

CONCEITOS BÁSICOS EM GEOPROCESSAMENTO

Gilberto Câmara

Cláudio Clemente Faria Barbosa

Clodoveu Davis

Frederico Fonseca

2.1 INTRODUÇÃO

O entendimento da tecnologia de Geoprocessamento requer, preliminarmente, uma descrição de alguns conceitos básicos, que serão posteriormente utilizados nos capítulos posteriores. Estes conceitos visam esclarecer as questões básicas do Geoprocessamento: *Como representar, em computadores, os dados geográficos ? Como as estruturas de dados geométricas e alfanuméricas se relacionam com os dados do mundo real ?*

Neste capítulo, estamos interessados em indicar como se dá a tradução entre os dados que dispomos na realidade e um GIS. Para simplificar a discussão, lidaremos neste capítulo com dados individuais (cada mapa considerado em separado dos demais dados). No próximo capítulo (*Modelagem de Dados em Geoprocessamento*) estaremos considerando o problema de modelar uma aplicação complexa, incluindo os relacionamentos entre os diferentes tipos de dados.

Os conceitos aqui apresentados incluem as noções de sistemas de medida (seção 2.3), tipos de dados (seção 2.4), campos e objetos (seção 2.5), estruturas de dados para GIS (seção 2.6) O desenvolvimento formal desses conceitos está disponível em Câmara (1995).

2.2 TRADUZINDO A INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA PARA O COMPUTADOR

Para entender o processo traduzir o mundo real para o ambiente computacional, uma das abordagens mais úteis é o chamado “paradigma dos quatro universos” (Gomes e Velho, 1995), que distingue:

- o universo do *mundo real*, que inclui as entidades da realidade a serem modeladas no sistema;
- o universo *matemático (conceitual)*, que inclui uma definição matemática (formal) das entidades a ser representadas;
- o universo de *representação*, onde as diversas entidades formais são mapeadas para representações geométricas e alfanuméricas no computador;
- o universo de *implementação*, onde as estruturas de dados e algoritmos são escolhidos, baseados em considerações como desempenho, capacidade do equipamento e tamanho da massa de dados. É neste nível que acontece a codificação.

Esta visão deste paradigma está ilustrada na Figura 2.1.

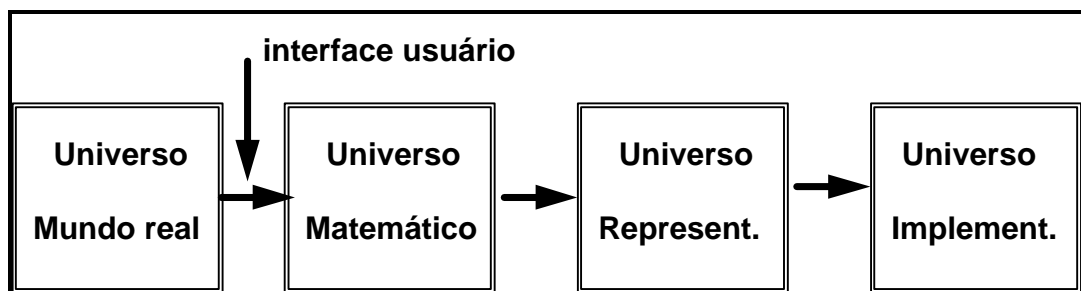


Figura 2.1 - Paradigma dos quatro universos.

A visão apresentada não se limita a sistemas de Geoprocessamento, mas representa uma perspectiva unificadora aos problemas de Computação Gráfica e Processamento de Imagens. Sua aplicação ao problema de Geoprocessamento é particularmente apropriada pois permite equacionar os problemas da área, como se pode constatar:

- no universo do *mundo real* encontram-se os fenômenos a serem representados (tipos de solo, cadastro urbano e rural, dados geofísicos e topográficos);
- no universo *conceitual (matemático)* pode-se distinguir entre as grandes classes formais de dados geográficos (*dados contínuos* e *objetos individualizáveis*) e especializar estas classes nos tipos de dados

geográficos utilizados comumente (dados temáticos e cadastrais, modelos numéricos de terreno, dados de sensoriamento remoto);

- no universo de *representação* as entidades formais definidas no universo conceitual são associadas a diferentes representações geométricas, que podem variar conforme a escala e a projeção cartográfica escolhida e a época de aquisição do dado. aqui se distingue entre as representações matricial e vetorial, que podem ainda ser especializadas;
- o universo de *implementação* é onde ocorre a realização do modelo de dados através de linguagens de programação. Neste universo, escolhem-se as estruturas de dados (tais como árvores quaternárias e árvores-R) para implementar as geometrias do universo de representação;

Com base nesta visão, as dicotomias tradicionais de Geoprocessamento (campos-objetos e matricial-vetorial) podem ser resolvidas, mostrando-se que elas se encontram *em níveis distintos de abstração*.

Esta análise também indica que a interface de usuário de um SIG deve, tanto quanto possível, refletir o universo conceitual e esconder detalhes dos universos de representação e implementação. No nível conceitual, o usuário lida com conceitos mais próximos de sua realidade e minimiza a complexidade envolvida nos diferentes tipos de representação geométrica.

2.3 O UNIVERSO DO MUNDO REAL

2.3.1 SISTEMAS DE MEDIDA E DE REFERÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL

Um aspecto central no uso da tecnologia de Geoprocessamento advém da característica lógico-matemática de sistemas de informação; para ser representada em ambiente computacional, temos de associar a cada tipo de informação geográfica uma escala de medida e de referência, que será utilizada pelo GIS para caracteriza-lo.

A visão mais aplicada em Geoprocessamento utiliza uma escala de mensuração que permite associar grandezas numéricas a cada objeto a ser representado computacional. Esta visão deriva do conceito "representacionista" proposto pelo filósofo Bertrand Russel: as propriedades não são intrínsecas aos objetos, mas são obtidas a partir de medidas. Assim, a representação de um objeto geográfico num GIS dependerá da escala que utilizarmos.

As regras de medida podem ir deste a simples atribuição do valor 0 ou 1 para as amostras (0 = sêco, 1 = úmido), até um conjunto de valores extraídos dos números

reais (23.3°C, 24.5°C, 28.1°C,....). A regra usada no processo de medição determina o seu nível, e cada nível de medida descreve a entidade de estudo com um determinado grau de detalhe, que varia de informações qualitativas até informações quantitativas. Como a forma de se medir as variáveis do mundo real afeta seus modos de manipulação, é essencial que o nível de medida utilizado seja incorporado a um conjunto de observações.

A referência histórica mais importante sobre os sistemas de medidas aplicados em GIS é o trabalho de Stevens (1951), em que esse autor propõe quatro escalas de mensuração: *nominal*, *ordinal*, *intervalo* e *razão*. Os dois primeiros níveis são *temáticos*, pois a cada medida é atribuído um número ou nome associando a observação a um tema ou classe. Quando um valor numérico é usado nos níveis de medidas *temáticos*, este valor serve somente como um identificador para nomear ou classificar aquela amostra da variável (1 = latossolo, 2 = podzólico,), não podendo portanto ser usado em expressões matemáticas, pois são valores qualitativos e não quantitativos.

A regra para o nível de medida *nominal* baseia-se na diferenciação entre os objetos segundo classes distintas. Como exemplos de classes usadas em medidas nominais tem-se: classes de solo, classes de rocha, classes de cobertura vegetal. Uma característica comum dos níveis binário e nominal é que a classificação dos eventos é feita sem nenhuma ordem inerente e serve apenas para diferenciá-los.

O nível de medida *ordinal* atribui valores ou nomes para as amostras, mas gera um conjunto ordenado de classes, baseado em critérios como tamanho (maior do que, menor do que), altura (1 = baixo, 2 = médio, 3 = alto), etc. Dados temáticos de classes de drenagem e de erosão, são exemplos de variáveis medidas no nível ordinal.

Uma característica importante dos níveis de medidas temáticas, é que elas não determinam magnitude. Quando o estudo necessita de uma descrição mais detalhada, que permita comparar intervalo e ordem de grandeza entre eventos, recorre-se aos níveis de medidas denominados de *numéricos*, onde as regras de atribuição de valores baseiam-se em uma escala de números reais.

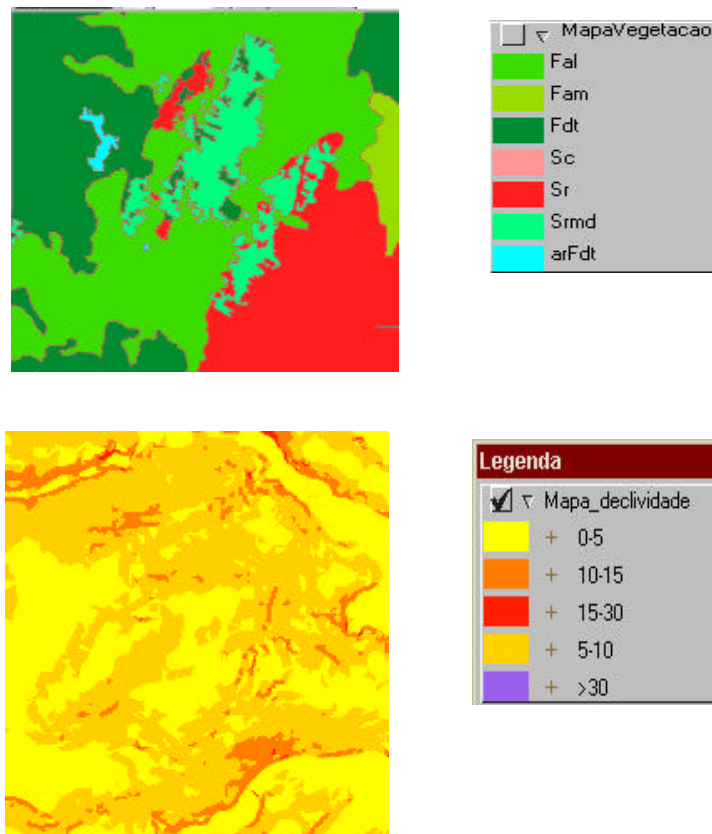


Figura 2.2 - Exemplos de medida nominal (mapa de vegetação) e medida ordinal (mapa de classes de declividade).

