

**INTEGRAÇÃO DE MODELOS  
HIDROLÓGICOS E SISTEMAS DE  
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS :  
FUNDAMENTOS**

Carlos André Bulhões Mendes

**CARLOS ANDRÉ BULHÕES MENDES**

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas*

*Av. Bento Gonçalves 9500 Caixa Postal 15029*

*CEP 91501-970 Porto Alegre - RS*

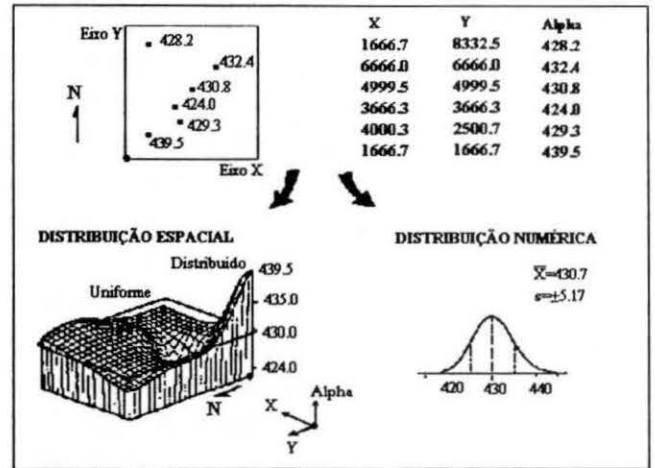
*E-mail : mendes@ifl.if.ufrgs.br*

**RESUMO**

As variáveis hidrológicas, em cada ponto, dentro da bacia hidrográfica estão associadas a seus valores médios através de alguma distribuição de probabilidade. Estes valores atuam como a menor informação discernível, que pode representar uma superfície contínua (bacia hidrográfica). Os dados resultantes deste processo (superfície contínua ⇒ valores médios discretizados) são facilmente manipulados através de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Este artigo explica como a integração entre modelos hidrológicos e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) pode ser obtida. Os resultados apresentados neste artigo têm somente a intenção de demonstrar a utilidade operacional destas técnicas.

**VARIABILIDADE ESPACIAL DO MEIO AMBIENTE**

Uma das características principais do meio ambiente é a grande variabilidade espacial de suas propriedades. Em geral, amostras destas propriedades são coletadas pontualmente no terreno, sendo então adotado, através de uma análise estatística, por exemplo, que elas têm um distribuição uniforme no terreno, conforme ilustrado na figura 1. O problema desta abordagem é que a natureza é espacialmente não-uniforme, sendo necessário incorporar mais informações espaciais para permitir uma representação mais realística do meio ambiente (figura 1).



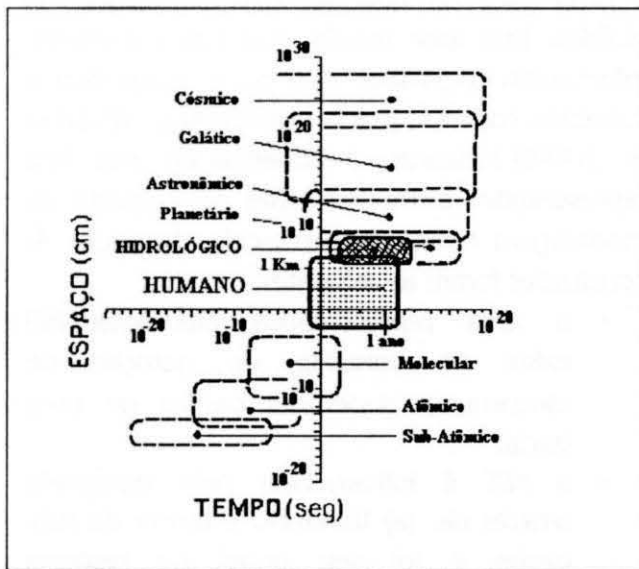
**VARIAÇÃO ESPACIAL DE DADOS** **Figura 1**

Uma bacia hidrográfica pode ser tratada como sendo a composição de numerosos (infinitos) pontos onde: precipitação, infiltração, evaporação e escoamento formam um balanço hídrico local. Cada ponto nesta superfície contínua (bacia hidrográfica) pode ser associado a uma área na qual os valores médios são obtidos. Esta área média atua como a menor informação discernível, que pode representar a superfície contínua (bacia hidrográfica). Wood et al., (1988) indicaram a existência de uma área representativa elementar (ARE) no contexto da modelagem hidrológica e escala de bacia. As conclusões foram as seguintes:

- a área representativa elementar (ARE) existe no contexto de geração do escoamento superficial dentro de uma bacia;
- a ARE é influenciada pela topografia através de: (a) tamanho e forma de sub-bacias e (b) seu papel na resposta hidrológica; e
- a variabilidade de solos e precipitação entre sub-bacias tem um papel secundário na determinação da ARE.

As funções que descrevem o fenômeno físico (transformação de precipitação em escoamento, por exemplo) são extremamente dependentes da escala (espaço e tempo) em

que é observado o fenômeno. A determinação de relações, descrevendo os processos físicos, em escalas de interesse prático (horas ou dias ao invés de segundos, por exemplo) ou a conexão analítica dos fenômenos que ocorrem em uma determinada escala com relações que descrevem estes fenômenos em outra escala, são problemáticas. A figura 2 apresenta as diferentes escalas espaço-tempo onde a maioria dos fenômenos ocorrem. Klemes (1983) sugere que a causa do nosso pouco entendimento dos processos em uma escala hidrológica é devido a mesma estar fora da compreensão dos fenômenos de uma escala humana, isto é, os fenômenos hidrológicos e humanos apresentam pouca interseção resultando diferentes escalas de tempo e espaço, conforme a figura 2.

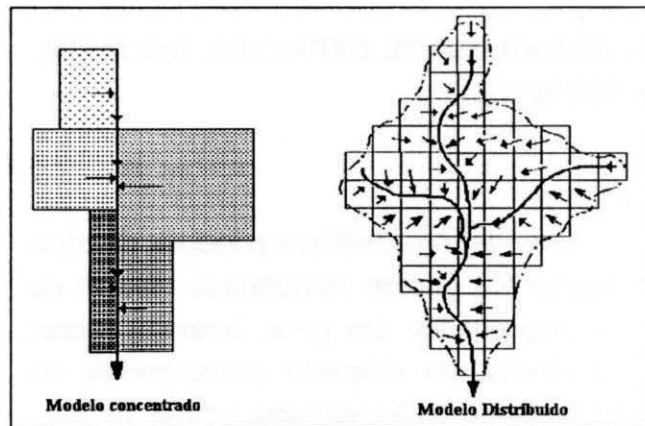


**DIFERENTES ESCALAS PARA VÁRIOS FENÔMENOS** Figura 2  
Adaptado : Klemes (1983)

Dooge (1982) apresentou diferentes formas para a modelagem hidrológica em diferentes escalas. Os resultados deste autor indicaram que os fenômenos hidrológicos

podem ocorrer em duas escalas: (1) uma escala de campo (10-100 ha) e (2) uma escala de bacia (10-1000 km<sup>2</sup>).

Atualmente existem críticas (Walling, 1983) quanto à utilização de modelos concentrados como forma de representação dos processos hidrológicos. Os modelos distribuídos são uma tentativa de melhor adequar os problemas de escala a modelagem hidrológica. A figura 3 apresenta as formas dos modelos concentrados e distribuídos. Um modelo é dito concentrado quando seus parâmetros e variáveis apresentam variação com o tempo sendo a variabilidade espacial representada com um único valor médio, o que é uma simplificação muito grande da realidade. Os modelos distribuídos subdividem a bacia em elementos que são considerados homogêneos quanto às propriedades avaliadas, representando, além da variação temporal, a variabilidade espacial do sistema físico



**REPRESENTAÇÃO BÁSICA DOS MODELOS HIDROLÓGICOS** Figura 3

Muitos sistemas concentrados continuam sendo utilizados. Através da análise de seus resultados observa-se :

- a distribuição espacial dos dados necessários ao modelo é bastante variável,

sendo a substituição por valores médios uma grande simplificação; e

- o problema da variação espacial dos dados se agrava com o aumento das dimensões do sistema em estudo.

