

# **Curso de Especialização em Gestão Ambiental**

## **Gestão das Informações Ambientais**

### **PARTE 2**

**(Texto adaptado das referências bibliográficas indicadas)**

**Daniel Rigo**

**Departamento de Engenharia Ambiental  
Universidade Federal do Espírito Santo**

**2005**

## **Índice – Parte 2**

### **Capítulo 5 – Análise de dados**

#### **5.1 - Análise dos parâmetros de hidrologia**

5.1.1 – Análise de dados pluviométricos

5.1.2 – Regionalização de vazões

#### **5.2 – Análise de dados de qualidade de água**

5.2.1 – Seleção da metodologia de análise de dados apropriada

5.2.2 – A natureza dos dados de qualidade de água

5.2.3 – Análise das médias de qualidade de água

5.2.4 – Determinação de extremos em qualidade de água

5.2.5 – Determinação de tendências em qualidade de água

5.2.6 – Conclusões

### **Capítulo 6 - Modelagem de processos ambientais**

#### **6.1 – Introdução**

#### **6.2 – Tendências em modelagem hidrológica**

6.2.1 – Abordagens básicas até os anos 90

6.2.2 – Tendências recentes

#### **6.3 – A função dos modelos em tomadas de decisão ambiental**

6.3.1 – Objetivos da modelagem

6.3.2 – Relações ambiente-modelagem-decisão

#### **6.4 – Classificação dos modelos de simulação hidrológica**

6.4.1 – Classificação geral

6.4.2 – Classificação baseada em processos

6.4.3 – Modelagem determinística versus estocástica

6.4.4 – Classificação baseada em escalas de tempo

6.4.5 – Classificação baseada em escalas espaciais

6.4.6 – Tipos adicionais de classificação

6.4.7 – Desenvolvimento de modelos

#### **6.5 – Expectativas futuras em modelagem**

### **Capítulo 7 - Tomada de Decisão para Gestão Ambiental**

#### **7.1 – Introdução**

#### **7.2 – Ferramentas para tomada de decisão**

7.2.1 – Ferramentas básicas

7.2.2 – Sensoriamento remoto e tecnologia de satélite

7.2.3 – O uso dos sistemas de informação geográfica (SIG)

#### **7.3 – Geoprocessamento**

## **7.4 – O processo de tomada de decisão**

7.4.1 – Uma nova abordagem

7.4.2 – Desenvolvimento de um sistema de informação para gestão

## **ANEXO 1 - Sistemas de Informações Geográficas - SIG**

# Gestão das Informações Ambientais

## Capítulo 5

### Análise de Dados

#### 5.1 - Análise dos parâmetros de hidrologia

A hidrologia leva em conta todos os parâmetros que entram no fenômeno do ciclo da água dentro do meio ambiente terrestre. Geralmente, estuda-se este ciclo da água num volume fechado que se chama sistema hidrológico.

O balanço hídrico desse sistema pode se resumir, para um intervalo de tempo dado, segundo a formulação simples de conservação da massa em:

Entradas + armazenamento inicial = saídas + armazenamento final.

Por razões numerosas, infelizmente não é fácil avaliar os parâmetros que intervêm nessa formulação.

Para simplificar o problema, os hidrólogos têm o hábito de trabalhar num sistema hidrológico bem definido chamado bacia hidrográfica. A bacia contém de um lado a noção topográfica de divisor de água e de outro a noção da área de interceptação das precipitações.

Basicamente, os parâmetros da hidrologia podem ser divididos em três categorias:

- Parâmetros climáticos: precipitação, evapotranspiração e parâmetros secundários ligados aos primeiros (radiações solares, temperaturas, umidade do ar, vento, etc.);
- Parâmetros do escoamento: descargas líquidas e sólidas e parâmetros secundários ligados aos primeiros (nível da água, características da rede de drenagem, área da bacia delimitada pela rede de drenagem, velocidade, qualidade da água e dos sedimentos transportados, reservatórios naturais e artificiais, etc.);
- Parâmetros característicos do meio receptor (geologia, topografia, solos, vegetação, urbanização, etc.).

Neste item são abordados somente os aspectos da avaliação das precipitações e das descargas. A razão é simples: em termos de recursos hídricos as primeiras formam as principais entradas no sistema estudado e as segundas as principais saídas.

Não é suficiente medir os parâmetros, é necessário também processar, corrigir, gerar e dar consistência aos dados medidos da maneira mais eficiente possível. Portanto, a primeira dificuldade da medição é a validação dos dados adquiridos num lugar conhecido em dado instante.

## 5.1.1 – Análise de dados pluviométricos

Antes do processamento dos dados observados nos postos pluviométricos, há necessidade de se executar certas análises que visam verificar os valores a serem utilizados. Entre estas podemos citar as que seguem.

### a) Detecção de erros grosseiros:

- Observações marcadas em dias que não existem;
- Preenchimento errado do valor na caderneta;
- Soma errada do número de provetas, quando a precipitação é alta;
- Valor estimado pelo observador, por não se encontrar no local no dia da amostragem;
- Quantidades absurdas que, sabidamente, não podem ter ocorrido;
- Erros de transcrição;
- Diferenças de leituras entre pluviógrafos e pluviômetros podem ser causadas por defeitos de sifonagem ou por causa de insetos que eventualmente entupam os condutos internos do pluviógrafo;
- Crescimento de vegetação ou outra obstrução próxima ao posto de observação;
- Danificação do aparelho;
- Problemas mecânicos no registrador gráfico.

O primeiro passo para se preparar os dados para o tratamento estatístico consiste na identificação e correção desses erros. Após esta análise as séries poderão apresentar lacunas que devem ser preenchidas por alguns dos métodos indicados a seguir.

### b) Preenchimento de falhas

#### b.1) Método de ponderação regional

É um método simplificado normalmente utilizado para o preenchimento de séries mensais ou anuais de precipitações, visando a homogeneização do período de informações e à análise estatística das precipitações. Para um grupo de postos, são selecionados pelo menos três que possuam no mínimo dez anos de dados e que estão em uma região climatológica semelhante ao posto a ser preenchido.

A precipitação do posto a ser preenchido é obtida em função das precipitações correspondentes ao mês (ano) que se deseja preencher, observadas nas três estações vizinhas; das precipitações médias nas três estações circunvizinhas, e da precipitação média do posto a ser preenchido.

#### b.2) Método de regressão linear

Um método mais aprimorado de preenchimento de falhas consiste em utilizar as regressões lineares simples ou múltipla.

Na regressão linear simples, as precipitações do posto com falhas e de um posto vizinho são correlacionadas. As estimativas dos dois parâmetros da equação podem ser obtidas graficamente ou através do critério de mínimos quadrados.

Na regressão múltipla as informações pluviométricas do posto a ser preenchido são correlacionadas com as correspondentes observações de vários postos vizinhos através de equações.

#### b.3) Método de ponderação regional com base em regressões lineares.

Este método é uma combinação dos dois anteriores e consiste em estabelecer regressões lineares entre o posto com dados a serem preenchidos e cada um dos postos vizinhos. De cada uma das regressões lineares efetuadas obtém-se o coeficiente de correlação, e estabelecem-se fatores de peso, um para cada posto. A soma de todos os fatores de peso deve ser a unidade.

#### c) análise de consistência de séries pluviométricas

Após o preenchimento da série é necessário analisar a sua consistência dentro de uma visão regional, isto é, comprovar o grau de homogeneidade dos dados disponíveis num posto com relação às observações registradas em postos vizinhos.

##### c.1) Método da dupla massa

Desenvolvido pelo Geological Survey (USA), é válido para séries mensais ou anuais e é de uso comum no Brasil. O método consiste em selecionar os postos de uma região, acumular para cada um deles os valores mensais (se for o caso), e traçar em um gráfico cartesiano os valores acumulados correspondentes ao posto a consistir (nas ordenadas) e de um outro posto confiável adotado como base de comparação (nas abscissas).

Um aprimoramento do método consiste em obter-se os valores médios das precipitações mensais acumuladas em vários postos da região e utilizar-se a série, assim formada, como *base de comparação* (colocando estes valores nas abscissas). Se os valores do posto a consistir são proporcionais aos observados na base de comparação, os pontos devem-se alinhar segundo uma única reta. A declividade da reta determina o fator de proporcionalidade entre ambas as séries. Também é possível que os postos não se alinhem segundo uma única reta.

##### c.2) Método do vetor regional

É válido para séries mensais ou anuais. O vetor regional é definido como uma série cronológica, sintética, de índices pluviométricos anuais (ou mensais), oriundos da extração por um método de máxima verossimilhança da informação mais provável contida nos dados de um conjunto de estações de observação, agrupadas regionalmente. Este método apresenta várias vantagens sobre o tradicional enfoque de dupla massa, pois, além de trabalhar com a informação mais provável, é de fácil implementação computacional e possibilita o seu uso em trabalhos de regionalização hidrológica.

#### d) Precipitação média numa área

Nos itens anteriores foram abordados métodos de tratamento de dados pluviométricos e pluviográficos que, com diferentes objetivos, visaram produzir estimativas pontuais de precipitação. Para calcular a precipitação média numa superfície qualquer, é necessário utilizar as observações dentro dessa superfície e nas suas vizinhanças.

Aceita-se a precipitação média como sendo uma lâmina de água de altura uniforme sobre toda a área considerada, associada a um período de tempo dado (com uma hora, dia, mês, ano). Isso não deixa de ser uma abstração, pois a chuva real obedece a distribuição espacial e temporal variáveis. Existem diversos métodos para sua determinação, conforme a ponderação que se faz das observações pontuais disponíveis:

#### d.1) Método da média aritmética

Admite-se que todos os pluviômetros têm o mesmo peso. A precipitação média é calculada como a média aritmética dos valores medidos. O método ignora as variações geográficas da precipitação, portanto é aplicável apenas em regiões onde isso possa ser feito sem incorrer em grandes erros, como áreas planas com variação gradual e suave do gradiente pluviométrico e com cobertura de postos de medição bastante densa.

#### d.2) Método de Thiessen

Este método considera a não uniformidade da distribuição espacial dos postos, mas não leva em conta o relevo da bacia. O método dá bons resultados em terrenos levemente acidentados, quando a localização e exposição dos pluviômetros são semelhantes e as distâncias entre eles não são muito grandes. Facilita o cálculo automatizado, já que uma vez estabelecida a rede, os valores das áreas de influência dos postos permanecem constantes, mudando apenas as precipitações.

#### d.3) Método das isoietas

As isoietas são linhas de igual precipitação que podem ser traçadas para um evento ou para uma duração específica. Para se obter a precipitação planimétrica-se a área entre duas isoietas consecutivas,  $A_i, A_{i+1}$ , multiplica-se pela média das precipitações das respectivas isoietas,  $(P_i + P_{i+1})/2$ , e divide-se pela área total. Este método considera a não uniformidade da distribuição espacial dos postos e o relevo da bacia.

### **5.1.2 - Regionalização de vazões**

O conhecimento adequado do comportamento de processos hidrológicos é de grande importância para a gestão de recursos hídricos, pois em face à sua crescente demanda, o conhecimento apenas qualitativo não permite o gerenciamento dos recursos hídricos de forma sustentável. Desta forma é importante a quantificação destes processos, que deve ser feita através da observação de variáveis hidrológicas ao longo do tempo.

Uma rede hidrológica de informação dificilmente abrange todos os locais de interesse. A dificuldade de obtenção de dados para os estudos em hidrologia e recursos hídricos conduziu os hidrólogos a buscarem formas de transferência de informações de um local para outro nas bacias hidrográficas.

Devido aos altos custos de implantação, operação e manutenção de uma rede hidrométrica, torna-se importante à otimização das informações disponíveis.

A regionalização consiste em um conjunto de ferramentas que explora ao máximo as informações existentes, visando à estimativa de variáveis hidrológicas em locais sem dados ou com dados insuficientes. A regionalização permite a redução de gastos com medições de parâmetros hidrológicos através da otimização das informações existentes.

Regionalização tem sido definida como a transferência de informações de um local para outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante e pode ser usada para:

- Melhor explorar as amostras pontuais e, em consequência melhorar as estimativas das variáveis;
- Verificar a consistência das séries hidrológicas;
- Identificar a falta de postos de observação.

Entre as funções e parâmetros que podem ser regionalizados incluem-se:

- funções estatísticas de variáveis hidrológicas tais como curva de probabilidade de vazões máximas (cheias de com período de retorno T anos), médias ou mínimas e curvas de probabilidade de precipitações máximas;
- funções específicas que relacionam variáveis tais como: curva de regularização, curva de infiltração e curva de permanência;
- parâmetros de modelos hidrológicos: características do hidrograma unitário e parâmetros de outros modelos hidrológicos.

#### Análise dos dados básicos para regionalização:

A análise dos dados básicos está implícita na maioria dos estudos hidrológicos, mas na regionalização deve ser orientada para que a escolha e seleção das informações sejam examinadas de acordo com a variável regionalizada. Por exemplo, no caso de vazões mínimas a parte inferior da curva de descarga e a mobilidade do leito são fatores importantes na qualidade dos dados de um posto. Numa região, parte dos dados pode não ser utilizada devido à sua qualidade ou por serem insuficientes.

Os dados hidrológicos, cartográficos e descritivos da região a ser regionalizada devem ser reunidos. Os dados descritivos são a localização geográfica da região, rios principais e seus afluentes, cobertura vegetal, relevo, formação geológica, distribuição climática, entre outros. Estes dados permitem visualizar e entender o comportamento hidrológico das bacias.

Os dados físicos se referem ao mapeamento das informações anteriores. Para regiões com grande área ( $>100.000 \text{ km}^2$ ) utiliza-se um mapa global em escala de 1:1.000.000 ou 1:500.000 para localização, e mapas de 1:250.000, 1:100.000 ou 1:50.000 para obtenção das variáveis físicas das bacias. Os postos disponíveis no Brasil são relacionados na base de dados da ANA/ANEEL.

Inicialmente são selecionados os postos com alguns critérios mínimos, tais como:

- disponibilidade de vazões;

- séries com pelo menos cinco anos de dados. Este limite inferior não é suficiente para um estudo estatístico, mas considerando que outros postos possuem série longa é possível que estes dados agreguem informações na região. No caso da curva de permanência e regularização este limite de anos para a série é insuficiente, com exceção das séries que, mesmo com poucos anos, englobam o período crítico regional.

Os dados dos postos selecionados devem ser analisados quanto à qualidade da curva de descarga, mobilidade da seção e confiabilidade dos dados históricos. Os postos, na segunda fase, são selecionados com base nas informações mencionadas, em critérios específicos que podem ser adaptados de acordo com a situação da região. Esses critérios devem ser revistos pelo usuário para cada bacia, procurando adaptá-los às condições gerais de informação, pois o objetivo é a diferenciação da qualidade dos dados entre os postos. As notas atribuídas a cada posto permitem que na fase da regionalização sejam identificados mais facilmente os postos com melhor qualidade de dados.

### Regionalização de vazões máxima, média e mínima

A vazão máxima se refere aos valores extremos que podem produzir enchentes nas margens. As vazões máximas podem ser controladas por obras hidráulicas como condutos, bueiros e vertedores, permitindo a drenagem do escoamento. A estimativa da vazão máxima torna-se importante para o controle da inundação e dimensionamento das referidas obras hidráulicas.

A vazão máxima pode ser estimada a curto ou a longo prazo. A estimativa a curto prazo é o acompanhamento de um evento a tempo real resultante de uma precipitação. A previsão a longo prazo é a previsão estatística da vazão máxima (diária ou instantânea) em qualquer ano. A vazão máxima está ligada a um determinado risco e pode ser obtida por uma distribuição de probabilidade. A regionalização da vazão máxima envolve a estimativa da curva de probabilidade para um local sem dados ou com dados escassos.

A vazão média anual de um rio é a média diária de todos os valores do ano. A vazão média de longo período é a média das vazões médias anuais ou a média das médias.

A vazão média permite caracterizar a capacidade de disponibilidade hídrica de uma bacia e seu potencial energético, entre outros usos. A vazão média de longo período é a maior vazão possível de ser regularizada numa bacia.

As vazões mínimas geralmente se caracterizam pelos menores valores das séries anuais. A vazão mínima é associada com uma duração  $t$ . Por exemplo, a vazão mínima de um ano qualquer com duração de 30 dias indica que é o menor valor do ano da vazão média de 30 dias consecutivos. Na prática, pouca utilidade tem a vazão mínima de 1 dia, enquanto as durações maiores, como 7 dias ou 30 dias apresentam maior interesse ao usuário, já que a seqüência de vazões baixas é a condição mais crítica na utilização da água.

A curva de probabilidade de vazões mínimas permite a estimativa do risco de que ocorram vazões menores que um valor escolhido. Esta curva de probabilidade é utilizada em estudo de qualidade de água, regularização de vazão para abastecimento de água e irrigação, entre outros.

## 5.2 – Análise de dados de qualidade de água

### 5.2.1 - Seleção da metodologia de análise de dados apropriada

A seleção de uma particular metodologia de análise de dados para investigação de qualidade da água depende basicamente de dois fatores:

- a) O tipo de informação solicitada;
- b) A natureza do dado disponível.

No caso de qualidade da água, existem essencialmente três tipos de informações a serem derivadas da análise de dados:

- a) Informação sobre os *valores médios* das variáveis de qualidade de água;
- b) Informações sobre os *valores extremos* das variáveis de qualidade de água;
- c) Informação sobre *tendências* (espaciais ou temporais) em qualidade de água.

Cada uma dessas propriedades necessita de técnicas diferentes de análise de dados para ser confiavelmente descrita. Estas técnicas serão também classificadas de acordo com sua adequabilidade para com a natureza dos dados disponíveis.

### 5.2 2 – A natureza dos dados de qualidade de água

Processos hidrológicos, incluindo qualidade da água, podem ser analisados como séries univariáveis na forma de séries temporais (uma função do tempo) ou como séries lineares (uma função da distância) quando uma das dimensões, tempo ou espaço, é mantida constante. Entretanto, a informação de tal processo é freqüentemente necessária em ambas distribuições, temporais e espaciais, de modo que são utilizadas técnicas de análise multivariáveis para um entendimento completo da sua evolução sobre o tempo e o espaço.

Três ferramentas básicas de amostragem afetam a informação resultante obtida sobre qualidade da água:

- a) Variáveis amostradas;
- b) Freqüência de amostragem;
- c) Locais de amostragem.

Com relação à primeira característica, a dificuldade é que a qualidade da água, mesmo em um local singular, tem que ser descrita por um grande número de variáveis em contraste com o dado de vazão que é representado por uma variável singular em um ponto no espaço. Assim, a análise da qualidade da água para um local singular torna-se uma análise multivariável onde a relação entre muitas variáveis tem que ser investigada.

A segunda característica de monitoramento, a freqüência temporal de amostragem, é o aspecto mais problemático com relação à análise de dados em qualidade da água. Variáveis de qualidade da água são freqüentemente observados esporadicamente em intervalos de tempo irregulares. Suas séries de dados têm muitos intervalos e valores falhados e também podem ter longos intervalos sem observações. Outro problema é o

período em que as observações de qualidade da água são feitas, freqüentemente muito curto. Assim, a aplicação de técnicas clássicas de dados seriais temporais é dificultada por essas características das observações de qualidade da água.

A terceira característica relaciona-se a adequada representação espacial da qualidade da água. Mesmo existindo números e localizações de amostragem suficientes, a informação transferida entre variáveis de qualidade da água no domínio espacial é freqüentemente pobre. Isso é devido a freqüências de amostragem temporais para uma variável singular em locais diferentes não concordarem, ou porque variáveis diferentes são monitoradas em locais diferentes. Assim, uma descrição espacial completa da qualidade da água ao longo de um curso d'água pode não ser realizada eficientemente.

Em função das características multivariável, multilocal e irregularidade dos dados de qualidade da água, sua análise é dificultada de tal modo que os pesquisadores estão em contínua pesquisa de técnicas apropriadas para identificar as distribuições de qualidade da água.

