobertura do solo da bacia. A rede de drenagem, elevação e outros dados topográficos foram digitalizados a partir de mapas. O SIG foi usado para integrar e manipular esses dados. Este procedimento possibilitou que classes de uso da terra que não podiam ser definidas a partir de imagens de espectros diferentes, fossem distinguidas para preparar os mapas de uso da terra. Neste caso, também ficou comprovado que o software SIG é uma ferramenta poderosa na análise e integração de dados.

Eash (1994) desenvolveu um método para quantificar as características físicas de uma bacia. O trabalho foi dividido em quatro fases.

A primeira prepara mapas digitais em SIG, representando o contorno de uma bacia, a rede de drenagem, as curvas de nível e o comprimento do rio principal da bacia. A delimitação da bacia e o comprimento rio principal da bacia foram feitos manualmente, usando mapas topográficos na escala 1:250.000. A rede de drenagem foi obtida usando um software SIG a partir de dados geográficos digitalizados na escala 1:100.000.

A segunda e a terceira fases usam um software desenvolvido para conceder atributos, especificando as características em 3 dos 4 mapas digitalizados e analisar os 4 mapas para quantificar 24 características morfológicas da bacia.

Na quarta fase quantificam-se 2 características climáticas dos mapas digitalizados através dos dados de precipitação. Compararam-se os métodos manuais, com os medidos, concluindo que a utilização do software SIG para o cálculo das características forneceu uma redução de tempo. Foram realizados testes comparativos indicando que as medidas das características obtidas através do SIG não são significativamente diferentes das obtidas manualmente.

Campbell (1994) ressalta que na literatura específica há ainda pouca informação sobre o impacto que as aplicações de SIG exercem nos órgãos onde estão sendo implementados. Com esta consideração em mente, este trabalho faz uma avaliação de pareceres de 12 estudos de casos realizados em governos locais na Inglaterra de 1991 a 1992. Esta avaliação foi dividida em 2 partes. A primeira indicou o impacto do software SIG nas empresas locais com no mínimo 2 anos de experiência. A segunda parte identificou as questões que são responsáveis pelas restrições na implementação efetiva do software SIG. São poucas as organizações que são essencialmente inovadoras. Como resultado da avaliação sugere-se que se dê maior consideração ao impacto que o software SIG causa nos órgãos, onde são implantados.

Em Smith e Maidment (1995) é apresentado o desenvolvimento de um banco de dados hidrológicos, usando o aplicativo Arc/Info, da ESRI. Os softwares SIG têm sido descritos como sistemas computacionais capazes de capturar, armazenar, recuperar, analisar e visualizar os dados espaciais. O objetivo do software SIG é capturar as observações do mundo real e simplificá-las, colocando os dados em escala, entre os elementos gráficos, para os quais são relacionadas características descritivas denominadas atributos. Os atributos são mantidos em um sistema de gerenciamento de banco de dados, enquanto os elementos gráficos são descritos por um dos dois tipos de estrutura espacial: vetorial ou raster (matricial). As estruturas vetoriais são aquelas em que os elementos discretizados (pontos, linhas e polígonos) são representados digitalmente por uma série de coordenadas bidimensionais (x,y), que implicam em magnitude e direção.

O sistema desenvolvido pelos pesquisadores é formado por programas e menus direcionados. Foi utilizada uma linguagem de alto nível conhecida como Arc Macro Language (AML), com a qual o usuário pode automatizar seqüências de comandos. Comandos condicionais e rotinas de “looping” que recuperam as entradas do usuário criam interfaces de menu direcionadas, lêem e escrevem arquivos e rodam programas externos, que permitem ao usuário determinar interativamente alguns parâmetros hidrológicos, utilizados no cálculo da estimativa de uma cheia de projeto.

No banco de dados, foram incluídos dados de topografia da região estudada. Estes dados são representados através de modelos de elevação digital, os quais contêm uma malha uniforme de elevações do solo. Este tipo de dados pode ser usado para uma grande variedade de aplicações, incluindo delimitação de bacias. A elevação assumida para uma célula dentro da malha representa a elevação do solo no centro da célula. No banco de dados estão as principais estradas, características do solo, chuva de projeto (intensidade, duração e freqüência), uso da terra e localização de postos fluviométricos.

Foram desenvolvidos programas para relacionar espacialmente as características do solo e o uso da terra com os coeficientes de escoamento superficial para serem usados na determinação do “Número da Curva” (CN), utilizado no método do “Soil Conservation Service”.

Um dos objetivos deste trabalho também foi identificar os procedimentos que são comuns em todas as análises hidrológicas e desenvolver tais procedimentos até minimizar o processamento em tempo real como: remover todas as falhas do modelo de elevação digital; calcular as direções do fluxo, baseadas nos gradientes calculados entre as células adjacentes; calcular o fluxo acumulado (através da contagem do número de células que contribuem com o fluxo para uma célula); estabelecer os cursos d’água como sendo aquelas células com o fluxo acumulado superior a um limite estipulados.

Segundo Smith e Maidment (1995), os órgãos federais, estaduais e municipais dos Estados Unidos usam os softwares SIG predominantemente para a

visualização de mapas e no gerenciamento de dados espaciais e não exploram os cálculos que podem ser feitos com esta base de dados. Está havendo um aumento de interesse nas aplicações, especialmente na área de hidrologia e hidráulica.

Os pesquisadores realizaram uma pesquisa junto aos órgãos federais, estaduais e municipais dos Estados Unidos para saber quais os estados americanos usam os SIG. Desta pesquisa foi constatado que dez estados usam o software SIG apenas para a visualização de mapas e apenas um estado, Maryland, tem usado o sistema com alguma finalidade hidrológica. Neste trabalho, foram discutidos os conceitos considerados importantes para o sucesso da formação de bancos de dados. Foram detalhados alguns requisitos para os dados, os métodos de desenvolvimento para o banco de dados hidrológicos e os métodos empregados na integração do sistema.

Jankowski (1995), na sua pesquisa aborda os problemas existentes nos processos de decisão, com relação à escolha de um local para finalidades específicas. Como exemplo, o autor comenta sobre a escolha de um local para alocação do uso da terra. Esta escolha requer uma decisão que considere o impacto da opção escolhida com relação a outras possíveis. Este processo de decisão envolve prioridades políticas, incertezas e outros fatores. Pode ser realizado através de métodos que fazem a decisão com múltiplos critérios. Esta pesquisa mostra como pode ser feita a integração dos processos decisórios com um SIG.

Dourado (1998) explora no seu trabalho a utilização de ferramentas SIG em modelos de simulação hidrológica. O software SIG é utilizado como gerador de dados de entrada para um modelo de simulação hidrológica. As características físicas da bacia hidrográfica são determinadas com o uso do SIG. O SIG utilizado foi o IDRISI (Clark University). Apresenta no seu trabalho uma revisão bibliográfica de SIG com aplicações em Recursos Hídricos de uma forma geral.

Garbrecht e Martz (2000) fazem uma síntese da importância da modelagem digital de terreno na modelagem dos recursos hídricos. Os processos hidrológicos e a distribuição dos recursos hídricos são comumente investigados pelo uso de

modelos distribuídos. Estes modelos necessitam de informações fisiográficas tais como: comprimento dos rios, declividades, enfim necessitam das propriedades geométricas das sub-bacias. Tradicionalmente, estes parâmetros são obtidos de mapas ou levantamentos de campo, o que muitas vezes inviabiliza um estudo hidrológico por falta destas informações. As informações digitais da topografia, ou seja, os modelos digitais de terreno, nas últimas duas décadas estão aumentando (Jenson e Domingue; 1988); (Mark,1984); (Moore et all, 1991); (Martz e Garbrecht, 1992) e as informações fisiográficas são obtidas diretamente das representações digitais da topografia.

A obtenção automatizada dos dados topográficos de uma bacia hidrográfica através de um modelo digital de terreno (MDT) é mais rápida, menos subjetiva e fornece mais medidas reproduzíveis do que as técnicas manuais tradicionais aplicadas aos mapas topográficos (Tribe, 1992). Estas informações digitais têm a grande vantagem de serem prontamente importadas e analisadas por um software SIG.

Maidment e Djokic (2000) apresentam trabalho de Olivera e Maidment (1998) o CRWR (Center Research in Water Resources) - Prepro, um sistema de scripts (programas) em ArcGIS-ArcINFO, desenvolvidos para extrair informações topográficas, topológicas e hidrológicas de um modelo digital de terreno, com o objetivo de gerar informações de entrada para o modelo HEC-HMS, onde HEC (Hydrologic Engineering Center do US Army Corps of Engineers) e HMS (Hydrologic Modeling System), o qual é um modelo chuva-vazão adicional ao HEC-1. O CRWR tem ferramentas para a obtenção do traçado da rede de drenagem e a delimitação de bacias hidrográficas.

Em Maidment e Djokic (2000) é apresentado um modelo hidrológico para a Bacia de Buffalo Bayou usando SIG, a mesma foi simulada usando Hydrologic Modeling System (HMS) com as entradas obtidas do SIG. A Bacia de Buffalo Bayou cobre a maior parte da área metropolitana de Houston no Texas. As sub-bacias e a rede de drenagem foram obtidas do modelo digital de terreno do USGS com células com resolução de 30 m. Os dados de drenagem também foram obtidos do USGS (United States Geological Surveys) e da EPA (Environmental Protection Agency). Os

parâmetros físicos das sub-bacias foram obtidos com a utilização dos programas do CRWR-Prepro. Após os resultados obtidos através do uso das ferramentas SIG foi realizada a verificação dos mesmos, calculando-se através dos procedimentos tradicionais. Neste projeto, a aplicação das ferramentas SIG mostrou bom ajuste em relação aos procedimentos tradicionais.

Rufino et al (2001) propõem a utilização do sensoriamento remoto (imagens de satélite) como auxiliar na atualização de uma base de dados hidrográfica. Estão aplicando esta técnica no Estado da Paraíba.

3.2 Formas de Disponibilização e Exploração de Dados Hidrometeorológicos Integrados a um SIG

Alguns trabalhos têm sido publicados com relação à utilização dos SIG como forma de apresentar e disponibilizar dados hidrometeorológicos. Entre eles estão:

Sznaider (2000) e Block (2000) apresentam o DTN (Data Transmission Network) Weather Services, um sistema comercial que foi desenvolvido com o objetivo de coletar, entre outros, dados climatológicos em tempo real de várias fontes e disponibilizar produtos dos mesmos para a comunidade que trabalha com os sistemas de informação geográfica. Atualmente há no mundo uma grande quantidade de dados climatológicos disponíveis em formatos não compatíveis entre si. Além disso, poucos dados são georegistrados em um formato padrão que permita o acesso aos dados sem que haja necessidade de ser um meteorologista. O DTN Weather Services coleta e processa todos os tipos de dados de tempo, incluindo dados de radar, satélite, raios, observações de superfície e atmosféricas, entre outros. Após serem coletados, os mesmos são processados e verificados quanto a um controle de qualidade e então distribuídos aos usuários e arquivados. O processamento dos dados envolve 2 passos fundamentais: central de processamento e conversão dos dados para SIG. Na central de processamento dos dados, medidas de controle de qualidade são aplicadas para verificar os dados brutos quanto à recepção dos mesmos.