Obviamente, as observações anteriores não representam uma crítica aos trabalhos em questão, mas apenas uma constatação das dificuldades de se aplicar modelos concentrados no estudo dos sistemas hidrológicos com as dimensões e variedades como os encontrados no território brasileiro.

Com a utilização de modelos distribuídos, os problemas anteriores podem ser minimizados, porém surgem outros problemas como aquisição, manutenção e utilização de extenso banco de dados referenciado geograficamente. Neste contexto o Sistema de Informação Geográfico (SIG) se insere como uma ferramenta que prepara, armazena, atualiza, analisa e apresenta estes dados em conjunção com outros (Burrough, 1991).

Este artigo tem por objetivo explicar os conceitos resultantes da integração de modelos hidrológicos distribuídos e SIG, bem como apresentar um modelo hidrológico distribuído simples, podendo servir de base para o desenvolvimento de novos modelos.

Os próximos itens estão estruturados da seguinte forma:

- Introdução aos conceitos que lidam com informações distribuídas no espaço.
- Técnicas de SIG mais relevantes para utilização em modelos hidrológicos.
- Modelos hidrológicos distribuídos que podem ser utilizados por SIG.
- Desenvolvimento de um modelo hidrológico simplificado utilizando técnicas de SIG.
- Conclusões.

## INFORMAÇÕES DISTRIBUÍDAS ESPACIALMENTE

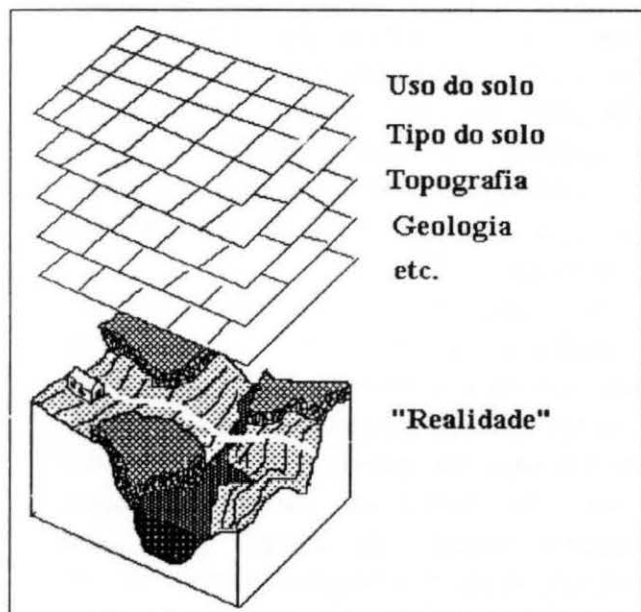
O SIG pode ser entendido como um sistema de informações aplicado a dados georeferenciados (um atributo Z é associado às coordenadas X,Y). Um sistema de informações é um conjunto de processos, que alimentado de dados, produz informação útil. Neste contexto, o SIG pode ser visto como o conjunto de computadores e programas criados a fim de obter, manipular, analisar, modelar e apresentar dados com referência espacial (coordenadas X,Y) (Burrough, 1991).

As variáveis hidrológicas apresentam um comportamento extremamente complexo no mundo real. Para representar o comportamento real destas variáveis precisa-se de um banco de dados infinitamente grande. Como, em termos práticos, este banco de dados não existe, costuma-se reduzir os dados para uma quantidade finita e manejável através de um processo de abstração da realidade (área representativa elementar, na introdução deste artigo).

Em geral o processo de aquisição de dados constitui uma imagem digital que pode ser descrita por uma função  $f(x,y)$ , onde  $x,y$  representam coordenadas espaciais sobre a imagem e  $f(x,y)$  um dado específico (por exemplo: topografia, solos, chuva, etc.). O  $f(x,y)$  em uma imagem de satélite representa uma quantidade de energia eletromagnética que atinge o sensor, a bordo de um satélite, após interagir com a superfície terrestre e atmosfera. Através deste processo de aquisição de dados, cada  $f(x,y)$  nesta matriz nos fornece diferentes valores de energia da superfície terrestre, permitindo uma representação da variabilidade espacial de propriedades (como uso do solo, cobertura vegetal, etc.) na superfície terrestre.

Na verdade diferentes características da superfície terrestre (uso do solo, tipo do solo,

topografia, precipitação, geologia, etc.), constituem diferentes  $f(x,y)$ , com diferentes processos de geração. Consequentemente, a natureza, com toda a sua variabilidade espacial, é representada através de um conjunto de  $f(x,y)$ , conforme ilustrado na figura 4.



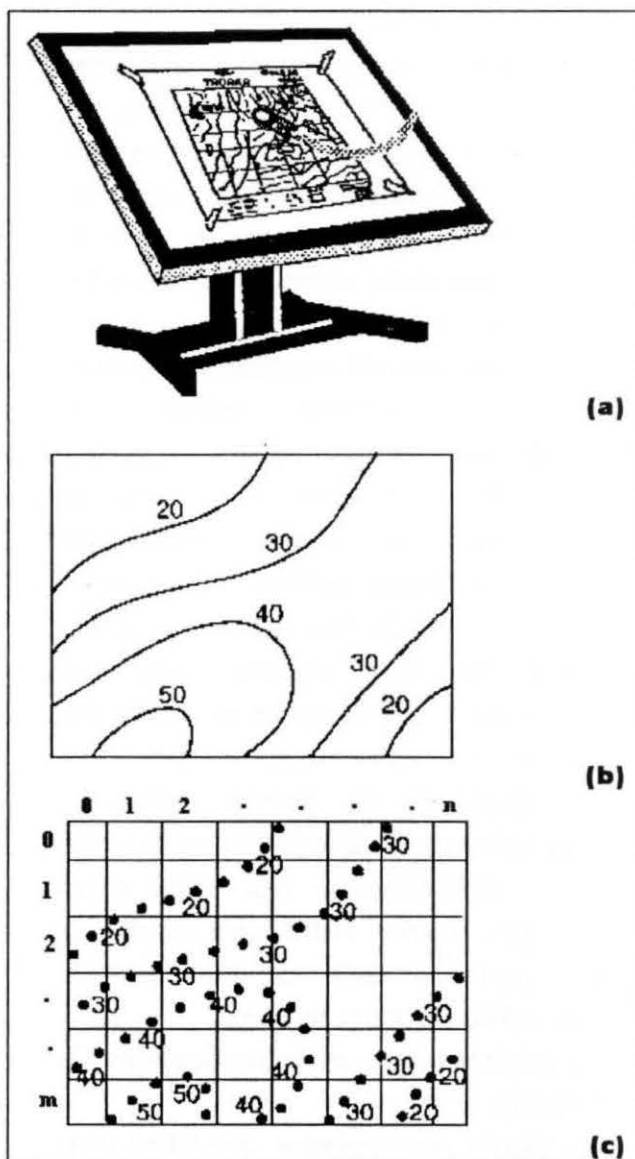
**UMA REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DAS CARACTERÍSTICAS DA "REALIDADE" ATRAVÉS DE UM CONJUNTO DE  $F(x,y)$**

**Figura 4**

O Modelo Numérico do Terreno é uma dessas variáveis que indica a distribuição espacial da topografia, sendo representado através de uma imagem digital, onde cada  $f(x,y)$  fornece o valor da cota topográfica na posição  $x,y$ . Geralmente, a informação topográfica está disponível na forma de mapas topográficos. O processo de transferência desta informação para o computador se constitui em:

1. fixar um mapa topográfico a uma mesa digitalizadora (figura 5a).
2. digitalizar as curvas de nível, com o uso do cursor da mesa, formando um arquivo de pontos (Figuras 5b e 5c).

