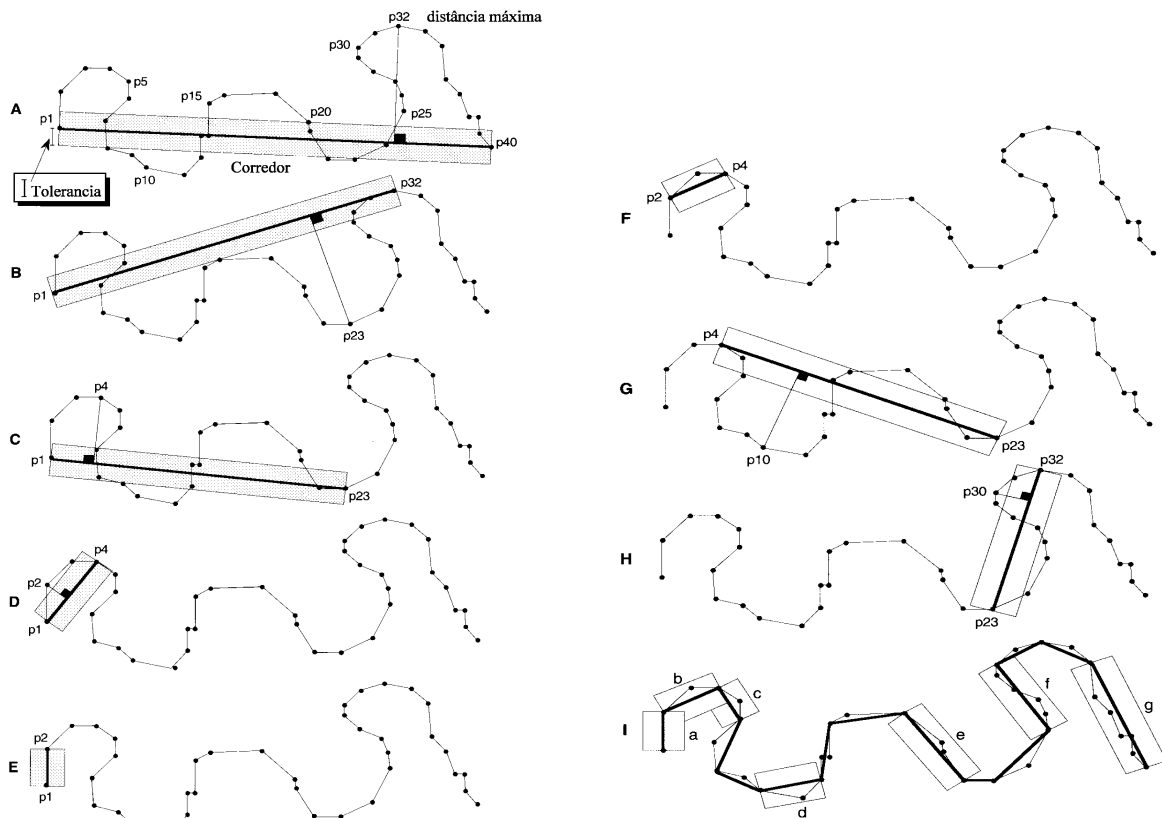


## 4 - Bibliografia

- [1999] D'Alge, J. C. L. Coordenadas geodésicas e sistemas de informação geográfica. GIS Brasil 99, Salvador.
- [1973] Douglas, D. H.; Peucker, T. K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature. The Canadian Cartographer, Vol. 10, No. 2.
- [1992] Li, Z.; Openshaw, S. Algorithms for automated line generalization based on a natural principle of objective generalization. International Journal of Geographical Information Systems, Vol. 6, No. 5.
- [1991] Maguire, D. J.; Goodchild, M. F.; Rhind, D. W. Geographical information systems – principles. Longman, Essex.
- [1992] McMaster, R. B.; Shea, K. S. Generalization in digital cartography. AAG, Washington D. C.
- [1992] Muehrcke, P. C.; Muehrcke, J. O. Map use – reading, analysis, and interpretation. JP Publications, Madison.
- [1989] Santos, M. C. S. R. Manual de fundamentos cartográficos e diretrizes gerais para elaboração de mapas geológicos, geomorfológicos e geotécnicos. IPT, São Paulo.
- [1987] Snyder, J. P. Map projections used by the U. S. Geological Survey. USGS Technical Report n. 1532
- [1990] Tomlin, C. D. Geographic information systems and cartographic modeling. Prentice Hall, Englewood Cliffs.

### Distância Acumulada

O método da distância acumulada é uma adaptação da implementação vetorial do algoritmo de Li-Openshaw que usa como critério o conceito de menor objeto visível. Este método acumula as distâncias a medida em que a linha é percorrida até atingir um certo limiar, removendo todos os pontos acumulados nesse trecho. Trata-se, portanto, de um método bastante simples, mas que, ao contrário dos dois métodos anteriores, não analisa a linha em sua totalidade.



**Figura 13 - Algoritmo de Douglas-Peucker**  
(adaptado de McMaster e Shea, 1992)

### Razão Área/Perímetro

Este método utiliza exatamente o mesmo procedimento de análise global de cada linha empregado no método de Douglas-Peucker. A única diferença consiste na adoção da razão área/perímetro calculada em função da tolerância escolhida pelo usuário. O uso da razão área/perímetro permite que triângulos formados por três pontos consecutivos que tenham um ângulo agudo muito pequeno no segundo ponto possam ser detectados de modo mais eficiente que no método de Douglas-Peucker.

costuma gerar linhas digitais com um número excessivo de pontos. O processo de entrada de dados via scanner, que envolve a geração de uma representação matricial seguida de uma vetorização, também costuma gerar redundância de pontos.

Alguns exemplos de algoritmos para simplificação de linhas são descritos a seguir: o algoritmo original de Douglas-Peucker (Douglas e Peucker, 1973); uma adaptação do algoritmo de Douglas-Peucker que usa o quociente área/perímetro; uma adaptação do algoritmo de suavização de Li-Openshaw (Li e Openshaw, 1992) que acumula as distâncias percorridas sobre cada linha. Convém lembrar que todos eles usam critérios meramente subjetivos, que se traduzem na forma de tolerâncias que são escolhidas pelos usuários. Portanto, aconselha-se fortemente que os usuários avaliem o impacto das diferentes tolerâncias, em cada método, sobre seus dados. Outro aspecto importante diz respeito à topologia. Estes métodos de simplificação atuam sobre as linhas sem preocupação com relações topológicas previamente criadas. Por isso, devem sempre ser sucedidos pelas operações de ajuste de nós e poligonalização.

### Douglas-Peucker

Trata-se do método mais utilizado pelos sistemas de informação geográfica. Concebido inicialmente para resolver o problema do número excessivo de pontos resultantes da conversão de dados gráficos para o formato digital, o método de Douglas-Peucker baseia-se na seguinte idéia: se nenhum ponto da linha encontra-se mais afastado do que uma certa distância vertical ao segmento de reta que liga os extremos da linha, então esse segmento de reta é suficiente para representar a linha. Este método é considerado uma técnica global de generalização, pois analisa cada linha como um todo. A figura 13 ilustra a aplicação do algoritmo de Douglas-Peucker. O primeiro ponto da linha é usado como âncora e o último como ponto flutuante. Este varia até que não haja mais pontos a retirar (A, B, C, D e E). O segundo ponto da linha passa a ser o âncora e o procedimento é reiniciado, continuando até que não haja mais candidatos a âncora (F, G, H e I).

o que se chama de representações múltiplas, onde a preocupação é com a eficiência na extração da informação.

Pode ser simples pensar em generalização por representações múltiplas para a Suíça, país pequeno, com recursos financeiros para manter atualizadas bases de dados em escalas variadas. No caso do Brasil, tanto pela extensão territorial como pela escassez de recursos financeiros, a abordagem da orientação por processos parece ser a única viável para generalização.

Do ponto de vista de desenvolvimento tecnológico em SIG é oportuno projetar ferramentas de visualização que atendam pelo menos a critérios de otimização de exibição dos dados na tela do computador. Em termos de modelagem o papel da generalização é mais analítico que gráfico. Neste contexto são de extrema importância as ferramentas de análise espacial, que fornecem a base teórica necessária ao entendimento de como o fenômeno em estudo varia no espaço. O desafio fica por conta da formalização do conhecimento geográfico.

### **Simplificação de linhas**

Os sistemas de informação geográfica normalmente propiciam aos usuários algumas ferramentas para a generalização cartográfica que se baseiam em transformações espaciais. Elas alteram a representação dos dados em termos da localização geográfica (simplificação, suavização, agregação, exagero e deslocamento) e do significado topológico (classificação e simbolização).