### **5.2.3 – Análise das médias de qualidade de água**

Em gestão de qualidade de água, o valor médio de uma variável de qualidade da água em um local particular é requerido com freqüência, e é solicitada para propósitos de fiscalização geral ou demandas de tratamento de controle de qualidade da água. Por exemplo, o projeto de uma planta de tratamento para regularizar a qualidade de efluentes é baseado no conhecimento dos valores médios de variáveis particulares monitoradas em um local. Os critérios de projeto são baseados em médias verdadeiras a serem estimadas a partir de dados observados. Certamente, uma ou duas observações ao acaso não são suficientes para decidir sobre o valor médio verdadeiro. Uma série de dados deve ser analisada em quantidades adequadas de tal modo que a concentração de qualidade da água média possa ser seguramente estimada. Assim, a questão é avaliar quantas amostras determinam a média verdadeira com um certo nível de confiança.

Há metodologias para determinar a freqüência temporal de amostragem requerida para obter-se o valor médio verdadeiro de uma variável de qualidade da água com um nível específico de confiança estatística, como a proposta por Sanders e Adrian (1978).

As metodologias para estimativa de valores médios são perfeitamente válidas em sentido estatístico, mas sua aplicação para curtas durações irregularmente observadas de dados não produz sempre resultados confiáveis, pois as hipóteses de tais métodos freqüentemente não são verificadas em séries de dados de qualidade da água. Esse pode não ser o caso de alguns países desenvolvidos onde os bancos de dados tenham sido preenchidos com dados observados regularmente.

### **5.2.4 – Determinação de extremos em qualidade de água**

O conhecimento de valores extremos é requerido para propósitos de regulamentação, tais como a detecção de violação de padrões. A maior dificuldade associada com avaliação de conformidade de padrões é que esta é baseada em amostragens. Neste contexto, é altamente afetada por erros de amostragens e pelas incertezas resultantes. Por exemplo, a qualidade real da água em um ponto no tempo e espaço pode exceder

um valor crítico, mas este evento pode não ser percebido se a amostragem não ocorrer neste tempo. Ou, se uma amostra tomada em um certo tempo mostrar que a qualidade é boa, esta qualidade é assumida até a próxima amostragem.

O problema principal em avaliação para conformidade origina-se na seleção de freqüências de monitoramento. Os avanços na capacidade de medida permitem observar muito melhor a variabilidade e as incertezas no comportamento dos processos de qualidade da água. Através de meios de monitoramento contínuo, pode-se identificar não somente as concentrações médias de poluentes, mas também a ocorrência de eventos extremos na forma de cargas instantâneas. Por outro lado, monitoramento contínuo é freqüentemente custoso em tempo, trabalho e recursos, além de ser altamente sensível à falhas de sistemas, ou seja, falhas de equipamentos (embora internacionalmente o número de estações com monitoramento contínuo esteja aumentando). Então a questão é quão freqüente a qualidade da água deve ser amostrada ou quantas amostras devem ser tomadas de modo que os extremos não sejam despercebidos. A resposta é basicamente tratada por abordagens probabilísticas, as quais são válidas para variáveis de qualidade de água desde que sejam de natureza aleatória.

As probabilidades de exceder (ou não exceder) determinadas probabilidades podem ser determinadas por abordagem paramétrica ou não paramétrica. A primeira requer o ajustamento de funções de distribuição de probabilidade para descrever a variável aleatória, e é por isso sujeita a incertezas na modelagem (erros). A abordagem não paramétrica para quantificação de riscos naturais e/ou impactos incluem o uso das fórmulas de posição de plotagem.

A condição de conformidade ou violação acarreta um fator de risco na forma de uma variável de qualidade da água exceder (ou não exceder) um valor crítico colocado como um padrão.

Algumas vezes a freqüência de ocorrências de resultados indesejáveis (não atendimento a conformidade) pode ser considerada mais significativa de tal forma que não possa exceder um valor crítico. Pode-se também, além da freqüência de atendimento, determinar que o grau de não atendimentos também seja importante expressando este requerimento usando quantidades. Por exemplo, a concentração de uma carga de poluente pode ser requerida a não exceder um nível crítico particular. Nesse caso, o padrão é colocado como o nível crítico, e o fator de risco se refere então àquelas amostras que não atenderam ao padrão.

Definir o nível crítico significa que um nível aceitável de risco ou não atendimento da conformidade é a priori determinado, de tal modo que um percentual particular de amostras é esperado a satisfazer a condição. Por exemplo, se o nível é selecionado como 5%, isto indica uma taxa de não atendimento aceitável de 5%, de tal forma que 95% das amostras devem satisfazer o padrão. Tal avaliação prevê a determinação de valores percentuais a partir de amostras estatísticas observadas usando abordagens paramétricas e não paramétricas.

A interpretação de padrões como valores percentuais afasta a avaliação da conformidade pelo uso de um padrão que é desnecessariamente rígido em algumas circunstâncias e não suficientemente rígido em outras. Similarmente, isto também previne o uso de um padrão que é inconsistente com a capacidade de instalações de tratamento existentes ou com o custo de melhorias possíveis. Assim, os padrões são

neste momento descritos em bases probabilísticas para levar em consideração as circunstâncias locais e os objetivos de qualidade. Limites de classe percentual de 95% são adotados para descrever padrões de qualidade da água na maioria dos países. Isso implica um risco aceitável de 5% de não atendimento da conformidade.

A dificuldade principal na comparação de um valor percentual particular de qualidade da água com um padrão é que, por acaso, pode-se ter um cenário de amostras ruins que mostram não conformidade, ou ao contrário, um cenário de amostras boas que indicam conformidade, embora o local de amostragem realmente violasse o padrão.

Essa incerteza na avaliação ocorre devido ao erro de amostragem, quando casos de falha verdadeira ou conformidade verdadeira não podem ser observados devido à amostragem discreta. Tais erros de amostragem levam a riscos de tomada de decisões erradas considerando a conformidade com os padrões. Esse risco pode ser expresso na forma de limites de confiança para descrever a faixa dentro da qual o valor verdadeiro de 95% é esperado situar. A seleção do nível de risco depende da avaliação do planejador da significância relativa ao problema considerado.

A avaliação de extremos em qualidade da água requer o ajustamento de distribuições de probabilidade, o qual é freqüentemente difícil pela natureza dos dados de qualidade da água coletados. Assim, utilizam-se também métodos não paramétricos. Situação similar existe na avaliação de tendências de qualidade da água.

## **5.2.5 – Determinação de tendências em qualidade de água**

### a) Objetivos da avaliação de tendências

Práticas de monitoramento têm sido feitas para avaliar as conseqüências dos esforços de controle de poluição (tratamentos de efluentes, etc), determinando o status atual da qualidade da água, e detectar possíveis alterações em processos de qualidade com relação ao tempo e ao espaço. Essencialmente, em relação a esses objetivos, os esforços de monitoramento têm sido intensificados em quase todos os países desenvolvidos, onde quantidades significativas de pesquisas são direcionadas para investigação e avaliação de tendências em qualidade da água (principalmente superficiais) em bases regionais e nacionais. É freqüentemente difícil determinar a média verdadeira ou os extremos em qualidade da água devido à variação no tempo das características das variáveis de qualidade, de tal modo que se torna imperativo a investigação de possíveis tendências em qualidade da água com relação ao tempo.

Por outro lado, observações de qualidade da água freqüentemente são constituídas de séries intermitentes de dados de tal forma que a aplicação de métodos clássicos para análise de tendências tem geralmente produzido resultados insatisfatórios. Assim, esforços têm sido intensificados para desenvolver, aplicar e testar técnicas mais efetivas para análise de tendências. Nesses estudos, métodos não paramétricos são propostos uma vez que, através destas técnicas, problemas relativos a distribuições de probabilidade de variáveis de qualidade da água, pequenos períodos de observação e caráter esporádico dos dados de qualidade da água podem ser efetivamente manuseados.

Desde os anos 70, muitas técnicas não paramétricas baseadas em ordens estatísticas de dados observados foram desenvolvidas, particularmente para análises de

tendências em qualidade da água. A qualidade do ajustamento dessas técnicas depende das propriedades estruturais das séries e do tipo de tendência temporal investigada.

#### b) – Métodos paramétricos de detecção de tendências

Métodos estatísticos paramétricos para detecção de tendências são técnicas que usam os valores numéricos de dados observados diretamente e que, por isso, requer que a distribuição de probabilidade do processo seja conhecida. O teste paramétrico mais conhecido é o t-teste, que assume que a função de densidade de probabilidade é normal.

Muitos bancos de dados de qualidade da água existentes têm-se mostrado inadequados para análises de métodos paramétricos padrões porque as séries de dados disponíveis não preenchem os requerimentos de tais métodos. Basicamente, a aplicação de técnicas estatísticas tradicionais para dados de qualidade da água não normais correlacionados temporalmente e espacialmente é problemática. As dificuldades associadas com dados de qualidade da água na avaliação de tendências por métodos paramétricos são descritas por vários pesquisadores como:

- a) Existem comumente muitas variáveis;
- b) Existem falhas e/ou dados perdidos na maioria dos registros;
- c) Algumas concentrações estão abaixo do limite de detecção e não podem ser designadas como um valor numérico em laboratório;
- d) Existe forte sazonalidade em algumas variáveis;
- e) Os dados podem ser correlacionados no tempo e entre constituintes;
- f) Os registros de dados são freqüentemente pequenos;
- g) As técnicas e as sensibilidades dos métodos analíticos tem mudado através dos anos;
- h) Os locais de amostragem e as freqüências têm mudado em muitos casos;
- i) Variações naturais de concentrações de fundo freqüentemente escondem tendências de qualidade da água;
- j) Séries de tempo de qualidade da água freqüentemente apresentam distribuições não normais;
- k) Variáveis de qualidade da água são freqüentemente correlacionadas com o escoamento de tal modo que é difícil identificar tendências verdadeiras em qualidade da água.

Devido principalmente aos problemas acima, as pesquisas recentes em detecção de tendências têm procedido em favor de métodos não paramétricos para o caso de variáveis de qualidade da água.

#### c) – Métodos não paramétricos de detecção de tendências

Recentemente, muitos testes não paramétricos para tendências em qualidade da água têm sido propostos. Os métodos não paramétricos são mais flexíveis e podem lidar com os problemas dos dados de qualidade de água mais facilmente. Um teste não paramétrico é um método para testar uma hipótese onde o teste não depende da forma da distribuição. Por isso, métodos não paramétricos são algumas vezes referidos como métodos livres de distribuição.

Os tipos mais usados de métodos estatísticos para detecção de tendência e modelagem podem ser resumidos na tabela 5.1 junto com as características dos dados de qualidade da água que limitam seu uso.

Tabela 5.1 – Métodos estatísticos para detecção de tendência e modelagem e as características dos dados de qualidade da água que limitam seu uso.

Objetivos	Métodos estatísticos	Características dos dados limitantes para uso do método estatístico(*)
Modelagem das séries	Análise de series temporais	D, E
Detecção de tendências	Métodos gráficos (dupla massa, Cusum)	A, B, C
	Testes paramétricos	A, B, C, E
	Testes não paramétricos	A

- (\*) A: dependência dos termos de erro;  
 B: termos de erro com distribuição não normal;  
 C: termo de erro com variância não constante;  
 D: observações espaçadas irregularmente no tempo;  
 E: observações abaixo do limite de detecção.

Os testes de Mann-Whitney, Spearman e Kendall são considerados como os melhores métodos para detecção de tendência em séries temporais de qualidade da água.

O uso de testes não paramétricos pode ser complicado por dependência serial, a qual freqüentemente ocorre em observações de qualidade da água. Tal dependência serial é devida a três fatores: variações sazonais, persistência, e tendências monotônicas. Em anos recentes, métodos não paramétricos têm sido propostos para dar conta de variações sazonais e persistência. Técnicas em blocos e de escala alinhada foram aplicadas a séries com sazonalidade; além disso, modificações dos testes Spearman, Mann-Whitney e em blocos foram propostos para tratar com a persistência.

Assim, muitos testes são viáveis para análises de tendências em qualidade da água, mas usualmente são aplicáveis somente para tipos específicos de tendência e séries temporais.

## 5.2.6 – Conclusões

Neste item foi apresentada uma revisão dos métodos de análises de dados usados correntemente, focando em propriedades básicas dos dados de qualidade da água (médias, extremos e tendências). Essencialmente, os métodos discutidos são as técnicas mais comuns empregadas em análises estatísticas. Discutiu-se como essas técnicas se comportam para o caso dos dados de qualidade da água desorganizados; assim, sua aplicação para tais dados foi verificada no caso de séries de tempo de qualidade da água observadas irregularmente com tamanhos de amostras pequenos, perdas de observações, e falhas de registro dentro das séries.

Assim, ficou demonstrado que os métodos estatísticos clássicos devem ser aplicados com cautela na presença de amostras de qualidade da água desorganizadas. Quanto a isso, abordagens não paramétricas parecem comportar-se melhor em comparação com suas alternativas paramétricas.

Uma importante conclusão é que as dificuldades na aplicação da maioria dos métodos estatísticos aparecem nas deficiências das práticas de monitoramento aplicadas, ou seja, na seleção das frequências de amostragens, locais, duração da amostragem, etc. Desse modo, é essencial definir a priori a expectativa de informação específica do monitoramento e depois expressar essa expectativa em termos estatísticos. Este parece ser o único caminho para produzir dados que cumprem as hipóteses e os requerimentos dos métodos de análise de dados disponíveis.

# **Gestão das Informações Ambientais**

## **Capítulo 6**

### **Modelagem de Processos Ambientais**

#### **6.1 – Introdução**

Modelagem é o estágio em que dados são transformados em informação requerida para a gestão ambiental. Assim, constitui-se em um componente essencial do processo de tomada de decisão. Em anos recentes, a adoção de abordagens integradas em gestão ambiental tem também modificado o modo como modelos ambientais são estruturados e empregados. Um bom exemplo para esse desenvolvimento é o caso de modelos hidrológicos os quais envolvem de modelos simples simulando processos individuais na bacia aos atuais modelos desenvolvidos para compreender toda a bacia hidrográfica. Neste capítulo será feita uma revisão de modelos usados correntemente com relação aos seus propósitos e conteúdos.

#### **6.2 – Tendências em modelagem hidrológica**

##### **6.2.1 – Abordagens básicas até os anos 90**

Modelos hidrológicos, quer físicos, quer matemáticos, são representações de sistemas hidrológicos reais. Modelos físicos, que são baseados em uma analogia física com a operação de um sistema, são freqüentemente inadequados quando o propósito da modelagem é a identificação dos processos básicos e suas interações dentro de um sistema natural complexo. Assim, modelos matemáticos são mais largamente utilizados.

As características básicas da modelagem matemática em hidrologia têm mudado dentro das últimas três décadas. A década de 70 pode ser considerada como a década da hidrologia estocástica, que então prosperou e atingiu uso muito difundido. Dois fatores facilitaram o uso de técnicas estatísticas na análise de processos hidrológicos: disponibilidade de dados suficientes que permitiram a análise estatística e desenvolvimentos na capacidade de computadores.

Por exemplo, até meados dos anos 70, esforços para modelagem de níveis e correntes do mar no Mar Negro estavam restritos a modelos hidrodinâmicos os quais foram rodados com um conjunto de valores de entrada exatos. A variabilidade aleatória dos fluxos e níveis do mar não pode ser levada em consideração uma vez que a quantidade de observações disponíveis não permitiu análises estatísticas. Foi somente depois da acumulação de dados monitorados que variáveis que descrevem correntes e níveis do mar foram investigadas como séries temporais. Além disso, como o monitoramento de tais dados foi realizado em freqüência alta da ordem de minutos, tanto o armazenamento como a análise dos dados requereram computadores com capacidades suficientes.

A situação foi similar para a maioria das variáveis hidrológicas de tal modo que a prática de modelagem dos anos 70 pode ser descrita como sendo baseada estatisticamente. Além disso, esses modelos foram focados na descrição de um processo hidrológico em um ponto particular para revelar basicamente sua variabilidade temporal.

A década de 80 experimentou o florescimento de outra abordagem em modelagem: técnicas otimizadas. Naqueles anos, os problemas associados com gestão e planejamento de recursos d' água, e também àqueles relacionados a todos os processos ambientais, cresceram em extensão e complexidade. Objetivos, demandas e soluções possíveis tornaram-se diversas e complicadas. Assim, a seleção da "melhor" solução alternativa foi demandada com relação a objetivos técnicos e sócio-econômicos. Dessa forma, técnicas otimizadas tornaram-se populares como ferramentas significativas adicionadas nos processos de tomada de decisão para gestão ambiental em geral, e para gestão de recursos hídricos em particular. Em paralelo com métodos otimizadas, técnicas de simulação foram também usadas para alcançar, não "a melhor" decisão, mas decisões de melhor uso.

Tratando-se processos ambientais de modo geral, os modelos foram classificados em modelos de decisão (gestão) e modelos tecnológicos. Modelos tecnológicos foram baseados em conceitos físicos, químicos, e biológicos (tais como aqueles de dinâmica de fluido e bioquímica) para delinear o comportamento de sistemas ambientais naturais. Esses foram basicamente modelos científicos os quais serviram para apontar com precisão variáveis representativas e processos diversos que acontecem no sistema. Tais modelos tecnológicos foram considerados como modelos ambientais de nível micro, uma vez que estavam interessados principalmente na identificação do fenômeno real.

Modelos de decisão ou gestão eram modelos de nível macro que serviam a propósitos de tomada de decisão, planejamento de longo termo, teste e previsão de efeitos futuros de gestão e estratégias de controle. Esses foram essencialmente modelos de simulação e otimização que deram suporte a decisões a serem feitas ou criaram práticas a serem realizadas no meio ambiente onde a natureza verdadeira do sistema é identificada através de modelos tecnológicos. Em comparação com modelos tecnológicos, modelos de decisão têm maiores dimensões, pois consideram fatores sociais, políticos, legais e econômicos. Como mostrado na fig 6.1, modelos tecnológicos foram então considerados como componentes dos modelos de decisão, incorporados tanto na função de objetivos como nas restrições.

Para desenvolver um modelo de decisão, o problema a ser investigado tem que ser descrito primeiro como um sistema, que pode ser um sistema ecológico em senso geral. Cada subsistema constituindo um componente de um sistema maior, de tal modo que existem interações contínuas entre os sistemas.

Uma vez que o sistema tenha sido especificado, o modelo de decisão pode ser realizado através da determinação da função objetiva e das restrições. Em geral, modelos de decisão ambiental usualmente têm tais componentes como funções de demanda, modelos de poluição, modelos de qualidade e desenvolvimento ambiental, funções de risco e políticas de gestão (decisão).