Algumas das fontes de dados do DTN Weather Services são:

- National Weather Service;
- National Center for Environmental Prediction;
- National Hurricane Center;
- Storm Prediction Center;
- Federal Aviation Authority;
- National Oceanic and Atmospheric Administration;
- Department of defense;
- European Center for Medium Range Weather Forecasting;
- European Organization for Exploitation of Meteorological Satellites;

- Canadian Atmospheric and Environmental Services;
- Japan Meteorological Agency;
- Global Atmospherics Incorporated;

Após serem processados, os dados são convertidos para formatos específicos dos softwares SIG da ESRI (Environmental Systems Research Institute). O usuário determina o formato desejado. Entre eles, estão disponíveis: point shapefiles, polygon shapefiles e malhas. Com este trabalho o DTN Weather Services pretende contribuir nas previsões de tempo via televisão, no gerenciamento dos recursos hídricos, no monitoramento global do tempo, na área de geração de energia, no monitoramento dos raios, no gerenciamento de emergências (catástrofes), na agricultura entre outros.

O DTN Weather Services tornou-se um negócio da ESRI, são parceiros desde 1996 para viabilizar soluções com a tecnologia SIG em diversas áreas.

Rea (2000) relata a importância das agências federais na coordenação de um banco com os contornos de bacias hidrográficas (WBD – Watershed Boundaries Dataset), como uma prioridade para ser incluído na chamada infraestrutura de dados espaciais nacionais – National Spatial Data Infrastructure (NSDI). Os propósitos do NSDI com o banco de dados com os contornos de bacias hidrográficas são:

- Ter uma série de dados digitais, consistente nacionalmente;
- Contornos de bacias hidrográficas, baseados em mapas topográficos de escala 1:24000;
- Estabelecer os nomes das bacias hidrográficas formalmente;
- Informações de atributo para identificar unidades a montante e a jusante;

Existem 3 grandes bancos de informações que devem ser relacionados: o banco que contém os contornos das bacias hidrográficas nacionais, o banco com as elevações de terreno também em dimensão nacional e o banco com a série de dados hidrográficos. Esforços deverão ser realizados para resolver o problema das inconsistências destes bancos para melhorar a qualidade dos dados. Os órgãos estaduais e federais, entre outros, estão unindo esforços para a construção do WBD

(Watershed Boundaries Dataset), incluindo o US Geological Survey, o US Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service and Forest Service, o US Environmental Protection Agency, Bureau of Land Management, National Oceanographic and Atmospheric Administration.

Segundo Andrews (2000) o National Hydrography Dataset (NHD) Reach Addressing Database (RAD) é um banco de dados Oracle 8i, SDE 8.01. É projetado para armazenar feições de recursos hídricos e registro de eventos de qualidade e uso da água para aplicações de mapeamento e buscas. O NHD contém uma série de dados digitais espaciais com informações sobre as feições hidrológicas, tais como: lagos, poços, riachos, córregos, rios, açudes e reservatórios. O registro de eventos é armazenado em forma de tabelas de atributos, correspondendo às feições hidrográficas. Como exemplo, podem ser citados: pontos de poluição, estações de monitoramento, usos, controles permitidos e padrões de qualidade da água. O NHD tem 3 propósitos principais. O primeiro é fornecer e armazenar os dados espaciais para aplicações de mapeamento. O segundo é fornecer estrutura para visualização das tabelas de dados. O terceiro é fornecer uma estrutura de banco de dados de modo a relacionar os vários componentes dos dados.

Hudgens e Maidment (2000) apresentam um trabalho realizado no Estado do Texas (USA). O Texas Natural Resources Conservation Commission (TNRCC) tem um projeto para modelar a disponibilidade da água, com o objetivo de melhorar os modelos usados em cada bacia. Um esforço paralelo é feito pelo Estado com uma iniciativa de mapeamento estratégico, que melhora a descrição dos dados geoespaciais do Texas através de mapas digitais da topografia, redes de drenagem, solos e ortofotografia. Como parte do projeto de modelagem do TNRCC, o Centro de Pesquisa em Recursos Hídricos (CRWR) da Universidade do Texas, está usando dados geoespaciais melhorados para determinar áreas de drenagem e propriedades das bacias em locais estratégicos para retirada de água. Estas áreas de drenagem e as propriedades das bacias são usadas para estimar as vazões em determinados locais, baseando-se nas vazões conhecidas em locais onde existem postos de medição de vazões. Como parte do processo de desenvolvimento dos dados para cada bacia hidrográfica, um banco de dados é construído, e o mesmo contém:

- Modelo digital de elevação de terreno (MDT);
- Uma rede de drenagem mostrando os rios principais;
- A localização de uma série de postos de vazões do USGS;
- A localização de uma série de pontos de tomadas d 'água;
- Uma malha de precipitações médias anuais;
- Uma malha com os valores do Número da Curva (CN) do Soil Conservation Service;

4. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA PILOTO

A área piloto onde foram realizadas as análises é uma bacia hidrográfica que está localizada a noroeste do município de Campinas (Estado de São Paulo), no trecho que é cortado pelo eixo da Rodovia Dom Pedro I. **A figura 1 abaixo exibe o mapa de localização**

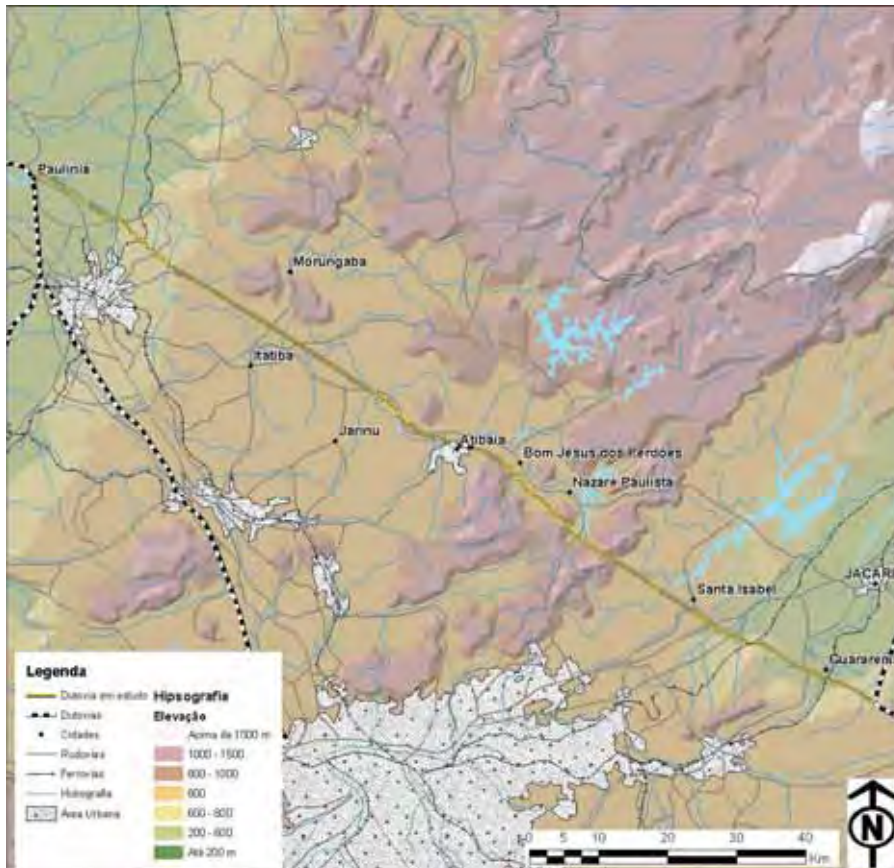


Figura 1: Mapa de Localização

4.1 Características Geomorfológicas

Campinas se localiza em uma área de transição entre o Planalto Atlântico Paulista (região leste) e a Depressão Periférica (região oeste), com relevo bastante ondulado e poucas áreas planas. O lugar mais alto da cidade está próximo ao Observatório Municipal Jean Nicolini, localizado na Serra das Cabras, no distrito de Joaquim Egídio, a uma altitude de 1020m. Dentro do perímetro urbano, entretanto, a região mais alta está no Jardim São Gabriel, a 780m de altitude. A menor altitude se verifica na região do Parque Itajaí, próximo ao Rio Capivari, a 555m.

4.2 Clima



Figura 2: Tempo Severo em Campinas

O clima de Campinas é classificado como Tropical de Altitude, com média de temperatura de 21°C, com predominância de chuvas no verão e com estiagens médias de 30 a 60 dias entre os meses de julho e agosto e estiagens agrícolas que podem chegar a 120 dias.

5. BASE DE DADOS

É chamado nesta pesquisa de base de dados às informações de interesse em Recursos Hídricos e que podem ser utilizadas e de alguma forma exploradas nos softwares SIG. Antes dos dados serem inseridos nos softwares SIG é importante fazer um levantamento da disponibilidade e do formato no qual se encontram. E principalmente se estão sobre uma mesma base cartográfica digital, isto é, nos mesmos sistemas de projeção, “datum” e coordenadas e conhecer a qualidade dos mesmos.

Neste trabalho, para efeito de apresentação são abordadas as bases de dados geográficos e a base de dados hidrológicos (os atributos dos postos hidrológicos). É apresentada uma definição de cada base, a importância da qualidade, a preparação das bases como função da disponibilidade e do formato no qual se encontram.

Define-se como dados geográficos os dados que descrevem qualquer parte da superfície da Terra, ou seja, as feições do mundo real. Já os dados espaciais são os dados geográficos que armazenam a localização geométrica de uma determinada feição, como exemplo os mapas digitais. Análises mais detalhadas sobre os dados geográficos podem ser encontradas em Câmara et al. (1996), Mendes e Cirilo (2001).