Como a maioria dos objetos utiliza a linha como entidade básica para sua representação, a simplificação de linhas tem sido bastante estudada e é a transformação mais comumente encontrada nos sistemas existentes. Os métodos de simplificação de linhas buscam selecionar e manter os pontos que melhor caracterizam a representação digital de uma linha. Em outras palavras, procura-se rejeitar pontos redundantes, ou seja, aqueles que não contribuem significativamente para a representação digital da linha. Um bom exemplo de redundância é a digitalização via mesa em modo contínuo, que

mapas em papel, o objetivo é fazer a comunicação visual dos dados de forma eficiente.

A generalização pode ser entendida como a seleção e a representação simplificada de objetos através de transformações espaciais e de atributos. Ela afeta diretamente a construção e a derivação de bases de dados. Vista como uma sequência de transformações, a generalização propicia aumento de robustez e otimização computacional. Como já foi mencionado, generalização tem um compromisso forte com eficiência na comunicação visual.

### **Tipos de Generalização**

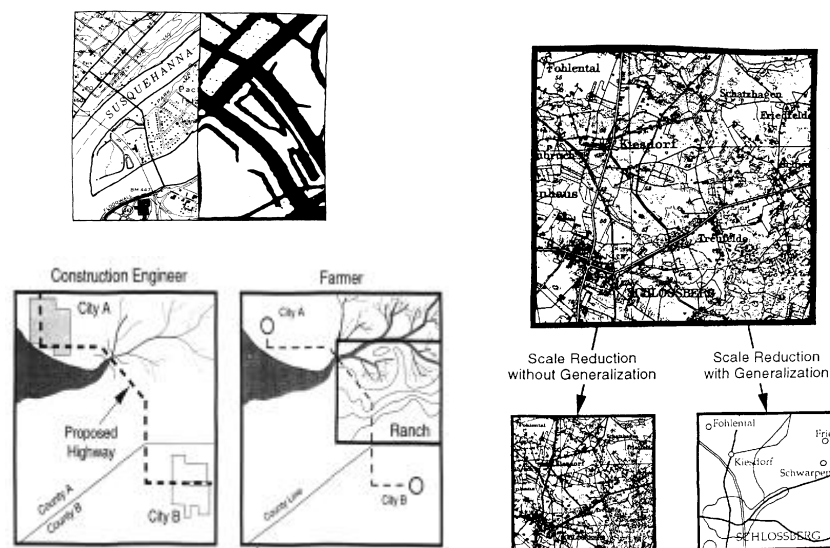
O entendimento de generalização como uma sequência de operações de modelagem permite que se pense em três tipos de generalização. O primeiro é a generalização de objetos, que usualmente ocorre antes da entrada de dados. Ela prevê uma seleção dos objetos que devem compor o conteúdo da base de dados. Outro tipo é a generalização orientada à modelagem, que responde pela simplificação da base de dados, ou seja, pela derivação de uma base de dados menos detalhada. Por último tem-se a generalização cartográfica propriamente dita, que coordena a representação gráfica da base de dados simplificada.

### **Estratégias de generalização**

Existem duas possibilidades básicas de se estabelecer um esquema de trabalho que envolva generalização num SIG. A primeira se baseia numa orientação por processos que prevê a existência de uma única base de dados bem detalhada no SIG. Qualquer base de dados menos detalhada deve ser gerada a partir da base detalhada. O estado da arte atual em SIG, que não expõe de forma explícita a semântica e o contexto dos objetos, dificulta esta abordagem. A segunda estratégia utiliza uma orientação por representações que prevê o armazenamento de todos os níveis de abstração de interesse. É

incorporar também a noção de modelagem, que envolve a derivação de uma base de dados menos complexa para atender a uma certa finalidade. Esta seção dedica-se à discussão do papel da generalização cartográfica no domínio digital.

Generalização pode ser entendida como o processo de universalização do conteúdo de uma base de dados espaciais com uma certa finalidade. Um de seus objetivos deve ser a redução da complexidade, quer seja para fins de visualização, quer seja para armazenar na base de dados apenas aquilo que é necessário. A redução da complexidade deve levar em conta uma certa lógica que não comprometa a exatidão de posicionamento e a exatidão de atributos dos dados (veja a seção 2.5 em caso de dúvidas). Algumas das motivações da generalização são ilustradas na figura 12.



**Figura 12 – Motivações da generalização**  
(fonte: McMaster e Shea, 1992)

No domínio digital a resolução espacial da base de dados parece ser uma dimensão mais relevante que a escala, de modo que a resolução espacial é, tal e qual a escala o é no domínio analógico, um dos elementos de controle para a generalização. Pode-se dizer que a modelagem em níveis de abstração diferentes depende da resolução espacial. Na verdade, a escala também se torna um elemento de controle quando há preocupação com visualização dos dados digitais na tela do computador. Neste caso, exatamente como nos

(linha, coluna) são lidas para cada ponto de controle na imagem. As coordenadas de referência são usualmente obtidas através de mapas confiáveis que contenham as feições usadas como pontos de controle. Os vários sistemas disponíveis também aceitam medições feitas diretamente no terreno (GPS), dados vetoriais existentes e imagens geo-referenciadas como fontes de extração de coordenadas de referência.

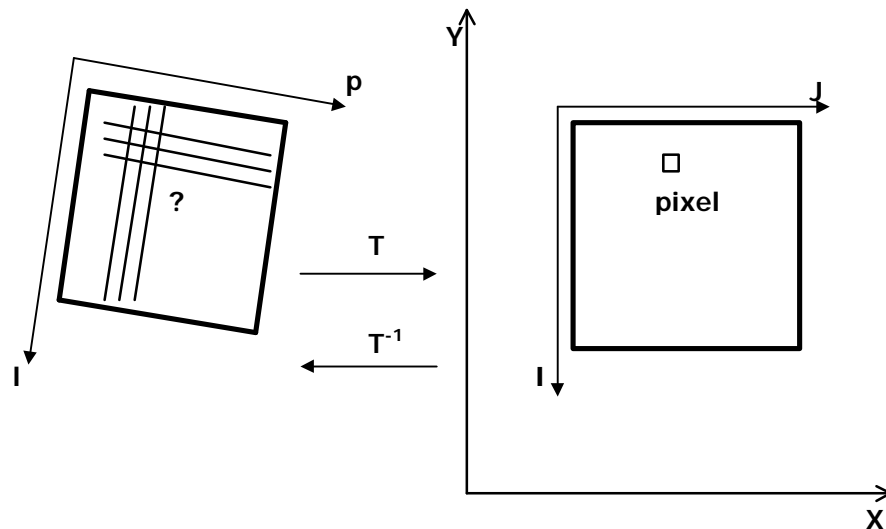
Uma vez determinados os  $n$  pontos de controle e selecionada a transformação polinomial, um sistema de  $2n$  equações é montado para resolver 6 ou 12 parâmetros, dependendo do polinômio ser de 1º ou 2º grau. Assim, conclui-se que o número mínimo de pontos de controle é 3 para o polinômio de 1º grau e 6 para o polinômio de 2º grau. O número mínimo de pontos de controle representa a situação de um sistema de equações determinado, no qual o número de equações coincide com o número de incógnitas a calcular. Entretanto, como as coordenadas medidas dos pontos de controle estão sujeitas a erros, convém usar um número de pontos maior que o mínimo. Nesse caso, trabalha-se com um sistema de equações sobre-determinado, que tem mais equações que incógnitas e permite tratar e distribuir os erros de medição dos pontos de controle. Em termos práticos aconselha-se o uso de 6 pontos de controle para o polinômio de 1º grau e 10 pontos de controle para o polinômio de 2º grau. Deve-se ter em mente também que a distribuição dos pontos de controle na área a ser registrada é de suma importância, pois as transformações polinomiais tendem a se comportar adequadamente apenas na região onde se encontram os pontos de controle.

### **3.4 – Generalização Cartográfica**

No domínio convencional da Cartografia generalização é um processo dependente da escala que inclui seleção, simplificação e síntese dos objetos que devem compor um certo mapa. É um processo claramente voltado à visualização ou à comunicação eficiente daquilo que está representado num mapa. Como regra geral, a complexidade deve diminuir com a escala do mapa. Com o advento da tecnologia de SIG, generalização passou a



terceiro grau sobre os dezesseis pixels que cercam o resultado do mapeamento inverso, quatro ao longo das linhas e a quinta na direção das colunas.



**Figura 11 - Relação entre os mapeamentos direto e inverso**

### Registro de Imagens

O uso de transformações polinomiais do 1º e 2º graus é bastante comum no registro de imagens. As transformações polinomiais fazem o vínculo entre as coordenadas de imagem e as coordenadas no sistema de referência (geográficas ou de projeção) através de pontos de controle. Pontos de controle são feições passíveis de identificação na imagem e no terreno, ou seja, são feições homólogas cujas coordenadas são conhecidas na imagem e no sistema de referência. Cruzamentos de estradas, pistas de aeroportos e confluências de rios são candidatos naturais a pontos de controle.