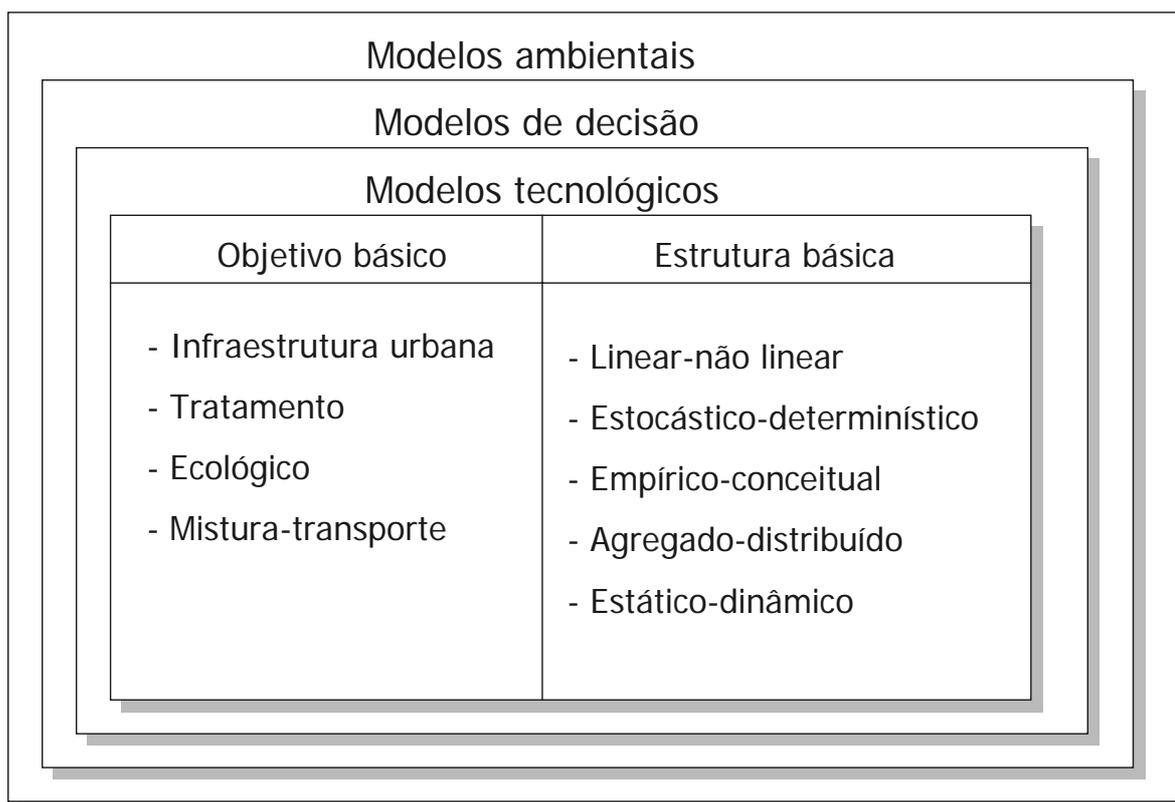


Figura 6.1 – Classificação dos modelos ambientais

A maioria dos modelos de decisão foi formulada como modelos otimizados onde uma solução ótima ou “a melhor” pode ser obtida para o problema investigado. Frequentemente, os resultados de um modelo otimizado foram confirmados através de técnicas de simulação, especialmente no caso de sistemas complicados onde a relação entre vários componentes do sistema não pode ser definida analiticamente. Por meio de modelos de simulação, foi possível observar o comportamento de sistemas em detalhes com relação a entradas físicas e econômicas. Além disso, números grandes de variáveis podem ser consideradas para avaliar muitas soluções alternativas.

Como discutido anteriormente, modelos de decisão foram considerados modelos de nível macro cobrindo aspectos físicos, econômicos, sociais, políticos e legais do problema. O comportamento físico de um sistema ambiental foi então definido por um modelo tecnológico, o qual usualmente é um modelo ecológico em escala ampla. Modelos de ecossistema foram desenvolvidos de duas maneiras para propósitos de gestão ambiental. Primeiro tais modelos podem ser usados para prever o comportamento do sistema ambiental para um conjunto de entradas dadas. Essa é basicamente uma aproximação simulada onde o modelo executa uma função descritiva. Segundo, quando padrões ou objetivos de gestão específicos foram dados, modelos de ecossistemas foram executados juntos a modelos de decisão (frequentemente um modelo otimizado) onde o nível ótimo de entradas para o modelo de ecossistema foi determinado através do modelo de decisão. Nesse caso, o comportamento do sistema foi analisado junto com fatores econômicos e padrões de tal forma que o modelo ecológico desempenha uma função prescritiva. Evidentemente, a formulação matemática de tal modelo é muito mais difícil que para o primeiro caso.

Vários modelos ambientais têm sido desenvolvidos com graus variados de complexidade. Essencialmente, atividades de modelagem podem ser identificadas no

passado a partir da formulação de Streeter-Phelps de 1925, a qual ainda é válida com algumas modificações. Mudanças nos objetivos da gestão ambiental têm também afetado os esforços de modelagem de tal forma que não somente específicos, mas também problemas multidimensionais foram investigados para produzir formulações detalhadas como modelos ecológicos compreensivos. Realmente, a partir do fim dos anos 70, modelagem ambiental tornou-se quase um costume. Isto foi devido aos tomadores de decisão tenderem a confiar mais em modelos matemáticos, pois poderiam ser usados com vantagens significativas na realização de decisões de gestão. Obviamente, o advento de computadores mais potentes foi uma das principais razões para a intensificação dessa tendência. O resultado foi o desenvolvimento de modelos altamente complexos, mormente de características determinísticas.

Pode ser interessante rever os tipos de modelos tecnológicos como mostrado na figura 6.1. A figura mostra que quatro tipos de modelos tecnológicos podem ser identificados com relação ao uso do modelo. Os dois primeiros grupos, ou seja, modelos de infraestrutura urbana (abastecimento de água e sistemas de esgotos) e de tratamento (lodo ativado, biofilme, etc.) ajudam em projeto e operação de sistemas físicos. Por isso, constituem ferramentas significativas em aplicações e projetos de engenharia. Quando tais modelos matemáticos são calibrados e validados através do uso de dados de sistemas reais, podem ser usados para determinar dimensões ótimas e políticas operacionais para novos sistemas.

Modelos ecológicos e de transporte-mistura são basicamente modelos de sistemas naturais onde o problema investigado é mais complexo. Modelos ecológicos consideram o ambiente em uma escala significativamente ampla para delinear as complicadas relações entre coisas vivas, matéria, e energia em sistemas reais. O outro grupo de modelos principalmente investiga os mecanismos de transporte e mistura (advecção e difusão) de poluentes dentro de ambientes naturais.

Os quatro tipos anteriores de modelos foram desenvolvidos mais com uma abordagem conceitual que uma empírica quando processos físicos foram dominantes no problema investigado. Basicamente, modelos de infraestrutura e mistura-transporte estão dentro desta categoria. Quando processos químicos e biológicos foram mais significativos como em modelos ecológicos e de tratamento, as características dos modelos foram mais para o lado empírico.

A figura 6.1 também mostra a classificação dos modelos tecnológicos com relação à estrutura do modelo. A seleção entre esses tipos basicamente depende da natureza dominante do sistema ambiental investigado.

Uma abordagem para modelagem é de natureza determinística, onde a aleatoriedade em parâmetros e variáveis básicas é ignorada. A principal dificuldade assenta-se na calibração do modelo usando dados observados. Se dados de campo suficientes e seguros não são disponíveis, a capacidade de previsão do modelo é altamente reduzida, não importando quão bem tenha sido formulado.

Modelos estocásticos consideram a natureza aleatória das variáveis ambientais e suas interações complexas. São modelos mais complexos em comparação com modelos determinísticos; entretanto, incertezas várias fundamentais aos fenômenos ambientais freqüentemente necessitam de uma abordagem estocástica.

Comparações similares existem entre as estruturas dos modelos estáticos (ou permanentes) e dinâmicos. O primeiro é mais fácil de manejar embora contradiga a natureza variante temporalmente do fenômeno ambiental e suas interações. Com relação a este respeito, modelos dinâmicos parecem ser mais favoráveis, embora tenham uma estrutura mais complicada, a qual limita o número de variáveis dinâmicas.

Sistemas ambientais são não lineares por natureza; entretanto, a suposição de linearidade não somente simplifica o modelo, mas também fornece a vantagem do desenvolvimento de uma formulação de programação linear para o modelo de decisão. Por outro lado, a incorporação de um modelo tecnológico não linear em um modelo de gestão complica os procedimentos de modelagem, quando este deve ser então um problema de programação dinâmica ou não linear.

Em essência, processos ambientais constituem sistemas de parâmetros distribuídos. Nos primeiros modelos, essa característica não podia ser levada em consideração, de modo que o fenômeno real era identificado por meio de parâmetros agregados. Foi com o advento de computadores mais potentes que uma descrição detalhada das variáveis do sistema e suas interações puderam ser realizadas na forma de modelos de parâmetros distribuídos.

### **6.2.2 – Tendências recentes**

No fim dos anos 80, a gestão de recursos hídricos tornou-se um esforço muito mais complicado conforme os problemas experimentados cresciam em “escopo” e “escala”. Com relação ao escopo, anteriormente, a questão básica era quanta água era disponível em um ponto particular na bacia. Depois, conforme os problemas de poluição das águas cresciam mais intensamente, tornou-se imperativo considerar a qualidade da água, tão bem quanto sua quantidade, para o planejamento e desenvolvimento dos recursos hídricos. Isso significa que essas duas propriedades da água tiveram que ser avaliadas com relação a todos os fatores causativos, incluindo efeitos induzidos pelo homem tão bem quanto causas naturais.

Com relação à qualidade da água, a avaliação dos pontos de origem de poluição tem sido relativamente mais verdadeira em comparação com aquela de origens não pontuais. Os últimos poluentes requerem uma investigação dos processos terrestres, uso do solo, atividades humanas, propriedades do solo e vegetação, práticas de agricultura, e similares, o que essencialmente constitui todos os componentes do ambiente. Conseqüentemente, recursos hídricos têm sido reconhecidos como parte do “continuum ambiental”. A consideração do ambiente como um todo indica uma mudança na escala dos problemas experimentados; ou seja, que, em anos recentes, problemas ambientais, seus fatores causativos, e por isso as soluções requeridas têm uma dimensão espacial significativa.

Finalmente, o reconhecimento do ambiente como um continuum de todos os processos naturais, mais a consideração sobre desenvolvimento sustentável do ambiente, e muitos outros problemas ambientais levaram a adoção de abordagens integradas para a gestão ambiental.

Como mostrado na figura 6.2, elementos de água compreendem aspectos físicos, químicos e biológicos da quantidade e qualidade de água, suas interações, e os efeitos de restrições naturais tanto quanto externas, constituem a ferramenta sobre a qual a

gestão integrada da água será construída. Restrições externas tais como econômicas, demográficas, meios de transporte e outras formas de desenvolvimento diretamente influenciam um ou outro elemento da água. Similarmente, fatores climáticos, mudança de clima, extremos climáticos e uma grande quantidade de riscos naturais são algumas das causas naturais que muito influenciam os elementos da água e têm impacto significativo na gestão integrada da água.

A demanda de água é derivada de uma variedade de atividades tais como agricultura, abastecimento de água, indústria, energia, transporte e recreação. Claramente, todos os usos da água não podem ser suportados em toda sua extensão, e uma política de gestão integrada tem que ser desenvolvida para incorporar todas as considerações mostradas na figura 6.3.

A evolução dos problemas ambientais mencionada acima e as abordagens usadas em sua gestão têm também levado a mudanças nos procedimentos de modelagem. Essencialmente, quatro desenvolvimentos principais são observados:

- a) Os primeiros modelos usados na análise dos processos hidrológicos, e naqueles em que a bacia hidrográfica é tomada como unidade básica para desenvolvimento de recursos hídricos, consideraram a quantidade de água como processo básico. Assim, a maioria dos modelos de bacia hidrográfica simulou a resposta da bacia hidrográfica ou sem considerar a qualidade da água ou com considerações inadequadas dela. Mais tarde, em reconhecimento da qualidade da água como um elemento essencial para a gestão da bacia hidrográfica, os modelos têm sido desenvolvidos para serem mais versáteis e abrangentes para incluir propriedades físicas, químicas e biológicas da água. Depois disso, esses modelos têm sido desenvolvidos como modelos de qualidade de água na escala da bacia. São necessários basicamente para avaliar duas questões: “efeitos de poluição de origem não pontual” (i.e., avaliação de cargas e/ou posicionamento), e planos de gestão química, como planos de melhor gestão da agricultura para fertilizantes e pesticidas ou, mais recentemente, cargas diárias máximas totais, incluindo origens de contaminantes pontuais e não pontuais.
- b) Previamente, os modelos hidrológicos tradicionais, em sua maioria de tipos conceituais em blocos, têm sido adequados na solução de problemas relacionados à quantidade de água, ou seja, enchentes e secas. Entretanto, em anos recentes, muitos problemas diversos emergiram em planejamento e gestão de recursos hídricos, ou seja, problemas relacionados à irrigação, degradação da terra, erosão do solo, poluição das águas superficiais e subterrâneas, danos aos ecossistemas aquáticos, possíveis mudanças climáticas, e similares. Esses problemas relacionam-se significativamente aos impactos induzidos pelo homem e têm a característica distinta de serem espacialmente distribuídos. Assim, para investigar estratégias de gestão requeridas por tais problemas, a demanda tem crescido por avançados tipos de modelos com distribuição em bases físicas, a maioria de uma natureza determinística.

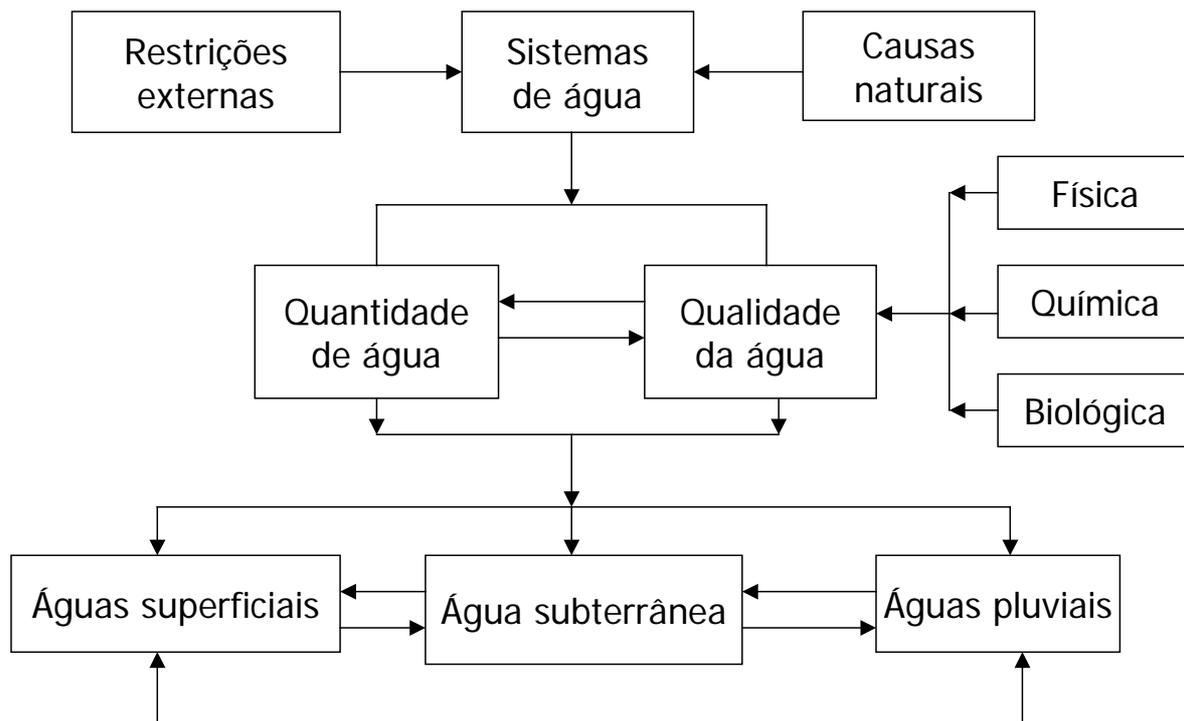


Figura 6.2 – Usos da água e suas interações com o sistema de água

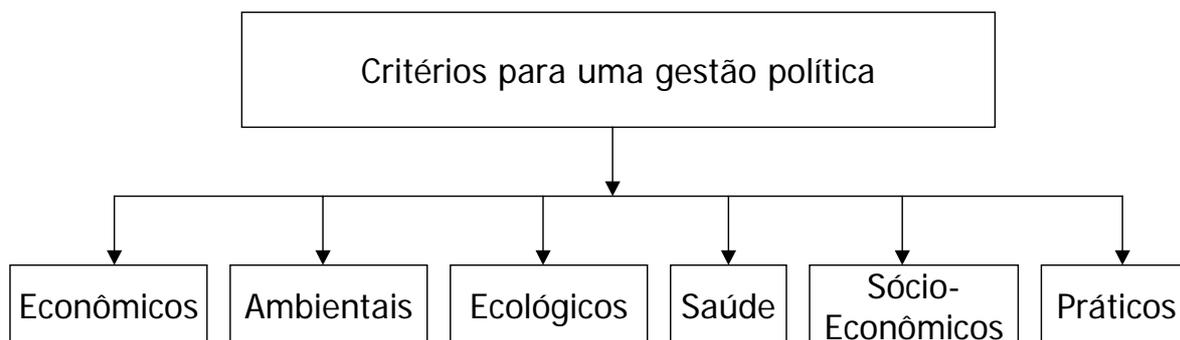


Figura 6.3 – Critérios para uma política de gestão integrada

c) A adoção de abordagens integradas para a gestão ambiental impõe novos requerimentos nas técnicas de modelagem, como comentado nos itens a e b. A gestão ambiental requer a integração de vários componentes tais como físicos, químicos, biológicos, sociais, econômicos, ecológicos, de saúde, e outros elementos ambientais. Isso pode ser realizado através do desenvolvimento e aplicação de modelos de bacia hidrográfica abrangentes os quais são modelos matemáticos baseados em computadores que simulam todos os processos e características de uma bacia hidrográfica. Eventualmente, modelos têm sido desenvolvidos para realizar análises de bacia hidrográfica abrangentes (modelagem de qualidade e quantidade de água) dentro de uma ferramenta singular. Assim, um número de modelos avançados foi formulado como “modelos de bacia hidrográfica integrados”, em lugar de modelos ligados externamente que realizam análises de processos particulares da bacia hidrográfica.

d) Nos últimos anos, com a revolução na tecnologia de comunicação e informação, perspectivas novas têm revelado que modelos de bacia hidrográficas não têm atendido completamente. Exemplos incluem sensoramento remoto e tecnologia de satélites, SIG, inteligência artificial, e análises de confiança e risco. A tecnologia de satélites, é uma tecnologia poderosa para a aquisição de dados sobre áreas extensas e mesmo senão inacessíveis. A tecnologia SIG pode ser utilmente empregada para gestão de dados – recuperação, manipulação, organização, e outros mais – que podem ser inteiramente adequados para desenvolvimento de modelos distribuídos. Inteligência artificial, ou os supostos sistemas especialistas, permitem a realização de modelos de bacia hidrográfica amigáveis e utilizáveis por não hidrologistas. Análises de confiança e risco concedem o fornecimento de informação sobre a segurança dos resultados do modelo que o usuário deseja saber. Ligadas com esses desenvolvimentos, modelos de bacia hidrográfica integrados têm se tornado ferramentas significativas de gestão. A recente abordagem de desenvolvimento e teste de estratégias de gestão envolve a integração de modelos de bacias hidrográficas com SIG, tecnologia de satélites e tecnologias de sistemas inteligentes. Então, esse sistema é executado para um número de esquemas de gestão para avaliar as conseqüências de cenários de gestão alternativos e para alcançar decisões melhores. Essa abordagem fornece ênfase na simulação em vez de técnicas de otimização discutidas no item 6.1.1.

## **6.3 – A função dos modelos em tomadas de decisão ambiental**

### **6.3.1 – Objetivos da modelagem**

Nos dias de hoje, a humanidade alcançou níveis de tecnologia tanto para o desenvolvimento como para a destruição dos ambientes naturais. Apesar dos avanços nas tecnologias disponíveis, dificuldades são ainda encontradas no desenvolvimento e gestão de recursos naturais devido à natureza significativamente complexa dos sistemas e problemas ambientais. O comportamento de tais sistemas traz várias incertezas; assim a gestão de decisões necessita ser realizado sobre condições incertas. Além disso, a tomada de decisão para propósitos de resolução de problemas ambientais torna-se muito mais complicada quando os objetivos e prioridades da sociedade são considerados. Conseqüentemente, fatores muito diversos, mas interrelacionados, de natureza tecnológica, social, política, e econômica necessitam ser avaliados para planejamento e gestão do ambiente. Essa realidade é a essência da gestão ambiental integrada.

Além disso, recursos naturais têm se tornado limitados tanto em quantidade como em qualidade de tal forma que o tomador de decisão tem que selecionar as políticas mais eficientes e efetivas, especialmente por estar também sujeito a restrições orçamentárias. Neste ponto, modelos matemáticos fornecem a base para suas decisões de tal maneira que a mais racional solução possa ser atingida.