A base de dados geográficos básica necessária para uso em Hidrologia é representada pelos seguintes dados:

- Hidrografia (dados vetoriais lineares);
- Curvas de nível (dados vetoriais lineares);
- Tipo de solos (vetorial ou matricial);
- Imagens de satélite (dados matriciais);
- Localização dos postos hidrológicos (vetorial-pontos);
- Outros mais específicos;

Com relação aos dados vetoriais na forma de pontos, como exemplo a localização dos postos, a probabilidade de erros é menor, pois para a entrada nos softwares SIG depende apenas das coordenadas do mesmo. Um possível erro existirá caso estas coordenadas não estejam corretas ou haja necessidade de uma conversão da mesma para outro sistema de coordenadas.

No caso da hidrografia e das curvas de nível, as quais são informações vetoriais lineares é necessário primeiro investigar em que condições de qualidade e formato se encontram e analisar se as mesmas cumprem a necessidade à qual se destinam. Com relação às imagens de satélite, podem ser utilizadas após o processamento das mesmas. Estas informações estão cada vez mais sendo utilizadas em Recursos Hídricos, como fonte de dados e como fonte de apoio às informações básicas obtidas por postos de medição de dados.

A primeira providência a ser tomada antes de se utilizar um software SIG, definida a região do estudo, é verificar a disponibilidade de mapas ou cartas em escalas adequadas. Mapas de grande escala apresentam uma quantidade significativa de detalhes para pequenas áreas. Mapas de pequena escala fornecem uma descrição pouco detalhada de grandes áreas.

Feito isso, é necessário fazer um levantamento da disponibilidade de dados geográficos para a região em estudo. Verificar se os mesmos já estão no formato digital adequado de forma a serem utilizados no software SIG.

Neste estudo foram utilizados os dados das seguintes instituições:

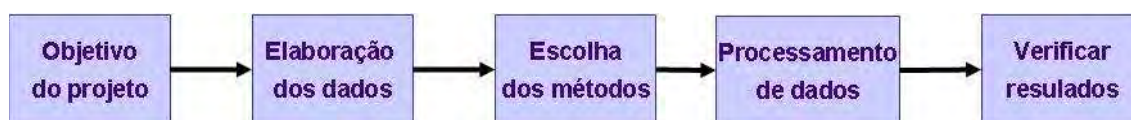
- IBGE – Mapa de Solos – (www.ibge.gov.br)
- IBGE – Carta Topográfica – Folha Campinas (www.ibge.gov.br)
- DAEE – Dados Pluviométricos (www.daae.sp.gov.br)
- NASA – Imagem Landsat 7 ETM (www.nasa.gov)

Todos estes dados estão disponíveis gratuitamente em seus respectivos endereços eletrônicos.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentados ferramentas e métodos para estudos hidrológicos em ambiente SIG. Todos os métodos são seguidos de exemplos onde sua aplicação foi bem sucedida na prática.

Para organizar a seqüência das análises descritas por estes métodos, foi utilizado o Processo Analítico (capítulo 1 do guia The ESRI Guide to GIS Analysis Volume1: Geographic Patterns and Relationships), como mostra o exemplo abaixo:



Através do processo analítico chegou-se ao diagrama apresentado no item 6.2 que exibe a seqüência de análises deste projeto. Todas as etapas da análise serão apresentadas nos tópicos seguintes deste capítulo.

6.1 Recursos de Informática e Geoprocessamento

O SIG adotado neste projeto foi o ArcGIS-ArcInfo Desktop (versão 9.3) com as extensões Spatial Analyst, 3D-Analyst e Geostatistical Analyst, sendo que a primeira se encarrega dos processos de análise espacial e álgebra de mapas, a segunda é utilizado para criação e exibição de modelos numéricos de terreno e a última para análises em geoestatística.

Este SIG possui três aplicativos, sendo o ArcMap, responsável pelas análises espaciais e construção dos mapas temáticos, o ArcCatalog, responsável pela construção e manutenção do banco de dados geográfico e o ArcToolbox, que é a biblioteca de funções de geoprocessamento.

Todos os processos foram executados no SIG ArcGIS-ArcInfo, com exceção do cálculo de chuva máxima, onde será utilizada a planilha eletrônica Microsoft Excel.

6.2 Diagrama de fluxos de trabalho

O diagrama exhibe as etapas de processamento dos dados, ligados aos métodos que foram submetidos. Estes métodos serão explanados nos próximos itens deste capítulo.

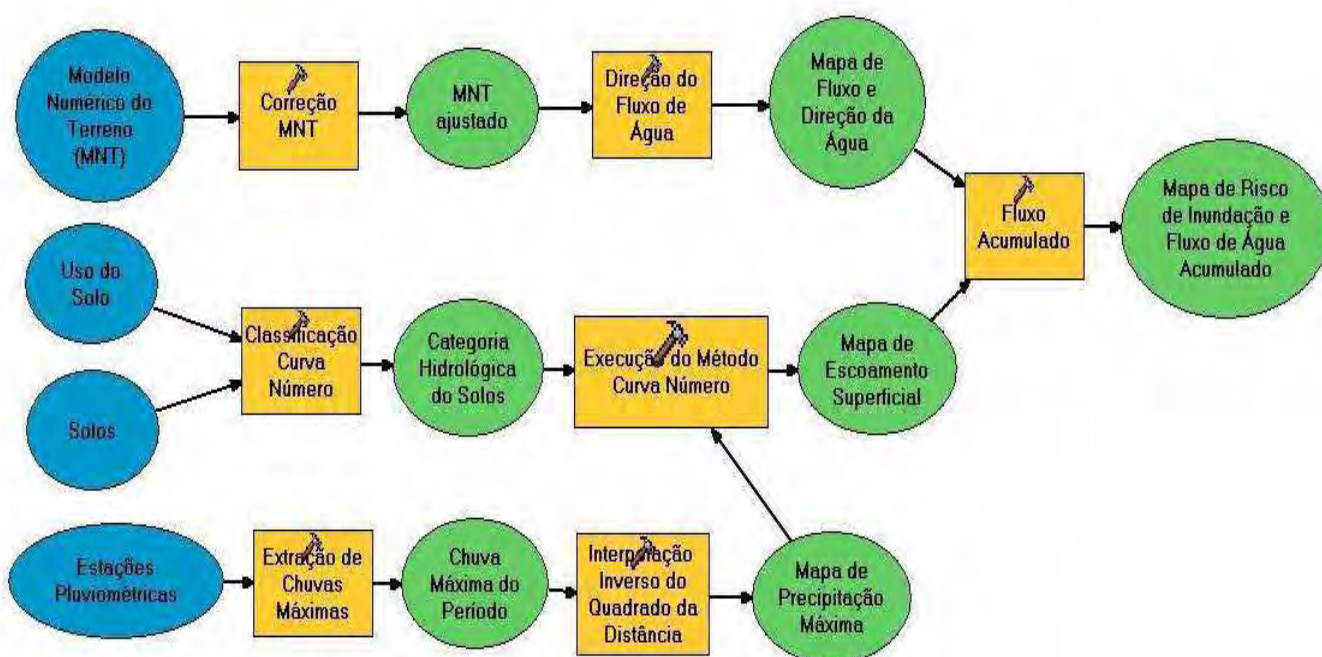


Figura 3: Fluxograma da Metodologia.

6.3 Método de Elaboração de MNT para análise hidrológica

Seguindo a ordem da figura 3, este tópico exhibe o processo de elaboração de um MNT hidrológicamente correto, que represente analiticamente o escoamento superficial. Este MNT é obtido através do processo de interpolação de dados. A figura abaixo exhibe resumidamente este processo:



Figura 4: Modelo esquemático do método de interpolação "topo to raster".

A ferramenta Topo to Raster do ArcGIS Spatial Analyst é um método de interpolação projetado especificamente para a criação de modelos digitais de terreno hidrológicamente corretos. Ela é baseada no programa ANUDEM desenvolvido por Michel Hutchinson (1988 – 1989). Veja Hutchinson e Downling (1991) para um exemplo de aplicação significativa do ANUDEM para outras referências associadas. Um breve resumo do ANUDEM e de outras aplicações são dadas por Hutchinson (1993).

O procedimento de interpolação foi projetado para tirar vantagem dos tipos de dados de entrada que geralmente estão disponíveis e as características conhecidas das superfícies de elevação. Este método usa uma técnica de interpolação baseada na interação entre diferenças finitas. Ele é otimizado para a eficiência computacional de métodos locais de interpolação como o Inverso da Distância Ponderada (IDW – Inverse Distance Weighted), sem no entanto perder a continuidade da superfície proporcionada por métodos globais como o Spline e Kriging.

Pode-se dizer que ele é uma adaptação da técnica Spline (Wahba, 1990) na qual a geração das irregularidades da superfície foi modificada de modo a permitir que o MNT expresse mudanças abruptas no terreno, como as provocadas por rios e vales.

A água é a principal força erosiva que determina a forma geral da maioria das paisagens. Por esta razão, a maioria das paisagens possui muitos topos de morro (locais mais altos) e poucas depressões (locais mais baixos), resultando num padrão de drenagem conectado. A ferramenta Topo to Raster usa este conhecimento sobre as superfícies e impõem restrições ao processo de interpolação que resultam em estrutura de drenagem conectada e uma representação correta de vales e cursos d'água. Esta condição imposta pela drenagem produz superfícies mais precisas com menos dados de entrada. A quantidade de dados de entrada pode ter uma ordem de magnitude menor do que a normalmente requerida para descrever adequadamente uma superfície a partir de curvas de nível. Isto acaba minimizando os custos para se obter um MNT confiável. A condição imposta pela drenagem também virtualmente elimina qualquer necessidade de edição ou de pós-processamento para corrigir a superfície gerada.

O programa atua de maneira conservadora na remoção de falhas em locais que podem contradizer os dados de elevação fornecidos. Estes locais normalmente aparecem descritas no relatório de processamento, e esta informação deve ser usada para corrigir erros nos dados, em especial ao processar conjuntos grandes de dados.

A função do processo de imposição da drenagem é remover todas as falhas presentes no MNT gerado pela interpolação que não tenham sido identificados no conjunto de dados de entrada. O programa assume que todos esses pontos não identificados são erros, uma vez que eles não são comuns em paisagens naturais (Goodchild e Mark, 1987).

O algoritmo que impõe a drenagem tenta eliminar os pontos de conexão de drenagem que são plausíveis, mas na verdade não existem de fato, modificando o MNT de maneira a deduzir as linhas dos cursos d'água ao usar como referência o ponto mais baixo do leito dos rios.

A imposição da drenagem também pode ser complementada pela incorporação dos dados das linhas dos cursos d'água, o que é útil quando um posicionamento mais preciso da hidrografia é necessário.

As curvas de nível foram originalmente o método mais comum para armazenamento e preservação da informação de elevação. Infelizmente este tipo de dado é também o mais difícil para se utilizar apropriadamente em técnicas de interpolação. Sua desvantagem é a falta de amostragem entre as isolinhas, especialmente em áreas de pouca rugosidade.