A determinação dos parâmetros da transformação polinomial selecionada é feita através da resolução de um sistema de equações. Para que esse sistema de equações possa ser elaborado as coordenadas dos pontos de controle devem ser conhecidas tanto na imagem de ajuste (imagem a ser registrada) como no sistema de referência. As coordenadas de imagem

referência da base de dados. É o modelo disponível em quase todos os sistemas para o registro de imagens. Como se trata de um modelo que não usa informações inerentes à aquisição da imagem e nem faz distinção sobre o nível de correção geométrica da imagem, muitos autores não o consideram um modelo de correção geométrica e preferem referir-se a ele como um modelo de registro. O desempenho deste modelo depende de uma boa distribuição de pontos de controle, da precisão das coordenadas dos pontos de controle e, o mais importante, da adequação da função polinomial escolhida ao que se pretende modelar. Convém lembrar daquilo que foi discutido sobre transformações geométricas na seção 2.4.

### Mapeamento Inverso

Se o mapeamento direto é executado pela transformação geométrica  $T$ , o mapeamento inverso fica definido pela transformação  $T^{-1}$ . A figura 11 ilustra essa relação entre os mapeamentos direto e inverso. O mapeamento inverso se faz necessário porque o mapeamento direto apenas define a geometria e o espaço geográfico da imagem corrigida. Os níveis de cinza que comporão a imagem corrigida residem na imagem de entrada. Baseado fortemente na idéia de otimização computacional, o mapeamento inverso permite recuperar os níveis de cinza que definirão o valor a ser associado a uma certa posição na imagem corrigida. É um procedimento imprescindível para a realização da reamostragem, descrita a seguir.

### Reamostragem (Interpolação)

A reamostragem é a última etapa do processo de correção geométrica. Ela usa a informação sobre níveis de cinza conseguida pelo mapeamento inverso e realiza uma interpolação para definir os valores de nível de cinza que comporão a imagem corrigida. Os métodos mais tradicionais de reamostragem são: vizinho mais próximo, que usa o nível de cinza mais próximo ao resultado do mapeamento inverso; bilinear, que usa três interpolações lineares sobre os quatro pixels que cercam o resultado do mapeamento inverso, duas ao longo das linhas e uma na direção das colunas; convolução cúbica, que usa cinco interpolações polinomiais do

grandes desvantagens na aplicação deste modelo. Em primeiro lugar, conforme o exemplo mencionado sobre a superposição de duas varreduras consecutivas, há correlações entre as fontes de distorção, de modo que seus efeitos nem sempre são separáveis. Assim, o resultado da correção geométrica não é muito bom. Além disso, como tudo se passa no sistema de referência da imagem, não se consegue estabelecer uma relação com as coordenadas geográficas sem que haja um procedimento externo. O modelo de correções independentes foi muito usado em imagens MSS dos três primeiros satélites da série Landsat.

#### b) Modelo fotogramétrico

O modelo fotogramétrico inspira-se no uso das equações de colinearidade aplicadas em fototriangulação. Com base nos dados de efemérides descobre-se a posição do satélite no instante de aquisição de um dado pixel. Com as informações da atitude e dos parâmetros do sistema de imageamento, define-se a direção de visada para aquele instante. Tem-se, então, um ponto e uma direção no espaço, os quais definem uma reta. Calcula-se a interseção dessa reta com a figura matemática da Terra, no caso um elipsóide de referência. Como resultado, chega-se aos valores de latitude e longitude associados ao instante de aquisição de um certo pixel, estabelecendo-se, assim, a relação entre o sistema de referência da imagem e as coordenadas geográficas. O modelo fotogramétrico não faz hipóteses sobre a independência das diversas fontes de erro e permite o cálculo das coordenadas geográficas sem que haja necessidade de um procedimento externo. Deste modo, o referenciamento da imagem a um sistema de projeção cartográfica pode ser feito sem grandes dificuldades. O modelo fotogramétrico tem sido usado para quase todas as imagens geradas pelos sensores dos satélites Landsat e Spot.

#### c) Modelo polinomial (registro de imagens)

O modelo polinomial consiste em uma função polinomial cujos parâmetros são determinados a partir das coordenadas de pontos de controle identificados tanto no sistema de referência da imagem como no sistema de

com que um pixel na borda da imagem corresponda a uma extensão mais que quatro vezes maior que a do pixel no nadir.

Outro efeito que se origina por questões de movimento relativo é o chamado arrastamento da imagem durante uma varredura. Ele afeta apenas os sensores que operam por varreduras mecânicas, pois o satélite move-se ao longo de sua órbita durante o tempo decorrido para a execução de uma varredura. Trata-se do efeito zigue-zague, comum nas imagens MSS. O sensor TM já possui um dispositivo que compensa esse efeito fazendo com que o espelho do sensor “olhe” para trás durante o movimento de varredura, compensando o movimento do satélite ao longo da sua órbita. O sensor HRV, que opera por varreduras eletrônicas, não sofre este efeito.

Somam-se a esses efeitos aqueles oriundos de variações de efemérides do satélite (posição e velocidade) e de atitude da plataforma (roll, pitch, yaw). É importante ter em mente que nem sempre é possível separar todos esses efeitos. Uma superposição entre varreduras sucessivas, por exemplo, pode ser causada por uma variação de velocidade do satélite, mas pode também ser explicada por uma variação de pitch (giro em torno de um eixo perpendicular à órbita do satélite).

### Transformação geométrica (mapeamento direto)

A transformação geométrica ou mapeamento direto pode ser executada através de três modelos matemáticos distintos: o modelo de correções independentes, o modelo fotogramétrico e o modelo polinomial. Apresenta-se a seguir uma descrição sucinta de cada modelo, enfatizando-se vantagens, desvantagens e aplicabilidade.

#### a) Modelo de correções independentes

O modelo de correções independentes, como o próprio nome sugere, trata de forma independente as diversas distorções sistemáticas. Tudo é feito no sistema de referência da imagem, onde os pixels são reposicionados de acordo com a modelagem de cada efeito visto de modo isolado. Há duas

retorne à imagem original para que se definam os níveis de cinza que comporão a imagem corrigida. Esta definição de níveis de cinza ocorre na última etapa, chamada de reamostragem, que nada mais é que uma interpolação sobre os níveis de cinza da imagem original.

#### Fontes de distorção geométrica

A discussão das fontes de erro se atém às imagens orbitais dos sensores MSS (Landsat), TM (Landsat), HRV (Spot) e AVHRR (Noaa). Um dos efeitos principais é causado pela rotação da Terra (skew), ou seja, pelo movimento relativo entre a Terra e o satélite. Na medida em que o satélite desloca-se para o sul, a Terra gira de oeste para leste, fazendo com que seja necessário compensar o posicionamento das varreduras, que devem ser deslocadas para oeste. Por isso as imagens corrigidas apresentam aquele aspecto de paralelogramo. No caso do sensor TM, Landsat-5, a compensação deste erro corresponde a um deslocamento de cerca de um pixel por varredura.

Outro efeito importante são as chamadas distorções panorâmicas, que afetam, principalmente, os sensores que trabalham com um campo de visada amplo, como é o caso do AVHRR. A distorção panorâmica é originada pela variação da inclinação do IFOV (instantaneous field of view) dentro do campo de visada. Como o IFOV corresponde a um ângulo fixo, ele cobre dimensões diferentes no terreno em função da inclinação. Isto faz com que a dimensão coberta no terreno no nadir seja menor que aquela coberta nas bordas da imagem. Por isso diz-se que a distorção panorâmica causa compressão de dados nas regiões distantes do nadir. Este efeito faz com que um pixel na borda das imagens AVHRR corresponda a uma extensão quase três vezes maior que a do pixel no nadir.

A curvatura da Terra gera um efeito análogo ao anterior. Na verdade, ela acentua o efeito da distorção panorâmica, fazendo com que haja uma compressão de dados maior nas bordas da imagem. Por isso deve ser tratada como parte integrante da distorção panorâmica. Nas imagens AVHRR a curvatura da Terra, associada à distorção panorâmica propriamente dita, faz

## **Correção Geométrica de Imagens**

A primeira razão para a realização da correção geométrica de imagens é a existência de distorções geométricas sistemáticas introduzidas durante a aquisição das imagens. Portanto, a correção geométrica trata, prioritariamente, da remoção dos erros sistemáticos presentes nas imagens. Outro aspecto importante são os estudos multi-temporais tão comuns à área de Sensoriamento Remoto. Eles requerem que uma imagem seja registrada com a outra para que se possa interpretar a resposta de ambas para uma certa posição no espaço. Na verdade, a motivação mais contemporânea para a correção geométrica de imagens é a integração com mapas e outras fontes de informação. Sensoriamento Remoto, por si só, já não faz tanto sentido. Há muito tempo os agrônomos deixaram de se preocupar apenas em separar uma cultura de outra numa imagem e passaram a pensar em produtividade agrícola, que também depende do tipo de solo (mapa de solos), do teor de certos nutrientes no solo (medição de amostras) e da declividade (carta topográfica).