3. interpolar estes pontos para formação de uma superfície.



**PROCESSO DE FORMAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DO TERRENO**

**Figura 5**

O nosso entendimento da "realidade" (figura 4) envolve processos cognitivos como seleção, generalização e síntese, formando um conjunto de informações. A representação física destas informações, isto é, os dados, constitui um modelo do processo observado. Um conjunto de dados (ou banco de dados)



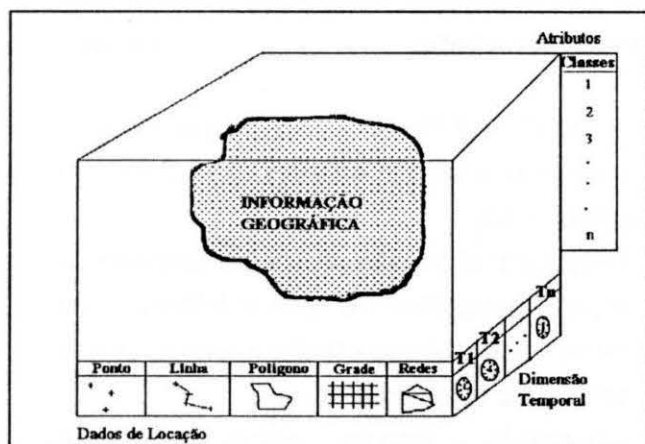
constitui-se na representação física de vários processos do mundo real (por exemplo: hidrológico, social, econômico, etc.). Diferentes usuários possuem diferentes visões da natureza, isto é, os processos (propriedades, relações e comportamentos) que atuam na "realidade" da figura 4 podem ser representados de várias maneiras. A figura 4 apenas ilustra uma destas representações através de um conjunto de  $f(x,y)$ .

A informação geográfica, obtida através da forma indicada na figura 4, está geralmente associada a duas características básicas:

1. o fenômeno ou processo, como variáveis, classes, nomes, valores, etc; e
2. a localização espacial, isto é, a posição do fenômeno dentro do espaço geográfico.

Existe ainda uma terceira característica que é o tempo onde os itens (1) e (2) ocorrem.

A figura 6 apresenta as relações entre estes três elementos (dados locacionais, dados não-locacionais (atributos) e o tempo).



**COMPONENTES CONCEITUAIS DA INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA**

**Figura 6**

O manejo efetivo das informações geográficas requer que as três dimensões da figura 6 sejam variáveis independentes, ou seja, os atributos podem mudar suas características e

manter a mesma posição geográfica, por exemplo.

Os fenômenos ou processos da "realidade" (figura 4) constituem um sistema espaço-temporal. Os dados (atributos) resultantes da observação destes fenômenos podem ser classificados de acordo com as variáveis geográficas que comandam o processo observado. Desta forma, os fenômenos podem ser classificados em:

1. fenômeno espacial,
2. fenômeno espaço-temporal,
3. fenômeno temporal.

A Tabela 1 ilustra várias aplicações que podem ser enquadradas na classificação acima.

| Domínio de várias aplicações |   |                      | Tabela 1 |
|------------------------------|---|----------------------|----------|
| Fenômenos espaciais          | Fenômenos espaço-temporais                  | Fenômenos temporais  |          |
| Mapas topográficos           | Modelos de Simulação                        | Inventários          |          |
| Mapa cadastral               | (Hidrológicos, dispersão, sedimentos, etc.) | Registros históricos |          |
|                              | Gerenciamento de áreas urbanas              |                      |          |

O entendimento do domínio do problema e como a informação geográfica é organizada constitui o primeiro passo para a construção de um sistema que represente a "realidade" da figura 4.

Com relação aos sistemas de informações geográficas (SIG), existem alguns aspectos que podem ser associados aos recursos ambientais. A capacidade de manipular informações distribuídas no espaço, ao invés dos dados pontuais nos quais os conceitos e modelos

foram desenvolvidos, é um dos aspectos mais vantajosos.

Neste contexto os SIG's se inserem como ferramentas que têm a capacidade de manipular as funções que representam os processos ambientais, em diversas regiões de uma forma simples e eficiente, permitindo uma economia de recursos e tempo. Estas manipulações permitem agregar dados de diferentes fontes (por exemplo : imagens de satélite, mapas topográficos, mapas de solos, etc) e diferentes escalas. O resultado destas manipulações, geralmente, é apresentado sob a forma de mapas temáticos com as informações desejadas.

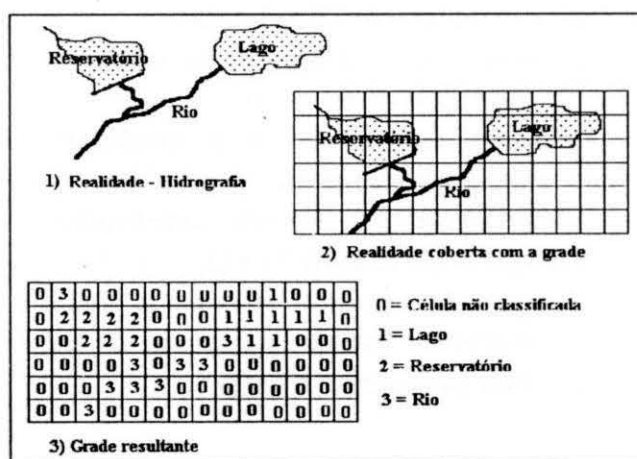
## MANIPULAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS

Este artigo somente apresenta um processo de abstração da realidade: Estrutura em grade. Neste caso a área em estudo é dividida em uma grade regular de elementos ou células, numa sequência específica:

- As posições relativas das células são expressas em linhas e colunas.
- Cada célula contém um único atributo (valor).
- Qualquer posição da área de estudo corresponde a uma única célula.
- Um conjunto de células, e seus respectivos atributos, definem um plano de informação ( ou grade ).
- As informações pertinentes à área de estudo podem ser representadas através de numerosos planos de informações. Por exemplo : tipo de solo, elevação, vegetação, etc.

A figura 7 ilustra o processo de criação de um plano de informação. A obtenção da

grade é feita através da codificação de cada célula com um valor que representa a classe (ou tema) na maioria da área de cada célula. No nosso exemplo, apresentamos apenas a hidrografia de uma região, mas de maneira análoga podemos realizar o mesmo processo com mapas de solos, geológicos, cartas topográficas, etc. A variabilidade espacial dos processos hidrológicos pode ser discretizada desta forma.



### CRIAÇÃO DA GRADE

Figura 7

Mark and Frank (1990) afirmam que as características mais importantes dos planos de informações são:

- Resolução: dimensão da menor unidade do espaço geográfico no qual a informação é armazenada. Numa estrutura em grade esta unidade é quadrada;
- Orientação: ângulo entre o Norte verdadeiro e a direção definida pelas colunas da grade; e
- Regiões: conjuntos de células adjacentes que apresentam o mesmo atributo (valor). Exemplo: lago ou reservatório da figura 7.

Segundo Laurini and Thompson (1992) existem quatro funções principais dos SIG:

- Manipulação de planos de informações
- Mecanismos que interligam planos de informações com diferentes representações espaciais ( Vetores e grades, por exemplo).
- Conversão de diferentes escalas e sistemas de projeções para uma única escala e sistema de projeção ( georreferenciamento ).
- Modelagem gráfica permitindo uma excelente análise dos resultados.

A descrição de todos os itens foge do escopo deste trabalho. A discussão que se segue é apenas para o item inicial.