No início do processo de interpolação, a ferramenta Topo to Raster usa a informação fornecida pelas curvas de nível para gerar um modelo de drenagem. Identificando as áreas de curvatura máxima em cada isolinha, as regiões de maior declividade são individualizadas e rede hidrográfica é criada (Hutchinson, 1988). Esta informação é usada para garantir propriedades hidrogeomórficas adequadas ao MNT resultante da interpolação, e também pode ser utilizada para verificar a precisão do MNT gerado.

Depois que a morfologia geral da superfície é gerada, as curvas de nível também são usadas para interpolar o valor de elevação de cada célula.

Quando as curvas de nível são usadas para interpolar as informações de elevação, todas as isolinhas são lidas e generalizadas. Então um máximo de 50

pontos de dados dessas isolinhas são lidos para cada célula. Na resolução final, apenas um ponto crítico é usado para cada célula. Por esta razão, ter uma alta densidade com várias isolinhas passando pela mesma célula é redundante.

6.4 Método SCS – Curva Número

O SCS curva número é um método simples e eficiente para determinar a expectativa de escoamento superficial, calculada a partir de uma eventual precipitação.

O cálculo do método curva número é realizado utilizando no mínimo duas informações geográficas:

- Mapa de uso e cobertura do solo
- Mapa de tipo de solo, classificado por grupos hidrológicos

O quadro 1 exibe a classificação feita sobre os tipos de solo, segundo o grau de permeabilidade. Os valores variam de A para D, sendo que o grupo A representam os solos com características mais arenosas, até a categoria D, que representam solos argilosos, ou seja, os solos do grupo A são mais permeáveis que os do grupo D, influenciando assim na taxa de absorção e escoamento superficial.

No quadro 1 estão os principais grupos hidrológicos encontrados neste estudo, seguido dos referentes tipos de solo:

Tipo de Solo	Categoria Hidrológica do Solo (CHS)
PVA Distrófico + CX Tb Distrófico	D
PVA Distrófico + PV Eutrófico + LVA Distrófico	D
PVA Eutrófico + PV Eutrófico + LV Distrófico	D
LVA Distrófico + LV Distrófico	C
LVA Distrófico + CX Tb Distrófico	B
LV Distrófico + LVA Distrófico + CX Tb Distrófico	D

Quadro 1 – Grupo Hidrológico de Solos

A figura 5 representa o mapa de solos com a classificação CHS utilizada no estudo:

O mapa de uso do solo foi obtido através da técnica de sensoriamento remoto de classificação não-supervisionada, algoritmo encontrado no aplicativo ArcGIS.

O quadro 2 exibe a classificação a combinação entre a informação geográfica de solos e uso e cobertura do solo:

Tipos de Uso e Cobertura do Solo	Categorias Hidrológicas dos Solos			
	A	B	C	D
Agricultura	65	75	82	86
Citros	39	52	66	71
Pasto	49	69	79	84
Reflorestamento	36	60	70	76
Cerrado	30	46	63	66
Vegetação de Várzea	45	66	77	80
Mata e cerrado	15	44	54	61
Área Urbana	51	68	79	84

Quadro 2 – Valores de curva número.

Os valores de curva número (tendendo a 100) indicam solos apresentando superficialmente condições de menor infiltração das águas pluviais e portanto maior chance de escoamento superficial.

O cálculo da taxa de escoamento superficial é realizado utilizando a equação SCS:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (1)$$

Q = runoff (in)
P = rainfall (in)
S = potential maximum retention after runoff begins
I_a = initial abstratctions

$$I_a = 0.2 S \quad (2)$$

$$Q = \frac{(P - 0.2 S)^2}{(P + 0.8 S)} \quad (3)$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (4)$$

O valor Q, representa o resultado final que se pretende chegar, isto é, uma camada de informação geográfica que representa a taxa de escoamento superficial (runoff)

P é a precipitação obtida através do cálculo de chuvas máximas.

O cálculo de S é gerado a partir da camada de informação geográfica resultante da combinação de solo e uso e cobertura vegetal já classificada com o método CN.

O coeficiente I é uma constante que pode ser calibrada de acordo com a situação de saturamento hídrico do solo.

Neste estudo foi utilizado o coeficiente de I com valor II, correspondente a uma condição de solo semi-saturado, devido as condições anteriores de precipitação.

Os valores de precipitação adotados foram do ano de 1976, no mês de janeiro, a partir das estações do DAEE, exibidas no quadro 3.

PREFIXO	NOME_DO_POSTO	ENTIDADE	MUNICÍPIO
D3-035	Pedra Bela	DAEE	Pedra Bela
E3-017	Vinhedo	DAEE	Vinhedo
E3-076	Piracaia	DAEE	Piracaia
E3-049	Santa Isabel	DAEE	Santa Isabel
E3-054	Paratei	DAEE	Guararema

Quadro 3: Descrição dos postos pluviométricos do DAEE.

6.5 Obtenção do Mapa de Risco de Inundação

A bacia hidrográfica é o elemento espacial essencial para os estudos e análises realizadas em Recursos Hídricos. Devido a sua importância decidiu-se avaliar a metodologia aplicada no software SIG utilizado na pesquisa. Esta metodologia de obtenção do mapa de risco de inundação, e em consequência da delimitação das bacias hidrográficas, utiliza como dado de entrada o modelo numérico do terreno. Neste software, existem funções hidrológicas desenvolvidas pela ESRI, que analisam o Modelo Numérico do Terreno (MNT) e geram os prováveis caminhos de fluxo e, em consequência, delimitam as bacias hidrográficas e determinam as regiões de acúmulo da água proveniente do escoamento superficial.

Este item aborda os conceitos utilizados em cada fase da metodologia incorporada ao aplicativo SIG ArcGIS – ArcINFO pela ESRI. Os algoritmos inerentes a cada função hidrológica, desenvolvidos pela ESRI, não são disponibilizados ao usuário.

Caso o usuário opte por um SIG com política de software livre, algoritmos semelhantes encontram-se no aplicativo SIG SPRING, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Existem ainda alguns estudos que tratam dos métodos para se determinar a rede de drenagem de uma região e consequentemente se obter a área de drenagem da respectiva rede. Entre os estudos, estão alguns mais recentes como o de Perez (2000), Garbrecht e Martz (2000), Olivera e Maidment (2000), Djokic e Ye (2000) e Saunders (2000).

A metodologia aplicada no SIG utilizado nesta pesquisa é a chamada D8 (Deterministic – 8 Node), apresentada em detalhe em O' Callaghan e Mark (1984). Este método define a rede de drenagem a partir de um MNT na forma matricial (raster) utilizando uma analogia com o fluxo da água sobre a superfície da terra. Garbrecht e Martz (2000) tratam em detalhe deste método.

Em um SIG, o terreno é representado pelas células de um MNT. O caminho percorrido pela água sobre o MNT pode ser traçado célula por célula utilizando uma função de modelagem hidrológica, a direção de fluxo.

O método D8 identifica o caminho mais íngreme para o fluxo entre cada célula de um MNT e suas 8 células vizinhas, por isso o nome do método, D8.

A Figura 6 apresenta o esquema de codificação das direções de fluxo utilizados no método D8.

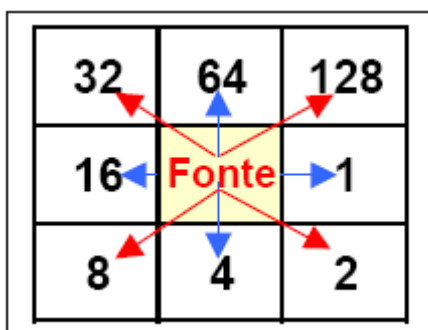


Figura 6: Esquema com as codificações das direções do fluxo.

O chamado ponto de escoamento ou fonte é o local (célula) através do qual a água flui de uma célula a outra. Cada célula da malha é cercada por 8 células vizinhas. Quatro das quais estão sobre os eixos principais (Norte, Sul, Leste e Oeste), e quatro estão sobre as diagonais. Pelo método D8, a água na célula pode fluir para uma e somente uma das células vizinhas. A direção deste fluxo é a do caminho mais íngreme. As direções do fluxo são codificadas no ArcGIS ArcINFO por potências de 2 ($2^0=1$, $2^1=2$, $2^2=4$, $2^3=8$, $2^4=16$, $2^5=32$, $2^6=64$, $2^7=128$) a partir de Leste, no sentido horário, como pode ser observado na Figura 1.

O modelo D8 é uma simplificação do caminho verdadeiro do fluxo da água que pode se dar em qualquer direção. Alguns pesquisadores, entre eles (Freeman, 1991; Quinn et al, 1991; Costa-Cabral e Burges, 1994) deram algumas alternativas ao método D8 que representariam de uma forma mais real como a água fluiria através do terreno, permitindo que o fluxo tenha mais de uma direção. Mas estas alternativas tornariam a aplicação do método inviável em termos de processamento,

e em termos do resultado final não melhorariam a determinação das áreas com risco de inundação.

O modelo D8 apresenta dificuldades na identificação da direção do fluxo quando existem depressões ou áreas planas no MNT. Muitas vezes as depressões e as áreas planas são originadas de erros resultantes da interpolação numérica quando da geração do MNT.

A dificuldade originada deste fato é que o fluxo nestas células ficaria comprometido, pois nenhuma célula vizinha teria elevação inferior e conseqüentemente o fluxo não poderia passar para nenhuma célula vizinha.

Para que isso não ocorra, as depressões e as áreas planas são removidas. Após as áreas planas ou depressões serem identificadas no MNT, devem ser corrigidas para que se possa obter a rede de drenagem ou rede de fluxo do MED. Existem vários métodos utilizados na correção ou no preenchimento dessas células que representam áreas planas ou depressões. Jenson e Domingue (1988), Martz e De Jong (1988), Freeman (1991), discutem alguns métodos para a correção dessas depressões.

No capítulo 6.3, foram realizadas as correções do MNT para uso em análises hidrológicas, excluindo as depressões provenientes da interpolação.