Alguns requerimentos são fundamentais para que se trabalhe bem com correção geométrica de imagens. Em primeiro lugar, para que se possa pensar em correção geométrica, há que se conhecer os erros que interferem no processo de formação das imagens. A escolha do modelo matemático mais adequado ao tratamento de cada caso depende fortemente desse conhecimento. Além disso, um SIG deve sempre propiciar ferramentas para que o resultado de uma correção geométrica possa ser avaliado e, conseqüentemente, validado.

De uma maneira geral, o processo de correção geométrica de imagens compreende três grandes etapas. Começa-se com uma transformação geométrica, também denominada mapeamento direto, que estabelece uma relação entre coordenadas de imagem (linha e coluna) e coordenadas geográficas (latitude e longitude). É a etapa em que se eliminam as distorções existentes e se define o espaço geográfico a ser ocupado pela imagem corrigida. Em seguida faz-se o mapeamento inverso, que inverte a transformação geométrica usada no mapeamento direto, permitindo que se

diferenças na representação digital resultante. Desse modo, pequenos polígonos, chamados polígonos espúrios, são gerados pela interseção de linhas que representam as mesmas feições mas que têm representações digitais levemente discrepantes. Apesar de existirem ferramentas para detecção desses pequenos polígonos – que tendem a ser afilados e ter área pequena – este problema é de difícil solução automática num SIG.

O melhor procedimento por parte do usuário é analisar seus dados antes de colocá-los no universo digital. Num exemplo que integra um mapa de solos com um de vegetação numa área de estudo no litoral, a linha de costa está representada nos dois mapas. O usuário deve escolher a melhor representação (mais recente, mais exata) e digitalizar a linha de costa que está presente somente em um dos mapas, copiando-a para o plano de informação do outro mapa.

### **3.3 - Integração com Sensoriamento Remoto**

Esta parte do documento dá uma atenção especial à integração entre Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Por motivos óbvios, como a alta frequência de recobrimento e o baixo custo operacional, o Sensoriamento Remoto representa uma fonte única de informação atualizada para um SIG. Além disso, a união da tecnologia e dos conceitos e teorias de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento possibilita a criação de sistemas de informação mais ricos e sofisticados.

De uma forma mais pragmática, a integração entre Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento depende da inserção das imagens aéreas ou de satélite na base de dados do SIG. Para isso entram em cena os procedimentos de correção geométrica de imagens, as vezes chamados de geo-referenciamento ou geocodificação, outras vezes excessivamente simplificados e reduzidos ao registro de imagens.

Acabou de descobrir que sua área de estudo requer 4 cartas topográficas para ser totalmente coberta? Ou que vai necessitar de 2 imagens de satélite para fazer a atualização do uso do solo? Ou ainda que certas informações municipais devem ser agregadas para integrar um contexto estadual? Estes são problemas típicos de cobertura dos dados. Trata-se de diferentes particionamentos do espaço geográfico e das consequências que isso traz para o usuário de SIG. Um SIG deve ser capaz de gerenciar os mais diversos particionamentos do espaço geográfico sem que haja limitações para as operações de entrada, combinação e análise dos dados.

O projeto de monitoramento do desflorestamento na Amazônia brasileira, de responsabilidade do INPE, é um bom exemplo da questão de cobertura dos dados. A área da Amazônia foi dividida de acordo com as folhas 1:250.000 das cartas topográficas, sendo que cada folha de 1° por 1,5° define um projeto no SIG. A informação atualizada do desflorestamento é extraída de imagens TM-Landsat e inserida nos projetos definidos pelas cartas topográficas. Posteriormente parte dos dados é organizada por município e há também uma agregação feita por estado.

Outro grupo de problemas ligados à integração de dados relaciona-se a certos erros que costumam aparecer nos dados que são combinados ou integrados. Há inicialmente uma questão básica que se refere ao ajuste de linhas que são copiadas ou mosaicadas de um plano de informação para outro. Sempre que esta operação ocorrer o usuário é obrigado a aplicar a função de ajuste de linhas de modo a garantir consistência topológica.

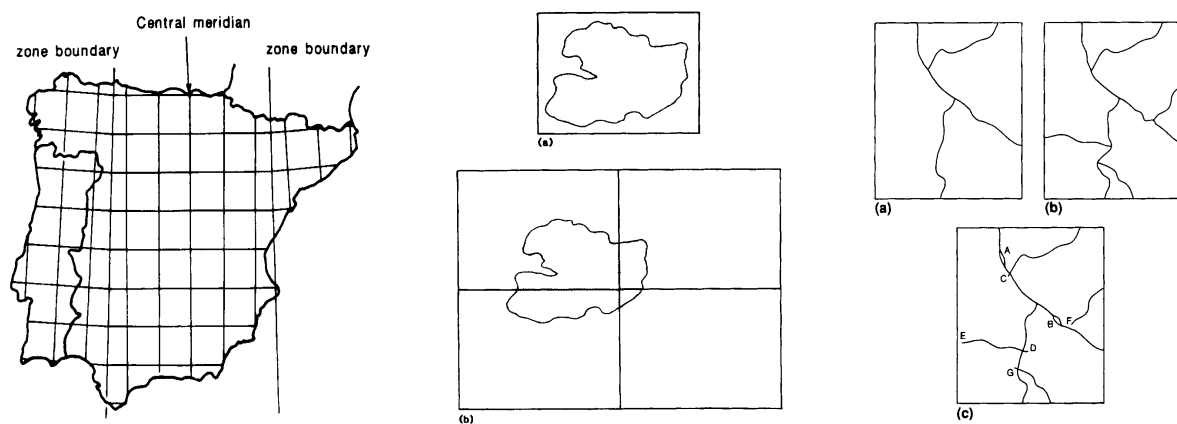
Uma questão mais preocupante, que nem sempre vem acompanhada de soluções possíveis, é a geração de polígonos espúrios. Este efeito pode ocorrer sempre que se faz uma combinação ou cruzamento de dados entre dois ou mais planos de informação que contêm linhas que representam a mesma feição geográfica. O problema é que essa linha pode não ter a mesma representação nos planos de informação envolvidos por um dos dois motivos: as linhas já não tinham a mesma representação nos mapas originais ou tinham a mesma representação mas a digitalização cuidou de introduzir



é igualmente importante o conhecimento que o usuário deve ter com relação ao sistema de referência de seus dados.

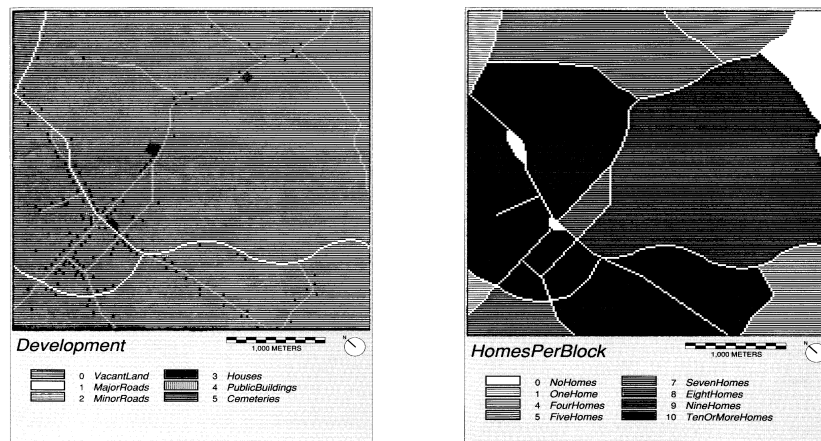
Determinadas projeções cartográficas requerem um certo cuidado na construção e manutenção da base de dados. O caso mais típico é o problema das zonas ou fusos da projeção UTM. Cada zona UTM tem seu próprio sistema de coordenadas planas, de modo que mapas separados por uma borda de zona não se articulam em termos de coordenadas planas. Nestes casos críticos há dois procedimentos. Os mais conservadores podem dividir o projeto em dois ou mais projetos UTM, um para cada zona. Os resultados das análises em cada projeto podem ser remapeados para outra projeção cartográfica mais conveniente para elaboração do mapa final. Outra possibilidade é estender a principal zona UTM a toda a região do projeto. Isto requer cuidado cartográfico com respeito às deformações que podem ser introduzidas e exige do SIG as funcionalidades adequadas ao tratamento de extensões de zonas UTM.

Problema semelhante também ocorre com a projeção cônica conforme de Lambert das cartas ao milionésimo, pois cada faixa de 4 graus de latitude tem seu próprio sistema de coordenadas planas, já que a origem é sempre definida pelo paralelo superior da carta. A figura 10 ilustra o problema da projeção UTM para o caso da Península Ibérica. Mostra, ainda, exemplos de dois outros problemas que serão discutidos nos próximos parágrafos: a cobertura dos dados e a geração de polígonos espúrios.



**Figura 10 – Problemas típicos de integração de dados**  
(fonte: Maguire, Goodchild e Rhind, 1991)

O último grupo de operações inclui aquelas que definem o novo valor para uma posição como uma função dos valores associados a uma zona ou região que contém a posição. São as chamadas operações zonais, como a soma zonal, que é mostrada na figura 9 para um caso de agregação do número de casas por subregião.