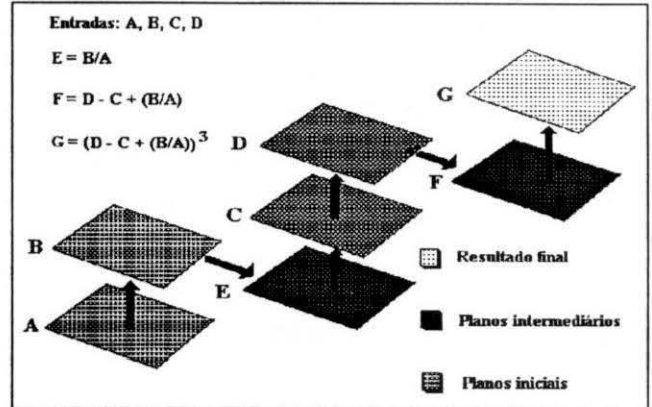
### Manipulação de planos de informações

A manipulação de planos de informações consiste em uma sequência finita de duas ou mais operações aplicadas aos planos. A figura 8 ilustra um exemplo destas manipulações. É comum nestes processos a geração de planos intermediários com o único propósito de armazenar resultados que serão posteriormente utilizados. A sequência de operações utilizada na figura 8 é :

- Geração do plano intermediário **E** a partir dos planos **A** e **B**.
- Geração de outro plano intermediário **F** a partir dos planos **C, D, E**.
- Finalmente, obtenção do plano **G** a partir do plano **F**.

Tomlin (1990) classificou as operações que manipulam os planos de informações em:

- Operações locais.
- Operações dentro de uma vizinhança.
- Operações dentro de uma região (grupo de células).



EXEMPLO DE ESTRUTURA DE MANIPULAÇÃO DE PLANOS

Figura 8

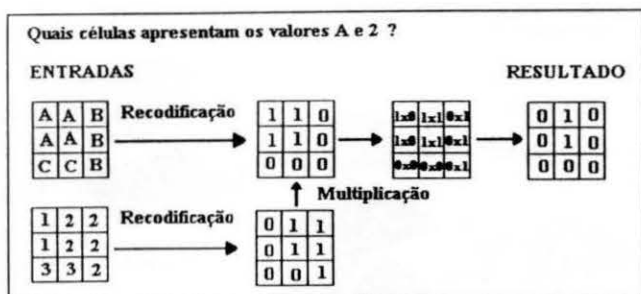
A recodificação usa um único plano como entrada e consiste na associação de um novo valor ao atributo do plano de entrada. Por exemplo, um plano de informações contendo o Modelo Numérico do Terreno-MNT (Mendes, 1995) apresenta valores de 0 a 600 m. Neste caso pode-se recodificar o MNT em: 1 - valores entre 0 e 199 m, 2 - valores entre 200 e 399 m e 3 - valores > 400 m.

No cruzamento de planos as operações são realizadas com dois ou mais planos para gerar resultados, sendo mais comum operações aritméticas e lógicas entre planos. Por exemplo:

Se o atributo do plano A > 10 faça  
 $A = A + ((B-C)/2)$   
 Caso contrário  
 $A = 0$   
 Fim

A figura 9 ilustra as operações locais. A partir de dois planos de informações é executada uma recodificação e em seguida uma multiplicação para obter o resultado final (atributo = 1 é o resultado desejado).





**OPERAÇÕES LOCAIS COM PLANOS DE INFORMAÇÕES** **Figura 9**

Nas operações dentro de uma vizinhança, o valor de cada célula é função das células vizinhas a mesma. Este grupo de operações também é chamado de filtragem ou convolução. A análise de uma vizinhança imediata é feita através de uma janela 3x3, que varre todo o plano de informações modificando o valor da célula central através de uma função que depende das 8 células vizinhas.

|                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|
| P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> |
| P <sub>4</sub> | <b>C</b>       | P <sub>5</sub> |
| P <sub>6</sub> | P <sub>7</sub> | P <sub>8</sub> |

$$C = P_1 \cdot Z_1 + P_2 \cdot Z_2 + \dots + P_7 \cdot Z_7 + P_8 \cdot Z_8 \quad (1)$$

Onde:

C - Atributo central (Valor a ser modificado)

P<sub>n</sub> - Funções ponderadoras.

Z<sub>n</sub> - Atributos dos planos de informações

A declividade e a orientação apresentados por Mendes (1995), são um exemplo destas operações. Declividade e orientação são úteis para modelos hidrológicos, análise de transporte de sedimentos, balanços de energia, identificação de padrões de vegetação, etc.

Existem ainda as operações de vizinhança estendidas que não se limitam somente às 8 células mais próximas, mas a todo plano de informação. Por exemplo: Quais as células que estão a 500 m da rede de drenagem? O

atributo armazenado em cada célula, neste caso, será a distância até a rede de drenagem.

As operações em grupos de células (regiões) são basicamente identificação de zonas e cálculos de áreas, perímetros e formas.

A fim de ilustrar as técnicas apresentadas, considere o seguinte exemplo :

**OBJETIVO:**

*Identificação de uma área apropriada à instalação de uma indústria.*

**CRITÉRIOS:**

*Escolher a melhor combinação de solos, declividade e acesso.*

**PLANOS DE INFORMAÇÕES**

*Resolução : 500 m*

*Área de estudos : 2,5 km x 2,5 km*

*Colunas alinhadas com a direção N-S*

|   | SOLOS   | DECLIVIDADE | ACESSO    |
|---|---------|-------------|-----------|
| 1 | 1 2 3 3 | 1 1 2 4 6   | 0 0 0 1 0 |
| 1 | 2 2 3 4 | 2 3 5 2 2   | 0 0 1 0 0 |
| 3 | 2 1 3 5 | 2 4 7 9 2   | 1 1 1 0 0 |
| 3 | 1 3 3 4 | 1 3 6 8 9   | 0 0 0 1 0 |
| 1 | 3 4 5 5 | 2 3 7 7 9   | 0 0 0 0 1 |

|                  |                       |                 |
|------------------|-----------------------|-----------------|
| 1 - Silte        | 1 - Pouca declividade | 0 - Não estrada |
| 2 - Argila       |                       | 1 - Estrada     |
| 3 - Areia/Argila |                       |                 |
| 4 - Areia        |                       |                 |
| 5 - Pedregulho   | 9 - Muita declividade |                 |

A figura 10 ilustra as operações necessárias.

**INTEGRAÇÃO DO SIG AOS RECURSOS HÍDRICOS**

Modelos hidrológicos lidam com fenômenos contínuos e dinâmicos, enquanto os

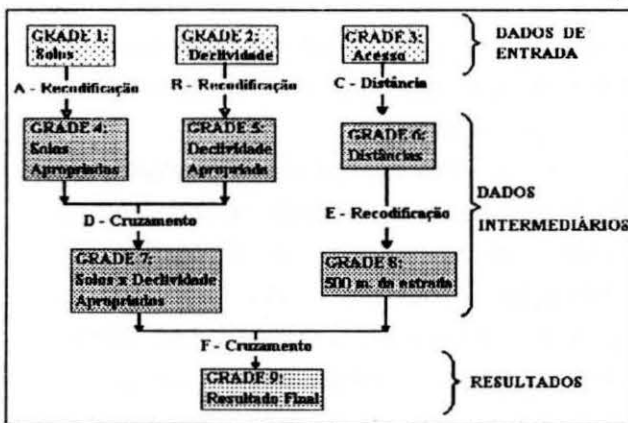
SIG's disponíveis atualmente no mercado tratam apenas com dados estáticos e discretos. Em termos de estrutura de dados, que representam a "realidade", o SIG utiliza os conceitos de pontos, linhas, polígonos, grades, rede de triângulos irregulares, quadrees, etc. Na hidrologia, os sistemas a serem representados espacialmente são bacias, aquíferos, rios, canalizações, lagos, estuários, etc., e a análise é feita através da simulação do movimento da água e de seus constituintes usando equações que representam leis físicas. No campo conceitual, a análise de fenômenos é feita no SIG através da manipulação e interpretação de dados geográficos.