A figura 7 mostra simplificada a obtenção de uma malha com as direções do fluxo

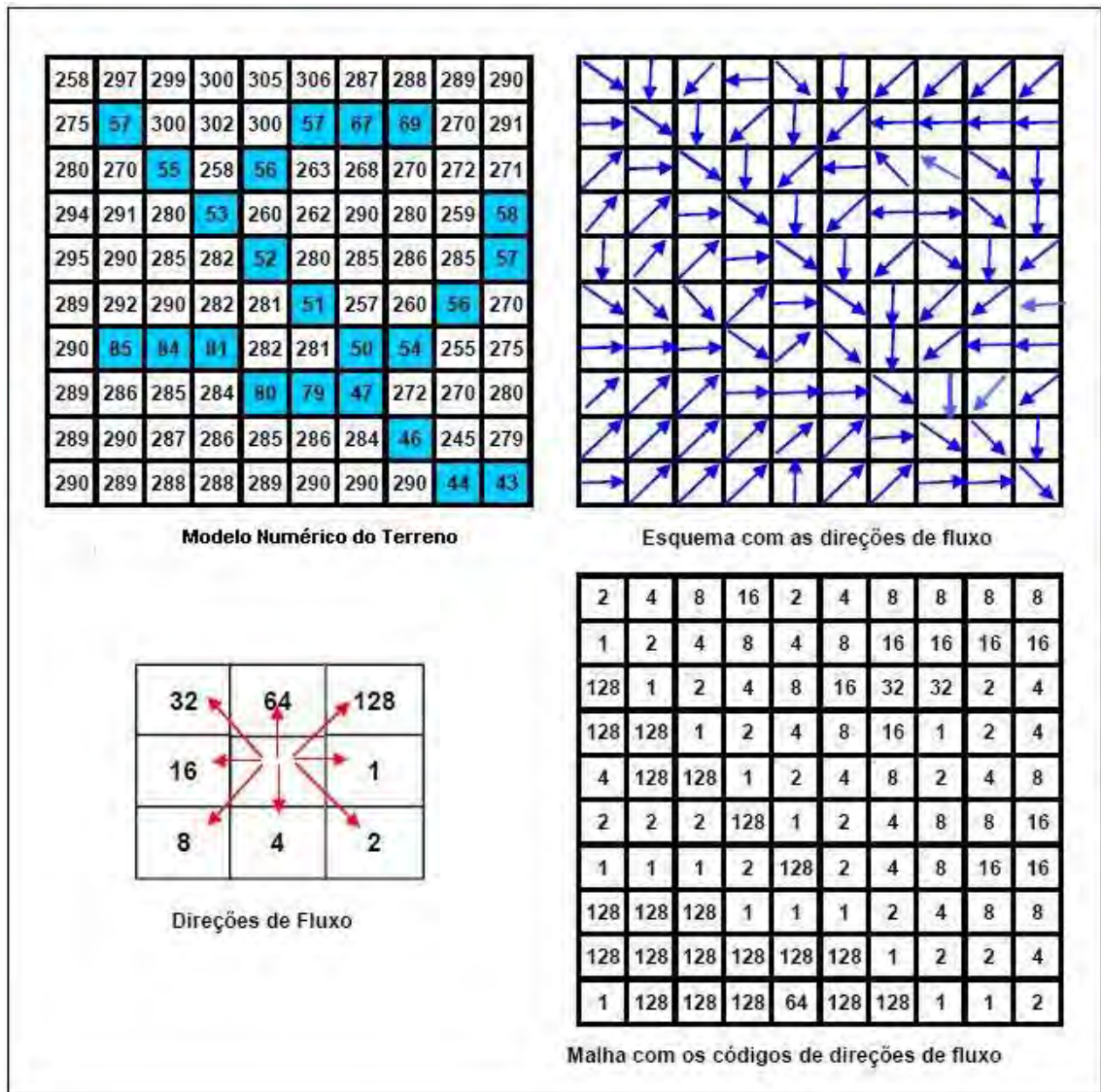


Figura 7: Exemplo de malha de direção de fluxo.

A Figura 6 apresenta como se define a malha com as direções de fluxo a partir de um MNT. Analisando-se a primeira célula superior à esquerda, compara-se o valor da elevação da célula em análise com elevação (258), com os valores das células vizinhas com elevação (297, 275 e 57). A regra do método D8 diz que a água flui da célula em análise para o caminho mais íngreme.

Este caminho é determinado calculando-se a declividade da célula em análise, com relação as suas células vizinhas. Faz-se a diferença das elevações da célula em análise com relação as suas células vizinhas. Esta diferença é dividida pela distância de centro a centro de cada célula. Na horizontal e vertical a distância

coincide com o lado da célula, na diagonal multiplica-se o lado da célula por 2, por ser uma célula quadrada. A direção do fluxo se dá na direção da maior declividade obtida. A direção do fluxo obtida em função do caminho mais íngreme é representada no esquema com as direções de fluxo por uma seta azul, no sentido do fluxo. Assim são determinadas todas as direções de fluxo. Para armazenar as direções calculadas representadas esquematicamente na Figura 7 por setas azuis, o método D8 adotado no aplicativo ArcGIS ArcINFO utiliza um esquema de codificação para as direções de fluxo, representado por potências de 2. Por exemplo, observa-se que para a célula com elevação (258), cuja direção calculada, é da célula com elevação (258), para a célula com elevação (57), o valor do código da direção é representado por 2. Este procedimento é repetido para todas as células do MNT.

A partir da malha com as direções de fluxo, é possível determinar a malha com os possíveis caminhos de fluxo. Isto é realizado, ligando-se as células de centro a centro, seguindo-se a direção do fluxo obtida para cada célula. Após todas as células serem verificadas, é possível obter a malha com os possíveis caminhos de fluxo, como pode ser observado na Figura 8.

Desta forma simplificada, é possível caracterizar o fluxo da água de forma unidimensional, ou seja, é possível descrever um fluxo com uma rede unidimensional sobre uma superfície bidimensional.

Na Figura 8, é possível visualizar um exemplo de uma matriz com os códigos das direções de fluxo (segundo o método D8), um esquema ilustrativo das direções de fluxo e todos os possíveis caminhos de fluxo (rede de fluxos), obtidos através da malha de direções de fluxo.

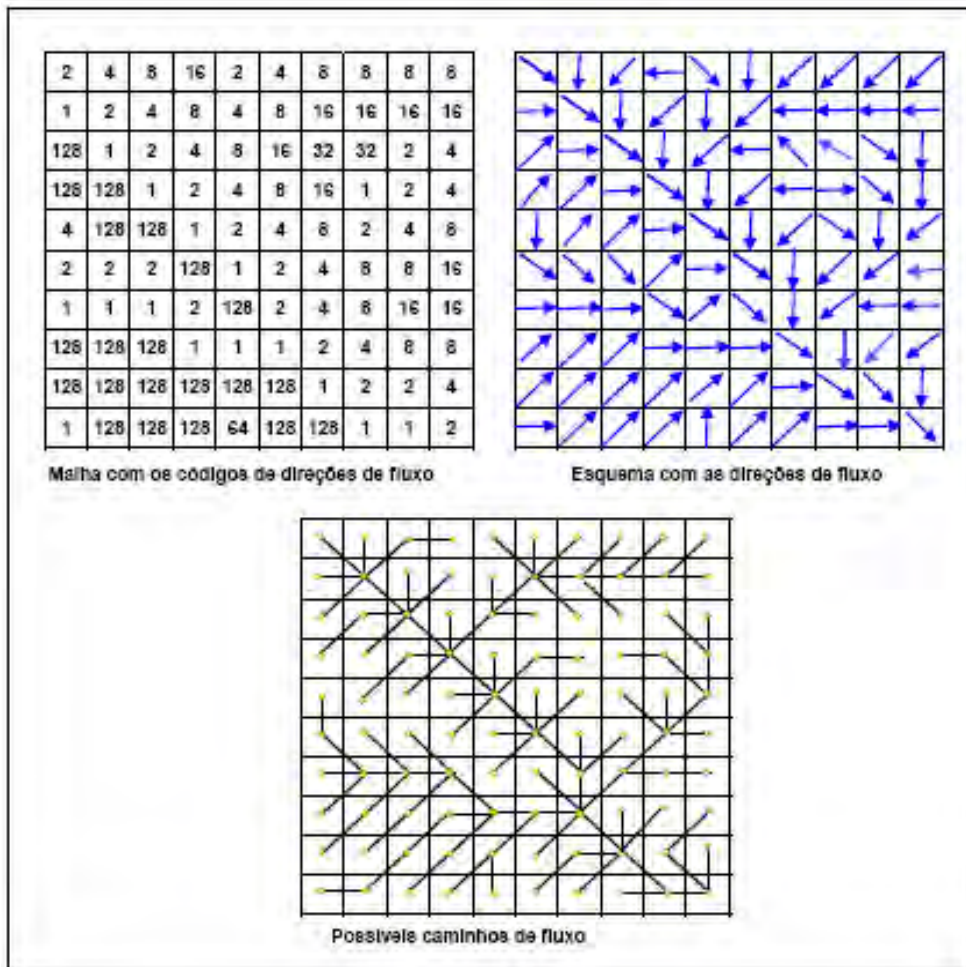


Figura 8: Caracterização dos caminhos de fluxo.

Como pode ser observado na Figura 8, a malha da esquerda é uma malha com uma representação dos possíveis caminhos de fluxo. Nesta malha, foram inseridos números em cada célula, que representam a soma das células que fluem de montante na direção daquela célula. Por exemplo, o valor acumulado obtido para a célula que está na linha 2, coluna 2 é igual a 6. Isto significa, que 6 células fluem na direção desta célula. Da Figura 8, observa-se que existem 6 células interligadas a montante desta célula. Isto pode ser comprovado, observando-se a direção das 6 células interligadas, na malha com as direções de fluxo da Figura 6. A malha da direita, na Figura 8 é a malha que representa o fluxo acumulado resultante.

Nas análises hidrológicas, uma das malhas mais importantes é a malha de fluxo acumulado (“flow accumulation”). Esta é a malha utilizada na determinação da rede de drenagem e potencial risco de inundação.

Através da malha de fluxo acumulado, obtém-se a rede de fluxos a qual é definida como a seqüência das células cujo valor do fluxo acumulado excede um *valor de base* (“threshold value” ou “cell threshold”). A extração da rede de drenagem é feita baseando-se nesta malha e no valor de base adotado. Pode-se escolher se os fluxos acumulados obtidos farão ou não parte desta rede de drenagem. Isto depende da escolha do *valor de base* (“threshold value”) para que a célula seja considerada como fazendo parte da rede de drenagem o valor de base é definido como o número mínimo de células a montante da célula em questão.

A Figura 9 mostra a malha com o resultado da escolha do *valor de base* para a determinação da rede de fluxo. Neste caso foi escolhido o valor igual a 4. Isto significa que as células com valor de fluxo acumulado no mínimo igual a 4 pertencerão à rede de fluxos.