Evidentemente, esse desenvolvimento coloca demandas significativas nos modelos matemáticos se estes serão usados como ferramentas em pesquisas para decisões efetivas. Esses modelos são demandados a representar realisticamente e com segurança o que ocorre no ambiente. O problema básico aqui é que sistemas ambientais reais são extraordinariamente complexos por natureza, enquanto os modelos matemáticos inevitavelmente dão lugar a simplificações e hipóteses.

Entretanto, um sistema real é entendido e identificado tanto quanto puder ser descrito matematicamente. Tal identificação matemática é o pré-requisito para decisões e julgamentos de engenharia, uma vez que a informação que não pode ser descrita em termos matemáticos não constitui informação científica. Isso significa que a interpretação de sistemas ambientais e processos de tomada de decisão para propósitos de gestão necessitam ser baseados matematicamente.

Qualquer sistema que é descrito matematicamente pode ser facilmente convertido em um modelo computacional. Isso constitui uma ligação significativa entre problemas ambientais e o advento de computadores de alta capacidade. A natureza complexa dos problemas ambientais requer soluções tecnológicas complexas, multifacetadas e dispendiosas. Tais soluções podem ser alcançadas somente por abordagens “intensivas em informação” para avaliar toda a informação disponível e todos os planos alternativos possíveis. É somente através de recursos computacionais que tais informações podem ser processadas; e conseqüentemente, o desenvolvimento na tecnologia de computadores tem naturalmente afetado os procedimentos de modelagem ambiental.

Basicamente, os modelos servem para dois propósitos básicos:

- a) Identificação dos processos básicos e suas interações em um sistema real, i.e., o continuum ambiental no caso de modelos integrados de bacia hidrográfica. Esse aspecto da modelagem ajuda “a entender e reproduzir como os sistemas modelados trabalham”;
- b) Testar as decisões de gestão alternativas e alcançar políticas de gestão efetivas. Esse aspecto da modelagem ajuda a “prever como o sistema responderá a ações e condições alternativas futuras”.

### **6.3.2 – Relações ambiente-modelagem-decisão**

A relação ambiente-tomada de decisão é estabelecida quando a sociedade gerencia o ambiente natural através dos recursos dos tomadores de decisão. Dentro desse processo, a modelagem atua com uma ferramenta de tal forma que as relações ambiente-modelagem-tomada de decisão são desenvolvidas como indicado na figura 6.4. Existem outros fatores que representam papéis significativos nessa relação tríplice. Resultados de pesquisas científicas servem para um entendimento do ambiente e assim afetam os esforços de modelagem diretamente. Avanços tecnológicos podem produzir o mesmo efeito, embora possam também ter conseqüências adversas sobre o ambiente.

Freqüentemente, as circunstâncias sociais, políticas econômicas onde o tomador de decisão funciona são completamente diferentes daquelas do modelador de tal maneira que uma relação direta entre o modelador e o tomador de decisão não pode ser desenvolvida. Nesse caso, investigações na forma de análises políticas fornecem a transição entre modelagem e tomada de decisão. Tais análises requerem especialistas modeladores e tomadores de decisão. O ponto significativo aqui é a comunicação entre os dois grupos; ou seja, que os modeladores devem desenvolver modelos matemáticos que possam ser “usados” pelos tomadores de decisão. Por outro lado, a extensão a qual modelagem contribui para o processo de tomada de decisão depende significativamente dos tomadores de decisão, ou seja, visão e atitudes com relação ao problema encontrado.

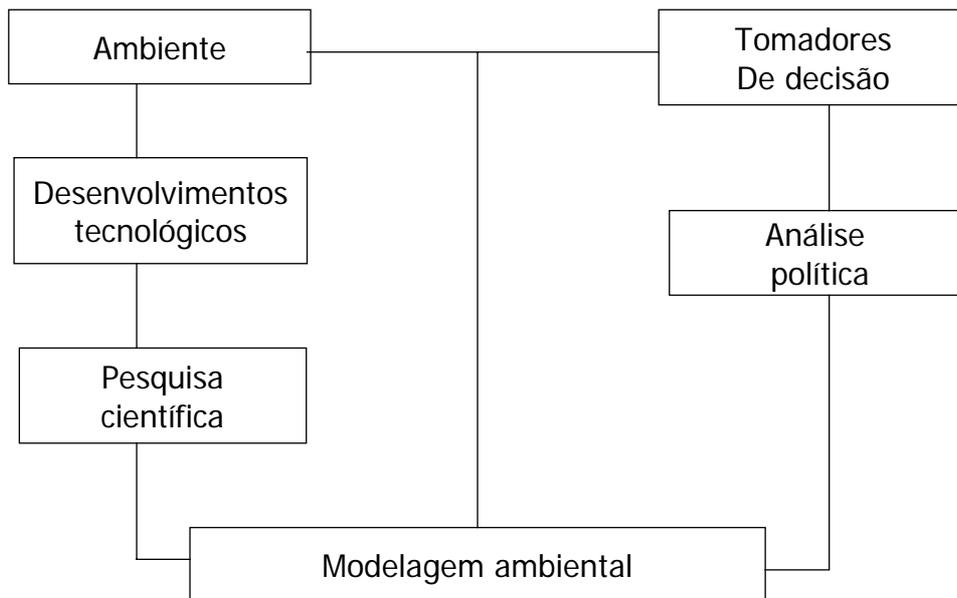


Figura 6.4 – Relações feitas em ambiente-modelagem-decisão.

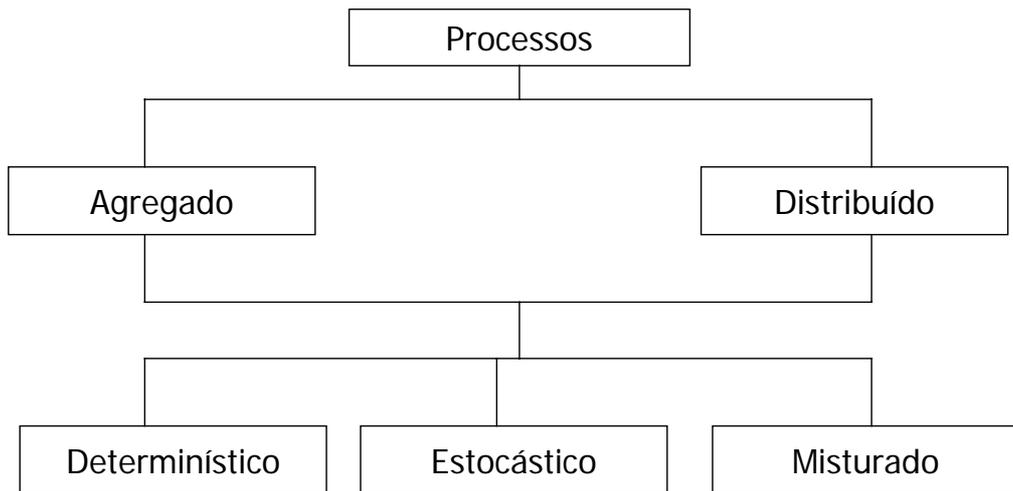
O processo de tomada de decisão cobre tais atividades como o identificador do problema, coleta de dados, análise política, determinação de objetivos e sua avaliação. Em alguns casos, as decisões são baseadas em análises detalhadas, enquanto em outros o tomador de decisões é satisfeito em confiar em resultados de experiências passadas. Frequentemente, o fator crucial neste caso é temporal (termo longo ou curto) e espacial (regional ou área extensa) estendendo-se sobre qual das decisões será considerada. Em geral, tanto os processos de realização decisões de termo curto como as decisões de termo longo requerem um certo tipo e nível de análises. Tais análises abrangem de métodos de investigação simples a formulações matemáticas sofisticadas para serem solucionadas através de computadores. A seleção de métodos analíticos a serem usados depende da natureza técnica dos problemas ambientais, dos objetivos prognosticados, e dos parâmetros de significância.

## 6.4 – Classificação dos modelos de simulação hidrológica

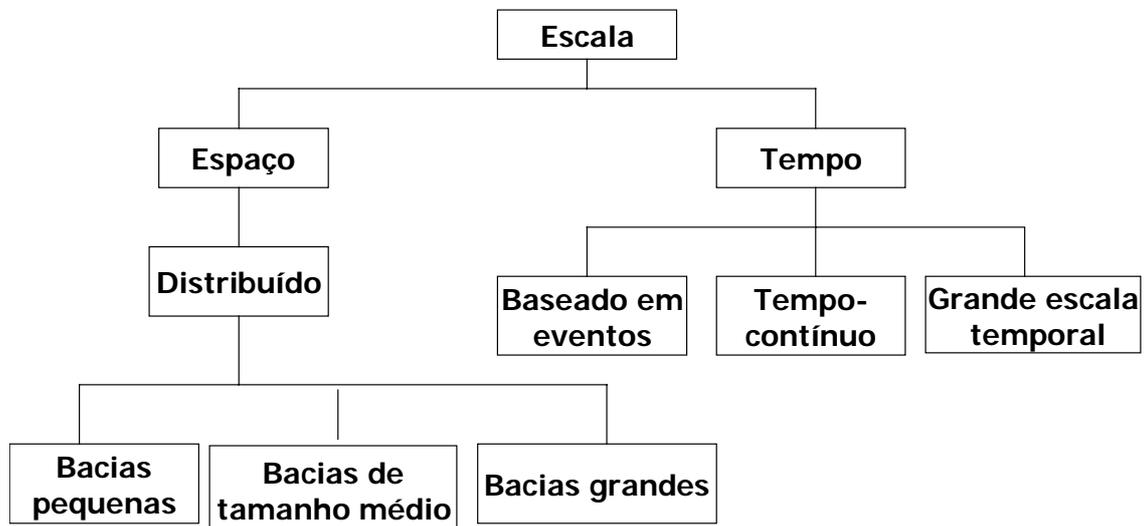
### 6.4.1 – Classificação geral

Modelos de simulação hidrológica em geral e modelos de bacia hidrográfica em particular têm sido classificados de várias maneiras. Um procedimento de classificação é indicado na figura 6.5, baseado em:

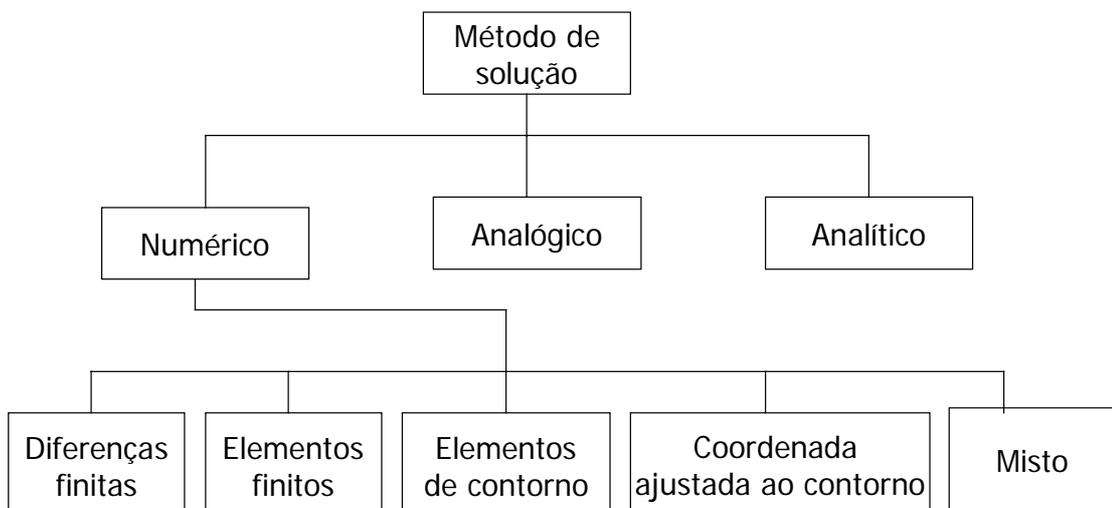
- a) Descrição do processo,
- b) Escala,
- c) Método de solução.



(a) – Classificação de modelos baseados em descrição de processos.



(b) Classificação de modelos baseada em escalas de tempo e espaço.



(c) Classificação de modelos baseada em soluções técnicas.

## 6.4.2 – Classificação baseada em processos

Com base na descrição dos processos simulados, os modelos podem ser descritos como agregados ou distribuídos, determinísticos ou estocásticos ou mistos.

Um modelo agregado descreve a bacia como uma unidade total. As variáveis e parâmetros usados representam valores médios para a bacia inteira. Um modelo distribuído, ao contrário, leva em conta as variações espaciais das variáveis e parâmetros do modelo.

Um modelo agregado, como indicado na tabela 6.1, é em geral expresso por equações diferenciais ordinárias, não considerando a variabilidade espacial do processo, entradas, condições de fronteira e características geométricas do sistema (bacia hidrográfica). Na maioria dos modelos agregados, alguns processos são descritos por equações diferenciais baseadas em leis hidráulicas simplificadas, e outros processos são expressos por equações algébricas empíricas.

Tabela 6.1 – Modelos agregados e distribuídos

Entrada	Características do sistema	Processos componentes	Equações governantes	Saída	Tipo de modelo
Agregado	Agregadas	Agregado	EDO	Agregado	Agregado
Agregado	Agregadas	Distribuído	EDP	Distribuído	Distribuído
Distribuído	Distribuídas	Distribuído	EDP	Distribuído	Distribuído
Distribuído	Agregadas	Distribuído	EDP	Distribuído	Distribuído

EDO: Equações diferenciais ordinárias

EDP: Equações diferenciais parciais

Modelos distribuídos, como mostrado na tabela 6.1, consideram uma definida variabilidade espacial dos processos, entradas, condições de fronteira, e/ou características do sistema (bacia hidrográfica). Na prática, falta de dados de campo ou dados experimentais (laboratório) impede tal formulação geral dos modelos distribuídos. Na maioria dos casos, as características do sistema (bacia hidrográfica) são agregadas, muitos dos processos são agregados, as entradas são agregadas, e mesmo algumas condições de fronteira são agregadas, mas alguns desses processos que estão diretamente ligados a saída são distribuídos, como por exemplo, processo de precipitação. Esses modelos não são completamente distribuídos; são quase-distribuídos.

## 6.4.3 – Modelagem determinística versus estocástica

A classificação de modelos em tipos determinísticos ou estocásticos é essencialmente um agrupamento baseado nos processos. No senso mais amplo, um modelo tem cinco componentes básicos como mostrado na figura 6.6.

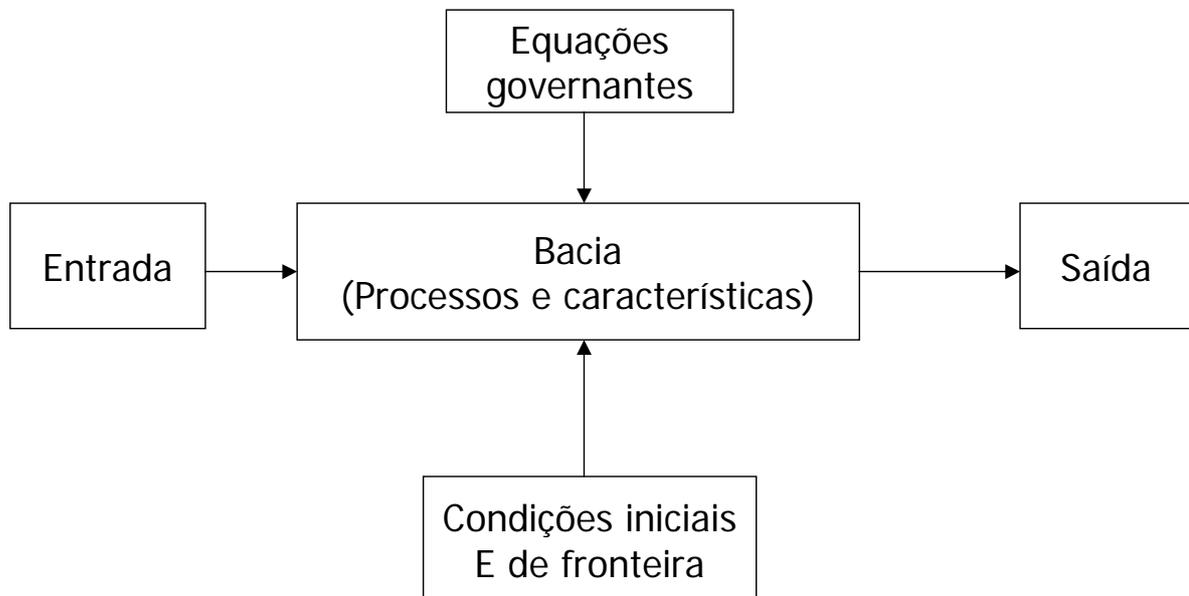


Figura 6.6 – Componentes básicos de um modelo de bacia hidrográfica.

Os processos incluem todos os processos hidrológicos que contribuem para a saída da bacia hidrográfica. Dependendo da descrição desses processos, em conjunção com as características do sistema (bacia hidrográfica), os modelos podem ser descritos como sendo determinísticos, estocásticos, ou misturados. Se todos os componentes de um modelo são determinísticos, o modelo da bacia hidrográfica é determinístico. Se todos os componentes são estocásticos, o modelo é completamente estocástico; se somente alguns componentes são estocásticos, então o modelo é quase-estocástico. Quando os componentes do modelo são descritos através de uma mistura de componentes determinísticos e estocásticos, o modelo é um modelo híbrido ou estocástico-determinístico.

Um modelo é basicamente uma descrição do sistema que compreende os processos da bacia hidrográfica e suas características. O sistema da bacia representa uma função de transferência através da qual entradas são transferidas em saídas. Em um modelo determinístico, a transferência não trabalha com a variabilidade que naturalmente ocorre nos processos e características da bacia. Ao contrário, modelos estocásticos trabalham com incertezas associadas com o sistema de variáveis. Alguns modelos determinísticos incluem processos estocásticos para considerar a variabilidade espacial e temporal de alguns dos subprocessos.

Com respeito às entradas e saídas do sistema, um modelo determinístico sempre produz a mesma saída quando é executado sob condições idênticas, fornecendo dois conjuntos de entradas iguais. Em um modelo estocástico, entradas idênticas geralmente levam a saídas diferentes quando o modelo é executado sob condições idênticas. Uma situação similar ocorre quando as entradas do modelo são descritas como processos estocásticos.

Com respeito às saídas, modelos determinísticos resultam em uma saída prevista para um conjunto de valores dado de entrada conhecido exatamente. Assim, o valor da saída pode ser exatamente determinado. Em contraste, modelos estocásticos apontam probabilidades de saídas, fornecidas para um conjunto de entradas conhecidas.

A maioria dos modelos de bacia é determinístico, e virtualmente nenhum modelo é completamente estocástico. Alguns modelos determinísticos podem incluir partes que são descritas através das leis de probabilidade, neste caso o modelo é caracterizado como quase-determinístico ou quase-estocástico.

#### **6.4.4 – Classificação baseada em escalas de tempo**

Modelos de bacia hidrográfica podem ser classificados baseados na escala de tempo dos modelos. A escala de tempo pode ser definida como uma combinação de dois intervalos de tempo. Um dos intervalos de tempo é usado para a entrada e para cálculos internos. O segundo intervalo de tempo é usado para a saída e calibração do modelo. Baseado nesta descrição, os modelos podem ser caracterizados como:

- a) Modelos tempo-contínuo ou baseado em evento,
- b) Diário,
- c) Mensal,
- d) Anual.

Essa classificação está baseada em intervalos de cálculo. Se os componentes do modelo são avaliados em intervalos de tempo pequenos, tais como intervalos horários ou menores, o modelo será um modelo de intervalo de tempo curto. Naturalmente, a escolha de um intervalo de tempo é freqüentemente uma função do objetivo do uso do modelo.

Um modelo baseado em evento é aquele que representa um evento singular de escoamento superficial ocorrendo sobre um período de tempo abrangendo de cerca de uma hora a muitos dias. As condições iniciais na bacia para cada evento são assumidas ou determinadas através de outros meios e introduzidas no modelo como dados de entrada. A precisão dos resultados do modelo freqüentemente depende da realidade dessas condições iniciais.