Alguns SIG's representam a "realidade" (contínua) como objetos exatos (pontos, linhas e polígonos) com os respectivos atributos. Outros representam esta "realidade" através de superfícies (uma matriz de células) com os atributos. Em resumo, as entidades geográficas, representada pelo SIG, podem ser agrupadas em dois conceitos: (1) O conceito de objetos, caracterizado por entidades geográficas exatas e (2) o conceito de superfície (um campo) representando a continuidade da "realidade", através de uma grade (matriz de células).

A utilização dos conceitos de SIG em conjunção com modelos hidrológicos não é muito recente. Gupta e Solomon (1977) usaram uma grade regular para armazenar informações do terreno e do canal a fim de modelar o escoamento superficial e transporte de sedimentos. Os modelos CREAMS ("Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems", Knisel, 1980), ANSWERS ("Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation", Beasley et al., 1982) e AGNPS ("AGricultural NonPoint Source", Young et al., 1989) são exemplos de modelos distribuídos, capazes de simular a distribuição de sedimentos e a concentração de poluentes agrícolas em diferentes pontos da bacia, utilizando estrutura em grade a fim de armazenar os dados que representam a variabilidade espacial das variáveis.

Quando os modelos anteriores foram criados, apenas alguns conceitos de SIG foram utilizados. No final da década de 80, muitos modelos começaram a utilizar toda a funcionalidade do SIG, como armazenamento, apresentação e manipulação dos dados distribuídos.

De Roo et al., (1989) apresentaram uma forma de integração do modelo ANSWERS com um SIG a fim de simular o escoamento superficial e a erosão do solo. O SIG foi utilizado



|                    |   |   |
|--------------------|---|---|
| A - RECODIFICAÇÃO: | Solo apropriado                           | 1 = [1,2,3]                                       |
|                    | Solo não apropriado                       | 0 = [4,5]   |
| B - RECODIFICAÇÃO: | Declividade apropriada                    | 1 = [1 ... 5]                                     |
|                    | Declividade não apropriada                | 0 = [6 .. 9]                                      |
| C - DISTÂNCIA :    | Distância ≤ 500 m da estrada              | Atributo de cada célula (distância até a estrada) |
|                    | Distância > 500 m                         | atributo = 0                                      |
| D - CRUZAMENTO     | Solos x Declividade (idêntico à figura 9) |   |
| E - RECODIFICAÇÃO  | Atributo > 0                              | atributo = 1                                      |
|                    | Atributo ≤ 0                              | atributo = 0                                      |
| F - CRUZAMENTO     | (Solos x Declividade) x Distância         |   |

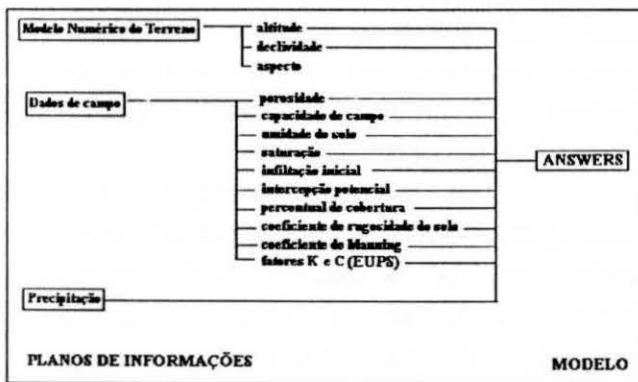
EXEMPLOS DE OPERAÇÕES COM SIG Figura 10

para armazenar, modificar e apresentar os dados necessários ao modelo; e para análise e comparação de vários resultados do modelo. A figura 11 ilustra os planos de informações necessários à implementação deste modelo utilizando SIG.

Panuska et al., (1991) apresentaram um procedimento idêntico à figura 11 integrando o modelo AGNPS com SIG. Drayton et al., (1992) desenvolveram um modelo chuva-vazão utilizando uma grade retangular e basendo-se em imagens de satélite, mapas de solos e modelos numéricos do terreno.

Os resultados dos modelos anteriores demonstram que conceitualmente a integração entre o SIG e modelos hidrológicos é possível e pode ser realizada através das seguintes fases:

1. Obtenção dos dados (dados de campo e digitais).
2. Processamento e análise dos dados de entrada.
3. Operações em SIG.
4. Simulação hidrológica.
5. Simulação visual dos resultados.



**INTEGRAÇÃO DE SIG E ANSWERS**  
Adaptado: De Roo et al., (1989)

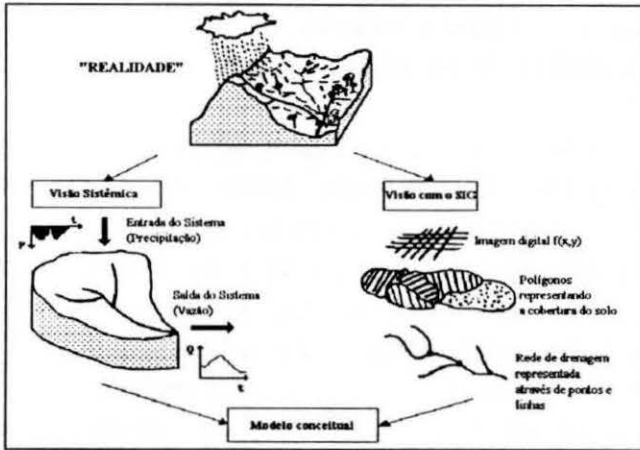
**Figura 11**

Nas etapas anteriores, apenas a 4 representa o modelo hidrológico. Todas as demais podem ser realizadas pelo SIG. Na prática, a integração, proposta neste artigo, é executada de duas maneiras: (1) Modelagem interna no SIG e (2) Formatos idênticos no modelo e SIG.

Algumas tentativas já foram realizadas no sentido de construir funções internas no SIG que consigam representar as transformações chuva-vazão (Berry e Sailor, 1987). A limitação atual desta forma de integração é o uso de modelos baseados em funções empíricas e demasiadamente simplificadas.

A maioria dos modelos distribuídos atuais estruturam os respectivos bancos de dados de forma que possam ser lidos pelos SIG. A principal desvantagem deste tipo de integração é a utilização de programas de conversão de formatos, o que causa um maior consumo de tempo no processamento.

É fundamental que os técnicos envolvidos na área dos recursos hídricos reconheçam e entendam as suposições e limitações da representação discreta da "realidade" (manipulada através do SIG) e o uso destes dados em modelos. Nesta seção, discutiu-se como alguns dos conceitos de sistemas hidrológicos podem ser adaptados para conduzir uma representação do fenômeno hidrológico (via modelos), inseridos em uma estrutura do SIG. A figura 12 ilustra esta situação onde diferentes usuários possuem diferentes visões de uma "realidade" (uma bacia hidrográfica, por exemplo). Neste caso, o objetivo maior é o desenvolvimento de conceitos que englobem um visão sistêmica e representação espacial, via SIG, de uma mesma bacia hidrográfica.

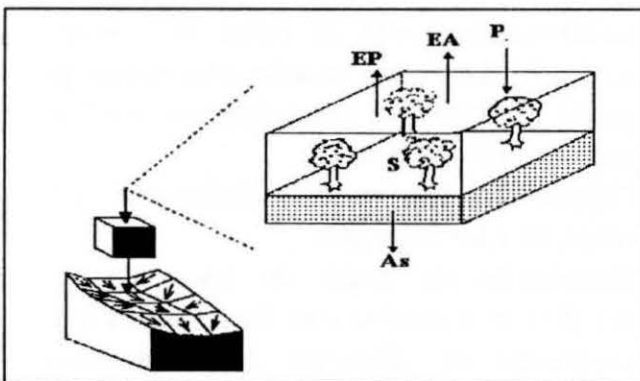


**DIFERENTES VISÕES DE UMA MESMA "REALIDADE"**

**Figura 12**

**MODELO HIDROLÓGICO SIMPLIFICADO UTILIZANDO SIG**

Nesta seção é apresentado um modelo hidrológico distribuído simplificado. Será utilizado um método de balanço hídrico mensal, discretizado para cada área de 1/4 ha, conforme figura 13. A metodologia proposta baseia-se nos métodos de balanço hídrico apresentados por Alley (1984) e modificado por Dingman (1994).