**Figura 9 - Operação zonal (soma seguida de reclassificação)**  
(fonte: Tomlin, 1990)

### 3.2 - Integração de Dados

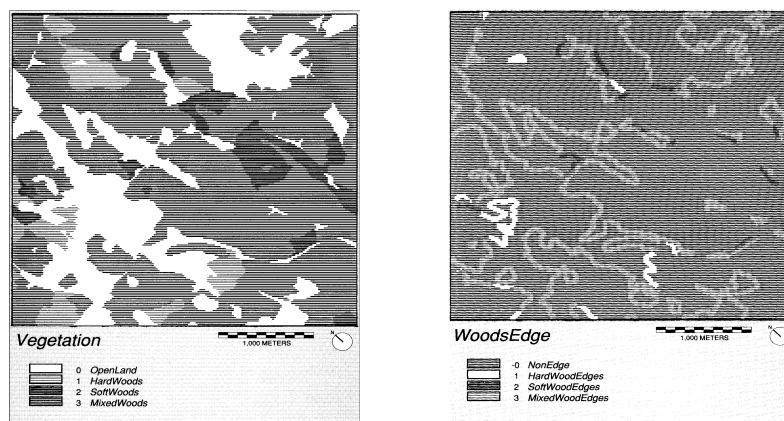
A integração de dados de diferentes fontes, gerados pelos mais diversos procedimentos, com o objetivo de compor a base de dados de um certo projeto, traz consigo algumas preocupações constantes para usuários de SIG. A integração de dados num SIG também requer procedimentos que dependem da existência de uma série de funcionalidades que devem estar presentes num SIG.

Uma questão básica já foi discutida nas seções 2.1 e 2.3. Em última instância um SIG guarda as coordenadas planas ou de projeção dos objetos que formam a base de dados. É importante que a informação a respeito dos parâmetros da projeção cartográfica e do datum planimétrico seja armazenada de forma explícita e usada corretamente quando necessário. Mas

A modelagem cartográfica transforma os dados através de operações que se baseiam na caracterização de posições individuais, de posições com respeito a uma certa vizinhança ou de posições que se relacionam a zonas ou regiões.

As operações que se baseiam em posições individuais podem gerar novos valores em função dos valores existentes num único plano de informação ou em dois ou mais planos de informação. Seguem alguns exemplos de operações baseadas em valores de um único plano de informação: reclassificação, máximos e mínimos locais, produtos ou quocientes locais e operações trigonométricas locais. Algumas operações envolvem dois ou mais planos de informação: combinação local, maioria ou minoria local, diferença local e média local.

As operações que levam em conta uma vizinhança em torno da posição de interesse têm mais sentido geográfico que as anteriores, pois calculam o novo valor para uma posição como uma função da sua vizinhança. As operações deste tipo correspondem às operações de convolução e filtragem, típicas da área de processamento de imagens. Algumas operações por vizinhança são: reclassificação e combinação, máximos e mínimos, área incremental e volume incremental. A figura 8 ilustra uma operação por vizinhança – reclassificação – que criou um plano de informação mostrando as bordas onde terras desocupadas e certos tipos de vegetação são exclusivamente adjacentes um ao outro.



**Figura 8 - Operação por vizinhança (reclassificação)**  
(fonte: Tomlin, 1990)

## **3 - Aspectos Funcionais e de Apresentação**

Esta parte do documento discute funcionalidades e ferramentas de integração e apresentação da dados que hoje compõem diversos módulos de SIG, mas que representam aspectos semelhantes no domínio da Cartografia. A Cartografia, ao mesmo tempo que influi, também se beneficia do uso da tecnologia de SIG.

### **3.1 - Modelagem Cartográfica**

Modelagem Cartográfica é uma metodologia bem definida que usa a tecnologia de SIG para apresentar soluções claras e consistentes em várias aplicações. Compreende modelos e representações cartográficas (mapas). Preocupa-se principalmente com o uso e não com o armazenamento e a disponibilização dos dados. É uma abordagem que busca decompor tarefas de processamento em componentes elementares, numa tentativa de generalizar, facilitar e padronizar o uso de SIG (veja Tomlin, 1990).

A estrutura básica para a modelagem cartográfica são as camadas ou os planos de informação, que são mapas que exibem uma característica específica da área de estudo. Um plano de informação pode conter informação sobre a declividade do terreno. Outros podem apresentar o tipo de vegetação, os lotes da área urbana de um município ou a qualidade da água das represas que abastecem uma cidade. Cada plano de informação possui um nome que o identifica, uma resolução espacial que reflete um padrão de observação espacial, uma orientação que amarra o sistema de referência do plano de informação ao norte geográfico e zonas ou regiões definidas pelo conjunto de dados que pertencem às classes temáticas do plano de informação. Cada zona, por sua vez, é descrita por um rótulo, um valor e pelas posições ocupadas em relação ao sistema de referência do plano de informação.

## 2.5 - Conhecimento da Incerteza

Um último aspecto a ser explorado na relação interdisciplinar entre Cartografia e Geoprocessamento diz respeito à incerteza. Tudo o que se mede ou se modela está sujeito a erros e esses erros respondem pela qualidade de um mapa ou da base de dados num SIG. A questão não é a busca da perfeição mas sim o conhecimento da incerteza.

O componente de erro mais explorado é a incerteza quanto à localização. A exatidão de posicionamento é dada pelo erro na posição ou na localização, com relação ao sistema de referência da base de dados, de pontos bem definidos. O usuário de SIG deve se preocupar, por exemplo, com o erro na medição das coordenadas dos pontos de controle com GPS ou então com o erro planimétrico associado à escala dos mapas.

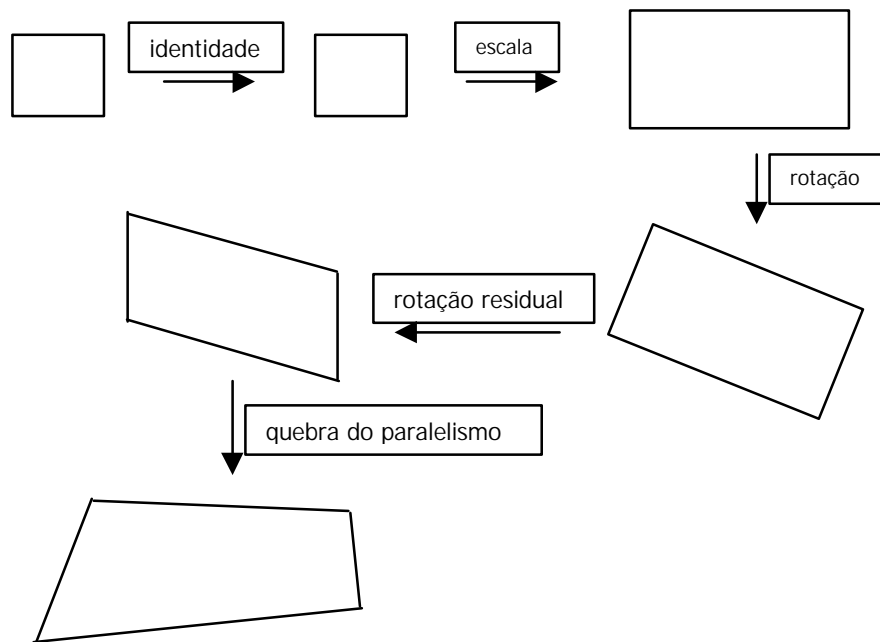
Outro componente de erro muito importante é a incerteza na atribuição de valores ou classes aos objetos que compõem a base de dados. A exatidão de atributos reflete a correção com que os atributos são associados aos objetos. No caso de variáveis representadas por campos numéricos, como o relevo, o erro é expresso por um valor numérico, um número real. Pode-se dizer que a altitude de um ponto tem um erro de 20m. Já para variáveis representadas por campos temáticos, como o solo, o erro reduz-se ao que é certo ou errado. Um polígono classificado como floresta ombrófila densa está errado porque está na área de floresta ombrófila aberta.

A base de dados de um SIG deve ser logicamente consistente e completa. A preocupação do usuário agora é quanto à omissão de linhas e à falta de rotulação de polígonos. É o caso de um trecho importante da BR-116, na região de Juazeiro (BA) e Petrolina (PE), que não foi digitalizado num mapa rodoviário. Pode-se também pensar no caso de um mapa de recursos hídricos do nordeste em que o polígono que descreve o açude do Orós (CE) não foi rotulado com a classe *açude*. A questão final é “será que a base de dados contém o que deveria conter?”