Um modelo contínuo de bacia hidrográfica é aquele que funciona por um período extenso de tempo, ou seja, períodos diferentes de condições de escoamentos superficiais diferentes. O modelo obedece a uma consideração contínua das condições de entrada da bacia e então determina as condições iniciais aplicáveis a um evento de escoamento superficial. Na primeira etapa de computação do modelo, as condições iniciais devem ser conhecidas ou assumidas. Entretanto, o efeito da seleção dessas condições iniciais decresce rapidamente enquanto a simulação avança. A maioria dos modelos contínuos de bacia hidrográfica utiliza três componentes de escoamento superficial: escoamento superficial ou direto, fluxo subsuperficial (fluxo intermediário) e fluxo das águas subterrâneas, enquanto um modelo baseado em um evento pode omitir um ou ambos dos componentes subsuperficiais e também a evapotranspiração.

#### **6.4.5 – Classificação baseada em escalas espaciais**

A escala espacial pode ser usada como um critério para classificar os modelos de bacia hidrográfica em modelos de bacias pequenas, de bacias de tamanho médio e de bacias grandes. Certamente, a definição de uma bacia pequena é algo vago. Usualmente, uma bacia com uma área de 100 Km<sup>2</sup> ou menos pode ser chamada de pequena; aquelas com áreas de 100 a 1.000 Km<sup>2</sup>, médias; e aquelas com áreas

maiores que 1.000 Km<sup>2</sup>, grandes. Tal classificação é arbitrária, e é antes experimental que conceitual, e é governada mais por disponibilidade de dados que por significado físico. O ponto essencial é o conceito de homogeneidade e cálculo da média de processos hidrológicos. Para consideração de geração de escoamento superficial nessas bacias, duas fases podem ser consideradas: fase em terra e fase no canal. Cada fase apresenta suas características próprias de armazenamento. Bacias grandes possuem rede de canais e fase nos canais bem desenvolvidas; e assim, o armazenamento no canal é dominante. Tais bacias hidrográficas são menos sensíveis para durações curtas, precipitações intensas altas. Por outro lado, pequenas bacias apresentam fase em terra e fluxo sobre a terra dominantes, possuem fase nos canais relativamente menos notável, e são altamente sensíveis a precipitações de intensidades altas e de duração curta.

Se todos os três tipos de bacia hidrográfica são espacialmente uniformes, então se comportarão hidrológicamente de modo similar. Sob essas condições, a classificação das bacias não serve para propósitos úteis. Se uma bacia é homogênea com relação a essas características, então é chamada de bacia pequena. Na realidade, todavia, bacias hidrográficas são raramente homogêneas; assim, homogeneidade é definida em um sentido médio ou estatístico. Por exemplo, para o ambiente subsuperficial, se a média dos valores logarítmicos das condutividades hidráulicas é a mesma, o aquífero pode ser considerado homogêneo. Similarmente, se as características médias do sistema não se alteram, então, a bacia pode ser considerada pequena. Para bacias de tamanho médio, a heterogeneidade está presente, mas está em uma faixa média, enquanto é maior para bacias grandes. Mesmo que a bacia seja homogênea em uma característica, pode não ser necessariamente homogênea em outras características. Neste sentido, tanto as características do solo como os usos da terra são importantes.

#### **6.4.6 – Tipos adicionais de classificação**

Os modelos de bacias também podem ser classificados com base no uso da terra e uso do modelo. Baseado no uso da terra, as bacias podem ser classificadas como:

- a) Agrícola,
- b) Urbana,
- c) Terras florestadas ou de pastagem,
- d) Desérticas,
- e) Montanhosas,
- f) Costeiras,
- g) Região úmida,
- h) Mista.

Em muitos casos, bacias grandes ou mesmo de tamanho médio têm usos da terra mistos. Essas bacias comportam-se hidrológicamente diferentemente, dessa forma originam diferentes ramos da hidrologia. Por exemplo, tratamento de bacias agrícolas constitui o que se chama hidrologia agrícola. Similarmente, existe hidrologia urbana para bacias urbanas, hidrologia costeira para bacias costeiras, hidrologia florestal para bacias florestais, e etc. Os solos, a geologia, e a vegetação são diferentes para essas bacias. Como resultado, os processos hidrológicos são diferentes em sua evolução nessas bacias, por isso seus modelos são claramente diferentes.

Freqüentemente, modelos de bacia hidrográfica são classificados com base em seu objetivo de uso:

- a) Modelos de planejamento,
- b) Modelos de gestão,
- c) Modelos de previsão.

Um modelo de bacia hidrográfica abrangente pode ser empregado para executar um considerável conjunto de trabalhos analíticos de planejamento e gestão de recursos d'água, oferecendo a oportunidade para análise sistemática de uma política de gestão. Por outro lado, torna-se cada vez mais um valioso meio de previsão da resposta da bacia do rio para as estratégias de gestão. Para propósitos de gestão, o modelo define tendências geográficas e temporais que podem não ser precisas em locais específicos na bacia do rio. Assim, o uso primário de um modelo de planejamento é para análises de estratégias de gestão de sistemas de rio. A grande questão relacionada com planos e tendências de grandes bacias é a necessidade de análise para determinar se existem interações locais. Uma vez que essas interações sejam determinadas, uma análise específica dos locais pode ser realizada com grande precisão, talvez através do uso de um modelo de simulação. Provavelmente, a mais poderosa característica de um modelo de gestão e planejamento é a habilidade de oferecer aos planejadores e gerentes a substituição dos índices de manejo do passado com medidas de desempenho econômico aperfeiçoadas de decisões potenciais.

#### **6.4.7 – Desenvolvimento de modelos**

A construção de modelos computacionais de bacia hidrográfica pode ser direcionada pela necessidade de resolver um problema particular ou uma atividade científica de construção de modelo, a qual pode ou não ser usada para resolver problemas. Freqüentemente, o tipo de modelo a ser elaborado é ditado pela disponibilidade de dados. Modelos diferentes apresentam necessidades de dados diferentes. Em geral, modelos distribuídos requerem muito mais dados que modelos agregados. Na maioria dos casos, dados requeridos não existem ou não estão completos. É por isso que regionalização e técnicas sintéticas são úteis. Mesmo se os dados necessários estão disponíveis, problemas permanecem com relação à falha, imprecisão, e heterogeneidade dos dados. Então, naturalmente, o armazenamento, o manejo, a recuperação, a análise e a manipulação dos dados têm que considerar isto. Se o volume de dados requeridos é grande, o processamento dos dados pode ser um procedimento muito sofisticado.

Um modelo de bacia hidrográfica é um conjunto de modelos componentes correspondendo a componentes diferentes do ciclo hidrológico. A escala de tempo do modelo de saída (ou seja, escoamento do curso d'água) influencia grandemente o tipo do modelo ou os detalhes a serem incluídos no modelo. Por exemplo, um modelo de bacia mensal é muito diferente em sua arquitetura e construção de um modelo horário. Assim, os elementos de simulação diferem com o tipo do modelo. Esta permanece uma questão sem solução no que diz respeito às leis hidrológicas operantes em escalas temporais diferentes para componentes diferentes do ciclo hidrológico. A solução dessa questão facilitará grandemente a elaboração do modelo e mais claramente definirá as necessidades de dados.

Depois do modelo ser desenvolvido, necessita de calibração, verificação, e uma avaliação de sua realidade. Calibrações de modelos envolvem estimativa de parâmetros ótimos sujeitas a critérios específicos de erros. Usualmente, os dados disponíveis são divididos em duas metades, uma para calibração e outra para verificação. O conjunto de calibração deve abranger a extensão completa de variabilidade de dados que podem ser utilizados na verificação. Uma série de técnicas sofisticadas de estimativa de parâmetros estão disponíveis. Entretanto, não está claro como um parâmetro do modelo muda com a variação em função do objetivo. Além disso, uma análise de erro dos resultados da calibração deve ser realizada. Através desta análise, pode ser avaliado se os erros são devidos aos erros nos dados, parâmetros, ou elaboração do modelo. A verificação do modelo e da realidade de seus resultados são essenciais para mostrar o quanto um modelo é bom para o fim a que se destina.

## **6.5 – Expectativas futuras em modelagem**

É reconhecido atualmente que modelagem matemática é uma ferramenta essencial para gestão ambiental. Modelos ambientais ajudam a descrever o comportamento do sistema e a alcançar decisões de gestão objetivas. Entretanto, ainda parece difícil admitir que modelagem dos processos ambientais tenha alcançado definitivamente um nível completo de uso. De fato, os modelos têm se tornado mais sofisticados e mais detalhados em tempo; porém, aumento de complexidade não necessariamente significa aumento de eficiência e precisão de um modelo. Este basicamente parece ser um problema principal no desenvolvimento do modelo. Um número de razões pode ser citado para explicar esse problema.

Primeiro, existem dificuldades conceituais associadas com o desenvolvimento das estruturas do modelo. Frequentemente, os conceitos fundamentais do problema real não podem ser identificados devido ao número grande de processos, variáveis, e interações envolvidas. Neste caso, tentar desenvolver modelos mais abrangentes e detalhados não parece exequível. Tal abordagem aumenta a complexidade de um já complicado problema. A solução pode ser simplificar o modelo através da consideração somente daquelas variáveis e interações que dominam o sistema. Por exemplo, desenvolver um modelo ecológico complexo pode facilmente tornar-se um exercício sem utilidade, se as incertezas fundamentais do fenômeno real não permitirem uma identificação clara dos conceitos básicos.

Depois, problemas ambientais são caracterizados não somente pela complexidade, mas também pelo grande número de processos, características temporais e características espaciais a serem analisadas. Todos esses fatores requerem dados suficientes e seguros de modo que possam ser reconhecidos. No entanto, frequentemente o caso é que não se tem estes dados. Então, não importa quão elegante um modelo seja formulado, pois não pode ser calibrado ou verificado, assim tal modelo não pode ser empregado. Sob estas condições, pode-se escolher desenvolver o modelo de acordo com as informações disponíveis ou pode-se preferivelmente, escolher colocar mais demanda nos sistemas de monitoramento.

Os resultados dos dois problemas citados são a dificuldade na identificação da estrutura do modelo. Falta de dados adequados e falta de um entendimento dos conceitos básicos leva a estruturas de modelos que não representam a verdadeira

natureza do fenômeno ambiental. Por exemplo, a maioria dos processos do ambiente é de uma característica dinâmica; no entanto são freqüentemente considerados nos modelos em estado permanente. A tendência entre os modeladores de desenvolver modelos matemáticos complexos foi fundamentada pelo advento de computadores mais potentes. Entretanto, o perigo dessa tendência tem sido o desenvolvimento de novos problemas relacionados à análise numérica de formulações altamente complicadas. Soluções numéricas resolvem somente as equações matemáticas, mas não necessariamente resolvem os problemas ambientais. Se os esforços de modelagem são direcionados mais para análises numéricas e soluções que avaliação de estratégias de gestão, os modelos resultantes serão inúteis para o realizador das decisões.

Assim, a perda de vista dos objetivos em modelagem impede o desenvolvimento de modelos eficientes e úteis. O propósito básico da modelagem é simplificar a complexidade do sistema através da identificação das variáveis dominantes e variações significativas. Esse objetivo não pode ser desconsiderado na tentativa de desenvolver modelos mais detalhados e abrangentes.

Em muitos países em desenvolvimento, os modelos são usados, não por planejadores de recursos hídricos e tomadores de decisão, mas por pesquisadores em universidades e institutos de pesquisas. Freqüentemente, essas aplicações são limitadas particularmente devido à falta de dados adequados e reais.

As seguintes questões necessitam ser levantadas para aumentar aplicabilidade dos modelos ambientais para problemas de caso reais:

- a) Quão efetivos são os modelos atuais na orientação de práticas de planejamento e gestão?
- b) Qual é a atitude dos gerentes e tomadores de decisão para o emprego dos modelos ambientais? O que pode ser feito para desenvolver atitudes positivas do lado dos tomadores de decisão para a modelagem ser aceita como uma ferramenta de gestão efetiva?
- c) Quais os fatores limitantes de uso dos modelos ambientais?
- d) Quão bem os modelos disponíveis realizam a simulação do comportamento real dos sistemas; em outras palavras, quão reais são os resultados produzidos pela modelagem?

O futuro dos modelos de bacia hidrográfica será formado pela demanda da sociedade por uma gestão ambiental integrada; crescendo a demanda por globalização através da incorporação de aspectos biológicos, químicos, e físicos do ciclo hidrológico; avanços rápidos em sensoriamento remoto e tecnologia de satélites, sistemas de informação geográfica (SIG), sistemas de gestão de bancos de dados (SGBD), e sistemas inteligentes; intensificando a função dos modelos na realização de planejamentos e gestão; elevando a pressão para a transformação de modelos para níveis de uso amigável; e declarações mais claras da confiabilidade e risco associadas com os resultados de modelos.

A aplicação de modelos de bacia hidrográfica em gestão ambiental crescerá no futuro. Os modelos serão desenvolvidos como ferramentas práticas facilmente utilizáveis em planejamento e tomada de decisão. E terão que ser interfaceados com modelos econômicos, sociais, políticos, administrativos e legais. Assim, os modelos de bacias hidrográficas tornar-se-ão um componente na estratégia de modelagem para gestão

maior. Além disso, esses modelos tornar-se-ão mais globais, não no sentido da escala espacial, mas no sentido de detalhes hidrológicos.

Os modelos de bacia hidrográfica terão que incluir os rápidos avanços que ocorrem em sensoramento remoto e tecnologia de satélite, informação geográfica e sistemas de gestão de banco de dados, e sistemas inteligentes. Com o uso de sensoramento remoto e tecnologia de satélite, nossa habilidade para observar dados sobre áreas grandes e inacessíveis é vastamente aperfeiçoada, tornando possível o desenvolvimento de modelos de bacia hidrográfica realmente distribuídos para bacias comprometidas e não comprometidas. Modelos distribuídos requerem grandes quantidades de dados os quais podem ser estocados, recuperados, gerenciados e manipulados com o uso de SIG e SGBD. Isso, naturalmente, é possível devida a literalmente ilimitada capacidade computacional disponível atualmente e será ainda maior no futuro.

Se os modelos de bacia têm que se tornar ferramentas práticas, então têm que ser simples, fáceis de usar com uma declaração clara do que podem e o que não podem realizar. Têm que definir a confiabilidade com a qual realizam suas funções projetadas, e requerem do usuário a posse de pelo menos um treinamento hidrológico. O usuário está interessado no que modelo produz e quão precisamente produz, não necessariamente na biologia, química, física e hidrologia na qual está baseado. Os resultados do modelo por si só são sem utilidade, a menos que sejam associados com uma declaração clara de sua confiabilidade e precisão.

Os modelos terão que ser descritos em termos simples de tal forma que a interpretação de seus resultados não exija demasiada habilidade do usuário. Assim, a construção do modelo terá que gravitar em torno do tema central de seu uso prático em gestão ambiental integrada. Embora muito progresso tenha sido feito em modelagem computacional de sistemas e processos ambientais, existe ainda um longo caminho a seguir antes dos modelos serem capazes de completamente integrar rapidamente os avanços em informação, computação, e tecnologia espacial, e poderem tornar-se ferramentas “domésticas”.

# **Gestão das Informações Ambientais**

## **Capítulo 7**

### **Tomada de Decisão para Gestão Ambiental**

#### **7.1 – Introdução**

Vivemos em uma época de vigilância ambiental. Quase todos recursos naturais têm sido atacados em graus variados de intensidade pela poluição. A qualidade das águas superficiais e subterrâneas é continuamente degradada. A situação é similar para recursos em terra com problemas de erosão de solo, desmatamento, e desertificação em muitas partes do mundo. A poluição do ar já alcançou, em regiões particulares, níveis ameaçadores para a vida e a saúde. Esses problemas têm eventualmente posto em perigo o habitat para a biodiversidade. Mais dificuldades são esperadas devido aos possíveis efeitos da mudança climática em vários componentes do ambiente. Todos esses desenvolvimentos adversos são induzidos por ocorrências naturais e diversas atividades humanas. O resultado é que a degradação ambiental não somente põe em perigo a natureza, mas também apresenta sérias implicações sociais e econômicas.

Assim, necessitamos de medidas urgentes, que constituam soluções para preservar a qualidade ambiental para a presente geração e também para as futuras gerações. Foi essa consideração que levou a adoção de “desenvolvimento sustentável” como política básica em gestão ambiental. A necessidade de sustentabilidade tem colocado uma demanda significativa no processo de tomada de decisão para gestão. Precisamos de decisões mais eficientes, mais efetivas, e mais confiáveis com as quais controlar e desenvolver nosso ambiente.

Os planejadores e gerentes têm lidado com problemas correntes múltiplos, multidimensionais, e multifacetados. E também existem numerosos objetivos a serem satisfeitos, freqüentemente de uma natureza conflitante. Além disso, a tecnologia tem fornecido um número abundante de soluções que podem ser aplicadas mesmo sem conhecimento antecipado de suas conseqüências para um problema particular investigado. Assim, o resultado é que os tomadores de decisão têm que atuar na esfera da complexidade e incerteza.

A tecnologia tem, também, fornecido as ferramentas mais avançadas e efetivas para facilitar a tomada de decisão. Assim, os tomadores de decisão estão agora melhor equipados na identificação, análise, e solução dos problemas ambientais.

A base essencial para os tomadores de decisão é informação sobre o ambiente. Essa informação é fornecida através dos dados disponíveis dos vários componentes do continuum ambiental, somados a dados sociais, econômicos, e todos os tipos de dados demográficos. O desafio mais significativo em gestão ambiental é, então, a transformação de dados em informação, e a informação é o produto final de um sistema de gestão de dados.

Além disso, decisões efetivas e eficientes requerem informação que seja suficiente e confiável. Esse requerimento explica porque os dados devem ser gerenciados dentro de um sistema coesivo com cada etapa no sistema afetando a qualidade da informação produzida.

Por outro lado, para dar suporte ao processo de tomada de decisão, as informações devem ser não somente suficientes e confiáveis, mas devem também satisfazer três condições:

- a) Devem estar disponíveis *quando* são demandadas;
- b) Devem ser *facilmente acessadas* pelo usuário;
- c) Devem ser disponibilizadas em uma forma que seja *fácil de entender e usar* para o tomador de decisão ou planejador.

## 7.2 – Ferramentas para tomada de decisão

### 7.2.1 – Ferramentas básicas

Existem essencialmente quatro ferramentas básicas que dão suporte ao processo de tomada de decisão:

- a) Dados (capítulos de 1 a 4);
- b) Modelos (simulação e otimização - capítulo 6);
- c) Sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica;
- d) Sistemas inteligentes.

Os dados são geralmente coletados através de métodos tradicionais, tomando amostras via monitoramento de campo. Tais dados são disponibilizados em vários graus de completude e precisão. Particularmente nos países em desenvolvimento, dados ambientais apresentam pequeno número de amostras e refletem incompletude, imprecisão, e heterogeneidade. Tecnologias modernas têm fornecido meios para diminuir essas deficiências, através de monitoramento automático para assegurar a completude. Os mais importantes meios, sensoriamento remoto e tecnologia de satélite, têm sido desenvolvidos para fornecer um número de vantagens significativas como discutido na seção a seguir.

A modelagem tem também experimentado evolução significativa na última década, evoluindo de modelos empíricos simples para simular processos individuais a modelos distribuídos de natureza conceitual baseados fisicamente, os quais modelam o ambiente em uma estrutura multicomponente. Esses desenvolvimentos foram discutidos em detalhes no capítulo 6.

As duas novas ferramentas, sistema de informação geográfica e sistemas inteligentes, tornaram-se componentes essenciais para o processo de tomada de decisão, e suas vantagens básicas são discutidas nas seções seguintes.

## 7.2.2 – Sensoriamento remoto e tecnologia de satélite

Segundo alguns seria "a ciência e a arte de obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno através da análise de dados obtidos por um aparelho que não esteja em contato com o objeto, área ou fenômeno sob investigação", enquanto outros tratam como "a ciência da observação a distância" ou como "a utilização de sensores para aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos sem que haja contato direto entre eles".

