

UMA AVALIAÇÃO DE DISTINTAS METODOLOGIAS PARA EXTRAÇÃO  
DE INFORMAÇÕES TOPOGRÁFICAS UTILIZANDO UM MODELO  
NUMÉRICO DO TERRENO E O ALGORITMO DE UM MODELO  
HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO

JOSETE DE FÁTIMA DE SÁ<sup>1</sup>

ALFONSO RISSO<sup>2</sup>

VITOR HAERTEL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>COORDENAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BAHIA - CRH/BA  
Av. Sussuarana, 630 3º andar - Salvador - BA  
CEP: 41217-260

<sup>2</sup>CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA -  
CEPRSM/UFRGS  
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Cx. Postal 15044  
CEP: 91501-970

<sup>3</sup>CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA -  
CEPRSM/UFRGS  
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Cx. Postal 15044  
CEP. 91501-970

**Resumo.** Muitos modelos hidrológicos necessitam descrever a distribuição espacial dos atributos topográficos de uma bacia hidrográfica. Estas informações referem-se às declividades, direção da declividade mais íngreme e do relevo para cada elemento de uma grade de células retangulares sob a qual estão baseados os modelos. O propósito deste trabalho é avaliar diferentes formas de utilização do Sistema de Informações Geográficas (SIG) na extração de informações para modelos, com algumas implementações na metodologia tradicional e com a utilização de um Modelo Numérico do Terreno. As aplicações destas metodologias são feitas a duas sub-bacias no Estado do Rio Grande do Sul, com características distintas. Os resultados são comparados e discute-se a validade para cada caso.

**Abstract.** Many hydrologic models need to describe spacial distribution of the topographic attributes of a watershed. These informations refer to slopes, aspects and relief to each other elements of rectangular cells network on which are based the models. This paper proposes to evaluate different procedures towards the use of Geographic Information System (GIS) in extracting information to models, implementing either in traditional procedure or by the use of a Digital Terrain Models. The applications of these methodologies are applied in two small basins in the state of Rio Grande do Sul, with distinct features. Results are compared and discussed in which it may concern their validity to other cases.

## INTRODUÇÃO

Os atributos topográficos de uma bacia hidrográfica são os fatores de maior impacto nos processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos ocorrendo no terreno. A distribuição espacial destes atributos podem ser usadas como uma medição indireta da variabilidade destes processos permitindo mapeá-los usando técnicas relativamente simples. Os sistemas de informações geográficas têm sido desenvolvidos para armazenamento das informações geográficas como dados básicos de análises de fontes hídricas e a topografia pode ser usada para desenvolver fisicamente, estruturas realísticas de modelos hidrológicos. Os modelos numéricos do terreno são essenciais na análise da topografia das bacias.

Uma grande deficiência de muitos modelos em uso, é a incapacidade para representar os efeitos tridimensionais em processos de escoamento e a variabilidade espacial de processos hidrológicos com simplificações grosseiras, e muitas vezes não realísticas. Em resposta a este desafio, estão sendo desenvolvidos métodos para representar digitalmente o terreno em modelos hidrológicos.

### MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO

Os modelos com base de processos dinâmicos podem ser melhor estruturados se a bacia hidrográfica for subdividida em

células formando uma grade. Um exemplo de modelo baseado nesta estrutura é o modelo ANSWERS-Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation (Beasley e Huggins, 1981), um modelo determinístico, conceitual e distribuído, desenvolvido para estudar o impacto do uso do solo, prática conservacionista e manejo na bacia da qualidade de água.

ANSWERS utiliza o conceito de parâmetros distribuídos e é orientado par eventos determinados.

Estas características operacionais geralmente produzem uma melhor compreensão das interações hidrológicas e qualidade da água envolvidas na bacia, pois permite ao usuário a descrição física destes processo espacial e temporalmente. Sua natureza distribuída apresenta como principal vantagem a possibilidade de representar com uma precisão maior as variações espaciais dos parâmetros e variáveis do sistema.