Uma transformação afim ortogonal executa dois fatores de escala, cada um ao longo da direção de um dos eixos de um sistema de coordenadas planas, uma rotação e duas translações (5 parâmetros). Aplicada a um quadrado, gera, numa outra posição do plano, um retângulo que pode estar rotacionado em relação a sua posição inicial. É uma transformação útil quando se deseja investigar deformações de escala ao longo de direções perpendiculares. Apesar de não ser muito comum, pode ser usada como função de calibração na entrada de dados via mesa digitalizadora. A determinação de seus 5 parâmetros requer um número mínimo de 3 pontos de controle.

Uma transformação de afinidade executa dois fatores de escala, uma rotação, duas translações e uma rotação residual, que é responsável pela quebra da ortogonalidade (6 parâmetros). Aplicada a um quadrado, gera, numa outra posição do plano, um paralelogramo que pode estar rotacionado em relação a sua posição inicial. É uma transformação adequada para função de calibração na entrada de dados via mesa digitalizadora e para o registro de dados vetoriais e matriciais a uma base de dados num SIG. Lembra-se aqui que a transformação de afinidade nada mais é que um polinômio do 1º grau. A determinação de seus 6 parâmetros também requer um número mínimo de 3 pontos de controle.

Qualquer transformação geométrica mais complexa (maior número de parâmetros) que uma transformação de afinidade ou um polinômio do 1º grau introduz quebra de paralelismo. Pense, por exemplo, na presença de um termo em  $xy$  acrescentado aos termos já presentes numa transformação de afinidade. Como resultado, o paralelogramo da figura 7 se transforma num trapézio, se o termo em  $xy$  só afetar uma direção, ou num quadrilátero genérico. Transformações polinomiais podem ser úteis para o registro de dados vetoriais e matriciais a uma base de dados num SIG. Entretanto, polinômios de ordem mais elevada devem ser usados com cautela: transformações mais complexas só fazem sentido se houver mais efeitos geométricos a ser modelados do que aqueles descritos nesta seção.



**Figura 7 – Primitivas básicas envolvidas nas transformações geométricas**

Uma transformação ortogonal executa uma rotação e duas translações, cada uma correspondente a um dos eixos de um sistema de coordenadas planas (3 parâmetros). É também conhecida como transformação de corpo rígido. Aplicada a um quadrado de lado  $L$ , gera, numa outra posição do plano, um quadrado de lado  $L$  que pode estar rotacionado em relação a sua posição inicial. Trata-se de uma transformação adequada para avaliações de qualidade geométrica de dados vetoriais. A determinação de seus 3 parâmetros requer um número mínimo de 2 pontos de controle.

Uma transformação de similaridade executa um fator de escala global, uma rotação e duas translações (4 parâmetros). É também conhecida como transformação isogonal. Aplicada a um quadrado de lado  $L_1$ , gera, numa outra posição do plano, um quadrado de lado  $L_2$  que pode estar rotacionado em relação a sua posição inicial. É uma transformação adequada para avaliações de qualidade geométrica de dados vetoriais e matriciais. A determinação de seus 4 parâmetros também requer um número mínimo de 2 pontos de controle.

## **2.4 - Transformações geométricas**

A entrada de dados através de uma mesa digitalizadora impõe uma calibração entre os sistemas de coordenadas do mapa e da mesa digitalizadora. Os usuários de SIG já se acostumaram a ter que clicar com o mouse em quatro pontos do mapa e fornecer as coordenadas geográficas ou de projeção. O SIG calcula os parâmetros de uma transformação de afinidade que guarda a relação entre coordenadas de mesa e coordenadas do mapa.

A integração de imagens de satélite a uma base de dados é tipicamente executada através de funções polinomiais determinadas a partir das coordenadas de pontos de controle identificados nas imagens e no sistema de referência da base de dados.

Estes dois exemplos de processamentos corriqueiros na criação da base de dados de um SIG mostram que é importante conhecer alguns aspectos básicos de transformações geométricas no espaço bidimensional. Em síntese, as seguintes transformações são aqui discutidas: ortogonal (3 parâmetros), similaridade (4 parâmetros), afim ortogonal (5 parâmetros), afinidade (6 parâmetros) e transformações polinomiais (mais de 6 parâmetros).

A figura 7 tem o objetivo de guiar o leitor na descrição de cada transformação geométrica. É importante que se entenda quais efeitos geométricos são modelados por cada transformação. As primitivas básicas aqui apresentadas são translações, fatores de escala e rotações. À exceção de transformações polinomiais mais complexas que a de primeiro grau, as transformações descritas a seguir compõem-se de combinações destas primitivas básicas. Por isso, sempre que possível, deve-se procurar entender a ação global de uma certa transformação através da sua decomposição em translações, fatores de escala e rotações.



<b>Projeção</b>	<b>Classificação</b>	<b>Aplicações</b>	<b>Características</b>
Albers	Cônica Equivalente	Mapeamentos temáticos. Mapeamento de áreas com extensão predominante leste-oeste.	Preserva área. Substitui com vantagens as outras cônicas equivalentes.
Bipolar Oblíqua	Cônica Conforme	Indicada para base cartográfica confiável dos continentes americanos.	Preserva ângulos. Usa dois cones oblíquos.
Cilíndrica Equidistante	Cilíndrica Equidistante	Mapas Mundi. Mapas em escala pequena. Trabalhos computacionais.	Altera área e ângulos.
Gauss-Krüger	Cilíndrica Conforme	Cartas topográficas antigas.	Preserva ângulos. Altera área (distorções inferiores a 0,5%).
Estereográfica Polar	Azimutal Conforme	Mapeamento das regiões polares. Mapeamento de planetas.	Preserva ângulos. Tem distorções de escala.
Lambert	Cônica Conforme	Mapas temáticos. Mapas políticos. Cartas aeronáuticas. Cartas ao milionésimo.	Preserva ângulos.
Mercator	Cilíndrica Conforme	Cartas náuticas. Mapas magnéticos. Mapas Mundi.	Preserva ângulos.
Miller	Cilíndrica	Mapas mundi. Mapas em escalas pequenas.	Altera área e ângulos.
Policônica	Cônica	Mapeamento temático em escalas pequenas.	Altera áreas e ângulos.
UTM	Cilíndrica Conforme	Mapeamento básico em escalas médias e grandes. Cartas topográficas.	Preserva ângulos. Altera área (distorções inferiores a 0,5%).

**Tabela 2 – Principais projeções, sua classificação, suas aplicações e características**

### Projeção UTM - "Universal Transverse Mercator"

O mapeamento sistemático do Brasil, que compreende a elaboração de cartas topográficas, é feito na projeção UTM (1:250.000, 1:100.000, 1:50.000, 1:25.000). Relacionam-se, a seguir, suas principais características:

- a superfície de projeção é um cilindro transversal e a projeção é conforme;
- o meridiano central da região de interesse, o equador e os meridianos situados a  $90^\circ$  do meridiano central são representados por retas;
- os outros meridianos e os paralelos são curvas complexas;
- a escala aumenta com a distância em relação ao meridiano central, tornando-se infinita a  $90^\circ$  do meridiano central;
- como a Terra é dividida em 60 fusos de  $6^\circ$  de longitude, o cilindro transversal adotado como superfície de projeção assume 60 posições diferentes, já que seu eixo mantém-se sempre perpendicular ao meridiano central de cada fuso;
- aplica-se ao meridiano central de cada fuso um fator de redução de escala igual a 0,9996, para minimizar as variações de escala dentro do fuso;
- duas linhas aproximadamente retas, uma a leste e outra a oeste, distantes cerca de  $1^\circ 37'$  do meridiano central, são representadas em verdadeira grandeza.

A tabela 2 ilustra as características principais de algumas das projeções cartográficas mais importantes. Os itens que aparecem na coluna "aplicações" referem-se, principalmente, à situação de uso das projeções aqui no Brasil (veja, por exemplo, Snyder, 1987, para uma consulta abrangente sobre características e algoritmos de todas as projeções cartográficas conhecidas).

Para saber a longitude de origem, o usuário deve localizar a área de interesse na figura e verificar a que fuso ela pertence. O meridiano central corresponderá à longitude de origem. Leme (SP), por exemplo, situada a 22°S e 47°O, encontra-se no fuso que vai de 42°O a 48°O; sua longitude de origem, portanto, é 45°O.

No caso da projeção de Gauss-Krüger, usada em cartas topográficas antigas no Brasil, a longitude de origem equivale aos limites das cartas ao milionésimo. Para verificar estes valores sugere-se o uso da figura apresentada anteriormente.

#### Paralelo (Latitude) de origem

Corresponde a um paralelo de referência escolhido para posicionar o eixo x do sistema de coordenadas planas ou de projeção. A latitude de origem costuma ser o equador para a maior parte das projeções. Nas cartas ao milionésimo, que usam a projeção cônica conforme de Lambert, adota-se sempre o paralelo superior de cada carta como latitude de origem.

#### Escala

É a relação entre as dimensões dos elementos representados em um mapa e aquelas medidas diretamente sobre a superfície da Terra. A escala é uma informação que deve estar presente em qualquer mapa e, em geral, também é apresentada na forma de escala gráfica.