Existem dois níveis de medidas baseados em escala de números reais: *o nível por intervalo e o nível por razão*. No nível de medida por intervalo o ponto de referência zero é definido de forma arbitrária, permitindo a atribuição de valores negativos, e positivos $[-\infty, 0, +\infty]$, para as amostras. O equador e o meridiano de Greenwich, usados com referência na determinação de posições sobre a superfície da Terra é um exemplos de referência zero arbitrária e a localização geográfica em latitude/longitude é exemplos de variáveis descritas no nível de medida por intervalo. Por ter um ponto de referência zero arbitrária, valores medidos no nível por intervalo não podem ser usados para estimar proporções.

No nível de medida por *razão* o ponto de referência zero não é arbitrário, mas determinado por alguma condição natural. Por exemplo, na descrição de atributos como o peso, a distância entre dois pontos, a área e o volume de objetos, não faz sentido físico valores negativos, sendo a ausência destes atributos o ponto de origem zero na escala de medida correspondente. No caso de temperatura, a condição natural é o ponto de repouso dos átomos da matéria, a partir do qual não se consegue

temperaturas menores. Este ponto é o zero absoluto para temperatura, zero graus Kelvin. Por ter como referência um ponto de zero absoluto, as medidas feitas no nível de medida por razão permitem estimar proporções e podem ser usadas em operações de multiplicação, divisão e subtração entre amostras.

As medidas temáticas e as numéricas por intervalo não devem ser usadas diretamente em expressões matemáticas. Entretanto, na prática, os modelos ambientais combinam valores por razão com valores por intervalo. Nestes casos, parâmetros devem ser incluídos para permitir a conversão de valores medidos no nível por intervalo para o nível por razão, em unidades apropriadas.

2.4 TIPOS DE DADOS EM GEOPROCESSAMENTO

2.4.1 DADOS TEMÁTICOS

Dados temáticos descrevem a distribuição espacial de uma grandeza geográfica, expressa de forma qualitativa, como os mapas de pedologia e a aptidão agrícola de uma região. Estes dados, obtidos a partir de levantamento de campo, são inseridos no sistema por digitalização ou, de forma mais automatizada, a partir de classificação de imagens. Os dados apresentados na figura 2.2 (mapa de vegetação e mapa de declividade) são exemplos de dados temáticos.

2.4.2 DADOS CADASTRAIS

Um dado cadastral distingue-se de um temático, pois cada um de seus elementos é um *objeto geográfico*, que possui atributos e pode estar associado a várias representações gráficas. Por exemplo, os lotes de uma cidade são elementos do espaço geográfico que possuem atributos (dono, localização, valor venal, IPTU devido, etc.) e que podem ter representações gráficas diferentes em mapas de escalas distintas. Os atributos estão armazenados num sistema gerenciador de banco de dados.

A Figura 2.3 mostra um exemplo de dado cadastral da América do Sul, onde os países possuem atributos não-gráficos (PIB e população).

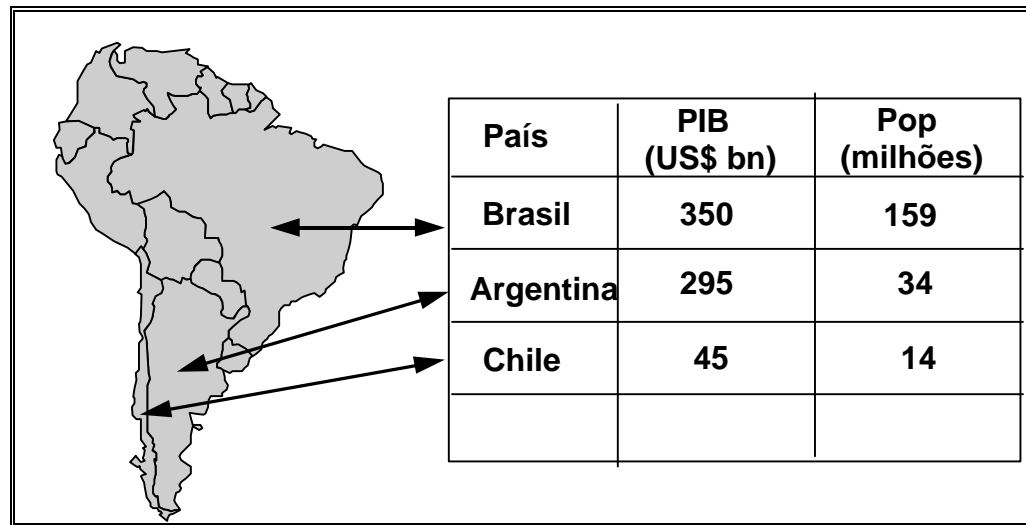


Figura 2.3 - Exemplo de dado cadastral (países da América do Sul).

2.4.3 REDES

Em Geoprocessamento, o conceito de "rede" denota as informações associadas a:

- Serviços de utilidade pública, como água, luz e telefone;
- Redes de drenagem (bacias hidrográficas);
- Rodovias.

No caso de redes, cada objeto geográfico (e.g: cabo telefônico, transformador de rede elétrica, cano de água) possui uma *localização geográfica exata* e está sempre associado a atributos descritivos presentes no banco de dados.

As informações gráficas de redes são armazenadas em coordenadas vetoriais, com *topologia arco-nó*: os atributos de arcos incluem o sentido de fluxo e os atributos dos nós sua impedância (custo de percorrimento). A topologia de redes constitui um *grafo*, que armazena informações sobre recursos que fluem entre localizações geográficas distintas, como ilustra a Figura 2.4.

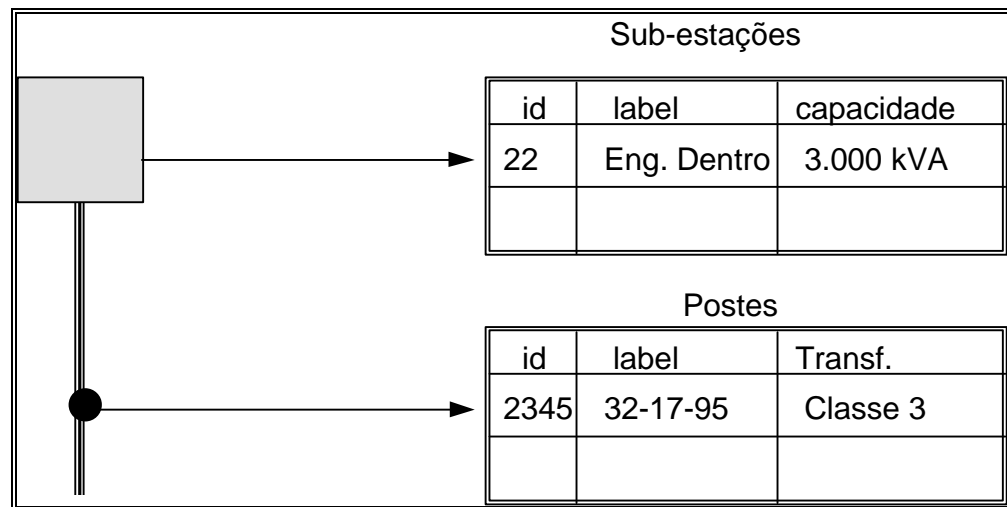


Figura 2.4 - Elementos de Rede.

Como observa Goodchild (1992b), uma rede é um sistema de endereçamento 1-D embutido no espaço 2-D. Para citar um exemplo, tome-se uma rede elétrica, que tem, entre outros, os componentes: postes, transformadores, sub-estações, linhas de transmissão e chaves. As linhas de transmissão serão representadas topologicamente como os arcos de um grafo orientado, estando as demais informações concentradas em seus nós. Note-se que os algoritmos de cálculo de propriedades da rede podem, em sua grande maioria, ser resolvidos apenas com a topologia da rede e de seus atributos.

2.4.4 MODELOS NUMÉRICOS DE TERRENO

O termo *modelo numérico de terreno* (ou MNT) é utilizado para denotar a representação quantitativa de uma grandeza que varia continuamente no espaço. Comumente associados à altimetria, também podem ser utilizados para modelar unidades geológicas, como teor de minerais, ou propriedades do solo ou subsolo, como aeromagnetismo.

Entre os usos de modelos numéricos de terreno, pode-se citar (Burrough, 1986):

- (a) Armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos;
- (b) Análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens;
- (c) Cômputo de mapas de declividade e exposição para apoio a análises de geomorfologia e erodibilidade;

- (d) Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas;
- (e) Apresentação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

Um MNT pode ser definido como um modelo matemático que reproduz uma superfície real a partir de algoritmos e de um conjunto de pontos (x, y) , em um referencial qualquer, com atributos denotados de z , que descrevem a variação contínua da superfície. Um exemplo de MNT é apresentado na figura 2.5.