O problema principal em análise ambiental é a necessidade de dados adequados para quantitativamente descrever precisamente um processo ambiental. A tecnologia de sensoriamento remoto contribui da seguinte maneira:

- 1) Produção de medidas em áreas ao invés de medidas pontuais;
- 2) Toda a informação é coletada e armazenada em um local;
- 3) Oferecimento de alta resolução em espaço e/ou tempo;
- 4) Os dados são disponibilizados em forma digital;
- 5) A aquisição de dados não interfere com a observação de dados;
- 6) Dados podem ser obtidos para áreas remotas que são inacessíveis de outro modo;
- 7) Uma vez instaladas as redes de sensoriamento remoto, as medidas de dados são obtidas a um custo relativamente baixo.

A principal desvantagem na obtenção de dados percebidos remotamente é a necessária calibração dos sinais eletromagnéticos em termos de processos observados.

Sensoriamento remoto e dados de satélite podem ser usados para modelagem de bacias hidrográficas, e são úteis especialmente onde locais de coleta e efetividade de custos de coleta de dados são importantes por um lado, e o crescente requerimento de dados por outro. Entre os satélites com dados úteis hidrologicamente estão a série NOAA, TIROS N, SPOT, Landsat, GOES, GMS, e Meteosat.

O sensoriamento remoto permite obter dados sobre um processo de uma localização distante do usuário ou modelador. O sensoriamento é realizado através da observação do valor médio de uma variável sobre alguma extensão de área através de mensuração de energia eletromagnética. As técnicas de medida são passivas e ativas. A técnica de medida passiva mede a quantidade de luz solar refletida ou a quantidade de emissões naturais de um objetivo em comprimentos de ondas variados. A técnica de medida ativa dirige sinais gerados artificialmente para um objetivo e mede o sinal refletido. Um exemplo de uma técnica passiva é a fotografia aérea e de uma ativa é radar do tempo.

Muitos sensores diferentes de sensoriamento remoto fornecem informações relevantes hidrologicamente, incluindo fotografia aérea, radiômetro escaneador, espectrômetros e radares de microondas. Uma vez que toda a informação é obtida na forma de sinais eletromagnéticos, é importante determinar o tipo de sinal mais apropriado para a variável particular observada. Além disso, a necessidade de resolução no espaço e no tempo é obtida com tipos específicos de sensores.

Dados de sensoriamento remoto de satélites são úteis em modelagem de bacia hidrográfica de duas maneiras. Uma é que os dados de satélite podem ser usados para melhor definir solos e cobertura de terra sobre a bacia hidrográfica, os quais são necessários para determinar infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial. A

outra é que sensoriamento remoto mede dados sobre o espaço em vez de em um ponto, e pode, por isso, ser usado para corrigir erros na entrada de dados baseadas em medidas pontuais, como no caso de precipitação pluviométrica, evaporação e similares. Um dos mais importantes dados produzidos por sensoriamento remoto são umidade do solo e evapotranspiração através de imagens infravermelhas termais. Esses dados podem ser usados para modelar a troca de água entre a superfície do solo e a atmosfera, e unindo a hidrologia da superfície da Terra e modelos atmosféricos.

A tecnologia de sensoriamento remoto pode ser empregada em muitas aplicações em hidrologia. Radares são empregados para medir precipitação pluviométrica. Dados de satélite podem ser usados para estimativa de área e intensidade de precipitação pluviométrica. Estimativas de temperatura obtidas de infravermelho e umidade do solo de observações em microondas podem ser aplicadas para desenvolver modelos matemáticos de evapotranspiração. Umidade do solo é adequadamente obtida através de sensoriamento remoto. Inventários dos corpos d'água tais como lagos, represas, rios, pântanos, áreas alagadas, etc., são facilmente obtidas por imagens de sensoriamento remoto. Mesmo uma avaliação dos recursos de água subterrânea pode ser realizada através de informações de sensoriamento remoto produzidas sobre características geológicas e geomorfológicas. Condições de gelo e neve são mapeadas com o uso de satélites. Parâmetros de qualidade de água tais como algas, clorofila, e parâmetros da vida aquática, como também poluição térmica, derramamento de óleo, etc., podem ser observados por técnicas de sensoriamento remoto.

Com a capacidade vastamente aumentada para observar dados hidrológicos, a tecnologia de sensoriamento remoto tem desenvolvido um papel significativo em uma série de aplicações hidrológicas, e essas aplicações estão se tornando operacionais em passo acelerado. Algumas dessas aplicações: previsão de enchentes em tempo real através de um modelo distribuído com medidas de precipitação pluviométrica por radar como entrada; cálculo do escoamento superficial mensal através de um modelo agregado com dados de satélite infravermelho NOAA como entrada; estimativa de parâmetros do modelo com dados de satélite Landsat multiespectral; desenvolvimento de modelos hidrológicos de macroescala ligados com modelos de circulação geral atmosférica com dados de satélite; desenvolvimento de modelos hidrológicos distribuídos baseados em modelos do terreno digitais e um sistema de informação geográfica com o uso de imagens de satélite Landsat.

Essas aplicações permitem a operacionalização de tecnologia espacial em áreas como previsão do tempo, previsão de escoamento superficial do derretimento da neve sazonal de curta duração, evolução das estratégias de gestão da bacia hidrográfica para planejamento de conservação, desenvolvimento de serviços de informação para previsão/avaliação de estiagem, mapeamento do potencial de água subterrânea para fundamentar uso conjunto de águas superficiais e subterrâneas, inventário dos processos ambientais costeiros e marinhos, avaliação de impacto ambiental de projeto de recursos d'água de grande escala, avaliação dos prejuízos de enchentes, e desenvolvimento de matriz de informação de reservas para desenvolvimento de irrigação.

A classificação digital é o processo voltado à extração de informação das imagens de sensoriamento remoto, para o reconhecimento de padrões e produção de mapas temáticos. Isso diz respeito à associação de cada pixel da imagem a um "rótulo", descrevendo um objeto real. Dessa forma, os ID's (Identificação Digital) de cada pixel,



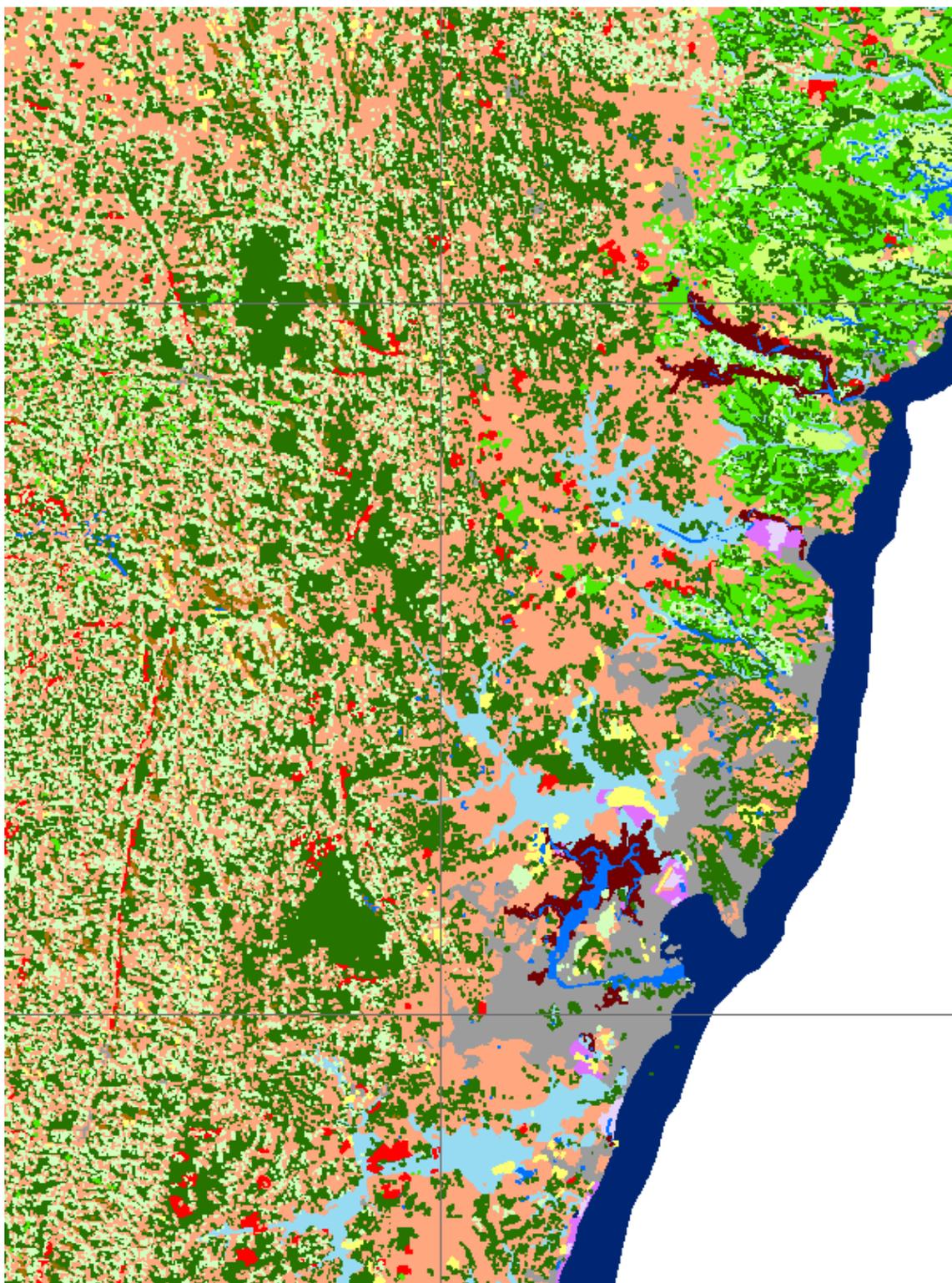


Figura 7.2 – Detalhe do mapa da figura 7.1

### 7.2.3 – O uso dos sistemas de informação geográfica (SIG)

Sistemas de informação geográfica (SIG) são ferramentas baseadas em computadores que armazenam, analisam, recuperam, manipulam e gerenciam grandes quantidades de dados espaciais. Constituem técnicas de gestão de bancos de dados espaciais. Originalmente, essas ferramentas foram desenvolvidas para facilitar trabalhos de cartografia, mas estão sendo usadas atualmente para análises, estimativas, planejamento e modelagem.

O desenvolvimento dos SIG's conta com a contribuição de várias disciplinas, dentre as quais se destacam a cartografia, o sensoriamento remoto, a informática e a estatística.

A estrutura geral de um SIG é composta de interface com o usuário, entrada e integração de dados, funções de processamento gráfico e de imagens, visualização e plotagem, e armazenamento e recuperação de dados.

Os dados geográficos possuem localização espacial (definida pelas coordenadas geográficas) e atributos descritivos (que podem ser representados num banco de dados convencional), sendo que os SIG's servem para localizar esses dados no espaço, e para representar a relação espacial entre eles.

Os dados espaciais podem ser enquadrados numa das categorias abaixo:

- **Dados Temáticos:** descrevem a distribuição espacial de uma feição geográfica, de forma qualitativa (Ex.: Carta de Declividade, Uso do Solo etc.).
- **Dados Cadastrais:** distingue-se dos mapas temáticos, pois seus elementos possuem atributos, e sua representação gráfica pode variar conforme a escala (Ex.: Mapa de Municípios).
- **Redes:** cada objeto possui localização geográfica exata e está associado a atributos descritivos, com informações sobre recursos que fluem espacialmente (Ex.: Rede de drenagem).
- **Modelos Numéricos de Terreno:** denotam a representação quantitativa de uma grandeza com variação contínua no espaço (Ex.: Cartas Altimétricas).
- **Imagens:** Obtidas por Sensoriamento Remoto e armazenadas no formato raster. Podem ser consideradas como dados primários, de onde se pode derivar mapas temáticos (Ex.: Imagens de Satélite).

A modelagem de bacia hidrográfica requer dados precisos e representativos. Coleta, armazenamento, e manipulação dos dados requeridos podem ser uma tarefa difícil por três razões:

- 1) Natureza espacial dos dados hidrológicos;
- 2) Grande volume de dados;
- 3) Organização dos dados.

Entretanto, através do uso de um sistema de informação geográfica e softwares associados, tais dados podem ser compilados e processados para uma utilização pertinente. A bacia hidrográfica e a hidrologia são basicamente espaciais. As

características físicas da bacia tais como solo, uso da terra e topografia variam espacialmente. Em modelos de bacia hidrográfica distribuídos, essas características podem ser usadas diretamente.

Modelos de bacias hidrográficas, especialmente modelos numéricos, requerem grandes volumes de dados. Uma unidade hidrológica é caracterizada por muitos dados, incluindo aqueles sobre topografia, uso do solo, solo, geologia, clima, e assim por diante. Por outro lado, os vários programas aplicados podem requerer o mesmo armazenamento de dados em diferentes arquivos, assim criando armazenamento redundante com o sistema estrutural de arquivos tradicionais.

Os dados hidrológicos são organizados em uma variedade de formatos e armazenados em vários meios. É freqüentemente difícil e tedioso transformar e manusear esses dados. Além disso, devido a muitos modelos apresentarem diferentes requerimentos de dados, um programa de coleta de dados que atende a demanda de um modelo particular pode não atender a outro modelo diferente. Conseqüentemente, um programa de coleta separado tem que ser desenvolvido e transformações de dados então têm de ser realizadas para cada modelo.

Esses problemas de dados podem ser resolvidos através da aplicação de um SIG. Sua habilidade para extrair, cobrir e delinear as características da bacia hidrográfica permitem integração com os modelos das bacias hidrográficas. Projeto, calibração, modificação e comparação desses modelos podem ser significativamente facilitadas através do uso do SIG. Entretanto, a aplicação da tecnologia SIG para modelagem da bacia hidrográfica requer planejamento cuidadoso e manipulação de dados extensiva, envolvendo três passos principais:

- 1) Construção de bancos de dados espaciais;
- 2) Integração de camadas de modelos espaciais;
- 3) O SIG e o modelo de interface.

Com o contínuo aumento do volume de dados disponíveis provenientes de muitas origens, o primeiro passo usualmente consome muito tempo. O segundo passo tem se tornado menos tedioso devido ao avanço da capacidade do SIG, no qual séries de camadas espaciais e/ou procedimentos de projeto podem ser derivados produzindo a camada modelada final. O último passo envolve o planejamento da interface do SIG com os modelos de bacia hidrográfica.

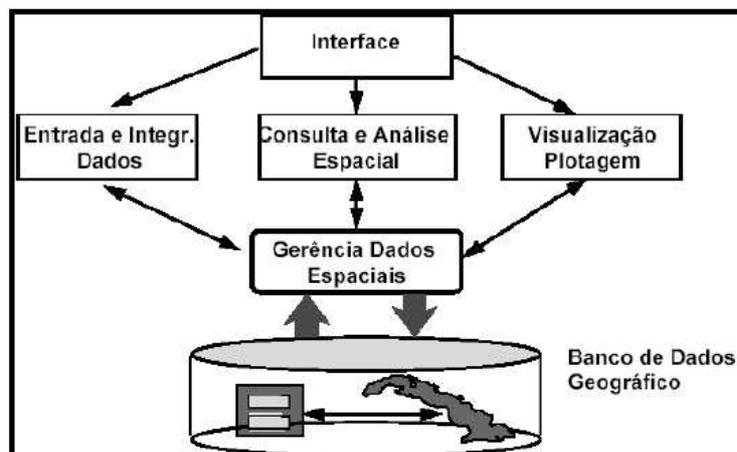


Figura 7.3 – Arquitetura de sistemas de informação

Embora grandes quantidades de dados possam ser eficientemente manipuladas através do uso do SIG, certas limitações precisam ser reconhecidas. Primeiro, a construção de um banco de dados é dispendiosa e consome tempo. Além disso, dados apropriados podem ser outro problema, e reparar deficiências nos dados pode ser muito difícil. Outra deficiência do SIG relaciona-se a aplicações em tempo real, ou seja, quando processando variáveis dinâmicas variando rapidamente. A menos que o mesmo banco de dados possa ser usado em uma variedade de análises ou modelos, o uso de um SIG pode não ser custo-efetivo. Entretanto, com o aumento da complexidade das investigações ou modelos envolvendo mais dados e mais complexidade de processamento de dados, um SIG pode de fato ser custo-efetivo, e as inovações do SIG baseado em PC têm diminuído bastante os custos.

Uma aplicação de SIG de sucesso requer dados precisos, dados acurados, e capacidade de atributos múltiplos. Um pacote de SIG deve ter um sistema de gestão de banco de dados relacional que fornece tanto independência de dados física como lógica. A construção de um banco de dados de um SIG é o procedimento mais difícil e dispendioso para modelagem de uma bacia hidrográfica. Existem grandes volumes de dados de solo, geologia, uso da terra, cobertura vegetal, e assim por diante em forma digitalizada. Entretanto, existem problemas com muitos dos bancos de dados digitais existentes:

- 1) Por estarem em diferentes formatos;
- 2) Por usarem coordenadas diferentes (sistemas de projeção);
- 3) Por serem muito primários para uso em modelos de bacia hidrográfica 2D e 3D.

A integração do SIG com modelagem de bacia hidrográfica aperfeiçoa um número significativo de funções hidrológicas: planejamento, calibração, alteração, e comparação de modelos de bacia hidrográfica. O uso de um SIG permite subdividir uma bacia hidrográfica espacialmente em sub-áreas homogêneas hidrológicamente. Dependendo do tipo de aplicação requerendo categorização das propriedades hidrológicas, muitas combinações de camadas espaciais podem ser realizadas. Com essa técnica, é possível delinear áreas de taxas de perda de solo variáveis, identificar áreas potenciais de poluição agrícola de origem não pontual, mapear suscetibilidade de contaminação da água subterrânea, e assim por diante. O SIG aperfeiçoa a habilidade de incorporar detalhes espaciais além da capacidade existente dos modelos de bacia hidrográfica. Com muito melhor resolução do terreno, rios e áreas de drenagem, aumenta-se a habilidade de delinear mais apropriadamente a rede de camadas para um elemento do modelo da bacia hidrográfica.

As aplicações usadas largamente do SIG em diferentes campos de pesquisa de recursos hídricos podem ser listadas como segue:

- a) análise de enchente;
- b) erosão e previsão de poluição baseada em erosão;
- c) qualidade e monitoramento da água subterrânea;
- d) análise de áreas inundadas;
- e) aplicações em monitoramento;
- f) morfologia da bacia;
- g) questões de dados geográficos e não geográficos;
- h) integrações de modelo-SIG em quantidade e qualidade de água;
- i) sistemas expertos e de tomada de decisão.