Neste modelo, um fator de ponderação é derivado do particionamento de uma célula com base na linha mais íngreme. Um problema com estas aproximações é que o escoamento não necessariamente segue a linha de maior declive com as estimativas resultantes das características de escoamento (por ex., a profundidade e a velocidade do escoamento) são difíceis de serem interpretados fisicamente. ANSWERS usa um programa de pré-processamento, ELEVAA para gerar as declividades e direções do modelo numérico do terreno com

base de grade para entrada no modelo. O programa ELEVAA necessita que as altitudes dos vértices de cada elemento sejam dadas para calcular as declividades e direções do escoamento para cada elemento e, então estabelece o formato completo para o arquivo de dados elementares. O uso de estrutura de grade apresenta também a vantagem de permitir que dados de sensoriamento remoto baseado em pixéis, tais como tipos de vegetação e cobertura, sejam usados para estimar os parâmetros do modelo em cada elemento ou célula devido a compatibilidade inerente às duas estruturas.

#### **SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS**

Os sistemas de informações e banco de dados para endereçamento de recursos e problemas ambientais devem ser capazes de integrar a informação espacial das diversas áreas representativas e deve ser capaz ser interfaceado com modelos e outros instrumentos analíticos usados para a análise. O Sistema de Informações Geográficas (SIG) é um instrumento básico para manipulação, armazenamento e acesso a estes dados, uma vez que: integra espacialmente com outras informações dentro de um sistema simples; oferece uma estrutura consistente para análise da variação espacial que cruza o terreno; permite conhecimento geográfico para ser manipulado e exposto em

vários formatos, inclusive mapas; permite interações entre atributos de base geográfica que são vitais para compreensão e gerenciamento das atividades. O SIG baseia-se em estrutura celular ou pixel, uma vez que os métodos baseados em grade de análise do terreno proporcionam um dado geográfico básico e pode ser integrado nestas análises de subsistemas. (Moore et al., 1991).

Uma das razões que a tecnologia tem sido utilizada é devido ao fato de permitir que a informação espacial seja exposta de forma integrada, facilmente compreensíveis e visuais. A distribuição espacial dos atributos e índices podem ser dispostos como isolinhas ou mapas planimétricos coloridos, projeções isométricas ou numericamente na forma acumulada, área ponderada ou distribuição de frequências.

#### **MODELO NUMÉRICO DO TERRENO**

Uma matriz ordenada de números que representam a distribuição espacial de determinado atributo do terreno caracteriza um Modelo Numérico do Terreno (MNT). Se a matriz ordenada de números representa a distribuição espacial das altitudes acima de alguma referência arbitrária de um terreno, então tem-se um Modelo de Altitude do Terreno. As informações referentes às altitudes podem ser descritas através de funções matematicamente definidas ou, de uma forma discretizada por

pontos e/ou linhas. Os MNTs podem ser desenvolvidos segundo dois modelos básicos: modelos de linhas e modelos de pontos. Os primeiros, modelos de isolinhas como são chamados não se adequam muito ao cálculo de declividades e da orientação azimutal de cada ponto da superfície, para isso, costuma-se convertê-lo de modelo de linha para o formato de uma matriz de altitude discretizada (modelo de ponto). Os modelos de pontos são os mais comuns para representar um MNT, chamado de matriz de altitude ou grade regular retangular. Este tipo de modelo permite a geração de isolinhas, de ângulos de declividades e orientação, de sombreado de relevo e delineamento de bacias. (Risso, 1993).

Em se tratando de modelagem de altitudes de superfície, o interpolador considerado mais apropriado é o interpolador de variação espacial gradual, descrito por uma superfície contínua matematicamente definida, de ajuste local que é mais indicado para o estudo de fenômenos com pequeno intervalo de variação, do tipo média móvel que consiste no cálculo da média dos valores amostrados em sua vizinhança para obter-se o valor a ser interpolado. É feita uma ponderação referente a distância entre os pontos amostrados e o ponto a ser estimado, consideram-se também outros fatores visando otimizar o tempo de computação para geração de uma matriz de altitudes.

## BACIAS SELECIONADAS

Foram selecionadas duas sub-bacias no estado do Rio Grande do Sul: uma sub-bacia do Rio Forquetinha de área  $0,55 \text{ km}^2$  e declividade acentuada (média de 30%) entre  $29^{\circ}15'$  e  $29^{\circ}30'$  de Latitude Sul entre  $52^{\circ}00'$  e  $52^{\circ}30'$  de Longitude Oeste; a outra, bacia do Donato é sub-bacia do Rio Potiribu de  $1,1 \text{ km}^2$  e declividade suave ondulada (média de 7%) entre  $28^{\circ}25'20''$  e  $28^{\circ}25'30''$  de Latitude Sul entre  $53^{\circ}40'25''$  e  $53^{\circ}40'30''$  de Longitude Oeste. Estas bacias foram escolhidas para se observar as metodologias aplicadas em dimensões e relevos distintos.