Onde: EA - Evapotranspiração atual  
 EP - Evapotranspiração potencial  
 P - Precipitação  
 S - Armazenamento de água no solo  
 As - Contribuição para água subterrânea

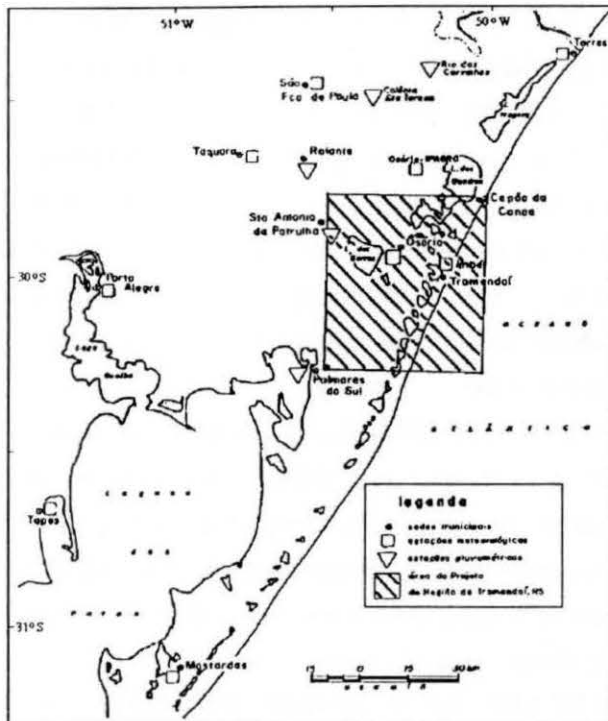
**BALANÇO HÍDRICO DISTRIBUÍDO NO ESPAÇO**

**Figura 13**

Este modelo de balanço hídrico distribuído será aplicado na parte norte do litoral do Rio Grande do Sul (figura 14). Com uso desta abordagem é possível quantificar e investigar mudanças nos vários componentes do balanço hídrico devido, por exemplo, à mudança climática e/ou uso do solo. O modelo foi desenvolvido para rodar em computadores IBM PC-AT, mas devido ao grande volume de dados utilizados o rendimento computacional foi baixo, isto é, consumiu-se aproximadamente 12:00 hs em um 486 DX4 com 100 Mhz (volume para dados de entrada e saída na ordem de 450 Mb). Os resultados, no aspecto do rendimento computacional, foram bem melhores quando utilizou-se estações de trabalho (em uma INDY - Silicon Graphics utilizou-se aproximadamente 20 min). O programa do balanço hídrico foi implementado na linguagem Pascal, funcionando no PC e na estação de trabalho. O programa de geoprocessamento utilizado no ambiente PC foi o IDRISI e na estação o GRASS (Geographical Resources Analysis Support System).

Na integração proposta neste item, adotaremos os procedimentos já explicados, ou seja:

1. Obtenção dos dados (dados de campo e digitais).
2. Processamento e análise dos dados de entrada.
3. Operações em SIG.
4. Simulação hidrológica.
5. Simulação visual dos resultados.



### Processamento e análise dos dados de entrada

Adotou-se a abordagem das estruturas em grade. As diferentes fontes de dados foram digitalizadas, interpoladas e rasterizadas para estudar uma área de 56 x 49 km, com tamanho de célula de 50 x 50 metros, resultando uma grade 1120 linhas por 980 colunas. Cada uma destas células representa um elemento de cálculo do modelo, conforme figura 13. As operações realizadas para preparação de dados ao modelo foram:

1. Análise de consistência dos dados pontuais,
2. Conversão de coordenadas das posições dos dados pontuais (LAT/LONG ⇒ UTM), isto é, conversão de coordenadas esféricas

[LAT/LONG] para coordenadas planas (UTM),

3. Interpolação dos dados pontuais gerando 24 grades, representando as superfícies de valores mensais de precipitação e temperatura na área em estudo,
4. Classificação da imagem de satélite para produção de um mapa de uso do solo da região, com as classes de usos correspondentes a água, floresta, pastagem, arroz, cultivos, solo nu ou área construída,
5. Georreferenciamento do mapa de uso do solo para sistema de coordenadas planas (a grade resultante dos procedimentos 4 e 5 é apresentada na figura 15),
6. Digitalização (via mesa digitalizadora) do mapa de solos da região,
7. Rasterização do mapa de solos, isto é, transformar o arquivo com os polígonos que descrevem os diferentes tipos de solos (estrutura vetorial) em uma estrutura em grade.

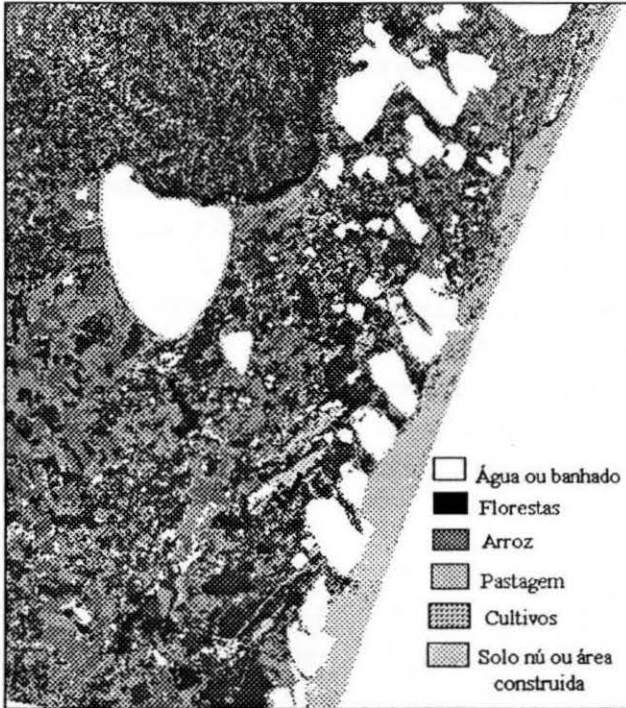
**LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO** **Figura 14**  
**Fonte: Hasenack e Ferraro (1989)**

### Obtenção dos dados

O seguinte conjunto de dados foi utilizado para a entrada e parametrização do modelo:

1. Dados pontuais de totais médios mensais de precipitação obtidos em 8 estações distribuídas na área de estudo,
2. Dados pontuais de médias mensais de temperatura distribuídas em 4 estações na área de estudo,
3. Mapa de solos (Ministerio da Agricultura, 1973),
4. Imagem do satélite LANDSAT-TM5 com as bandas 3/4/5.