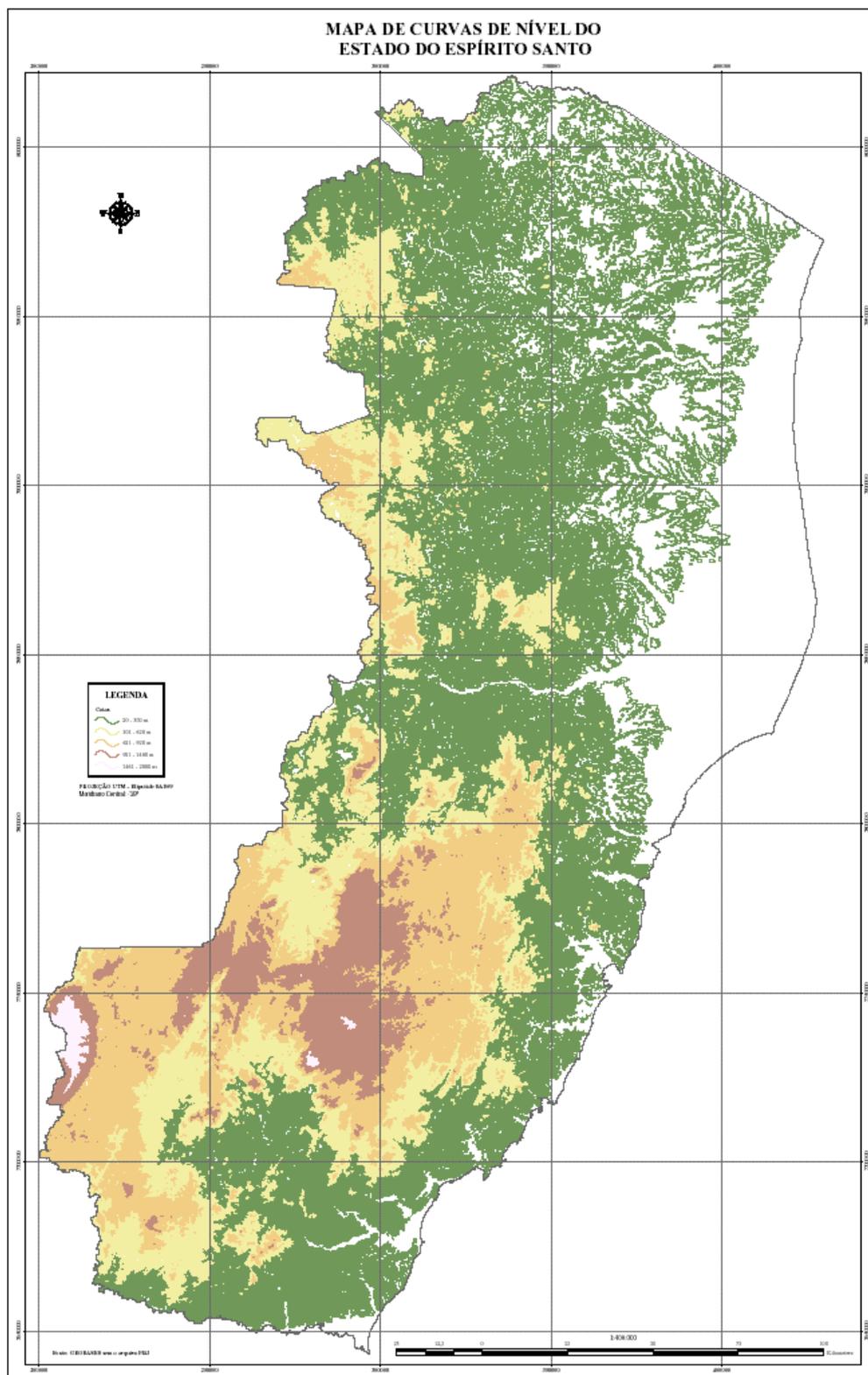


Figura 7.5 – Mapa de curvas de nível do Espírito Santo (em 5 classes), extraído das cartas do IBGE nas escalas: 1:50000 e 1:100000.

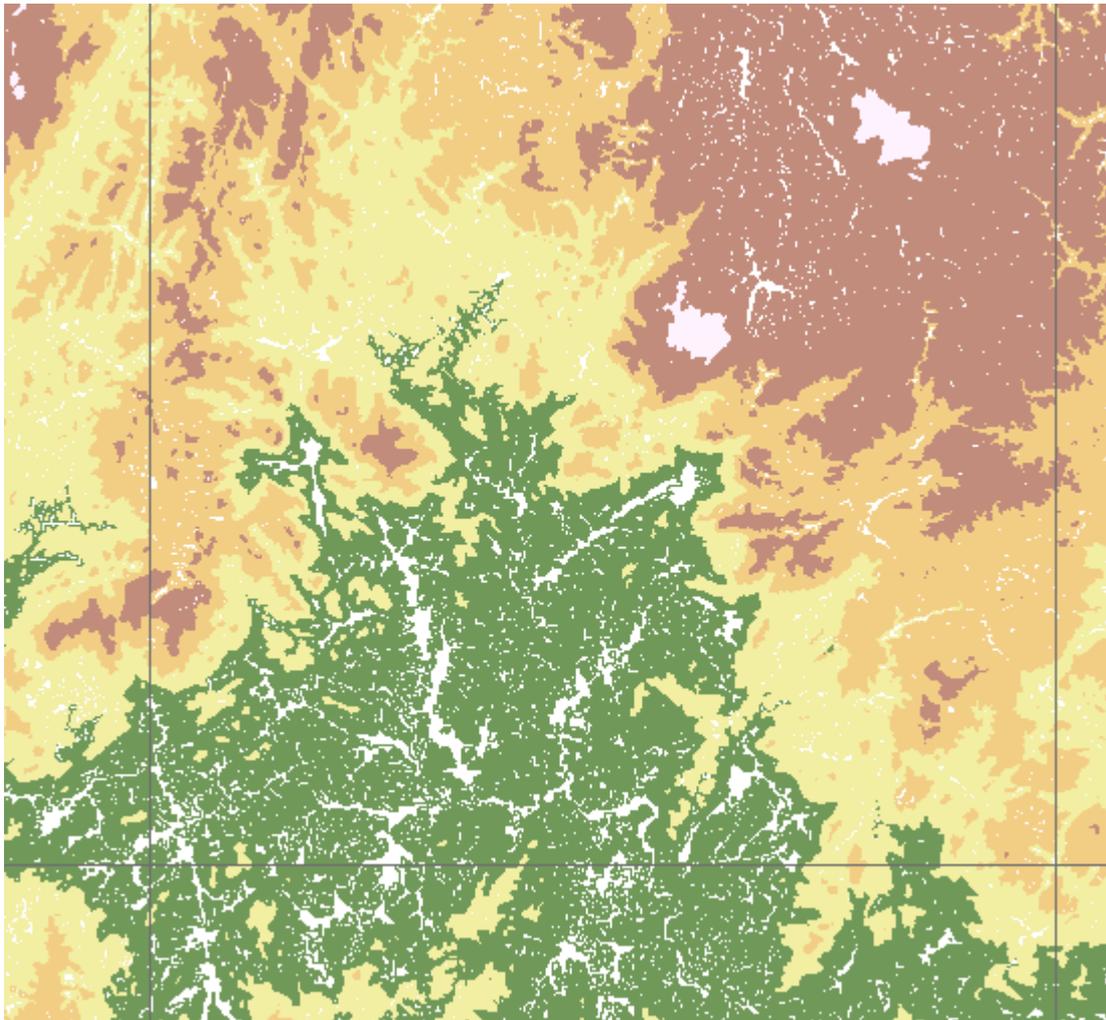


Figura 7.6 – Detalhe do mapa da figura 7.5

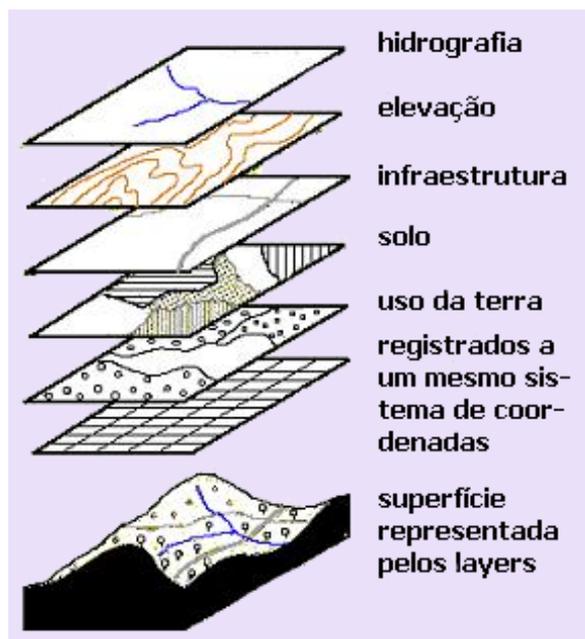


Figura 7.4 – SIG: layers, temas ou camadas

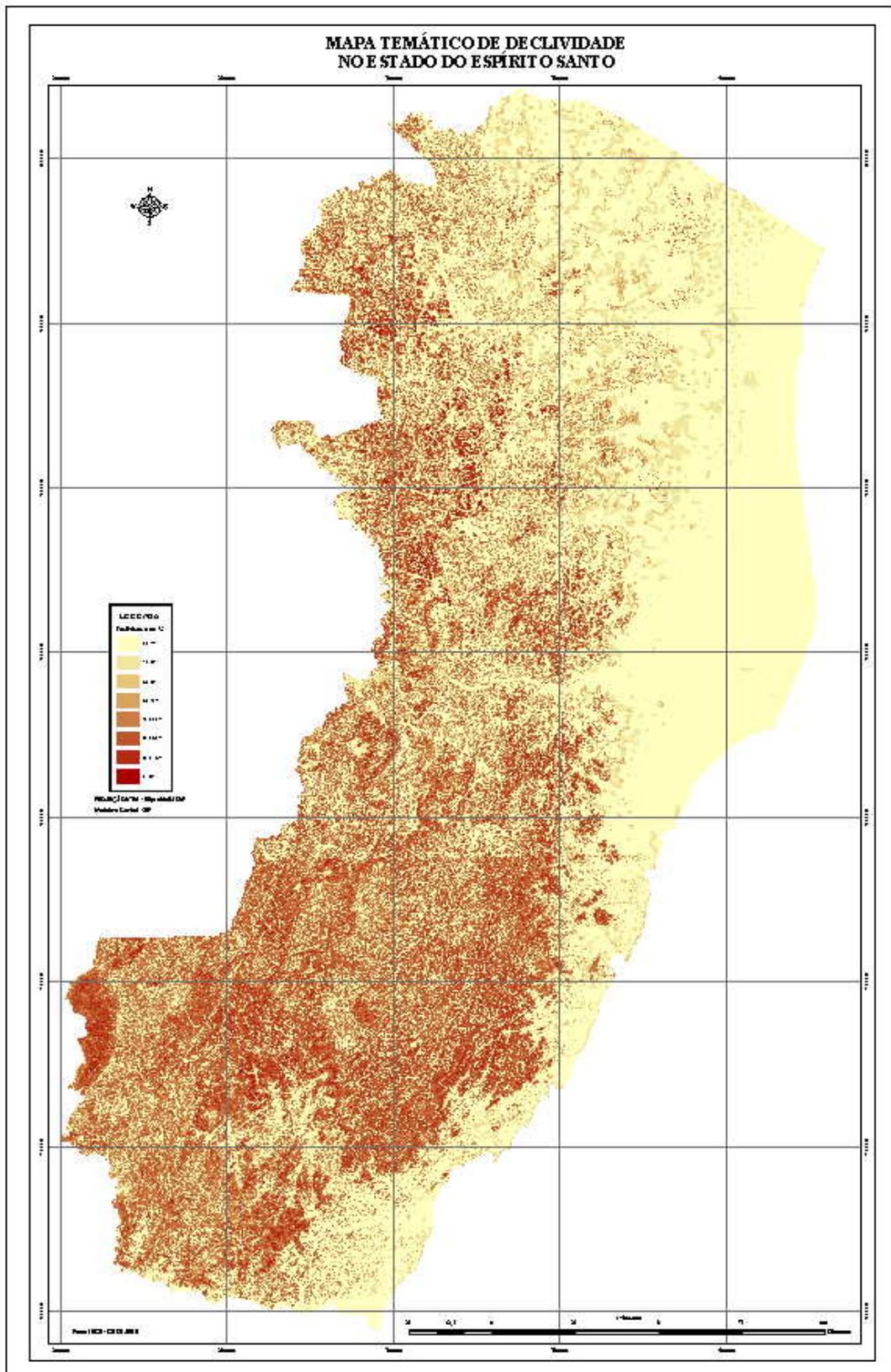


Figura 7.7 – Mapa de declividades do Espírito Santo em 8 classes, executado a partir do mapa de curvas de nível.

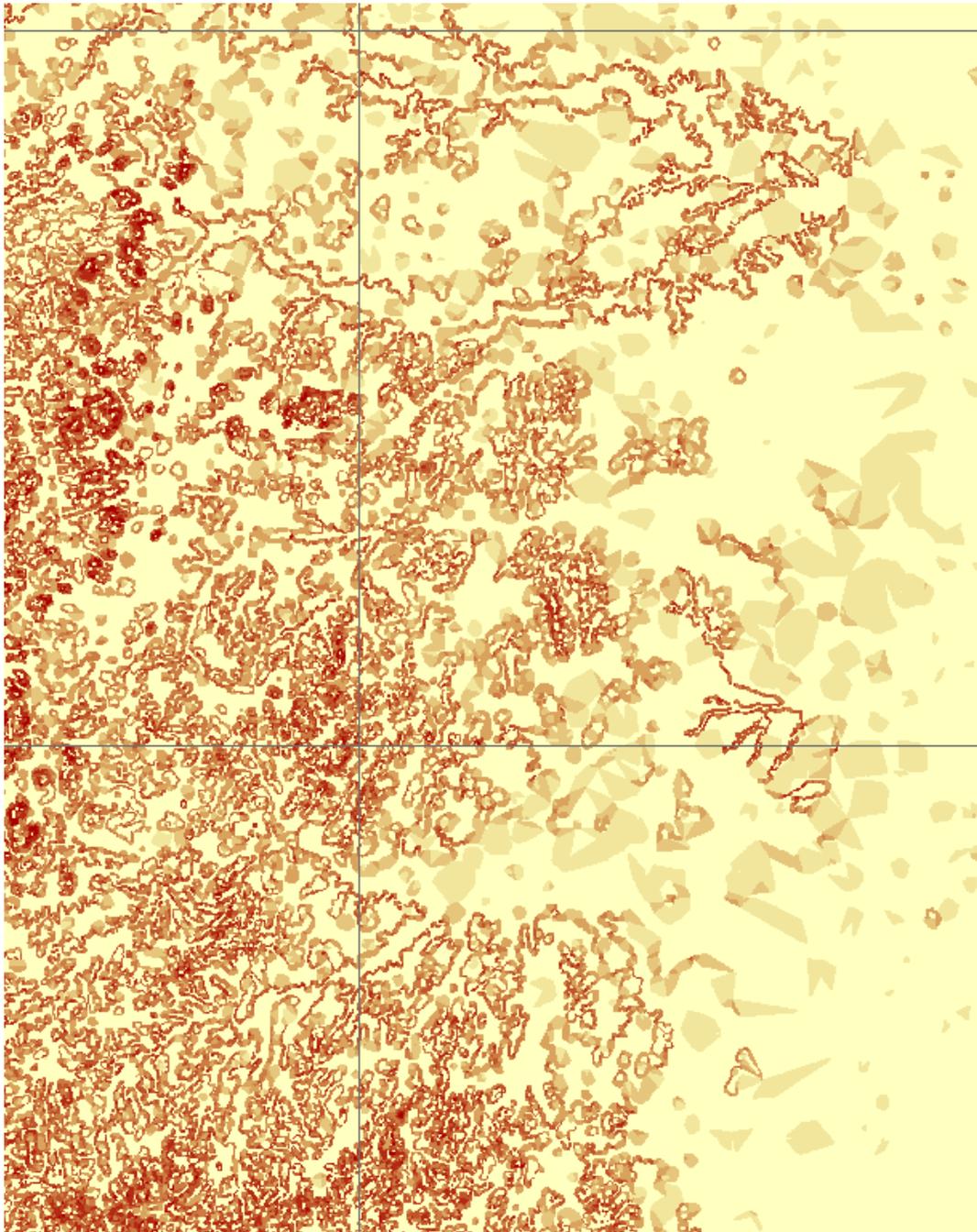


Figura 7.8 – Detalhe do mapa da figura 7.7

## **7.3 – Geoprocessamento**

Pode ser definido como o conjunto de tecnologias de coleta, tratamento de informações espaciais e de desenvolvimento, e uso, de sistemas (softwares) que se utilizam destas tecnologias. As áreas que utilizam as tecnologias de geoprocessamento têm, em comum, o interesse por entidades de expressão espacial, sua localização, distribuição, ou a distribuição espacial de seus atributos. Assim, são áreas ligadas à atuação do homem sobre o meio físico tais como: meio ambiente, geologia, hidrologia, agricultura, urbanismo, transportes, engenharia de minas

Nestas diversas atividades, os procedimentos de coleta, tratamento e utilização de informações espaciais tem tido desenvolvimento próprios, como adequado às necessidades específicas de cada área.

No Geoprocessamento estão incluídas ferramentas tais como:

- Cartografia
- SR (Sensoriamento Remoto)
- SIG (Sistemas de Informação Geográfica)

A cartografia é a arte e ciência de graficamente representar uma área geográfica em uma superfície plana como em um mapa ou gráfico (normalmente no papel ou monitor). As representações de área podem incluir superimposições de diversas informações sobre a mesma área através de símbolos, cores, entre outros. A cartografia é feita através da fotogrametria ou do sensoriamento remoto por satélite, que servem de material base para confecção das cartas.

## **7.4 – O processo de tomada de decisão**

### **7.4.1 – Uma nova abordagem**

Avanços recentes em tecnologias de informação, ligados ao desenvolvimento das novas ferramentas tais como sensoriamento remoto e tecnologia de satélite, SIG e sistemas inteligentes têm mudado a estrutura do processo de tomada de decisão. No passado, planejadores também tiraram partido de modelos e dados. Uma abordagem típica poderia ser o desenvolvimento de um modelo de gestão, freqüentemente na forma de um modelo de otimização, ao qual se incorporaria um modelo tecnológico (ou seja, qualidade de água, infra-estrutura urbana, erosão, e similar) como parte da função objetiva ou restrições. A solução para tal problema de otimização indicaria a “melhor” decisão a ser feita.

Atualmente, o aumento da complexidade do problema de gestão por um lado, e a disponibilidade de ferramentas avançadas para gestão por outro lado, tem mudado a trajetória do processo de tomada de decisão. A abordagem corrente envolve duas etapas básicas:

- a) Desenvolvimento de um sistema de informação integrada para dar suporte à tomada de decisão;

- b) Construção e experimentação de cenários de gestão alternativos através da simulação de cada um deles no sistema de informação.

Essas duas etapas implicam que o processo de tomada de decisão tem se tornado um processo interativo, ou seja, o planejador comunica-se com o sistema de informação e testa as conseqüências de suas decisões em lugar de chegar a uma decisão fixa singular.

#### **7.4.2 – Desenvolvimento de um sistema de informação para gestão**

O desenvolvimento de um sistema de informação para tomada de decisão envolve três etapas básicas:

- a) preparação dos dados para análise;
- b) análise dos dados e modelagem para transformação dos dados em informação;
- c) desenvolvimento de métodos de comunicação para o usuário (planejador) para interpretar os resultados e interativamente participar no processo de planejamento.

A preparação dos dados por si mesmo requer esforços significativos para arranjar os dados disponíveis em um formato utilizável. Os dados vêm de numerosas origens e organizações de monitoramento diferentes, de tal forma que estão freqüentemente disponíveis em formatos variados. Assim, dados em formatos incompatíveis são um problema a ser resolvido.

Além disso, se os dados são coletados via equipamento de medida automática ou são sensoriados remotamente por satélite, são gerados em grandes volumes. Se forem monitorados através de métodos de amostragem tradicionais, devem ser tratados problemas de falhas, proporcionalidade e heterogeneidade dos dados, além de erros de amostragem. Certamente, a etapa de preparação dos dados envolve o teste dos dados disponíveis em fidedignidade e erros e a integração de grandes volumes de dados multiformatados, de múltiplas origens e múltiplos meios para dentro de um banco de dados. Claramente, esta etapa é essencialmente devotada à gestão dos dados.

Para efetivamente gerenciar dados disponíveis e bancos de dados, o SIG pode ser usado como um elemento essencial do sistema de informação, e tem sido apontado como a “espinha dorsal da gestão de dados”. Quando o SIG está integrado com o sistema de banco de dados, os dois elementos juntos realmente constituem a “espinha dorsal” de todo o procedimento de gestão.

Quando os dados são preparados via integração SIG-banco de dados, os modelos podem ser executados para interpretar os dados e produzir informação. Esse é outro estágio de integração onde “dados + SIG + modelo”, como ferramentas primárias do sistema de informação, estão integradas. O SIG representa uma função ativa através da preparação da entrada de dados para o modelo e mais adiante apresentando os resultados do modelo dentro do sistema de organização de referencia geográfica.