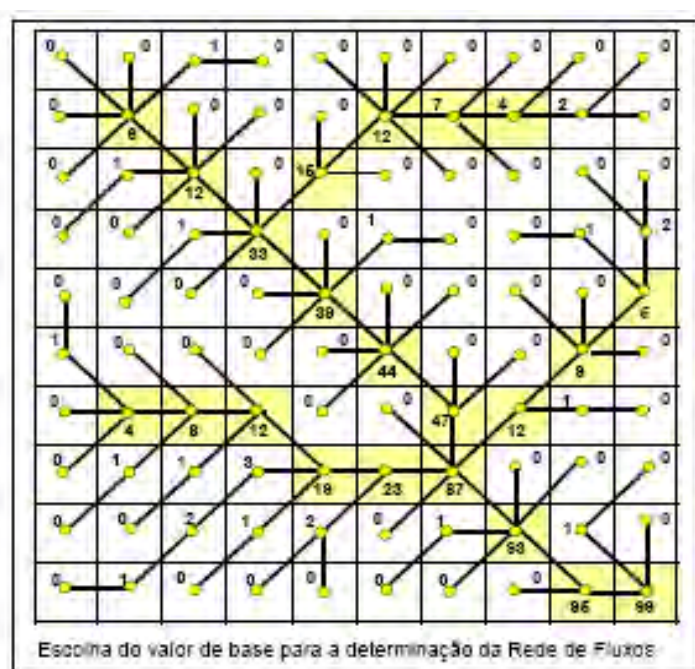


Figura98: Malha de fluxo acumulado a partir da escolha do valor de base.

A Figura 4 mostra em amarelo só as células cujo valor do fluxo acumulado é igual ou superior a 4 (valor de base adotado). Apenas estas células representarão a rede de fluxos.

O **valor de base** (“threshold value” ou “cell threshold”) é essencial na determinação da rede de drenagem. Se o valor de base escolhido é muito baixo a

rede de drenagem é exageradamente detalhada. Se o valor é muito alto poderá resultar em uma rede de drenagem muito simplificada, que se afasta muito da realidade. Portanto, a rede de drenagem é definida pelas células com valor de fluxo acumulado maior ou igual ao valor de base escolhido. Um valor inicial normalmente adotado para o valor de base é de 1000 células. Este valor é adotado como padrão no aplicativo ArcGIS ArcINFO.

Segundo experiências de Maidment (2001), a faixa normalmente utilizada para este valor, está entre 100 e 10.000 células. Mas, na prática é importante analisar visualmente a rede de drenagem resultante, para avaliar se a mesma é ou não, representativa da hidrografia real. Caso se considere insuficiente, adota-se um valor maior, e assim procede-se até chegar a uma rede de drenagem com a densidade desejada.

7. RESULTADOS OBTIDOS

O resultado da análise a partir da modelo exposto na Figura 3 (capítulo 6.1), exhibe o Mapa de Inundação (Figura 10). Este modelo apresenta sua variabilidade de acordo com os dados de precipitação e escala de coleta das informações cartográficas.

No Mapa de Inundação, pode-se observar os principais pontos de contato entre as áreas com grande volume de água durante a precipitação do período de análise e as faixas de dutovias.

O resultado desta análise exibe as áreas sujeitas a inundação na forma de drenagens, porém este padrão cartográfico carrega uma informação quantitativa referente ao escoamento real da água naquele momento da precipitação.

A Tabela 1 abaixo exibe o total de chuva que precipitou no período analisado. Os valores representam o valores em mm de chuva por estação de coleta do DAEE, cada coluna representa a evolução temporal em minutos da quantidade de chuva.

PREFIXO	Total	ch_10'	ch_20'	ch_30'	ch_60'	ch_120'	ch_180'	ch_360'	ch_720'	ch_1080'	ch_1440'
D3-035	2560	1.44	0.78	0.536	0.418	0.314	0.269	0.183	0.11	0.104	0.091
E3-017	1779	1.41	0.89	0.73	0.571	0.386	0.295	0.186	0.111	0.091	0.082
E3-076	1212	0.4	0.33	0.32	0.296	0.259	0.211	0.128	0.088	0.062	0.057
E3-049	1203	1.01	0.84	0.716	0.538	0.375	0.261	0.204	0.122	0.082	0.062
E3-054	1202	2	1.485	1.65	1.123	0.63	0.429	0.216	0.108	0.078	0.071
TOTAL	7956	6.26	4.325	3.952	2.946	1.964	1.465	0.917	0.539	0.417	0.363

Tabela 1: Valores de chuva em mm X tempo em minutos

O Mapa de Inundação utilizou os valores totais, obedecendo a condição hidrológica II do método CHS, que representa solos em condições intermediárias de saturação pela água.

Ainda analisando o mapa encontram-se valores de precipitação variando de 1202 mm até 2560 mm de chuva. A sua maior concentração ocorreu ao norte da área de estudo, próximo ao município de Bragança Paulista. Esta precipitação ocorreu no dia 16/01/1978.

O resultado encontrado indica ainda que a área de estudo possui uma forte tendência ao escoamento superficial, com valores acima de 60, como indica a Tabela 2:

VALOR CN	ÁREA (KM2)	% DA ÁREA
30	8,22	0,12
49	6,52	0,10
51	3,87	0,06
63	1558,25	23,49
66	1050,25	15,83
79	2094,30	31,57
84	499,48	7,53
86	874,42	13,18
100	539,07	8,13
ÁREA TOTAL	6634,37	
MÉDIA CN	68	

Tabela 2: Valores de CN encontrados na área de estudo.

Através do cálculo de CN apresentado no Capítulo 6.4 e utilizando os dados de precipitação máxima e valor de CN, obteve o resultado do escoamento superficial. Nota-se um grande volume de água concentrado ao norte desta região com valores variando entre 2300 a 2500 mm/min.

No Mapa de Inundação, foram identificados os principais trechos de cruzamento das dutovias da Petrobras e TBG, com os pontos de grande acúmulo de água, o que sugere o maior risco a inundação.

Na tabela 3 exibe os principais pontos de risco a inundação, utilize o Mapa de Inundação para identificar a localização dos pontos. Observe os valores de acúmulo de água em mm/minuto.

PONTOS DE RISCO A INUNDAÇÃO			
Valores em mm/min			
PETROBRAS		TBG	
PETR-01	8.718	TBG-01	45.627
PETR-02	12.004		
PETR-03	24.500		
PETR-04	21.635		
PETR-05	67.433		

Tabela 3: Trechos de dutovia identificados em pontos de risco a inundação

Os trechos com maior risco identificados são:

- Petrobras: PETR-05, com 67.433 mm/min, próximo ao município de Paulínia-SP.

- TBG: TBG-06, com 45.627 mm/min, próximo ao município de Piracaia-SP.

8. CONCLUSÕES

A conclusão pode ser distribuída em dois tópicos relatando as condições satisfatórias que atenderam os objetivos do trabalho, assim como os pontos que poderão ser melhorados em aplicações futuras utilizando este conjunto de métodos expostos neste trabalho.

As condições satisfatórias atingiram os objetivos referentes a automação do processo de análise e potencial do uso de um SIG para a análises referentes a inundação, tais como:

- Em um SIG é possível espacializar o processo de acumulação de água, identificando os principais pontos sujeitos a uma inundação, assim como sua precisão na mensuração dos valores de escoamento superficial.

- É possível repetir diversas vezes os ensaios substituindo os valores de chuva, uso do solo, solo e elevação.

- A aplicação se estende em várias escalas de trabalho, desde escalas regionais, tais como utilizadas neste projeto, assim como em micro-bacias, em escalas grandes (escalas de levantamento topográfico local).

- A atual configuração dos computadores e dos aplicativos SIG suportam uma grande quantidade de dados para o processamento em curto espaço de tempo.

- A ferramenta SIG possibilita ainda simulação em tempo real e espaço-temporal, simulando casos de emergência, podendo ser utilizada em casos voltados para a Defesa Civil.

- A aplicação se estende do uso em obras lineares como dutovias, podendo ser aplicadas a qualquer caso em que se deseja obter mapas de inundação.

Neste projeto houve uma limitação na elaboração do banco de dados geográficos, onde foram utilizados dados de fontes públicas e gratuitas, no qual nem

sempre possuem grande integridade, ou ainda, pouca riqueza de quando se trata de detalhamento em escalas de trabalho grandes e locais.

As possibilidades que poderão ser exploradas em trabalhos futuros que devem ser testadas com grande chance de êxito e maior riqueza na análise dos dados são referentes ao mapeamento de base, fundamental em qualquer análise SIG. Abaixo são listados os principais itens que devem ser explorados com maior profundidade em trabalhos futuros

- Mapas de solos: o mapa obtido neste projeto, retrata uma condição muito generalizada da realidade quando se quer estudar situações de escoamento superficial, num estudo voltado a análises de dutos, é necessário levantar os dados de solo em campo se possível para obter uma boa acuracidade desta informação. O mapa do IBGE é útil quando se quer identificar os principais pontos de estudo em áreas grandes, como a deste estudo.

- Imagem de satélite e mapa de uso do solo: atualmente existem diversos sensores para os mais diversos tipos de aplicações de mapeamento através de sensoriamento remoto, mas nunca esteve tão prático e rápido obter um excelente mapeamento de uso do solo a partir de sensores de alta resolução espacial. Além de ter disponíveis estes sensores, ainda existem aplicativos poderosos para processar estas imagens com rapidez e acuracidade. Podemos citar exemplos de aplicativos como o ERDAS da Leica Geosystems ou o ENVI da ITT, ambos possuem ferramentas de extração de dados de imagens de alta resolução. Hoje possuímos a disposição cenas do Satélite Quickbird e WorldView, ambos da Digital Globe, assim como o Ikonos, todos com ótima resolução espacial para mapeamentos até a escala 1:5000.

- Obtenção do CN: através das imagens citadas acima, assim como um bom levantamento dos tipos de solos, a acuracidade da taxa de escoamento superficial obtida pelo método CHS aumenta exponencialmente, garantindo o bom resultado em análises de precisão em escalas de até 1:5000.

- Mapas Digitais e recursos de publicação de mapas: com os recursos de publicação de mapas na internet, ou em sistemas locais, é possível dispor os resultados de uma análise como esta em mapas digitais interativos, dando ao usuário maiores oportunidade para explorar os dados das áreas afetadas pela inundação.

Especificamente o resultado deste trabalho, atingiu-se o objetivo de identificar as áreas de risco a inundação próximos aos dutos, porém não é possível explicar o real risco que eles podem correr devido as condições de mapeamento em escala regional e generalizada.

Porém este resultado já minimiza o levantamento de dados e mapas nas escalas grande e detalhadas, já que a obtenção destes dados tem custo elevado, tanto na aquisição de imagens de satélite, custos de levantamento de campo, custos de processamento em gabinete destes dados.