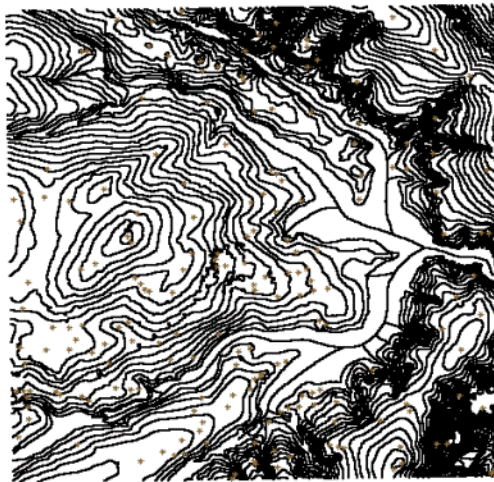


Figura 2.5 - Exemplo de modelo numérico de terreno (isolinhas de topografia).

2.4.5 IMAGENS

Obtidas por satélites, fotografias aéreas ou "scanners" aerotransportados, as imagens representam formas de captura indireta de informação espacial. Armazenadas como matrizes, cada elemento de imagem (denominado "pixel") tem um valor proporcional à energia eletromagnética refletida ou emitida pela área da superfície terrestre correspondente. A Figura 2.6 mostra uma composição colorida falsa cor das bandas 3 (associada a cor Azul), 4 (Verde) e 5 (Vermelha) do satélite TM-Landsat, para a região de Manaus (AM).

Pela natureza do processo de aquisição de imagens, os objetos geográficos estão contidos na imagem, sendo necessário recorrer a técnicas de fotointerpretação e de classificação para individualizá-los.

Características importantes de imagens de satélite são: o número e a largura de bandas do espectro eletromagnético imageadas (*resolução espectral*), a menor área da superfície terrestre observada instantaneamente por cada sensor (*resolução espacial*), o nível de quantização registrado pelo sistema sensor (*resolução radiométrica*) e o intervalo entre duas passagens do satélite pelo mesmo ponto (*resolução temporal*).

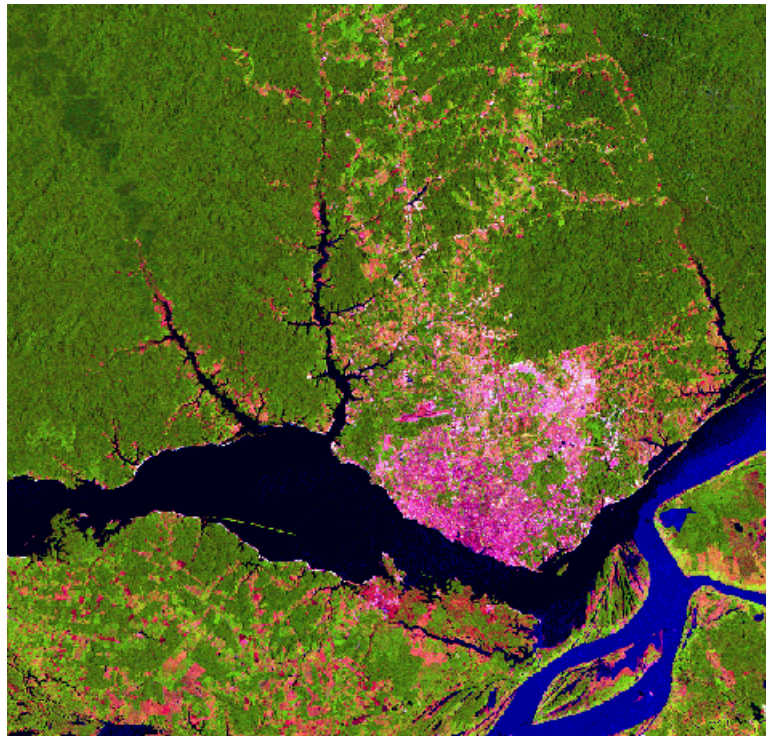


Figura 2.6 - Exemplo de Imagem (composição colorida TM/VI/NDVI para a região de Manaus).

2.5 O UNIVERSO CONCEITUAL

2.5.1 VISÃO GERAL

Em Geoprocessamento, o espaço geográfico é modelado segundo duas visões complementares: os modelos de *campos* e *objetos* (Worboys, 1995). O modelo de campos enxerga o espaço geográfico como uma superfície contínua, sobre a qual variam os fenômenos a serem observados segundo diferentes distribuições. Por exemplo, um mapa de vegetação descreve uma distribuição que associa a cada ponto do mapa um tipo específico de cobertura vegetal, enquanto um mapa geoquímico associa o teor de um mineral a cada ponto.

O modelo de objetos representa o espaço geográfico como uma coleção de entidades distintas e identificáveis. Por exemplo, um cadastro espacial dos lotes de um município identifica cada lote como um dado individual, com atributos que o distinguem dos demais. Igualmente, poder-se-ia pensar como geo-objetos os rios de uma bacia hidrográfica ou os aeroportos de um estado.

Para definir o modelo, seguir-se-ão os seguintes passos:

1. definir as classes básicas do modelo e estabelecer as suas relações, dentro dos princípios de especialização, generalização e agregação;
2. estabelecer como é possível, a partir do modelo, definir um esquema conceitual para um banco de dados geográfico, por especialização das classes básicas.

2.5.2 REGIÃO GEOGRÁFICA

Definição 2.1. Região Geográfica.

Define-se uma *região geográfica* R como uma superfície qualquer pertencente ao espaço geográfico, que pode ser representada num plano ou reticulado, dependente de uma projeção cartográfica.

A região geográfica serve de suporte geométrico para localização de entidades geográficas, pois toda entidade geográfica será representada por um ponto ou um conjunto de pontos em R . A definição de região geográfica proposta não restringe a escolha da representação geométrica (matricial ou vetorial) associada aos objetos geográficos.

2.5.3 GEO-CAMPOS

Definição 2.2. Geo-Campo.

Um geo-campo representa a distribuição espacial de uma variável que possui valores em todos os pontos pertencentes a uma região geográfica, *num dado tempo t*.

Múltiplas representações de um mesmo *geo-campo* podem significar a variação de uma dada variável no tempo t_1, t_2, \dots, t_{N-1} . Desta maneira torna-se possível representar as diferentes cronologias de alguns temas, tais como as mudanças no uso e cobertura do solo, a sazonalidade da vegetação ou a dinâmica das variáveis climáticas.

Os geo-campos podem ser especializados em:

- TEMÁTICO - dada uma região geográfica R , um *geo-campo temático* associa a cada ponto do espaço um *tema* de um mapa (p.ex. um geo-campo de vegetação é caracterizado pelo conjunto de temas {floresta densa, floresta aberta, cerrado, ...});
- NUMÉRICO - dada uma região geográfica, um *geo-campo numérico* associa, a cada ponto do espaço, um valor real (p. ex. um mapa de campo magnético ou mapa de altimetria);
- DADO_SENSOR_REMOTO - esta classe é uma especialização de NUMÉRICO, obtida através de discretização da resposta recebida por um sensor (passivo ou ativo) de uma área da superfície terrestre.

A Figura 2.7, apresenta um exemplo de geo-campos.

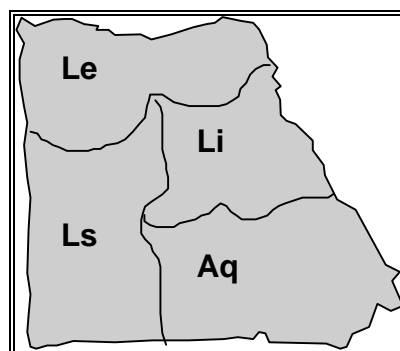


Figura 2.7 - Geo-campo temático (solos).

2.5.3.1 GEO-OBJETO

Definição 2.3. Geo-Objeto

Um geo-objeto é um elemento único que possui atributos não-espaciais e está associado a múltiplas localizações geográficas. A localização pretende ser exata e o objeto é distinguível de seu entorno.

Esta definição tem três grandes motivações adicionais:

1. *As projeções cartográficas:* a projeção planar da Terra, a partir de escalas macroregionais, é feita com o uso de quadrículas que estão particionadas em sistemas de referência independentes que definem recortes arbitrários no espaço e podem dividir a localização de um geo-objeto. Por exemplo, um particionamento cartográfico da Amazônia na projeção UTM, escala 1:250.000, faz com que os principais rios tenham representações geométricas descontínuas em vários mapas;
2. *Representações geométricas em diferentes escalas:* na prática, num mesmo banco de dados geográfico, podem conviver representações da mesma realidade geográfica em diferentes escalas geográficas. Por exemplo, considere-se um conjunto de mapas dos municípios do Estado de São Paulo, que inclui um mapa geral (na escala de 1:1.000.000) e mapas regionais (na escala de 1:100.000). Nesta situação, um mesmo geo-objeto (p.ex., o município de São José dos Campos) teria duas representações geométricas: uma contínua no mapa regional do Vale do Paraíba e outra descontínua nas folhas na escala 1:100.000;
3. *Múltiplas representações temporais:* as diferentes representações de um mesmo objeto podem corresponder a variações temporais do mesmo, como no caso de um lago que teve suas bordas alteradas¹;

Para ilustrar este conceito, considere-se a Figura 2.8, que mostra um banco de dados da Amazônia, onde os retângulos pontilhados representam o recorte espacial do banco de dados. Entidades como os rios Amazonas e Xingú têm representações em diferentes particionamentos espaciais do banco de dados.

¹Um caso particularmente dramático é o Mar de Aral, na ex-URSS.