Um estágio final de integração é realizado entre o modelo e um sistema inteligente. Sistemas inteligentes funcionam como um modelo enquanto definem, para um dado conjunto de variáveis de entrada, um valor de saída para uma variável. Diferentemente dos modelos numéricos, sistemas inteligentes executam essa função baseados em

regras, em estrutura qualitativa onde não somente fatores físicos, mas também fatores socio-econômicos podem ser levados em conta. O desenvolvimento de cenários e simulações, como segunda etapa do processo de tomada de decisão, pode então ser executado através do componente integrado “modelo + sistema inteligente” do sistema de informação.

O sistema de informação para gestão ambiental é estabelecido através da integração de ferramentas de gestão básicas: banco de dados, SIG, modelos e sistemas inteligentes. A integração das ferramentas de gestão constitui uma estrutura de meios múltiplos como base para sistemas de software interativos, os quais são atualmente projetados com abordagem orientada a objeto. Esses sistemas podem ser acessíveis a usuários locais ou mesmo a comunidades globais via sistemas de rede tais como a World Wide Web. Assim, usuários podem facilmente acessar e interagir com o sistema, testar e interpretar resultados de vários cenários e realizar julgamentos.

O procedimento acima implica que o processo de tomada de decisão tem agora se expandindo em um processo dinâmico onde o tomador de decisão é ativamente envolvido em todos os aspectos do problema gerenciado, ou seja, banco de dados, modelagem, SIG e sistemas inteligentes.

## ANEXO 1 - Sistemas de Informações Geográficas - SIG

Sistemas SIG são capazes de gerenciar dados geográficos, ou seja, dados que descrevem situações do mundo real em termos de sua posição (em relação a um sistema de referência espacial), geometria, relacionamentos espaciais (relações topológicas) e atributos. A principal diferença entre estes sistemas e os demais está na sua capacidade em armazenar e gerenciar dados espaciais. As estruturas matricial e vetorial, próprias de cada implementação, são as mais utilizadas para este fim. O banco de dados não espacial armazena informações que descrevem características ou atributos das entidades espaciais representadas no banco de dados espacial.

Pode-se definir Sistemas de Informações Geográficas como sistemas projetados para trabalhar com dados referenciados por coordenadas espaciais ou geográficas. Em outras palavras são sistemas computadorizados para armazenar, manipular, analisar, recuperar e mostrar dados referenciados geograficamente.

Na Hidrologia, a utilização inicial de recursos SIG foi motivada pela necessidade de representações mais precisas do terreno. Nesta linha de trabalho, identificam-se iniciativas de utilizar modelos hidrológicos distribuídos sobre representações "raster" da superfície geográfica e rede de drenagem. Mas este campo ainda não atingiu maturidade, especialmente no que concerne à solução de problemas de escala (resolução espacial), tempo e calibração de parâmetros.

### • Elementos Essenciais de um Sistema de Informações Geográfica (SIG)

Existem cinco elementos essenciais que um SIG deve conter:

*Aquisição de dados:* é o processo de identificação e coleta de dados requeridos para a aplicação. Este processo envolve dados de diversas fontes, tais como: observações de campo, fotografias aéreas, mapas, imagens de sensoriamento remoto, GPS, relatórios e outros documentos.

*Pré-processamento:* envolve a manipulação dos dados de forma que possam ser introduzidos no SIG. Engloba como atividades principais conversão de formato dos dados e identificação da localização dos objetos nos dados originais de forma sistemática.

*Gerenciamento de dados:* comanda a criação e o acesso ao banco de dados do SIG. Esta função fornece métodos consistentes de entrada, substituição, deleção e recuperação de dados.

*Manipulação e análise:* operações analíticas que trabalham com o conteúdo da base de dados para gerar novas informações.

*Exibição de resultados:* nesta fase os resultados finais do SIG são criados. Estes resultados podem incluir relatórios estatísticos, mapas, gráficos e tabelas.

A tecnologia SIG vem sendo utilizada em um número cada vez maior de áreas: geologia, análise e monitoramento ambiental, hidrologia, recursos hídricos, planejamento urbano, transportes, saúde e educação para citar algumas.

- **Tipos de variáveis de um SIG**

É importante notar que diferentes tipos de variáveis podem ser armazenados em um SIG. Estas variáveis precisam ser organizadas de forma que se possa definir as propriedades de cada uma delas. Pode-se, simplificada, definir os dados de um SIG como:

*Dados geométricos:* são representações das entidades espaciais, geralmente armazenados na forma de mapas. Genericamente, podem descrever propriedades posicionais (posição do objeto), topológicas (relacionamentos de vizinhança ou de conexão entre os objetos) e amostrais (valores de grandezas físicas ou de propriedades de um ponto ou região).

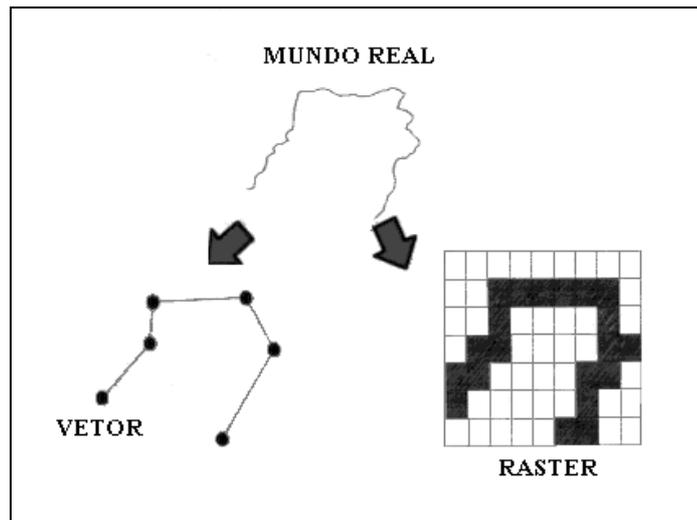
*Dados não-geométricos:* são atributos, descrições ou propriedades de objetos como, por exemplo: nomes, endereços, categorias de uso do solo, características da vegetação e atividade econômica.

- **Representação dos dados geográficos em um SIG**

Há várias maneiras de organizar os dados de um sistema de informações. A escolha de uma forma particular é uma decisão importante no desenvolvimento de um SIG. Em um SIG, cada tipo diferente de dado espacial é armazenado em um plano de dados referenciado geograficamente. Em cada um destes planos há três tipos primitivos de entidades geométricas: pontos, linhas e polígonos. As duas representações de dados mais utilizadas são:

*Representação tipo "raster":* o espaço em análise é dividido em células pela sobreposição de um "grid" (geralmente regular). As células do "grid" são constantes em tamanho e geralmente quadradas, embora retângulos, hexágonos e triângulos equiláteros possam ser utilizados. Cada célula (também chamada "pixel") é referenciada por números de linha e coluna e contém um valor. Neste tipo de representação um ponto é representado por uma célula isolada, uma linha por células vizinhas localizadas em uma direção e uma área por um aglomerado de células vizinhas. A seleção do tamanho da célula dita a precisão com que a imagem "raster" reproduz a realidade. Células menores aumentam a precisão, porém aumentam também o volume de dados armazenados. As fontes mais comuns de dados em formato "raster" são dados provenientes de "scanners" e de sensoriamento remoto.

*Representação tipo vetorial:* descreve objetos na forma de vetores de pontos. Esta forma de representação utiliza conjuntos de linhas definidos por pontos de início e fim e uma forma de conectividade. Representações vetoriais podem descrever um objeto com extrema precisão, uma vez que o espaço é contínuo e, portanto, permite que posições, tamanhos e dimensões sejam definidas precisamente.



### Comparação entre as representações “raster” e vetorial.

Comparações entre as duas formas de representação de dados mostram que cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens. Comparações entre volumes de dados são inteiramente dependentes do conteúdo das bases de dados, assim como da confiabilidade e da precisão. Os sistemas são fundamentalmente diferentes na forma de guardar as informações: o “raster” é quase contínuo e o vetorial claramente discreto. A representação “raster” pode ser considerada mais densa que a vetorial porque nela um número maior de valores unitários são armazenados. Comparações de eficiência de processamento também são difíceis em sistemas modernos. Com o atual desenvolvimento, a velocidade de processamento é mais afetada pelo banco de dados em si do que pela escolha entre as duas representações de dados.

- **Funcionalidades de SIG para apoio a decisões**

Sistemas de Informação Geográfica podem ser agrupados de acordo com suas finalidades em Análise, Síntese, Explicação e Predição em relação ao conteúdo do banco de dados. Análise compreende comparação, construção, exame, exploração, introdução, revisão, entre outros. Síntese inclui, entre outros, agregação, compreensão, composição, dedução, generalização, integralização, sobreposição, relatório, unificação e união. Explicação abrange associação, causa, interpretação, racionalização, razão, relatório, entre outros; e Predição pode envolver, entre outros, previsão, futuro, resultado, prognóstico e tendência.

A etapa de inteligência, em que o decisor procura por uma situação de problema, pode ser apoiada pelas funções de Análise, Síntese e Explicação. Na etapa de projeto, quando necessita escolher modelos formais e gerar alternativas ou cursos de ação, são úteis as funções de Predição. A etapa de escolha não é abrangida por nenhuma das categorias de funcionalidades dos SIG.

Tecnologias SIG têm experimentado ampliação de funcionalidades através da reunião de um conjunto de ferramentas interoperáveis de software voltadas a uma classe de problemas. Isto vem sendo possível porque há uma clara tendência dos desenvolvedores de SIG em tornar disponíveis produtos mais flexíveis, numa abordagem não monolítica. Seus sistemas tendem a seguir a distribuição de

plataformas, usuários, bancos de dados e processamento. Alguns são de domínio público com arquitetura aberta (como o SPRING ou o GRASS). Outros possuem bibliotecas que podem ser úteis dentro do paradigma da orientação-a-objetos. De uma forma geral, as propostas para melhorar a capacidade de SIG com vista ao suporte à tomada de decisão são classificadas em:

- apresentação de estudos de casos;
- implementação de modelos;
- projeto de sistema e arquitetura.

Na primeira busca-se mostrar como o uso das funções SIG e visualização cartográfica podem melhorar a tomada de decisão espacial. Na segunda, procura-se incorporar módulo de modelagem científica ao SIG. O SIG fornece as ferramentas de desenvolvimento de aplicativos, o banco de dados (e gerenciador) e interface com o usuário. Na terceira aborda-se o problema de como construir tecnologia específica de apoio à decisão espacial.

Independentemente da estratégia adotada para ampliar as funcionalidades SIG, em direção a apoio efetivo a decisões espaciais, há que se ressaltar que o sistema resultante é visto por muitos não mais como um "SIG estendido", mas sim como um Sistema de Apoio à Decisão Espacial - SADE. Este conceito vem de encontro a um consenso crescente quanto à necessidade de tecnologias de suporte efetivo à decisão espacial, ou mesmo como um meio de incrementar a utilidade de SIG e SADE para a solução de problemas espaciais. Uma área promissora que pode se constituir em um nicho apropriado para SADE é a Geocomputação.

## EXEMPLO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÃO SOBRE RECURSOS HÍDRICOS

Como exemplo de um Sistema de Informações em Recursos Hídricos será apresentado o SAGA – Sistema de Apoio à Gestão das Águas (Figura 01), desenvolvido pelo Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos da Universidade Federal do Espírito Santo com suporte da FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos por meio da Rede Cooperativa de Pesquisas CT-HIDRO.



**Figura 01: Tela inicial do SAGA.**

O SAGA é um sistema computacional que trabalha com um banco de dados alimentado com informações levantadas pelo usuário, e disponibilizando estas informações de forma amigável. A seguir serão apresentadas algumas das informações disponibilizadas neste sistema e a forma de entrada de dados.

O SAGA trabalha com unidades territoriais do tipo bacia hidrográfica, entretanto não é necessário ter apenas essas unidades territoriais (Figura 02). A essas unidades territoriais são associadas modelos computacionais e informações cadastrais referentes a diversos temas (barragens, poços, outorga, etc.) (Figura 03). Além de modelos computacionais (SISDERH), o SAGA possui módulo de cadastro de usuários de água (SISCAD) e um módulo de cadastro de estações meteorológicas (SISGEST) (Figura 04).

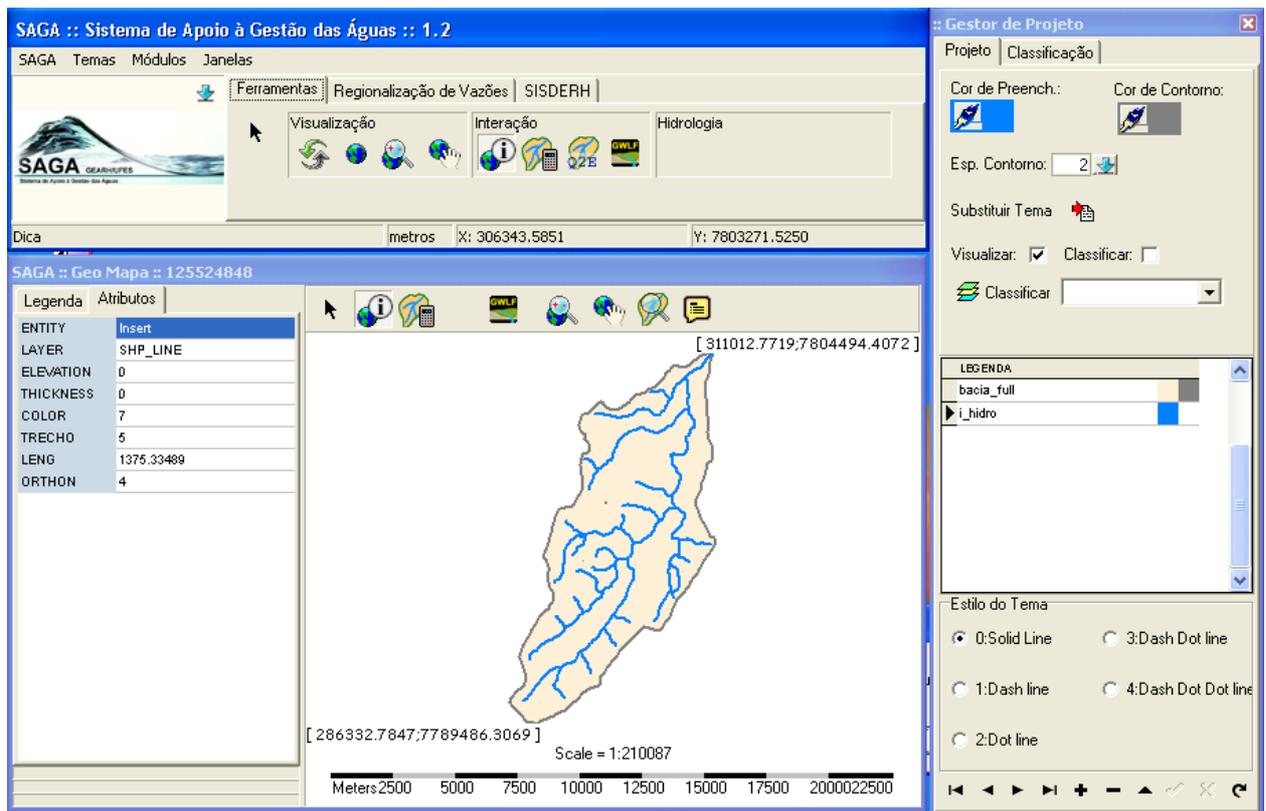


Figura 02: Unidade territorial com hidrografia.

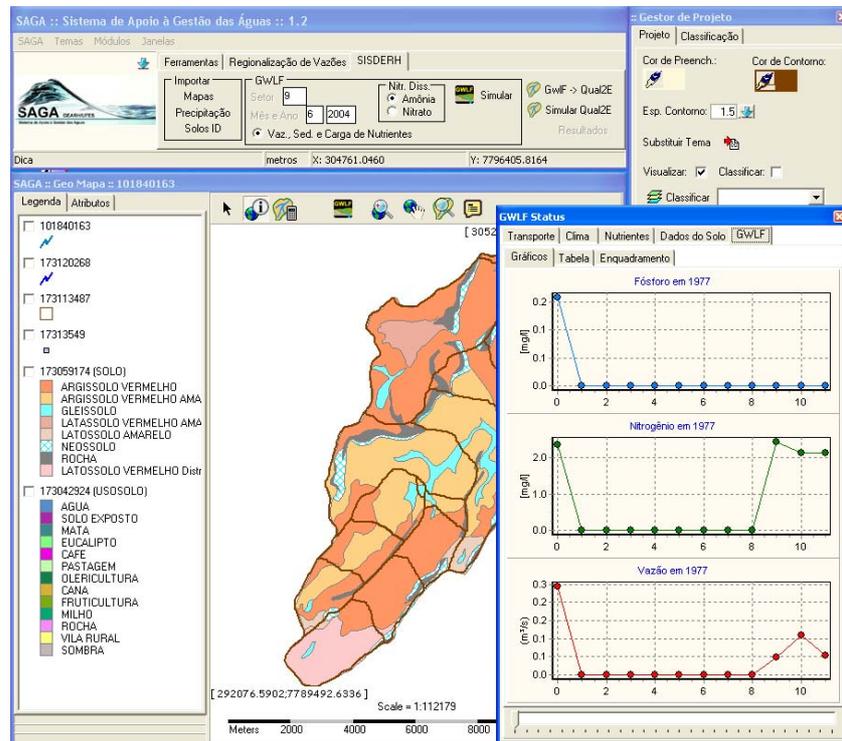
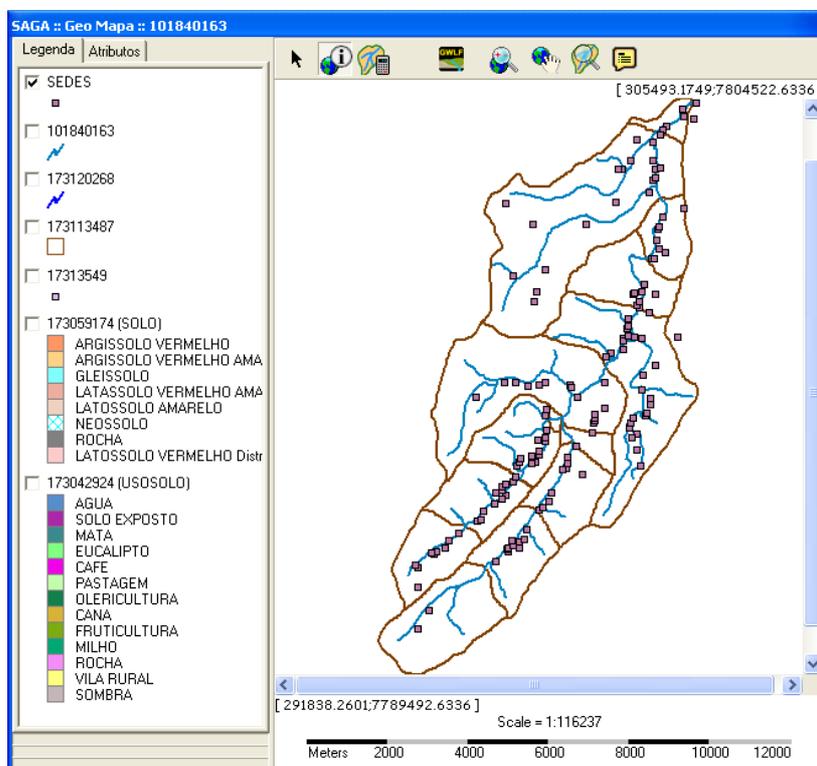


Figura 03: Aplicativos e Telas de Resultados.



**Figura 04: Janela de Cadastro de Usuários da Água.**

Essas informações cadastrais são georreferenciadas e apresentadas ao usuário na forma de mapas, como, por exemplo, a localização dos empreendimentos outorgados para uso da água (Figura 05).



**Figura 05: Identificação da localização de empreendimentos outorgados.**