Com este resultado o analista pode se dirigir as áreas identificadas num estudo como este, e obter os dados para uma análise detalhada somente na área que realmente oferece risco.

9. BIBLIOGRAFIA

Abel, D.J.; Kilby, P.J.; Davis, J.R. The systems integration problem. **International Journal Geographical Information Systems**, v.8, n.1, p.1-12, 1994.

Adinarayana, J.; Flach, J.D.; Collins, W.G. Mapping land use patterns in a river catchment using geographical information systems. **Journal Environmental Management**, v.42, n.1, p. 55-61, 1994.

Andrews, S. The National hydrography dataset in SDE: an event and application friendly dynamic segmentation database implementation. Environmental Systems Research Institute. <http://campus.esri.com/campus/library/techpapers>, 2000.

Aronoff, S. Geographic Information Systems: A Management Perspective. Ottawa, WDL Publications, 1995.

Band, L. E. Topographic Partition of Watersheds with Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, v.22, n.1, p.15-24, Jan., 1986.

Bao, J. Using GIS for Hydrologic Data – Processing and Modeling in Texas, CRWR – Online Report 97-4, 1997.<<http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>>

Batty, M.; Xie, Y. Modelling inside GIS: Part 2. Selecting and calibrating urban models using ARC/INFO. **International Journal Geographical Information Systems**, v.8, n. 5, p.451-470, 1994.

Bertoni, J.C.; Tucci, C.E.M. Precipitação. In: Tucci C. E., org. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. Da Universidade: ABRH/EDUSP, 1993.

Bhaskar, N.R.; James, W. P.; Devulapalli, R. S. Hydrological Parameter Estimation Using Geographic Information System. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.118, n.5, p.492-512, 1992.

Block, J. The Use of Historical, Current, and Forecast Weather and Climate Data GIS. Environmental Systems Research Institute. <http://campus.esri.com/campus/library/techpapers>, 2000.

Bracken, I; Webster, C. Towards a typology of geographical information systems. **International Journal Geographical Information Systems**, v.3, n.2, p.137-152, 1989.

Burrough, P.A. Principles of geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Data Structures for Thematic Maps. Oxford Science Publications Monographs on soil and resources, n.12, 1986.

———. & **Frank, A . U.** Concepts and paradigmas in spatial information: are current geographical information systems truly generic? **International Journal Geographical Information Systems**, v. 9, n.2, p.101-116, 1995.

Câmara, G. Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica: Visão Atual e perspectivas de evolução. In: **IV Conferência Latino-americana sobre SIG- 2º Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento** – 7-9 de julho de 1993. SP-Brasil, 1993

———. Desenvolvimento de Sistemas de Informação Geográfica no Brasil: Desafios e Oportunidades. In: **Geoprocessamento: Mitos e Realidade**. Anais da 1ª Segeo – RJ. 1ª Semana Estadual de Geoprocessamento – Rio de Janeiro, 1996.

———. & **Medeiros, C.B.; Casanova, M.A.; Hemerly, A.; Magalhães, G.** Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica. Escola de Computação, SBC, 1996. Livros On line. <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livros.html>.

Campana, N.A . ; Mendiondo, E. M.; Tucci, C.E.M. A Multi-source Approach to Hydrologic Parameter Estimation in Urban Basins. **Water Science Technology**, v.32, n.1, 1995.

Campbell, H. How effective are GIS in practice? A case study of British local government. **International Journal Geographical Information Systems**, v.8, n.3, p. 309-325, 1994.

Carter, J. R. Digital Representations of Topographic Surfaces. **Photographic Engineering and Remote Sensing**, v.54, n.11, p.1577-1580, Nov., 1988.

Chang, M.; Lee, R. Objective double-mass analysis. **Water Resources Research**, v.10, p.1123-1126, 1974.

Chevallier, P. Aquisição e Processamento de Dados. In: Tucci C. E., org. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. Da Universidade: ABRH/EDUSP, 1993.

Choudhry, S., Morad, M. GIS Errors and Surface Hydrologic Modeling: An examination of effects and solutions. **Journal of surveying engineering**, v.124, n.3, Aug., 1998.

Chow, V.T. Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill Book Company, 1964.
217

D´Alge, J.C.L. Cartografia para Geoprocessamento. In: **Geoprocessamento: Teoria e Aplicações**. Editado e organizado por Gilberto Câmara, Clodoveu Davis, Antônio Miguel Vieira Monteiro, João Argemiro Paiva e Júlio César Lima D´Alge, 1999.
<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>.

Dangermond, J. A classification of software components commonly used in geographic information systems. **Design and Implementation of Computer-Based Geographic Information Systems**, 1983.

Davies, C.; Medyckyj-Scott, D. GIS Usability: Recommendations Based on the User's view. **International Journal Geographical Information Systems**, v.8, n.2, p. 175-189, 1994.

Djokic, D.; Ye, Z. DEM Preprocessing for Efficient Watershed Delianeatation. Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems. ESRI Press, 2000.

Dongwei, Y. Transinformation between hydrologic gauges end its application on the rational adjustment of a discharge gauge network. **American Water Resources Association**, p. 569-576, 1993.

Dourado, S.S.S. Exploração do potencial de uma ferramenta de sistemas de informações geográficas na obtenção de parâmetros para modelos de simulação hidrológica. **Dissertação de mestrado apresentado a EP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**. 129p. São Paulo, 1998.

Dugger, A. Linking GIS with the Hydrologic Modeling System: An Investigation of the Midwest Flood of 1993. **Master Report, Department of Civil Engineering, University of Texas at Austin, Texas, 1997.**

Eash, D. A . A geographic information system procedure to quantify drainage-basin characteristics. **Water Resources Bulletin**, v.30, n.1, p.1-8, 1994.

Fairfield, J.; Leymarie, P. Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, v.27, n.5, p.709-717, may, 1991.

Felgueiras, C.A.; Carvalho, P.C.P. Modelagem Numérica de Terreno. In: Geoprocessamento: Teoria e Aplicações. Editado e organizado por Gilberto Câmara, Clodoveu Davis, Antônio Miguel Vieira Monteiro, João Argemiro Paiva e Júlio César Lima D´Alge, 1999. <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>.

———. Modelagem Numérica de Terreno. Introdução à Ciência da Geoinformação. Disponível em http://www.dpi.inpe.Br/Gilberto/livro/introd/cap7_mnt.pdf

Fill, H.D.O. Informações Hidrológicas. In: **Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos**/ Flavio Terra Barth et al./São Paulo:Nobel:ABRH, 1987.

Garbrecht, J.; Martz, L. W. Digital Elevation Model Issues in Water Resources Modeling in: Hydrologic and Hydraulic – Modeling Support. Edited by David Maidment and Dean Djokic, ESRI Press, p.1-27, 2000.

Garrote, L.; Bras, R. L. A distributed model for real time flood forecasting using digital elevation models. **Journal of Hydrology**, v.167, p.279-306, 1995.

Geertman, S.C.M.; Van Eck, J.R. R. GIS and Models of accessibility potential: an application in planning. **International Journal Geographical Information Systems**, v. 9, n.1, p.67-80, 1995.

Goodchild, M. F. Geographic information systems and cartography. **Cartography**, v. 19, n.1, jun., 1990.

Greenlee, D. D Raster and Vector Processing for Scanned Linework. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.53, n.10, Oct., p.1383-1387,

1987.

Haining, R. Designing spatial data analysis in geographical information systems in: Spatial Analysis and GIS. Taylor & Francis edited by Stewart Fotheringham and Peter Rogerson, 1995.

Hay, L.E.; Knapp, L.K. Integrating a Geographic Information System a scientific visualization System and a Precipitation Model. **Water Resources Bulletin**, v.32, n. 2, p.357-369, 1996.

Hellweger, F.L. HEC-PRO A GIS Preprocessor for Lumped Parameter Hydrologic Modeling Programs. CRWR Online Report 97-8, 1997. Disponível em: <<http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>>

Hohl, P. ArcView Exercise Book. OnWord Press, 1996.

Hudgens, B.T.; Maidment, D.R. Determination of Watershed Parameters using Geospatial Data. Environmental Systems Research Institute. <http://campus.esri.com/campus/library/techpapers>, 2000.

Hutchinson, S; Daniel, L. Inside ArcView. OnWord Press, 1995.

Jankowski, P. Integration geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. **International Journal Geographical Information Systems**, v.9, n.3, p.251-273, 1995.

Jenson, S. K.; Domingue, J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v 54, n.11, p.1593-1600, Nov., 1988.

———. Applications of Hydrologic Information Automatically Extracted form Digital Elevation Models. **Hydrological Processes**, v.5, n.1, p.31-44, 1991.

Jones, R.M.; Copas, C.V.; Edmonds, E.A. GIS support for distributed group-work in regional planning. **International Journal Geographical Information Systems**, v.11, n.1, p.53-71, 1997.

Kite, G.W A watershed model using satellite data applied to a mountain basin in Canada. **Journal of Hydrology**, 128, p.157-169, 1991.

———. **& Kouwen, N.** Watershed Modeling Using Land Classifications. **Water Resources Research**, v.28, n.12, p.3193-3200, dec., 1992.

Kraak, M-J; Müller, J-C; Ormeling, F. GIS –cartography: visual decision support for spatio-temporal data handling. **International Journal Geographical Information Systems**, v.9, n.6, p.637-645, 1995.

Laurini, R.; Thompson, D. Fundamentals of Spatial Information Systems. The APIC Series. Academic Press, 680p, 1992.

Lyra, F.J. Um Novo Método para Representação da Hidrografia e das Características da Bacia na Gestão de Recursos Hídricos. **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos**

Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Aracaju-SE, 2001.

Maguire, D.J.; Goodchild, M.F.; Rhind, D.W. Geographical Information Systems: Principles and Applications. Longman Scientific & Technical, Co-published in the United States and Canada, 1993.

Maidment, D. R. GIS and Hydrologic Modeling. First International Symposium /Workshop on GIS and Environmental Modeling, Boulder, Colorado, USA, 1992a.

———. The definition of a Watershed Data Structure. GIS in Hydraulics, Hydrology and Water Resources, course presented at CEHPAR Federal University of Parana, Curitiba, Brasil, 1992 b.

———. Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, INC, 1993.

———. **& Djokic, D.** Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems. ESRI Press, 2000.

———. Watershed and Stream Network Delineation Using Digital Elevation Models. Curso Spatial Hydrology Using ArcView GIS. Cursos on line, disponível em

<http://campus.esri.com/courses/hydrology/>, 2001.

Marble, D. F. Geographic information systems: an overview. Proceedings, Pecora 9 Conference, Sioux Falls, S. D., p.18-24, 1984.