**MAPEAMENTO DO USO DO SOLO, DERIVADO DE IMAGENS ORBITAIS** **Figura 15**

### Operações em SIG

Em algumas das estruturas anteriores, tornaram-se necessárias operações adicionais para preparação de dados ao modelo. Estas operações foram:

1. Filtragem da grade de uso do solo, para retirada de ruídos, presentes na cena ou adicionados durante o processo de classificação.
2. Reclassificação da grade do uso do solo para obtenção de superfícies dos coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) e profundidade do sistema radicular ( $H$ ) em mm.
3. Reclassificação da grade do tipo do solo para obtenção de superfícies da densidade do solo ( $d_s$ ), capacidade de campo ( $C_c$ ) e ponto de murchamento ( $P_m$ ).
4. Aplicação da seguinte fórmula (no ambiente do SIG) para obtenção da capacidade

máxima de armazenamento de água no solo ( $S_{max}$ ) em mm:

$$S_{max} = d_s \cdot \frac{C_c - P_m}{100} \cdot H \quad (2)$$

### Simulação hidrológica

Utilizando as grades anteriores calculou-se, para cada célula, (figura 13) o balanço hídrico mensal segundo Alley (1984). Esta abordagem é derivada do método de Thornthwaite e utiliza como dados de entrada valores mensais de precipitação ( $P$  para o mês  $i$  -  $P_i$ ) e evapotranspiração potencial ( $ET_i$ ). A  $ET_i$  pode ser calculada por qualquer método apropriado à região e à disponibilidade de dados. No nosso caso utilizamos, devido a dificuldades na obtenção dos dados, o método sugerido por Dingman (1994). Inicialmente, foi calculada a pressão de saturação do vapor [ $e_{sat}(T)$ ] em mb, como função da temperatura média mensal ( $T$ ) em °C, isto é:

$$e_{sat}(T) = 6,11e^{\left(\frac{17,3T}{T+237,3}\right)} \quad (3)$$

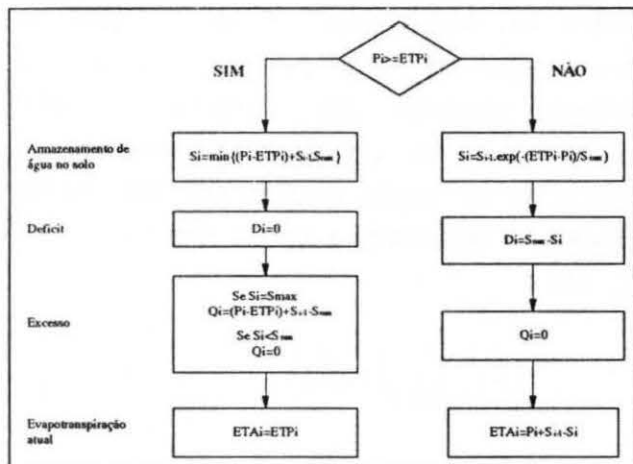
Em seguida obteve-se a evapotranspiração potencial mensal ( $ET_i$ ) em mm/mês, dada por:

$$ET_i = 4,09[e_{sat}(T)] \quad (4)$$

Finalmente aplicou-se uma correção para a  $ET_i$  utilizando-se o  $K_c$ , resultando uma evapotranspiração potencial corrigida para um determinado tipo de cultivo ( $ETP_i$ ) no mês  $i$ , ou seja:

$$ETP_i = K_c \cdot ET_i \quad (5)$$

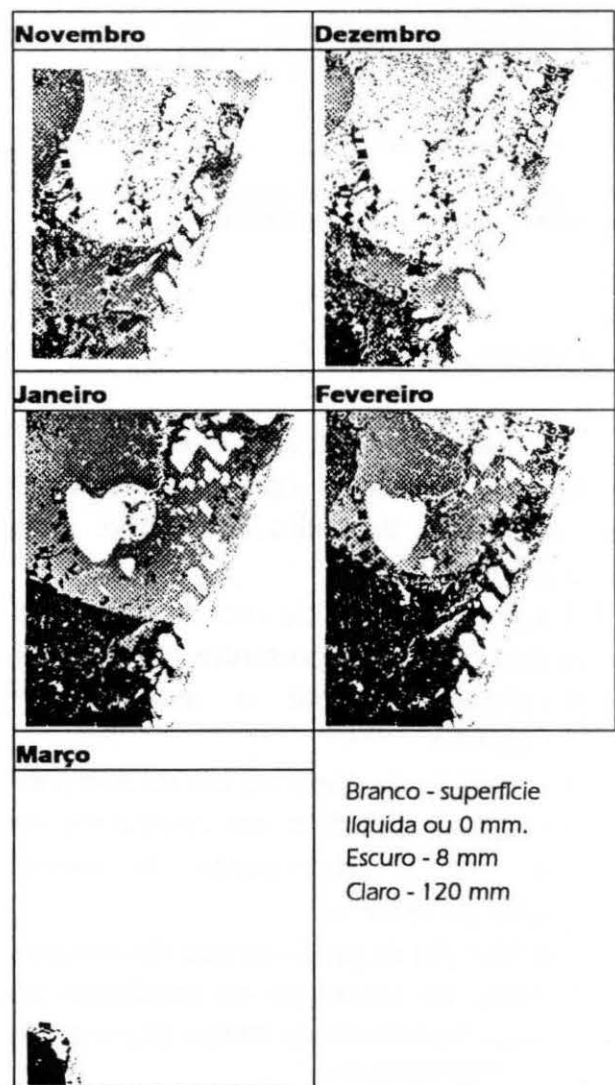
Para o funcionamento do modelo ainda é necessário estimar o armazenamento inicial de água no solo ( $S_0$ ). Inicialmente uma quantidade de água, depositada em cada célula ( $P_i$ ), é comparada com a  $ETP_i$ . Em cada intervalo de tempo (mês  $i$ ), são produzidos: *a*) armazenamento de água no solo ( $S_i$ ), *b*) deficit de água no solo ( $D_i$ ), *c*) água em excesso ( $Q_i$ ) e *d*) evapotranspiração atual ( $ETA_i$ ), conforme ilustrado no fluxograma abaixo (com todas as unidades em mm). Os resultados são formados por grades nos quais cada célula apresenta valores que foram calculados segundo o fluxograma. Conseqüentemente, estes mapas apresentam a distribuição espacial de  $S_i$ ,  $D_i$ ,  $Q_i$  e  $ETA_i$  em um determinado mês  $i$ .



**Simulação visual dos resultados**

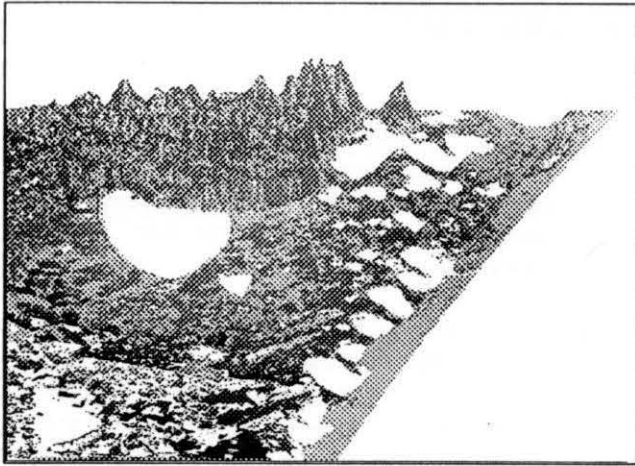
A modelagem proposta produz mapas que representam a variabilidade espacial e temporal dos processos envolvidos. Como exemplo apresenta-se na figura 16 o padrão espacial e temporal (novembro  $\Rightarrow$  março) do deficit de água no solo. A figura 17 apresenta outra forma de visualização dos resultados. Nela é apresentado o excesso hídrico para o mês de maio sobreposto à

informação topográfica em três dimensões. Na figura 18 é apresentada outra possibilidade de saída dos resultados. Esta série temporal de precipitação e evapotranspiração atual foi obtida colocando-se o cursor na tela do computador na posição da cidade de Osório e lidos, diretamente nas 24 grades, os respectivos valores. Em uma área como a estudada é possível plotar inúmeras séries representando diferentes locais. Uma das prováveis aplicações da metodologia proposta seria a identificação de áreas com maiores demandas de água para irrigação.