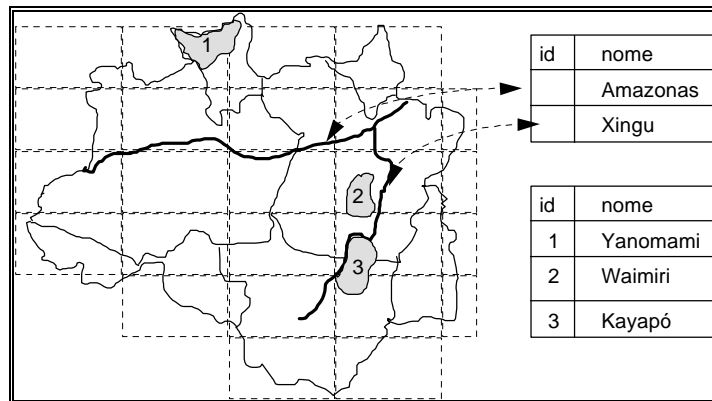


Figura 2.8 - Princípio de identidade em bancos de dados geográficos.

2.5.3.2 OBJETO NÃO-ESPACIAL

Em muitas situações é conveniente permitir a associação de informações não-espaciais a um banco de dados georeferenciado. Por exemplo, considere-se uma aplicação de cadastro urbano em uma prefeitura que já dispõe de um sistema para cálculo do IPTU baseado num cadastro alfanumérico de lotes. Neste caso, pode-se desejar associar o cadastro alfanumérico a dados georeferenciados contendo a localização geográfica e as dimensões destas propriedades. Para englobar estas entidades, introduz-se a noção de *objeto não-espacial*.

Definição 2.4. Objeto não-espacial

Um objeto não-espacial é um objeto que não possui localizações espaciais associadas.

Assim, a noção de objeto não-espacial engloba qualquer tipo de informação que não seja georeferenciada e que se queira agregar a um SIG.

O exemplo anexo mostra o caso de uma aplicação de cadastro rural, mostrada na Figura 2.9. Neste caso, tem-se os geo-objetos da classe “fazendas” (que estão referenciados espacialmente) e deseja-se estabelecer a ligação entre estes geo-objetos e a informação alfanumérica já existente sob a forma de um cadastro de propriedades. Neste caso, as informações de cadastro são consideradas um *objeto não-espacial*.

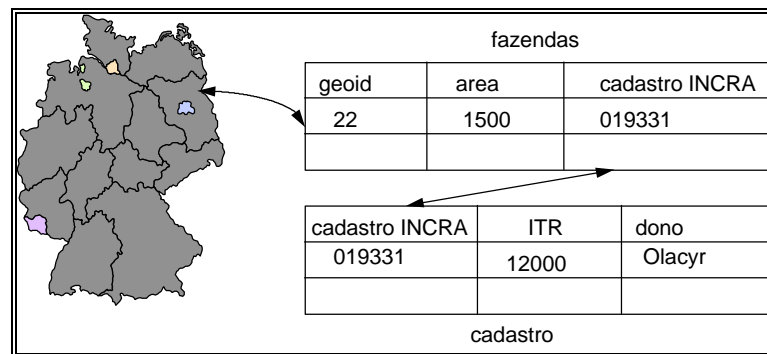


Figura 2.9 - Exemplo de ligação entre geo-objeto e objeto não-espacial.

2.6 UNIVERSO DE REPRESENTAÇÃO

No universo de representação, definem-se as possíveis representações geométricas que podem estar associadas às classes do universo conceitual. Inicialmente, deve-se considerar as duas grandes classes de representações geométricas: REPRESENTAÇÃO VETORIAL e REPRESENTAÇÃO MATRICIAL.

Na representação vetorial, a representação de um elemento ou objeto é uma tentativa de reproduzi-lo o mais exatamente possível. Qualquer entidade ou elemento gráfico de um mapa é reduzido a três formas básicas: pontos, linhas, áreas ou polígonos.

A representação matricial consiste no uso de uma malha quadriculada regular sobre a qual se constrói, célula a célula, o elemento que está sendo representado. A cada célula, atribui-se um código referente ao atributo estudado, de tal forma que o computador saiba a que elemento ou objeto pertence determinada célula.

Vale ressaltar que as representações estão associadas aos tipos de dados anteriormente discutidos, a saber:

- *dados temáticos*: admitem tanto representação matricial quanto vetorial;
- *dados cadastrais*: sua parte gráfica é armazenada em forma de coordenadas vetoriais e seus atributos não gráficos são guardados em um banco de dados;
- *redes*: sua parte gráfica é armazenada em forma de coordenadas vetoriais, com a topologia *arco-nó* e seus atributos não gráficos são guardados em um banco de dados;
- *imagens de sensoriamento remoto*: armazenadas em representação matricial;

- modelos numéricos de terreno: podem ser armazenados em *grades regulares* (representação matricial), *grades triangulares* (representação vetorial com topologia *arco-nó*) ou *isolinhas* (representação vetorial sem topologia).

2.6.1 REPRESENTAÇÃO MATRICIAL

Nesta representação, o espaço é representado como uma matriz $P(m, n)$ composto de m colunas e n linhas, onde cada célula possui um número de linha, um número de coluna e um valor correspondente ao atributo estudado e cada célula é individualmente acessada pelas suas coordenadas.

A representação matricial supõe que o espaço pode ser tratado como uma superfície plana, onde cada célula está associada a uma porção do terreno. A resolução do sistema é dada pela relação entre o tamanho da célula no mapa ou documento e a área por ela coberta no terreno. A Figura 2.10 mostra um mesmo mapa representado por células de diferentes tamanhos (diferentes resoluções), representando diferentes áreas no terreno.

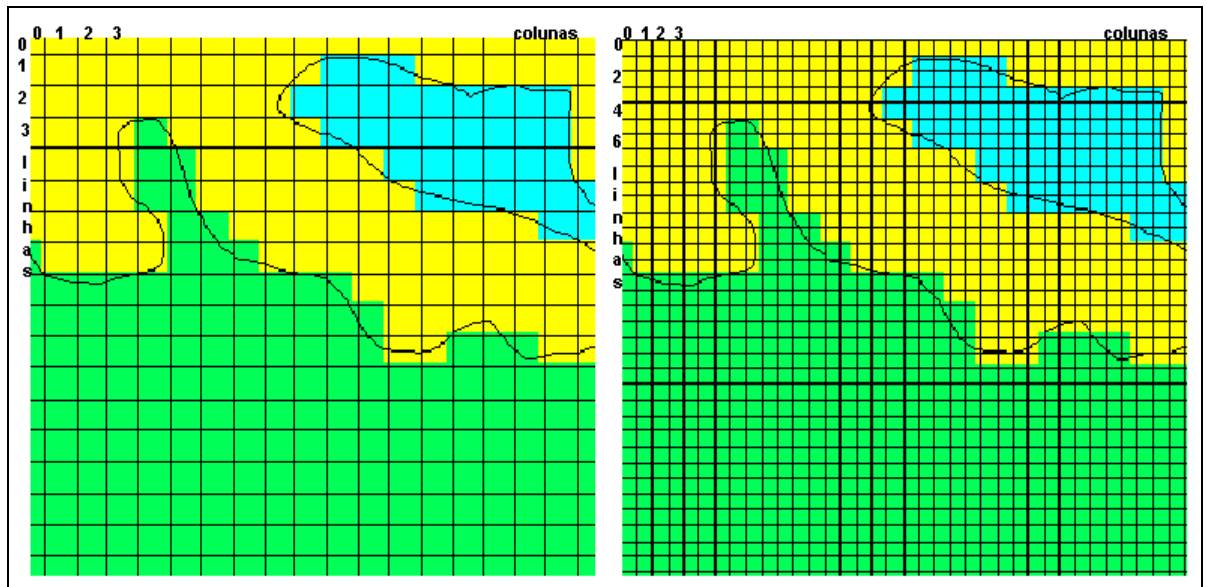


Figura 2.10 - Diferentes representações matriciais para um mapa.

Como o mapa do lado esquerdo possui uma resolução quatro vezes menor que o do mapa do lado direito, as avaliações de áreas e distâncias serão bem menos exatas que no primeiro. Em contrapartida, o espaço de armazenamento necessário para o mapa da direita será quatro vezes maior que o da esquerda.

Os dados são codificados, célula a célula, atribuindo a cada uma o código correspondente à uma classe referente ao fenômeno estudado. Para fazer isto, é necessário estabelecer um critério a ser obedecido em toda a operação.

Pode-se, por exemplo, atribuir a cada célula o código da classe sobre a qual estiver o centro da quadrícula. Outra possibilidade é adotar-se o critério da maior ocorrência. Neste caso, o código corresponde ao da classe que ocupar a maior parte da célula.

Hierarquia de Representações Matriciais

A REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA MATRICIAL pode ser especializada segundo a hierarquia de classes mostrada na Figura 2.11.

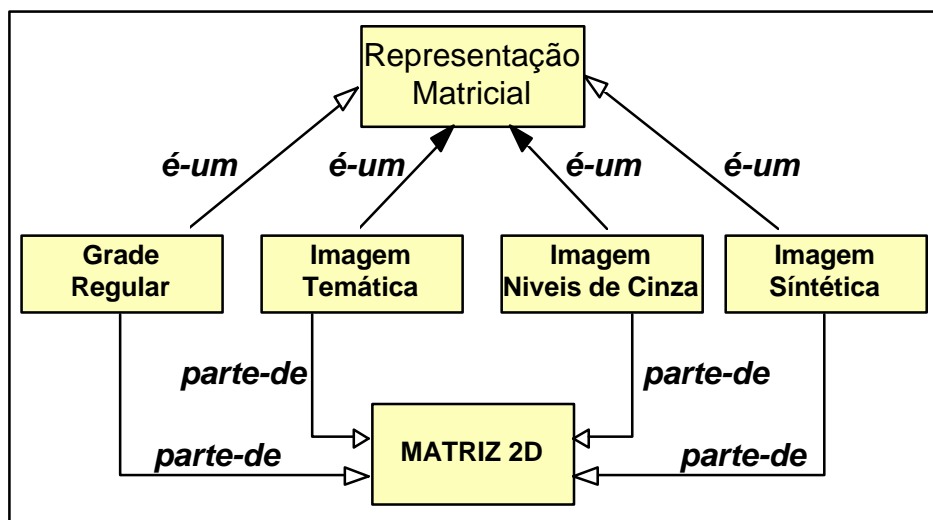


Figura 2.11 - Hierarquia de classes para representação matricial.