Marcellini, S.S., Dias, N.L. Implementação do Sistema de Controle de Qualidade Objetivo do Simepar: Testes Preliminares. **XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos** - 16 a 20 de novembro, Vitória – ES, 1997

Martz, L.W; De Jong CATCH: a Fortran Program for Measuring Catchment Área from Digital Elevation Models. **Computers and Geosciences**, v.14,n.5, p.627-640, 1988.

Mason, D.C.; O’Conaill, M.A.; Bell, S.B. Handling four-dimensional geo-referenced data in environmental GIS. **International Journal Geographical Information Systems**, v.8, n.2, p.191-215, 1994.

Mendes, C.A.B.; Cirilo, J.A. Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2001.

Meyer, S.P.; Salem, T.H.; Labadie, J.W. Geographic Information Systems in Urban Storm-Water Management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.119, n.2, p.206-228, 1993.

Mitas, L., Mitasova, H. Spatial Interpolation. In: P. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire, D.W. (Eds.). **Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications**, Wiley, 1999.

Mitasova, H.; Mitas, L. Interpolation by Regularized Spline with Tension: I. Theory and Implementation. **Mathematical Geology**, v.25, n.6, p.641-655, 1993.

———. **& Hofierka, J.** Interpolation by Regularized Spline with Tension: II. Application to Terrain Modeling and Surface Geometry Analysis. **Mathematical Geology**, v.25, p.657-669, 1993.

Moore, I.D.; Grayson, R.B.; Ladson, A. R. Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological and Biological Applications. **Hydrological Processes**, v.5, n.1, p.3-30, 1991.

Moxey, A.; Allanson, P. Areal interpolation of spatially extensive variables: A comparison of alternative techniques. **International Journal Geographical Information Systems**, v.8, n.5, p.479-487, 1994.

Müller, M; Garcia, K.S. Modelos Digitais de Terreno em Escalas Globais e sua Utilização em Recursos Hídricos. **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa**. Aracaju-SE.2001.

Olivera, F.; Maidment, D.R.; Charbeneau, R.J. Spatially Distributed Modeling of Storm Runoff and Non-Point Source Pollution using Geographic Information Systems. Center for Research in Water Resources (CRWR) Online Report 96-4, December, 1996 . .<<http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>>

Ottlé, C.; Madjar, V.; Girard, G. Remote Sensing Applications to Hydrological Modelling. **Journal of Hydrology**, v.105, p.369-384, 1989.

Papadias, D.; Theodoridis, Y. Spatial relations, minimum bounding rectangles, and spatial data structures. **International Journal Geographical Information Systems**, v. 11, n.2, p.111-138, 1997.

Paiva, J.B; Paiva, E.M.C.D Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001.

Pascoe, R.T.; Penny, J.P. Constructing Interfaces between (and within) Geographical Information Systems. **International Journal Geographical Information Systems**, v.9, n.3, p.275-291, 1995.

Perez, A. Source Water Protection Project: A Comparison of Watershed Delineation Methods in Arc/Info and ArcView GIS. Paper 3. **Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems**. ESRI Press, 2000.

Peuquet, D.J. A conceptual framework and comparison of spatial data models. **Cartographica**, v.21, p. 66-113, 1984.

Pinto, N.L.S; Holtz, A.C.T; Martins, J.A.; Gomide, F.L.S Hidrologia Básica. São

Paulo. Edgard Blücher Ltda, 278p., 1976.

Quintanilha, J. A. Conversão e Modelagem de Dados Espaciais. Sagres Editora Ltda. Revista Fator GIS, 1996.

———. Erros em Bases Digitais de Dados Espaciais para uso em Sistemas de Informação Geográfica. **Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia**, 1996.

Ravazi, Amir, Warwick, V. ArcView GIS/Avenue programmer's reference: class hierarchy quick reference and 101 + scripts. OnWord Press, 1997.

Rea, A. Development of National Watershed Boundaries Dataset. Technical Papers Environmental Systems Research Institute. <http://campus.esri.com/campus/library/techpapers>, 2000.

Reed, S. M.; Maidment, D.R. A GIS procedure for Merging NEXRAD Precipitation Data and Digital Elevation Models to Determine Rainfall-Runoff Modeling Parameters. Center for Research in Water Resources (CRWR) Online Report 95-3, September, 1995. <<http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>>

———. & **Maidment, D.R.; Patoux, J.** Spatial Water Balance of Texas. Center for Research in Water Resources (CRWR) Online Report 97-1, Austin, Texas, February, 1997. <<http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>>

Rhind, D.W.; Green, N.A. Design of a geographical information system for a heterogeneous scientific community. **International Journal Geographical Information Systems**, v.2, n.2, p.171-189, 1988.

Rodrigues, M. A Sistemas de Informação Geográfica. In: Programa de transferência de tecnologia GIS. **Workshops. Escola Politécnica da USP e SABESP**, 1998.

Rosenthal, W.D.; Srinivasan, R.; Arnold, J.G. Alternative River Management Using a Linked GIS-Hydrology Model. **Transaction ASCE**, v.38, n.3, p.783-790, 1995.

Ross, M.A. ; Tara, P.D. Integrated Hydrologic With Geographic Information Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.119, n.2, p.129-140,

1993.

Rubert, O.A.V. Codificação Automática de Regiões Hidrográficas Utilizando Sistemas de Informações Geográficas. **Tese de Mestrado. Viçosa, MG:UFV;DEA.2000.54p.**

———. & **Figueiredo, L.C.C.** Divisão Hidrográfica Nacional – Aplicação da Metodologia de Otto Pfafstetter. **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa.** Aracaju-SE.2001.

Rufino, I.A.A.; Paiva, A.E.D.B.; Batista, M.E.M.; Bandeira, M.M. Atualização da Hidrografia do Estado da Paraíba Utilizando Processamento Digital de Imagens e Geoprocessamento. XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Aracaju-SE.2001.

Salomonsson, O. Methodological demands on a planning-oriented spatial information system. SORSA, Segment-Oriented International Referencing System Association, 1978.

Saunders, W. Preparation of DEMs for Use in Environmental Modeling Analysis. Paper 2. **Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems.** ESRI Press, 2000.

Schmidt, M. G.; Schreier, H.E.; Shah, P.B. A GIS evaluation of land use dynamics and forest soil fertility in a watershed in Nepal. **International Journal Geographical Information Systems**, v.9, n.3, p.317-327, 1995.

Schulz, G. A. Parameter determination and input estimation in rainfall-runoff modeling based on remote sensing techniques. **Water for the Future: Hydrology in Perspective (Proceedings of the Rome Symposium, April 1987).** IAHS Publ. N. 164, 1987.

Scoolmaster, F.A ; Marr, P.G. Geographic Information Systems as a Tool in Water Use Data Management. **Water Resources Bulletin**, v.28, n.2, p.331-336, 1992.

Setzer, J.; Porto, R. L. L Tentativa de avaliação de escoamento superficial de acordo

com o solo e o seu recobrimento vegetal nas condições do Estado de São Paulo.

Boletim Técnico DAEE, v2., n.2, p82-135, maio-agosto 1979.

Shafer, M. A., Hughes, T.W. Automated Quality Assurance of Data from the Oklahoma Mesonet. American Meteorological Society, Boston, Mass, 1996.

Shea, C.; Grayman, W.; Darden, D.; Males, R.M.; Sushinsky, P. Integrated GIS and Hydrologic Modeling for Countywide Drainage Study. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.119, n.2, p.112-128, 1993.

Short Jr., N.M.; Dickens, L. Automatic generation of products from terabyte-size geographic information systems using planning and scheduling. **International Journal Geographical Information Systems**, v.9, n.1, p.47-65, 1995.

Silva, A. B. Sistemas de Informações Geo-referenciadas: **Conceitos e Fundamentos**. Editora da Unicamp, 236p, 1999.

Simonovic, S. P. Flood control management by integrating GIS with expert systems: Winnipeg City case study. HydroGIS93: **Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources (proceedings of the Vienna Conference, April 1993)**. IAHS Publ. n.211, 1993.

Smith, P.N.; Maidment, D.R. Hydrologic Data Development System. Center for Research in Water Resources (CRWR) Online Report 95-1, Austin, Texas, 1995.
<<http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>>

Souza, J.M.; Ramirez, M.; Ferrari, R.; Duarte, M.P.C. Uma Arquitetura Organizacional para Sistemas de Informação Geográfica Orientados a Objetos. In: **IV Conferência Latinoamericana sobre SIG- 2º Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento** – 7-9 de julho de 1993. SP-Brasil, 1993.

Star, J.; Estes, J. Geographic Information Systems an Introduction. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey , 1990.

Sznaider, R. Real-Time International Weather Data in GIS Format. Environmental Systems Research Institute. <http://campus.esri.com/campus/library/techpapers>, .2000.

Tao, T. ; Kowen, N. Remote sensing and fully distributed modeling for flood forecasting. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.115, n.6, Nov., 1989.

Tarboton, D.G.; Bras, R.L.; Rodriguez-Iturbe, I. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data: Hydrological Processes, v.5, n.1, p.81-100, 1991

Teixeira, A.L.A, Christofolletti, A. Sistemas de Informação Geográfica – **Dicionário Ilustrado**. Editora Hucitec. São Paulo, 244p., 1997.

Tomlinson, R. F. Geographic Information Systems – a new frontier. **Operational Geographer**, v.5, p. 31-35, 1984.

———. Na Overview: The Future of GIS. **ESRI ArcNews Winter**. v.21, n.4, 1999/2000.

Tsihrintzis, V. A .; Hamid, R.; Fuentes, H.R. Use of Geographic Information Systems (GIS) in Water Resources. A review. **Water Resources Management**, v.10, n.4, p.251-277, 1996.

Tucci, C.E.M.; Beltrame, L.F.S. Evaporação e Evapotranspiração. In: Tucci C. E., org. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Ed. Da Universidade: ABRH/EDUSP, 1993.

Ye, Z.; Maidment, D.R.; McKinney, D.C. Map-based Surface and Subsurface Flow Simulation Models: an object oriented and GIS Center for Research in Water Resources (CRWR) Online Report 96-5, Austin, Texas, August, 1996 .
<<http://www.ce.utexas.edu/centers/crwr/reports/online.html>>

Worboys, M.F. Object-oriented approaches to geo-referenced information. **International Journal Geographical Information Systems**, v.8, n.4, p.385-399, 1994.

Zech, Y. Sillen, X.; Debources, C.; Van-Hauwaert, A . Rainfall-runoff Modelling of Partly Urbanized Watersheds: Comparison Between a Distributed Model Using GIS and other Models Sensitivity Analysis. **Water Science Technology**, v.29, n.1-2, 1994.