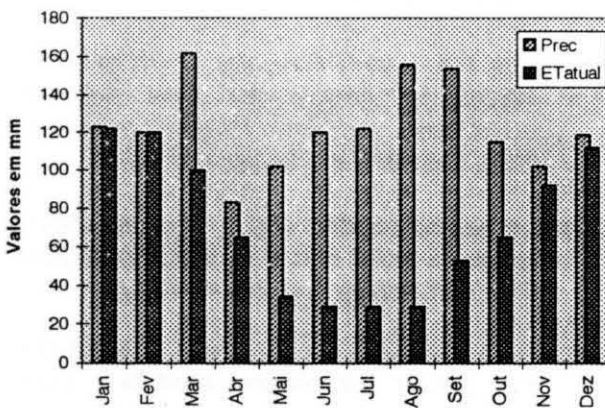
**DEFICIT DE ÁGUA NO SOLO**

**Figura 16**



**EXCESSO HÍDRICO NO MÊS DE MAIO, SOBREPOSTO À TOPOGRAFIA**

**Figura 17**



**DIAGRAMA CLIMÁTICO (PRECIPITAÇÃO E EVAPO-TRANSPIRAÇÃO ATUAL) EM OSÓRIO-RS**

**Figura 18**

## CONCLUSÕES

Os processos hidrológicos são dependentes de diversas variáveis distribuídas ao longo de uma superfície contínua (bacia hidrográfica). Os modelos hidrológicos utilizam funções do tipo de solo, vegetação, relevo do terreno, etc. ao longo de uma bacia hidrográfica como aproximação

desses processos. O Sistema de Informações Geográficas (SIG) tem a capacidade de obter algumas dessas funções de uma forma simples e eficiente, permitindo uma economia de recursos, tempo e diminuição das possibilidades de ocorrência de erros durante a simulação dos processos. O objetivo deste artigo foi introduzir alguns conceitos básicos usados na integração entre sistemas de informações geográficas e modelos hidrológicos.

Todas as técnicas apresentadas neste artigo utilizam estrutura em grade, porém existem outras formas de representar as diversas variáveis hidrológicas (atributos), como vetores (Laurini e Thompson, 1992). A estrutura de dados mais utilizada é a grade por ser de fácil implementação e muito eficiente computacionalmente (Collins and Moon, 1981), porém esta tem as seguintes desvantagens: (1) não representa mudanças repentinas dos valores dos atributos e (2) o tamanho da grade (resolução) afeta o resultado obtido.

As relações no espaço como as posições das células acima, abaixo, laterais e diagonais utilizadas neste artigo não existem no mundo real. Toda esta manipulação de células é considerada uma abstração da mente humana como forma de auxílio no entendimento do mundo real. Erros podem surgir durante a transformação do mundo real (superfície contínua ⇒ bacia hidrográfica) para uma abstração (estrutura dos dados ⇒ grade), exigindo uma contínua análise dos dados resultantes de cada fase ao longo de todo o processo de simulação hidrológica. Sugere-se uma análise mais detalhada da influência dos erros no resultado final de modelos hidrológicos, considerando-se a variabilidade espacial dos dados.

## AGRADECIMENTOS

Ao término deste artigo gostaria de agradecer às pessoas e às instituições que tornaram este trabalho possível. Inicialmente ao Prof. H. Hasenack, do Centro de Ecologia/UFRGS, pela cedência dos dados referentes ao litoral norte do Rio Grande do Sul (imagens de satélite, mapa de solos na forma digital e dados pontuais), também agradeço o auxílio recebido dos alunos Martini (doutorando no Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS) e Marcos (mestrando no Centro de Ecologia/UFRGS), pela preparação dos dados ao modelo e as discussões quanto ao correto funcionamento do mesmo. Finalmente, agradeço ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS pelo financiamento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ALLEY, W.M. (1984) On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models. *Wat. Resour. Res.* 20:1137-1149.
- BEASLEY, D.B., and HUGGINS, L.F. (1982) ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation) User's manual. U.S.EPA 905/9-82-001, Chicago, ILL, 54 pp.
- BERRY, J. and SAILOR, J. (1987) Use of geographic information system for storm runoff prediction for small urban watersheds. *Envir. Mgmt.* 11:21-27.
- BURROUGH, P.A. (1991) *Principles of geographical information systems for land resources assessment*- reprinted - Oxford University Press, Oxford. U.K. 194 pp.
- COLLINS, S.H. and MOON, G.C. (1981) Algorithms for dense digital terrain models, *Photogram. Eng. and Remote Sensing*, 47:71-76.
- DE ROO, A.P.J.; HAZELHOFF, L.; and BURROUGH, P.A. (1989) Soil erosion modelling using 'answers' and geographical information system. *Earth surface processes and landforms*. 14:517-532.
- DINGMAN, S.L. (1994) *Physical Hydrology*. Macmillan Publishing Company. New York, N.Y., pp 575.
- DOOGE, J.C.I. (1982) Parameterization of hydrologic processes. In: Eagleson, P.S. (Editor). *Proceedings of the Greenbelt Study Conference*. Cambridge University Press, New York, N.Y., pp. 243-288.
- DRAYTON, R.S.; WILDE, B.M.; and HARRIS, J.H.K. (1992) Geographical information system approach to distributed modelling. *Hydrological processes*, 6:361-368.
- GUPTA, V.K., and SOLOMON, S.I. (1977) Distributed numerical model for estimating runoff and sediment discharge of ungaged rivers: 1.

- The information system, 2. Model development, 3. Comparison with other simple techniques, *Wat. Resour. Res.*, 13:613-636.
- HASENACK, H. e FERRARO, L. W. (1989) Considerações sobre o clima da região de Tramandal, RS. *Pesquisas*, 22:53-70.
- KLEMES, V. (1983) Conceptualization and scale in hydrology. *J. Hydrol.*, 65:1-23.
- KNISEL, W.G. ed. (1980) CREAMS - A field scale model for chemical, runoff, and erosion from agricultural management systems. Cons. Res. Rpt. No. 26., *U.S. Dept. Agr., Washington, D.C.* 493 pp.
- LAURINI, R. and THOMPSON, D. (1992) *Fundamentals of spatial information systems.* Academic Press . London. U.K. 680 pp.
- MARK, D.M. and FRANK, A.U. (1990) Language, cognitive science, and geographic information system. *National Center for Geographic Information and Analysis. Report 90-10.* University of California, Santa Barbara, CA. 48 pp.
- MENDES, A. (1995) Modelos numéricos do terreno e suas aplicações a recursos hídricos. Submetido e aceito no *XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.*
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA (1973) Levantamento e reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Boletim técnico nº 30.
- PANUSKA, J.C.; MOORE, I.D.; and KRAMER, L.A. (1991) Terrain analysis: integration into the agricultural nonpoint source pollution (AGNPS) model, *J. Soil and Water Conserv.*, 46:59-64.
- TOMLIN, C.D. (1990) *Geographic information systems and cartographic modeling.* Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 249 pp.
- WALLING, D.E. (1983) The sediment delivery problem, *J. Hydrol.* 65: 209-237.
- WOOD, E.F.; SIVAPALAN, M.; BEVEN, K. and BAND, L. (1988) Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. *J. Hydrol.*, 102:29-47.
- YOUNG, R.A.; ONSTAD, C.A.; BOSCH, D.D.; and ANDERSON, W.P. (1989) A AGNPS, a non-point source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *J. Soil and Water Conserv.*, 44:168-173.



**ABSTRACT**

***Integration of hydrologic models and geographical information systems : basis***

*The hydrologic variables at every point within a catchment are related to its average value through some probability distribution. These values act as the smallest discernible element which is representative of the continuum surface (catchment). The data resulting from this process (continuum surface  $\Rightarrow$  discretely average values) can be easily manipulated by a Geographical Information System. This paper explains how the integration between hydrologic models and Geographical Information System can be obtained. The results presented here are intend only to demonstrate the management utility of the approach.*