Os tipos possíveis de representação matricial são:

- **GRADE REGULAR:** uma grade regular é uma matriz de reais;
- **IMAGEM EM TONS DE CINZA:** imagem representada através de uma matriz onde os valores da matriz representam os valores de cinza da imagem;
- **IMAGEM TEMÁTICA:** representação matricial de um geo-campo TEMÁTICO, Por exemplo, numa imagem temática, um elemento da matriz de valor 2 pode estar associado ao tema “Floresta Ombrófila”;

- **IMAGEM SINTÉTICA (ou CODIFICADA):** representação de uma imagem em cores, utilizada para mostrar imagens em composição colorida em placas gráficas falsa-cor.

2.6.2 REPRESENTAÇÃO VETORIAL

2.6.2.1 CONCEITOS GERAIS

No modelo vetorial, a localização e a aparência gráfica de cada objeto são representadas por um ou mais pares de coordenadas. Este tipo de representação não é exclusivo do GIS: sistemas CAD e outros tipos de sistemas gráficos também utilizam representações vetoriais. Isto porque o modelo vetorial é bastante intuitivo para engenheiros e projetistas, embora estes nem sempre utilizem sistemas de coordenadas ajustados à superfície da Terra para realizar seus projetos, pois para estas aplicações um simples sistema de coordenadas cartesianas é suficiente. Mas o uso de vetores em GIS é bem mais sofisticado do que o uso em CAD, pois em geral GIS envolve volumes de dados bem maiores, e conta com recursos para tratamento de topologia, associação de atributos alfanuméricos e indexação espacial.

No caso de representação vetorial, consideram-se três elementos gráficos: ponto, linha poligonal e área (polígono). Um *ponto* é um par ordenado (x, y) de coordenadas espaciais. Além das coordenadas, outros dados não-espaciais (atributos) podem ser arquivados para indicar de que tipo de ponto se está tratando.

As *linhas poligonais*, arcos, ou elementos lineares são um conjunto de pontos conectados. Além das coordenadas dos pontos que compõem a linha, deve-se armazenar informação que indique de que tipo de linha se está tratando, ou seja, a que atributo ela está associada. Um *polígono* é a região do plano limitada por uma ou mais linha poligonais conectadas de tal forma que o último ponto de uma linha seja idêntico ao primeiro da próxima.

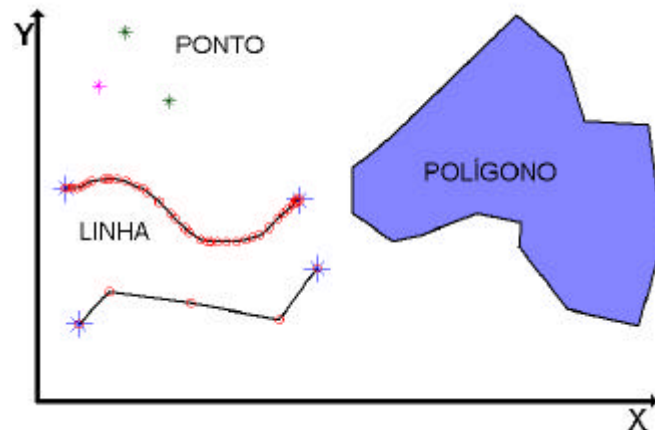


Figura 2.12 - Elementos da representação vetorial

Observe-se também que o polígono divide o plano em duas regiões: o interior, que convencionalmente inclui a fronteira (a poligonal fechada) e o exterior. Assim, quando utilizamos a expressão *vetores*, estamos nos referindo a alguma combinação de pontos, linhas poligonais e polígonos, conforme definidos acima. Combinações porque teoricamente poderíamos utilizar mais de um tipo de primitiva gráfica na criação da representação de um objeto. Por exemplo, pode-se ter objetos de área mais complexos, formados por um polígono básico e vários outros polígonos contidos no primeiro, delimitando buracos. Pode-se também ter objetos compostos por mais de um polígono, como seria necessário no caso do estado do Pará, que além da parte “continental” tem a ilha de Marajó e outras como parte de seu território.

2.6.2.2 VETORES E TOPOLOGIA EM GIS

Apesar de estarmos sempre concebendo representações sob a forma de pontos, linhas e áreas para objetos em GIS, existem algumas variações com relação à adaptação destas representações à realidade, ou seja, considerando a forma com que estes objetos ocorrem na natureza.

Objetos de área podem ter três formas diferentes de utilização: como objetos *isolados*, objetos *aninhados* ou objetos *adjacentes*. O caso de objetos isolados é bastante comum em GIS urbanos, e ocorre no caso em que os objetos da mesma classe em geral não se tocam. Por exemplo, edificações, piscinas, e mesmo as quadras das aplicações cadastrais ocorrem isoladamente, não existindo segmentos poligonais compartilhados entre os objetos. O caso típico de objetos aninhados é o de curvas de nível e todo tipo de isolinhas, em que se tem linhas que não se cruzam, e são entendidas como estando “empilhadas” umas sobre as outras. Finalmente, temos objetos adjacentes, e os exemplos típicos são todas as modalidades de divisão territorial: bairros, setores censitários, municípios e outros. São também exemplos

mapas geológicos e pedológicos, que representam fenômenos que cobrem toda a área de interesse. Neste caso, pode-se ter o compartilhamento de fronteiras entre objetos adjacentes, gerando a necessidade por estruturas topológicas. Estes também são os casos em que recursos de representação de buracos e ilhas são mais necessários.

Também objetos de linha podem ter variadas formas de utilização. Analogamente aos objetos de área, pode-se ter objetos de linha isolados, em árvore e em rede. Objetos de linha isolados ocorrem, por exemplo, na representação de muros e cercas em mapas urbanos. Objetos de linha organizados em uma árvore podem ser encontrados nas representações de rios e seus afluentes, e também em redes de esgotos e drenagem pluvial. E podem ser organizados em rede, nos casos de redes elétricas, telefônicas, de água ou mesmo na malha viária urbana e nas malhas rodoviária e ferroviária.

Seja no caso de objetos de área ou no caso de objetos de linhas, quando queremos armazenar explicitamente as relação de adjacência, utilizamos formas específicas de representação vetorial: as representações topológicas.

2.6.2.3 TOPOLOGIA ARCO-NÓ

A topologia arco-nó é a representação vetorial associada a um rede linear conectada. Um *nó* pode ser definido como o ponto de intersecção entre duas ou mais linhas, correspondente ao ponto inicial ou final de cada linha. Nenhuma linha poderá estar desconectada das demais para que a topologia da rede possa ficar totalmente definida.

O conhecimento das relações topológicas entre as linhas pode ser de fundamental importância no caso de redes. Para exemplificar, considere-se a Figura 2.13, que mostra uma parte de uma rede de distribuição elétrica, com os seus diversos componentes (sub-estação, rede, poste, transformador, consumidor).

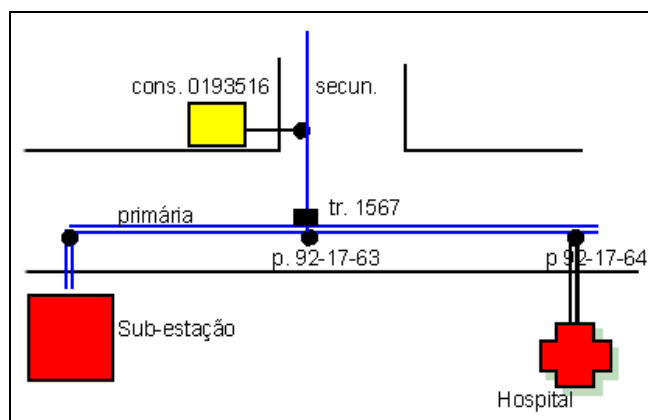


Figura 2.13 - Exemplo de topologia arco-nó (rede elétrica).

2.6.2.4 TOPOLOGIA ARCO-NÓ-POLÍGONO

A topologia arco-nó-polígono é utilizada quando se quer representar elementos gráficos do tipo área. Seu objetivo é descrever as propriedades topológicas de áreas de tal maneira que os atributos não-espaciais associados aos elementos ou entidades poligonais possam ser manipulados da mesma forma que os correspondentes elementos em um mapa temático analógico.

Neste caso, faz-se necessário armazenar informação referente aos elementos vizinhos, da mesma forma que na estrutura de redes deviam ser definidas as ligações entre as linhas. A Figura 2.14 mostra de forma simplificada um exemplo desta estrutura topológica.