A escala numérica indica no denominador o valor que deve ser usado para multiplicar uma medida feita sobre o mapa e transformá-la num valor correspondente na mesma unidade de medida sobre a superfície terrestre.

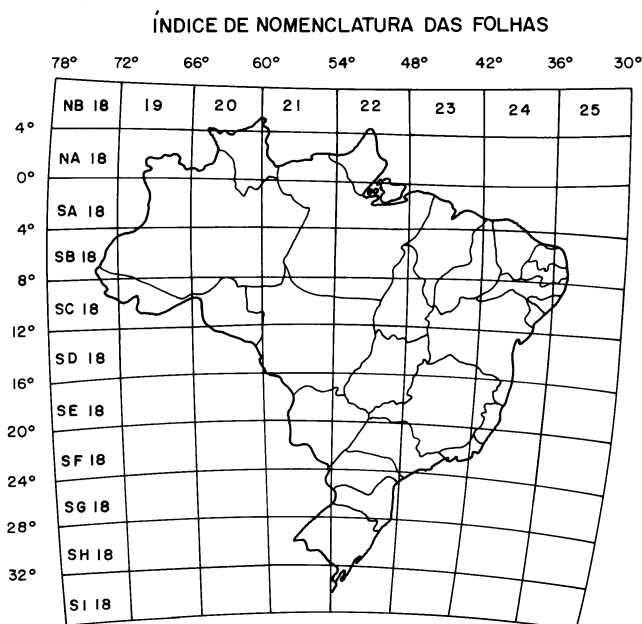
### Paralelo padrão (latitude reduzida)

É o paralelo onde as deformações são nulas, isto é, onde a escala é verdadeira. O paralelo padrão é único quando é definido por um cilindro tangente à Terra, como na projeção Mercator. Se a superfície de projeção for um cone secante à Terra têm-se dois paralelos padrão, como nas projeções cônicas de Albers e de Lambert.

### Meridiano (Longitude) de origem

Trata-se de um meridiano de referência escolhido para posicionar o eixo y do sistema de coordenadas planas ou de projeção. A definição da longitude de origem depende da projeção utilizada pelo usuário.

A longitude de origem para a projeção UTM corresponde ao meridiano central de um fuso ou zona (a cada 6° define-se um fuso), ou seja, o meridiano central de uma carta ao milionésimo. A figura 6 apresenta a distribuição das cartas 1: 1.000.000 no Brasil.



**Figura 6 – Distribuição das cartas ao milionésimo no Brasil**  
(fonte: Santos, 1989)

### Projeções conformes ou isogonais

São as projeções que mantêm os ângulos ou as formas de pequenas feições. Convém lembrar que a manutenção dos ângulos acarreta uma distorção no tamanho dos objetos no mapa. As projeções de Mercator e UTM têm a característica da conformidade. A projeção de Mercator é muito usada em navegação porque representa as linhas de azimuth constante como linhas retas. Entretanto, distorce bastante o tamanho dos objetos situados nas proximidades das regiões polares.

### Projeções equivalentes ou isométricas

São projeções que conservam as áreas. Como consequência, os ângulos sofrem deformações. Muitos consideram que estas são as projeções mais adequadas para uso em SIG. Como exemplos pode-se citar as projeções Cônica de Albers e Azimutal de Lambert.

### Projeções equidistantes

As projeções equidistantes conservam a proporção entre as distâncias, em determinadas direções, na superfície representada. Convém reforçar a idéia de que a equidistância, ao contrário da conformidade ou da equivalência, não é uma característica global de toda a área mapeada. O exemplo mais comum de projeção equidistante é a projeção Cilíndrica Equidistante, chamada de projeção "latlong" pelos usuários de SIG.

### **Parâmetros das projeções**

A transformação entre coordenadas geográficas e coordenadas de projeção é feita através dos algoritmos das projeções cartográficas, que dependem de certos parâmetros que variam de acordo com a projeção em questão. Os parâmetros mais importantes são apresentados a seguir.

## Projeção cilíndrica

Usa-se um cilindro tangente ou secante à superfície da Terra como superfície de projeção. Em seguida, desenvolve-se o cilindro num plano. Em todas as projeções cilíndricas normais (eixo do cilindro coincidente com o eixo de rotação da Terra), os meridianos e os paralelos são representados por retas perpendiculares. A projeção de Mercator, uma das mais antigas e importantes, é um exemplo de projeção cilíndrica.

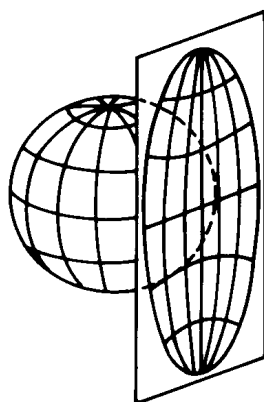
Na figura 5 apresenta-se uma comparação da representação de um quarto de hemisfério segundo diferentes sistemas de projeção.



**Figura 5 – Comparação entre diferentes sistemas de projeção**

(fonte: Santos, 1989)

Como já foi colocado anteriormente é impossível representar a superfície curva da Terra sobre uma superfície plana (ou desenvolvível num plano) sem que haja deformações. Por isso deve-se escolher quais características devem ser conservadas e quais podem ser alteradas. Por exemplo, pode-se pensar numa possível conservação dos ângulos ou numa manutenção de áreas, sempre lavando-se em conta a que se destina o mapa. Quanto ao grau de deformação das superfícies representadas, as projeções podem ser classificadas em conformes ou isogonais, equivalentes ou isométricas e equidistantes.

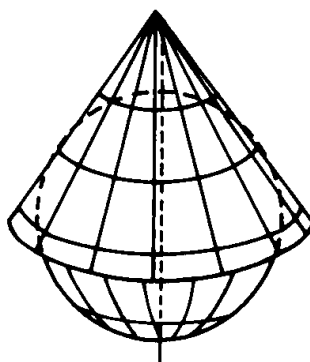


**Figura 3 - Projeção plana ou azimutal**  
(fonte: Santos, 1989)

### Projeção cônica

A superfície de projeção usada é um cone que envolve a Terra e que, em seguida, é desenvolvido num plano. As projeções cônicas podem ser tangentes ou secantes. A figura 4 apresenta um exemplo de projeção cônica.

Em todas as projeções cônicas normais (eixo do cone coincidente com o eixo de rotação da Terra) os meridianos são retas que convergem para um ponto (que representa o vértice do cone) e os paralelos são circunferências concêntricas a esse ponto.



**Figura 4 - Projeção cônica**  
(fonte: Santos, 1989)

A elaboração de uma mapa requer um método que estabeleça uma relação entre os pontos da superfície da Terra e seus correspondentes no plano de projeção do mapa. Para se obter essa correspondência, utilizam-se os sistemas de projeções cartográficas. De um modo genérico, um sistema de projeção fica definido pelas funções  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $g_1$  e  $g_2$  apresentadas a seguir ( $x$  e  $y$  são as coordenadas planas ou de projeção e  $\varphi$  e  $\lambda$  são as coordenadas geográficas):

$$\begin{array}{ll} x = f_1(\varphi, \lambda) & \lambda = g_1(x, y) \\ y = f_2(\varphi, \lambda) & \varphi = g_2(x, y) \end{array}$$

Há um número grande de diferentes projeções cartográficas, uma vez que há vários modos de se projetar os objetos geográficos que caracterizam a superfície terrestre sobre um plano. Consequentemente, é interessante classificá-las de acordo com a superfície de projeção adotada e com as características conservadas.

### **Classificação das projeções**

Os sistemas de projeção cartográfica podem receber a seguinte classificação de acordo com o tipo de superfície de projeção adotada: planas ou azimutais, cilíndricas, cônicas e poliédricas, segundo se represente a superfície curva da Terra sobre um plano, um cilindro, um cone ou um poliedro tangente ou secante à Terra. Seguem algumas descrições a respeito desta classificação.

#### **Projeção plana ou azimutal**

É o tipo mais antigo de projeção. A construção do mapa utiliza uma superfície de projeção plana tangente ou secante a um ponto na superfície da Terra, como na figura 3.



desenvolvimento das projeções cônicas (veja seção 2.3). Trata-se de um sistema simples, de relação direta com o sistema de coordenadas cartesianas, que substitui o uso de um par de coordenadas (x,y) por uma direção e uma distância para posicionar cada ponto no plano de coordenadas. Por isso ele é tão conveniente para o estudo das projeções que se desenvolvem sobre cones. A relação com coordenadas cartesianas é apresentada a seguir ( $\rho$  e  $\theta$  denotam, respectivamente, a distância do ponto à origem e o ângulo formado com o eixo x):

$$\begin{aligned}x &= \rho \cdot \cos \theta & \theta &= \arctg(y/x) \\y &= \rho \cdot \sin \theta & \rho &= (x^2 + y^2)^{1/2}\end{aligned}$$

### **Sistema de coordenadas de imagem (matricial)**

Você verá mais adiante neste documento que a integração de Geoprocessamento com Sensoriamento Remoto depende do processo de inserção de imagens de satélite ou aéreas na base de dados do SIG. O georeferenciamento de imagens pressupõe uma relação estabelecida entre o sistema de coordenadas de imagem e o sistema de referência da base de dados. O sistema de coordenadas de imagem é, tradicionalmente, levógiro, com origem no canto superior esquerdo da imagem e eixos orientados nas direções das colunas e das linhas da imagem. Os valores de colunas e linhas são sempre números inteiros que variam de acordo com a resolução espacial da imagem. A relação com um sistema de coordenadas planas é direta e faz-se através da multiplicação do número de linhas e colunas pela resolução espacial.