## MATERIAL UTILIZADO

Para a sub-bacia do Rio Forquetinha, utilizou-se os dados do levantamento planialtimétrico, na escala 1:2500, com curvas de nível intervaladas de 10 m.

Para a bacia do Donato, utilizou-se a carta planialtimétrica da região do arroio Taboão (Folha MI-2915/4) na escala 1:50000, com curvas de nível intervaladas de 20 m. O equipamento necessário foi um microcomputador PC-AT 386, com disco rígido de 55 Mb, com o software SGI (Sistema Geográfico de Informações) instalado, traçador gráfico e mesa digitalizadora de formato A0, ligado em rede local.

## **METODOLOGIAS**

O modelo ANSWERS requisita como entrada entre outros parâmetros para cada elemento, a declividade e a direção do escoamento. Aqueles que contém canais devem ser identificados e o elemento exutório (saída da bacia) devem ser conhecidos. O último será identificado no arquivo de dados gerais e os anteriores no arquivo de dados elementares.

A primeira fase das duas metodologias consiste na preparação da matriz de altitudes ou grade regular e das saídas visuais através do SGI. Na segunda fase diferenciam-se os procedimentos: da forma tradicional utilizando o programa ELEVAA e através da análise digital do MNT. A seguir são descritas cada fase:

### **Preparação das Grades no SGI**

Primeiramente é necessário que os mapas sejam digitalizados criando um arquivo de pontos no SGI. Estes devem ser organizados através de outra função do sistema e, em seguida são geradas as grades regulares nas resoluções desejadas, criando os arquivos .GRD.

Para a visualização das direções do escoamento, chamados no SGI de aspectos, serão apresentados em níveis de cinza ou cores selecionadas, conforme o ângulo formado com o eixo horizontal, no sentido anti-horário, agrupados em 256

níveis de intervalos iguais ou de intervalos determinados para o caso da seleção de cores (fatiamento). Também as declividades podem ser apresentadas em níveis de cinza ou cores selecionadas para intervalos determinados (fatiamento). Esta exposição visual permite ao usuário um supervisionamento das curvas digitalizadas e também auxilia no sentimento da topografia da região em estudo. No caso de se obter os mapas de declividades e aspectos, os arquivos de grade devem ser refinados. Estes planos de informação (PIs) são obtidos em formato imagem e não em formato grade (digital) como seria o ideal para a obtenção do arquivo de elementos do modelo ANSWERS.

No caso da grade de altitudes para o MNT não há necessidade do mascaramento, ou seja, o cruzamento do PI que contém o contorno da bacia obtido também por digitalização e o PI da grade de altitudes. O primeiro PI é a máscara e é do tipo imagem, o outro é tipo grade. Este procedimento se faz necessário para a criação do arquivo de entrada no programa ELEVAA.

Preparados os arquivos de grade mascarada e grade de altitudes completa, passa-se para a fase específica seguinte. A Tabela I apresenta os arquivos gerados com as matrizes e número de elementos correspondentes. As siglas FOA corresponde a sub-bacia A do Rio Forquetinha e DON a bacia do Donato.

TABELA I - Grades de Altitudes Completas e Mascaradas

Arquivo	Reso-		
Completa	N° de	Mascarada	
N° de			
	lução	lin	
col elementos	lin	col	
elementos			

**Topografia obtida pelo ELEVAA**

O arquivo de entrada do programa ELEVAA requisita as cotas dos vértices dos elementos da grade a ser considerada com a resolução definida para a simulação no modelo ANSWERS. Portanto, a grade que fornece as cotas dos vértices deve ter os elementos menores do que os referentes a resolução considerada, ou seja, deve-se trabalhar com uma resolução maior que a resolução da simulação. Por exemplo, para o estudo, as simulações no modelo são efetuadas com resolução de 25 m e de 50 m, logo os vértices são tirados da grade de resolução 10 m. Uma pequena subrotina lê esta grade e seleciona os vértices montando, assim o arquivo desejado.