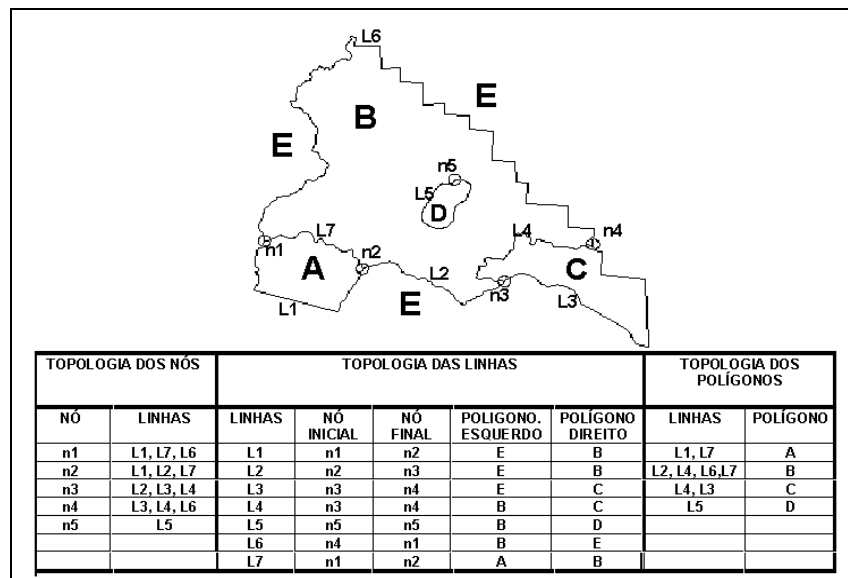


Figura 2.14 - Estrutura topológica do tipo arco-nó-polígono.

2.6.2.5 HIERARQUIA DE REPRESENTAÇÕES VETORIAIS

Para um entendimento mais detalhado das representações vetoriais em GIS, deve-se inicialmente precisar o que se entende por primitivas geométricas: *coordenadas 2D*, *coordenadas 3D*, *nó 2D*, *nó 3D*, *nó de rede*, *arcos*, *arcos orientados*, *isolinhas* e *polígonos*.

Dada uma região geográfica R , pode-se definir:

- COORDENADA2D - Uma coordenada 2D é um objeto composto por uma localização singular $(x_i, y_j) \in R$;
- COORDENADA3D - Uma coordenada 3D é um objeto composto por uma localização singular (x_i, y_j, z) , onde $(x_i, y_j) \in R$;
- PONTO2D - Um ponto 2D é um objeto que possui atributos descritivos e uma coordenada 2D;
- LINHA2D - Uma linha 2D possui atributos e inclui um conjunto de coordenadas 2D;
- ISOLINHA - uma isolinha contém uma linha 2D associada a um valor real (cota);
- ARCO ORIENTADO - um arco orientado contém uma linha 2D associada a uma orientação de percorrimto;
- NÓ2D - um nó 2D inclui uma coordenada2D $(x_i, y_i) \in R$ e uma lista L de linhas 2D (trata-se da conexão entre duas ou mais linhas, utilizada para manter a topologia da estrutura);
- NÓ REDE - um nó de rede contém um nó 2D e uma lista de arcos orientados, onde a cada instância associa-se uma impedância e um custo de percorrimto;
- NÓ 3D - um nó 3D instância desta classe contém uma coordenada 3D (x_i, y_i, z_i) e um lista L de linhas 2D (trata-se da conexão entre três ou mais linhas de uma grade triangular);
- POLÍGONO - um polígono contém uma lista de linhas 2D e uma lista de nós 2D que descrevem as coordenadas da área externa e das áreas internas que compõem o polígono.

Uma vez definidas as primitivas geométricas vetoriais, pode ser estabelecida a hierarquia de representações geométricas vetoriais, como mostrado na Figura 2.15, onde distinguem-se os relacionamentos de especialização **é-um** (“is-a”),

inclusão de uma instância **parte-de** (“part-of”), inclusão de um conjunto de instâncias **conjunto-de** (“set-of”) e inclusão de uma lista de identificadores de instâncias **lista-de** (“list-of”).

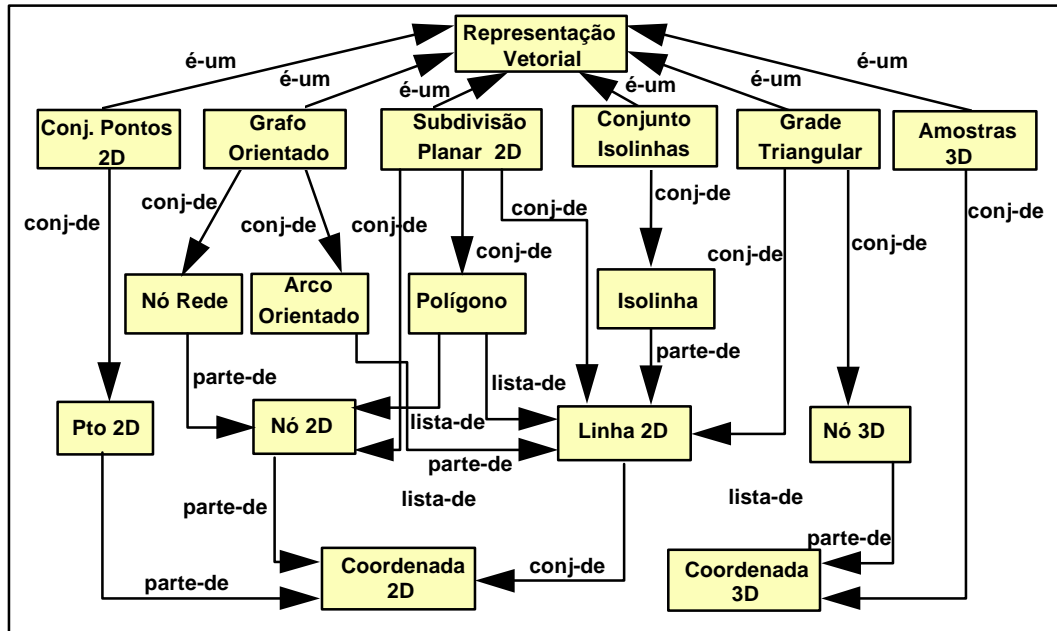


Figura 2.15 - Hierarquia de classes para representação vetorial.

Deste modo, pode-se distinguir os tipos de representação vetorial:

- CONJUNTO DE PONTOS 2D - uma instância desta classe é um conjunto de pontos 2D utilizados para guardar localizações isoladas no espaço (p.ex. no caso de poços de petróleo);
- CONJUNTO DE ISOLINHAS - uma instância desta classe é um conjunto de linhas, onde cada linha possui uma cota e as linhas não se interceptam;
- SUBDIVISÃO PLANAR - para uma região geográfica R qualquer, uma subdivisão planar contém um conjunto Pg de polígonos, L de linhas 2D e N de nós 2D;
- GRAFO ORIENTADO - uma instância desta classe é uma representação composta de um conjunto de nó de rede e de um conjunto de arco orientado 2D;
- GRADE TRIANGULAR - uma instância desta classe contém um conjunto de nós 3D e um conjunto L de linhas 2D tal que todas as linhas se interceptam, mas apenas em seus pontos iniciais e finais;
- MAPA PONTOS3D - uma instância desta classe é um conjunto de coordenadas 3d. Trata-se de um conjunto de amostras 3D.

2.7 COMPARAÇÃO ENTRE REPRESENTAÇÕES MATRICIAL E VETORIAL

Como observamos anteriormente, dados temáticos admitem tanto a representação matricial quanto a vetorial; deste modo, é relevante compará-las.

Para a produção de cartas e em operações onde se requer maior precisão, a representação vetorial é mais adequada. As operações de álgebra de mapas são mais facilmente realizadas no formato matricial. No entanto, para um mesmo grau de precisão, o espaço de armazenamento requerido por uma representação matricial é substancialmente maior. Isto é ilustrado na Figura 2.16.

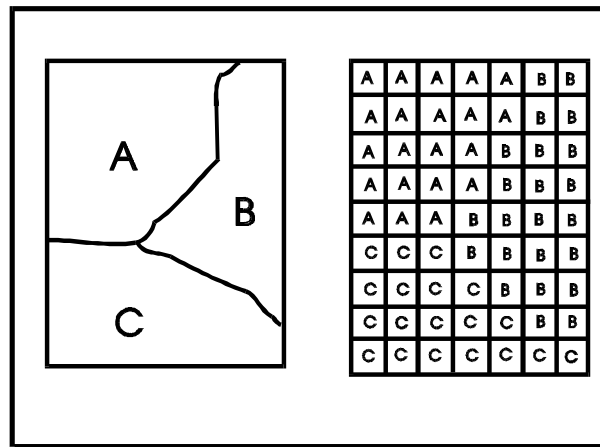


Figura 2.16 - Representação vetorial e matricial de um mapa temático.

A Tabela 2.1 apresenta uma comparação entre as vantagens e desvantagens de armazenamento matricial e vetorial para mapas temáticos. Esta comparação leva em conta os vários aspectos: relacionamentos espaciais, análise, armazenamento. Nesta tabela, o formato mais vantajoso para cada caso é apresentado em destaque.

TABELA 2.1

COMPARAÇÃO ENTRE REPRESENTAÇÕES PARA MAPAS TEMÁTICOS

<i>Aspecto</i>	<i>Representação Vetorial</i>	<i>Representação Matricial</i>
Relações espaciais entre objetos	Relacionamentos topológicos entre objetos disponíveis	Relacionamentos espaciais devem ser inferidos
Ligação com banco de dados	Facilita associar atributos a elementos gráficos	Associa atributos apenas a classes do mapa
Análise, Simulação e Modelagem	Representação indireta de fenômenos contínuos Álgebra de mapas é limitada	Representa melhor fenômenos com variação contínua no espaço Simulação e modelagem mais fáceis
Escala de trabalho	Adequado tanto a grandes quanto a pequenas escalas	Mais adequado para pequenas escalas (1:25.000 e menores)
Algoritmos	Problemas com erros geométricos	Processamento mais rápido e eficiente.
Armazenamento	Por coordenadas (mais eficiente)	Por matrizes

2.8 REPRESENTAÇÕES DE MODELOS NUMÉRICOS DE TERRENO

2.8.1 GRADE REGULAR

A *grade regular* é uma representação matricial aonde cada elemento da matriz está associado a um valor numérico, como mostra a Figura 2.17. Para a geração da grade torna-se necessário estimar, através de interpoladores matemáticos, os valores para as células que não possuem medidas de elevação, considerando-se a vizinhança de medidas de elevação conhecidas.