O algoritmo que calcula as declividades neste programa de pré-processamento é o que segue:

1. Calculam-se as cotas corrigidas dos vértices, de forma que a quadricula forme um plano, mantendo a mesma cota média da quadricula original. Determinam-se duas retas: V1-V3 (diagonal do vértice de maior e menor cota, dado V1 o de maior cota) e V2-V4 (diagonal dos outros dois vértices, com V4 maior que V2);
2. As cotas são corrigidas para que estas diagonais se cruzem coincidindo com a cota média do elemento. A cota média é a média das cotas dos quatro vértices, obtidas por:

$$\begin{aligned}
 CM &= (C1 + C2 + C3 + C4) / 4 & (1) \\
 DEL1 &= ((C1 + C3) / 2) - CM & (2) \\
 DEL2 &= ((C2 + C4) / 2) - CM & (3) \\
 Z1 &= C1 - DEL1 & (4) \\
 Z2 &= C2 - DEL2 & (5)
 \end{aligned}$$

FOA-??10.GRD	10	103	01	8343	99	78
	7722					
FOA-??25.GRD	25	42	33	1386	40	31
	1240					
FOA-??50.GRD	50	21	17	357	19	15
285						
DON-??10.GRD	10	300	300	90000	125	148
	18500					
DON-??30.GRD	30	100	100	10000	42	50
	2100					
DON-??10.GRD	60	50	50	2500	20	25
500						

Z3 = C3 - DEL1  
 (6)  
 Z4 = C4 - DEL2  
 (7)

onde: C1, C2, C3, C4 são as cotas medidas dos vértices;

Z1, Z2, Z3, Z4 são as cotas corrigidas dos vértices.

3. A declividade é calculada por:

$$S = \frac{\{(Z1-Z2) + [(Z3-Z4)*(Z2-Z3)/(Z1-Z2)]\}}{A} \quad (8)$$

onde:  $A = \{[1+(Z2-Z3)^2/(Z1-Z4)^2]\}^{1/2} * a$

curvas de níveis estejam extrapoladas de seus limites. As subrotinas utilizadas foram desenvolvidas por Risso (1993), a partir dos algoritmos para simular o escoamento das águas sobre um MNT, propostos por Mark et al. (1984) (apud Risso, 1993) e Jenson et al. (1988). Tal algoritmo assemelha-se à definição do teorema de Cauchy que estabelece a menor distância entre qualquer ponto sobre uma superfície curva e um ponto de cota inferior a ele, como sendo a linha de descenso mas íngreme. A partir desta definição, a altitude de cada célula é comparada às de suas oito vizinhas mais próximas dentro de uma janela de 3x3 células. A célula vizinha na qual o gradiente é maior, é identificada e o acúmulo de água (expresso através do número de células atravessadas e a área de cada célula) é marcado na célula central. O processo é repetido para todas

a = resolução do elemento.

A declividade média da bacia é calculada como a média das declividades das quadrículas. As declividades e as direções do escoamento são obtidas e organizadas no formato do arquivo de entrada do ANSWERS.

### Extração da Topografia pelo MNT

As grades que serão analisadas pelo algoritmo do MNT são as grades completas, isto porque o próprio algoritmo definirá os divisores da bacia necessitando assim, que as células. As linhas de drenagem podem ser codificadas numa escala de níveis de cinza de acordo com o volume de água que passe por elas. Na determinação dos divisores de água é proposto um procedimento a partir do cálculo do gradiente local e da orientação de cada célula. Um dos principais problemas nesta análise são as depressões do terreno, geralmente decorrente de "ruídos" originados no processo de digitalização ou interpolação e estão sempre presentes em qualquer MNT em estado bruto, uma vez que este é uma representação discreta do terreno. Estas depressões devem ser preenchidas antes de se estabelecer o fluxo de drenagem (Risso, 1993). A série de subrotinas elaboradas, segundo estas definições estão associadas ao SGI, sendo:

suavização: suaviza a matriz de altitudes buscando preencher as depressões presentes;

orientação: cria uma matriz derivada do MNT, representando as orientações de cada célula, de forma simples, define a orientação do sentido da maior declividade ao qual cada célula do MNT aponta;

acúmulo: possuindo a matriz referente às orientações, esta rotina traça a rede de drenagem do terreno, em função do número de células atravessadas para chegar a uma célula em questão e em função da área de cada pixel;

ADBG: esta segue o algoritmo de Mark (1984) para definir os divisores de água.

Assim, são obtidas as declividades e direções do escoamento em PIs tipo grade que são, então passadas para o formato do arquivo de entrada dos dados elementares do modelo ANSWERS.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em primeira análise, as metodologias propostas para obtenção do arquivo elementar do modelo ANSWERS, destacam as implementações necessárias e as diferenças de algoritmo de cada um, sem se aprofundar nas análises dos resultados hidrológicos finais do modelo propriamente dito.

Com respeito ao algoritmo do programa ELEVAA algumas dificuldades surgidas são comentada a seguir:

1. Algumas direções de declividades calculadas são insatisfeitas e necessitam ser

manualmente editadas, especialmente os limites da bacia. Em alguns casos de relevos se faz necessário, digitalizar um mapa da rede de drenagem de maneira a obter um PI de drenagem do tipo imagem que poderá orientar onde devem ser alteradas as direções, sendo possível utilizar um procedimento computacional capaz de efetuar esta verificação no PI conhecido e no PI obtido pelo ELEVAA evitando assim, o trabalho manual.

2. O elemento exutório deve ser especificado como canal. Deve-se obter esta informação do PI de drenagem.

3. Os elementos localizados próximos dos canais de escoamento não têm direções apropriados devido as irregularidades topográficas ao longo de um canal.

4. Surgem problemas com a saída do programa para regiões planas ou mesmo com depressões.

Os algoritmos de análise do MNT apresentam algumas desvantagens citadas abaixo:

1. Ocorre redundância de informação a ser armazenada em áreas de relevo uniforme.

2. A incapacidade de modificar o tamanho das células da grade em áreas onde o relevo da superfície é mais acidentado requerendo uma maior densidade de pontos.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A obtenção dos atributos topográficos dos PIs obtidos pelo SGI demonstraram sensíveis benefícios em termos de tempo e



precisão na montagem dos arquivos do modelo distribuído ANSWERS permitindo que várias análises sejam feitas com variação da escala.

Embora as primeiras avaliações detectem muitos problemas no algoritmo do programa ELEVA, as implementações sugeridas com a associação do SGI dão condições de uma investigação maior em seu algoritmo para possíveis alterações.

De modo geral, os algoritmos do MNT apresentam-se mais eficientes na definição dos arquivos de entrada do ANSWERS tanto em tempo de execução quanto em precisão.

Este estudo é a parte inicial das avaliações no que diz respeito a modelos distribuídos sendo a continuidade deste, a análise dos resultados em função da variação das resoluções observando a compatibilidade também com a escala dos mapas digitalizados e com o tipo do relevo da região.

#### **AGRADECIMENTOS**

A execução deste trabalho só foi possível com a utilização dos equipamentos existentes no CEPARM e da experiência de seus técnicos.

Os autores agradecem também aos auxílios prestados pela CRH/BA.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BEASLEY, D. B., HUGGINS, L. F.,  
MONKE, E. J. 1981. ANSWERS:  
user's manual. Chicago: U.S.  
Environmental Protection  
Agency. 54p.

GOLDENFUM, J. A. 1991. *Simulação hidrossedimentológica em pequenas bacias rurais*. Porto Alegre: UFRGS- Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 112p. - Diss. Mestr. Engenharia Civil.

JENSON, S., DOMINGUE, J. O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Fall Church, v.55, n.6, p.911-917, Jun.

JENSON, S. K. 1991. Applications of hydrologic information automatically extracted from digital elevation models. *Hydrological Processes*. Chinchester, v.5, n.1, P.31-44, Jan-Mar.

MOORE, I. D., GRAYSON, R. B.,  
LADSON, A. R. 1991. Digital terrain modelling: review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, Chinchester, v.5, p. 3-30.

RISSE, A. 1993. *Obtenção e manipulação dos parâmetros da Equação Universal de perda de solos através de técnicas de geoprocessamento*. Porto Alegre: UFRGS - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 162p. Diss. Mestr. Engenharia Civil.