Os procedimentos de interpolação para geração de grades regulares a partir de amostras variam de acordo com a grandeza medida. No caso de altimetria, é comum o uso de funções de ponderação por inverso do quadrado da distância. Já para variáveis geofísicas, procedimentos de filtragem bidimensional ou de geoestatística (como a *krigeagem*) são utilizados.

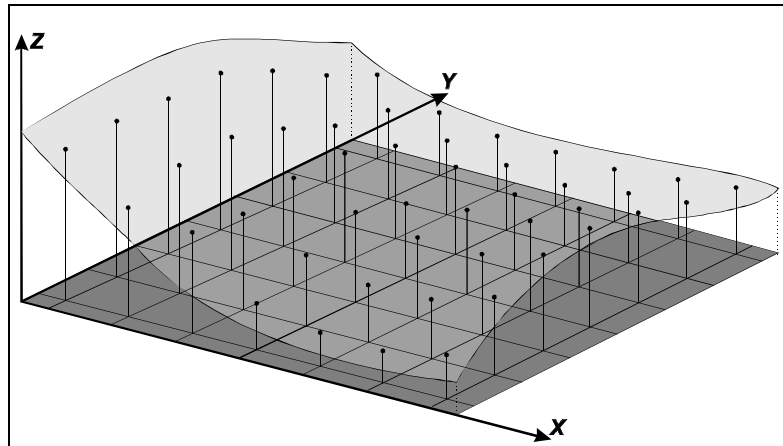


Figura 2.17 - Superfície e grade regular correspondente. (Fonte: Namikawa 1995).

2.8.2 MALHAS TRIANGULARES

A *malha triangular* ou TIN (do inglês “triangular irregular network”) é uma estrutura do tipo vetorial com topologia do tipo *nó-arco* e representa uma superfície através de um conjunto de faces triangulares interligadas. Para cada um dos três vértices da face do triângulo são armazenadas as coordenadas de localização (x , y) e o atributo z , com o valor de elevação ou altitude. Em geral, nos SIGs que possuem pacotes para MNT, os algoritmos para geração da grade triangular baseiam-se na triangulação de Delaunay com restrição de região.

Quanto mais equiláteras forem as faces triangulares, maior a exatidão com que se descreve a superfície. O valor de elevação em qualquer ponto dentro da superfície pode ser estimado a partir das faces triangulares, utilizando-se interpoladores. A Figura 2.18 mostra uma superfície tridimensional e a grade triangular correspondente.

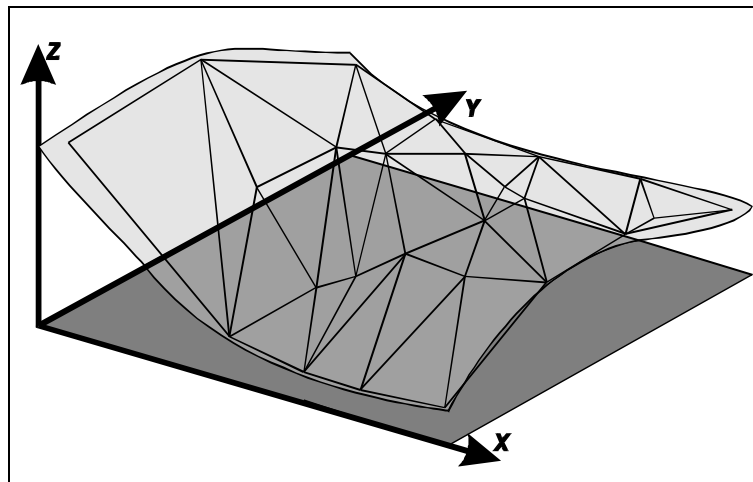


Figura 2.18 - Superfície e malha triangular correspondente. (Fonte: Namikawa 1995).

2.8.3 COMPARAÇÃO ENTRE REPRESENTAÇÕES DE MNT

As malhas triangulares são normalmente melhores para representar a variação do terreno, pois capturam a complexidade do relevo sem a necessidade de grande quantidade de dados redundantes. As grades regulares têm grande redundância em terrenos uniformes e dificuldade de adaptação a relevos de natureza distinta no mesmo mapa, por causa da grade de amostragem fixa.

Para o caso de variáveis geofísicas e para operações como visualização 3D, as grades regulares são preferíveis, principalmente pela maior facilidade de manuseio computacional. A Tabela 2.2 resume as principais vantagens e desvantagens de grades regulares e malhas triangulares.

TABELA 2.3

COMPARAÇÃO ENTRE GRADES REGULARES E MALHAS TRIANGULARES PARA REPRESENTAR MODELOS NUMÉRICOS DE TERRENO

	Malha triangular	Grade regular
Vantagens	<ol style="list-style-type: none"> 1. Melhor representação de relevo complexo 2. Incorporação de restrições como linhas de crista 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Facilita manuseio e conversão 2. Adequada para geofísica e visualização 3D
Problemas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Complexidade de manuseio 2. Inadequada para visualização 3D 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Representação relevo complexo 2. Cálculo de declividade

Os modelos numéricos de terreno também podem ser convertidos para mapas temáticos e para imagens. Em ambos os casos, a grandeza numérica é quantizada, seja para um número pequeno de valores (caso de dados temáticos) seja para a variação associada a imagens (valores discretos).

2.9 REPRESENTAÇÕES COMPUTACIONAIS DE ATRIBUTOS DE OBJETOS

Entende-se por atributo qualquer informação descritiva (nomes, números, tabelas e textos) relacionada com um único objeto, elemento, entidade gráfica ou um conjunto deles, que caracteriza um dado fenômeno geográfico.

Inicialmente os SIGs armazenavam tanto as entidades gráficas quanto os atributos não-espaciais em sistemas próprios de arquivos internos. Permitiam ainda que os atributos não-espaciais fossem inseridos no sistema durante, ou imediatamente após, a entrada dos objetos ou entidades gráficas que representavam. Estes procedimentos eram problemáticos quando havia numerosa quantidade de atributos não-espaciais a serem relacionados com os objetos.

Além disso, as ferramentas de busca, recuperação, manutenção e análise destes sistemas deixavam a desejar, quando comparadas aos tradicionais Sistemas de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD). Um SGBD é um sistema de banco de dados que funciona independentemente do sistema aplicativo, armazenando os dados em arquivos no disco rígido e carregando-os em memória para sua manipulação. Assegura três requisitos importantes na operação de dados: *integridade* - controle de acesso por vários usuários; *eficiência* - acesso e modificações de grande volume de

dados e *persistência* - manutenção de dados por longo tempo, independente dos aplicativos que dão acesso ao dado.

A organização de bancos de dados geográficas mais utilizada na prática é a chamada *estratégia dual*, descrita a seguir. Para alternativas, o leitor deverá reportar-se ao capítulo 3 deste texto.

2.9.1.1 ESTRATÉGIA DUAL

Um SIG implementado com a estratégia dual utiliza um SGBD relacional para armazenar os atributos convencionais dos objetos geográficos (na forma de tabelas) e arquivos para guardar as representações geométricas destes objetos. No *modelo relacional*, os dados são organizados na forma de uma *tabela* onde as *linhas* correspondem aos *dados* e as *colunas* correspondem aos *atributos*.

A entrada dos atributos não-espaciais é feita por meio de um SGBD relacional e para cada entidade gráfica inserida no sistema é imposto um identificador único ou *rótulo*, através do qual é feita uma *ligação lógica* com seus respectivos atributos não-espaciais armazenados em tabelas de dados no SGBD, como ilustrado na Figura 2.19.

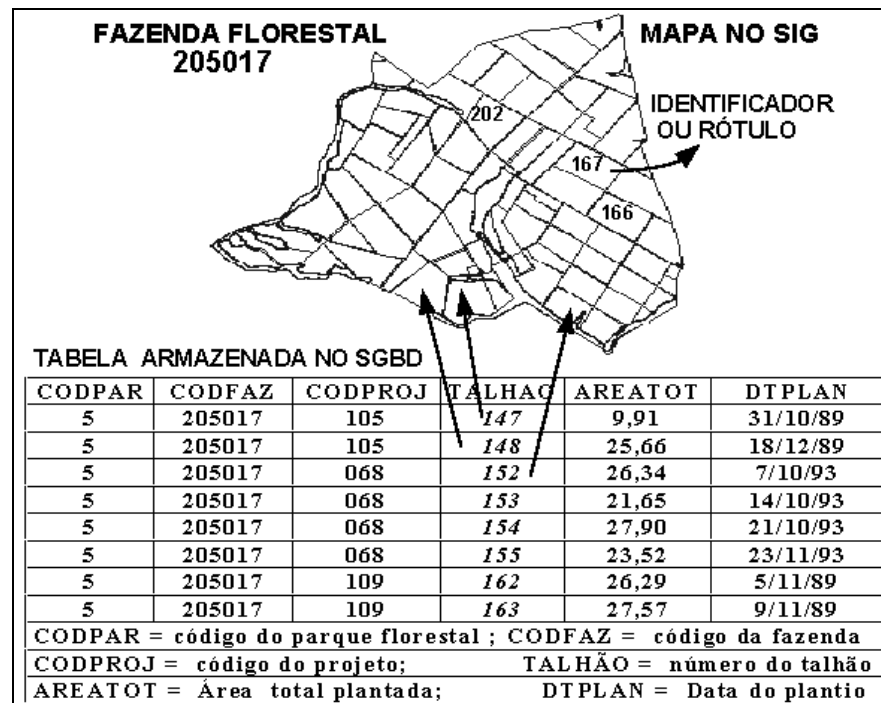


Figura 2.19 - Estratégia dual para bancos de dados geográficos.

A Figura 2.19 exemplifica as ligações lógicas criadas entre os rótulos dos talhões de um mapa florestal e seus atributos correspondentes (registros no “campo” TALHÃO) numa tabela de banco de dados.

O mesmo tipo de relacionamento lógico pode ser feito em outros casos, como por exemplo: moradores em um lote, lotes em uma quadra, quadras em bairro, bairros em uma cidade; hidrantes de segurança ou telefones públicos ao longo de uma avenida; postos de serviço e restaurantes ao longo de uma rodovia.

A principal vantagem desta estratégia é poder utilizar os SGBDs relacionais de mercado. No entanto, como as representações geométricas dos objetos espaciais estão fora do controle do SGBD, esta estrutura dificulta o equacionamento das questões de otimização de consultas, gerência de transações e controle de integridade e de concorrência. Estes problemas só podem ser resolvidos através de implementações sofisticadas das camadas superiores da arquitetura genérica, que operem coordenadamente com o SGBD convencional. Exemplos de sistemas comerciais baseados em estratégia dual são o ARC/INFO (Morehouse, 1992), MGE (Intergraph, 1990) e o SPRING (Câmara et al., 1996).

2.10 UNIVERSO DE IMPLEMENTAÇÃO

Ao se discutir o universo de implementação, serão indicadas quais as estruturas de dados a serem utilizadas para construir um sistema de Geoprocessamento. Neste momento, são tratadas as decisões concretas de programação e que podem admitir número muito grande de variações. Estas decisões podem levar em conta as aplicações às quais o sistema é voltado, a disponibilidade de algoritmos para tratamento de dados geográficos e o desempenho do hardware. Para uma discussão sobre os problemas de implementação de operações geográficas, veja-se Güting et al. (1994).

Um dos aspectos principais a ser levado em conta no universo de implementação é o uso de estruturas de indexação espacial. Os métodos de acesso a dados espaciais compõem-se de *estruturas de dados e algoritmos de pesquisa e recuperação* e representam um componente determinante no desempenho total do sistema. Apanhados gerais da literatura são feitos em Berg (1997) e van Kreveld et al.(1998). Estes métodos operam sobre chaves multidimensionais e dividem-se conforme a representação dos dados associados: pontos (ex: *árvores K-D*), linhas e polígonos (ex: *árvores R e R+*) e imagens (ex: *árvores quaternárias*).

Com relação às estruturas de dados, podemos fazer algumas considerações de ordem prática:

- armazenamento de pontos 3D em árvores K-D (Bentley, 1975) traz um ganho muito significativo para aplicações como a geração de grade regular a partir de um conjunto de amostras esparsas;
- o uso de árvores quaternárias (Samet, 1990) para armazenar imagens em tons de cinza não é eficaz. Para o caso de mapas temáticos, apesar de utilizado em pelo menos um sistema comercial (SPANS), os ganhos não são significativos;
- o uso de árvores-R (Gutman, 1984) é uma forma eficiente de organizar os dados vetoriais, para fins de recuperação e operação (Brinkhoff et al., 1993).

2.11 RESUMO

Para compreender melhor a relação entre os diferentes universos (níveis) do modelo, a Tabela 2.4 contém vários exemplos de entidades do mundo real e suas correspondentes no modelo.

TABELA 2.4

CORRESPONDÊNCIA ENTRE UNIVERSOS DO MODELO

<i>Universo do mundo real</i>	<i>Universo conceitual</i>	<i>Universo de representação</i>	<i>Universo de implementação</i>
Mapa de vegetação	Geo-campo	Matriz de inteiros	Quad-tree
	Temático	Subdivisão Planar	Linhas 2D (com R-Tree)
Mapa altimétrico	Geo-campo Numérico	Grade regular	Matriz 2D
		Grade triangular	Linhas 2D e Nós 3D
		Conjunto Pontos 3D	Pontos 3D (KD-tree)
		Conjunto Isolinhas	Linhas 2D
Lotes urbanos	Geo-objetos	Polígonos e Tabela	Linhas 2D e Nós 2D
Rede elétrica	Rede	Grafo Orientado	Linhas 2D (com R-Tree)

2.12 ORGANIZAÇÃO DE AMBIENTE DE TRABALHO EM SIG

Num SIG, existem duas grandes formas de organização de um ambiente de trabalho:

- organização baseada num *banco de dados geográficos* (“à la dBASE”);
- organização baseada em *projetos* (“à la AutoCAD”).

No primeiro caso, o usuário define inicialmente o esquema conceitual associado às entidades do banco de dados geográficos, indicando para cada tipo de dados seus atributos não-espaciais e as representações geométricas associadas. Procede-se da mesma forma que num banco de dados tradicional (como o dBASE ou o ACCESS), onde a definição da estrutura do banco precede a entrada dos dados. O SPRING e o MGE são exemplos de sistemas organizados como bancos de dados geográficos. No segundo caso, o usuário define inicialmente um referencial geográfico (que delimita uma região de trabalho) e a seguir, define as entidades geográficas que compõem o projeto. O ARC/INFO, SGI e IDRISI são exemplos desta classe de sistemas.

Note-se que um banco de dados geográficos pode ser particionado em projetos, sendo que as definições do esquema conceitual valem para todos os projetos do banco, mesmo que não haja continuidade espacial entre estes projetos.

Um projeto é usualmente composto por um conjunto de *níveis, camadas ou planos de informação (PIs)*, que variam em número, tipos de formatos e de temas, conforme as necessidades de cada tarefa ou estudo. Por exemplo, caso se desejasse fazer um estudo de uso atual do solo e seus impactos sobre o ambiente em uma região, definida em um projeto, seria necessário que este projeto fosse composto de *PIs* com os seguintes temas: 1) rede de drenagem; 2) cidades, rodovias e ferrovias; 3) altimetria; 4) geomorfologia; 5) unidades e associações dos solos; 6) tipologia vegetal; 7) tipos de uso e ocupação das terras. Os *PIs* 1, 2 e 3, quando superpostos, vão formar a cartografia básica da região de estudo ou mapa topográfico, como foi visto no capítulo 2. Os *PIs* restantes são os mapas especiais ou temáticos necessários para atingir o objetivo proposto, isto é, cada *PI* representa uma mesma área mas com informações geográficas diferentes.

Os *PIs* de um projeto podem pertencer a diferentes classes de dados relacionadas com os formatos de representação de dados disponíveis no SIG utilizado.

Esta organização da informação espacial é muito conveniente para permitir que diferentes variáveis sejam integradas ao banco de dados e que diferentes tipos de estudo possam ser realizados, combinando tão somente os fenômenos de interesse.

BIBLIOGRAFIA

- BENTLEY, J. Multidimensional Search Trees Used for Associative Searching. *Communications of the ACM*, 18:509-517, 1975.
- BRINKHOFF, T.; KRIEGEL, H.P.; SEEGER, B. Efficient Processing of Spatial Joins Using R-Trees. In: ACM SIGMOD Conference, Washington, 1993. *Proceedings*, Washington, ACM, pp. 237-246, 1993.
- DE BERG (ed.), *Computational Geometry : Algorithms and Applications*. Berlin, Springer Verlag, 1997.
- CÂMARA, G. *Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos*. Tese de Doutorado em Computação Aplicada. São José dos Campos, INPE, Dezembro 1995. (disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/teses/gilberto>>).
- CÂMARA, G.; FREITAS, U.M.; SOUZA, R.C.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS by Object-Oriented Data Modelling. *Computers and Graphics*, vol. 15, n.6, July 1996.
- GOODCHILD, M. Geographical information science. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6 (2): 35-45, 1992a.
- GOODCHILD, M. Geographical data modeling. *Computers & Geosciences*, 1992, 18(4): 401-408, 1992b.
- GOMES, J.M.; VELHO, L. *Computação Visual: Imagens*. Rio, SBM, 1995.
- GUTING, R.H. An Introduction to Spatial Database Systems. *VLDB Journal*, 3(4), October 1994.
- GUTMAN, A. R-trees: a dynamic index structure for spatial searching. In: ACM SIGMOD CONFERENCE. *Proceedings*, Boston, ACM, pp. 47-57, 1984.
- INTERGRAPH, MGE- *The Modular GIS Environment*, 1990. <<http://www.intergraph.com/gis>>
- VAN KREVELD, M.; ROOS, T.; NIEVERGELT, J. (eds.) *Algorithmic Foundations of Geographic Information Systems (Lecture Notes in Computer Science, 1340)*. Berlin, Springer-Verlag, 1998.
- MOREHOUSE, S. The ARC/INFO Geographical Information System. *Computers & Geosciences*, 18(4): 435-443, 1992.

- NAMIKAWA, L. M. *Um método de ajuste de superfície para grades triangulares considerando linhas características*. (Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil, 1995.
- SAMET, H. *The Design and Analysis of Spatial Data Structures*. Reading, Addison-Wesley, 1990.
- STEVENS, S. *Handbook of Experimental Psychology*. New York, Wiley, 1951.
- WORBOYS, M.F. *GIS: A Computing Perspective*. London, Taylor and Francis, 1995.