## **2.3 - Projeções Cartográficas**

Todos os mapas são representações aproximadas da superfície terrestre. Isto ocorre porque não se pode passar de uma superfície curva para uma superfície plana sem que haja deformações. Por isso os mapas preservam certas características ao mesmo tempo em que alteram outras.

coordenadas muito importante para a transformação entre coordenadas geodésicas (se você ainda não se deu conta de que as coordenadas geodésicas, que você chama de geográficas, variam, leia outra vez a seção 2.1). A transformação de um datum planimétrico a outro é feita a partir das relações matemáticas entre coordenadas geodésicas e coordenadas geocêntricas terrestres, que são descritas a seguir assumindo-se um modelo esférico de raio R para a Terra (X, Y e Z denotam os eixos do sistema geocêntrico terrestre e  $\varphi$  e  $\lambda$  denotam, respectivamente, a latitude e a longitude geodésicas):

$$\begin{aligned}X &= R \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda & \varphi &= \arcsen (Z/R) \\Y &= R \cdot \cos \varphi \cdot \sen \lambda & \lambda &= \arctan (Y/X) \\Z &= R \cdot \sen \varphi\end{aligned}$$

### **Sistema de coordenadas planas ou cartesianas**

O sistema de coordenadas planas, também conhecido por sistema de coordenadas cartesianas, baseia-se na escolha de dois eixos perpendiculares cuja interseção é denominada origem, que é estabelecida como base para a localização de qualquer ponto do plano. Neste sistema de coordenadas um ponto é representado por dois números reais: um correspondente à projeção sobre o eixo x (horizontal) e outro correspondente à projeção sobre o eixo y (vertical).

O sistema de coordenadas planas é naturalmente usado para a representação da superfície terrestre num plano, ou seja, confunde-se com aquilo que se chama em SIG de sistema de coordenadas de projeção, como será visto e discutido na seção 2.3.

### **Sistema de coordenadas polares**

Apesar de não aparecer de forma explícita para o usuário de SIG, o sistema de coordenadas polares merece menção por causa de sua utilização no

## **Sistema de coordenadas geográficas**

É o sistema de coordenadas mais tradicional. Nele, cada ponto da superfície terrestre é localizado na interseção de um meridiano com um paralelo. Num modelo esférico os meridianos são círculos máximos cujos planos contêm o eixo de rotação ou eixo dos pólos. Já num modelo elipsoidal os meridianos são elipses definidas pelas interseções, com o elipsóide, dos planos que contêm o eixo de rotação.

Meridiano de origem (também conhecido como inicial ou fundamental) é aquele que passa pelo antigo observatório britânico de Greenwich, escolhido convencionalmente como a origem ( $0^\circ$ ) das longitudes sobre a superfície terrestre e como base para a contagem dos fusos horários. A leste de Greenwich os meridianos são medidos por valores crescentes até  $+180^\circ$ . A oeste, suas medidas decrescem até o limite de  $-180^\circ$ .

Tanto no modelo esférico como no modelo elipsoidal os paralelos são círculos cujo plano é perpendicular ao eixo dos pólos. O Equador é o paralelo que divide a Terra em dois hemisférios (Norte e Sul) e é considerado como o paralelo de origem ( $0^\circ$ ). Partindo do equador em direção aos pólos tem-se vários planos paralelos ao equador, cujos tamanhos vão diminuindo até que se reduzam a pontos nos pólos Norte ( $+90^\circ$ ) e Sul ( $-90^\circ$ ).

Longitude de um lugar qualquer da superfície terrestre é a distância angular entre o lugar e o meridiano inicial ou de origem, contada sobre um plano paralelo ao equador. Latitude é a distância angular entre o lugar e o plano do Equador, contada sobre o plano do meridiano que passa no lugar.

## **Sistema Geocêntrico Terrestre**

O sistema geocêntrico terrestre é um sistema cartesiano tridimensional com origem no centro da Terra, um eixo coincidente com o eixo de rotação da Terra, outros dois eixos jacentes no plano do equador e eixo primário amarrado ao meridiano de Greenwich. Trata-se de um sistema de

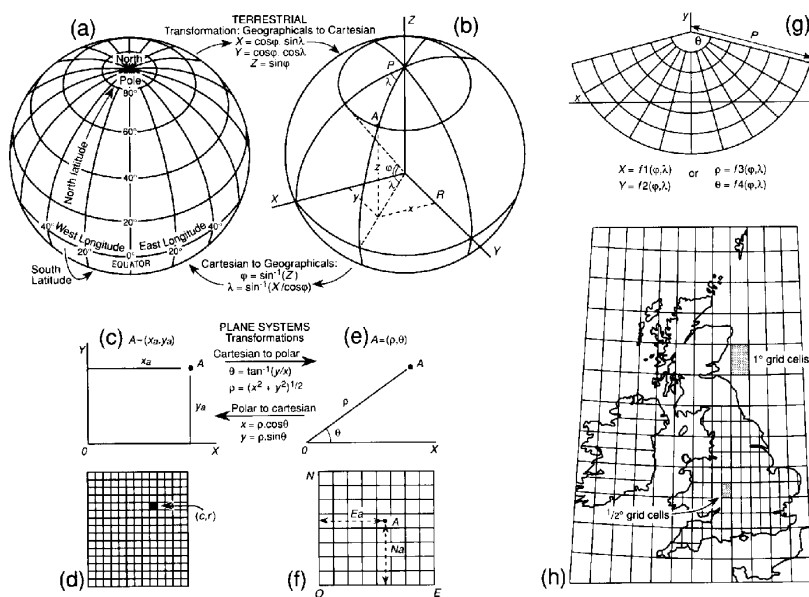
A tabela 1 ilustra os parâmetros dos dois elipsóides empregados como figuras de referência para Córrego Alegre e SAD-69:

Elipsóide	Raio Equatorial R(m)	Raio Polar r(m)	Achatamento (R-r)/R
IAU	6.378.160	6.356.776	1/298,25
Hayford	6.378.388	6.366.991	1/297

**Tabela 1 - Parâmetros dos elipsóides da União Astronômica Internacional e Hayford**

## 2.2 - Sistemas de Coordenadas

O usuário de SIG está acostumado a navegar em seus dados através de ferramentas simples como o apontamento na tela com o cursor e a subsequente exibição das coordenadas geográficas da posição indicada. Por trás da simplicidade aparente dessa ação, há algumas transformações entre diferentes sistemas de coordenadas que garantem a relação entre um ponto na tela do computador e as coordenadas geográficas. A figura 2 mostra alguns dos sistemas de referência mais importantes para Cartografia e SIG.



**Figura 2 - Diferentes sistemas de coordenadas para Cartografia e SIG**  
 (fonte: Maguire, Goodchild e Rhind, 1991)

para definição da referência “zero” e adota-se um dos marégrafos como ponto de referência do datum vertical. No Brasil o ponto de referência para o datum vertical é o marégrafo de Imbituba, em Santa Catarina.

Um dos problemas típicos na criação da base de dados de um SIG aqui no Brasil tem sido a coexistência de dois sistemas geodésicos de referência: Córrego Alegre e SAD-69. Algumas cartas topográficas referem-se à Córrego Alegre, que é o antigo datum planimétrico brasileiro, enquanto outras utilizam como referência o SAD-69, que é o atual datum planimétrico. Os usuários de SIG já estão relativamente acostumados a conviver com escolhas de projeção e seleções de datum sempre que precisam realizar entrada ou importação de dados, mas costumam ignorar que as coordenadas geográficas - na verdade, geodésicas - são definidas sobre a superfície de referência do datum selecionado e que, portanto, variam de datum para datum.

Desfeito o mito da invariabilidade das coordenadas geodésicas, deve-se atentar para a magnitude das variações envolvidas. As diferenças entre Córrego Alegre e SAD-69, por exemplo, traduzem-se em discrepâncias de algumas dezenas de metros sobre a superfície do território brasileiro. Essas discrepâncias são negligenciáveis para projetos que envolvam mapeamentos em escala pequena, mas são absolutamente preponderantes para escalas maiores que 1:250.000 (d’Alge, 1999). É o caso, por exemplo, do monitoramento do desflorestamento na Amazônia brasileira, que usa uma base de dados formada a partir de algumas cartas topográficas na escala 1:250.000 vinculadas ao datum Córrego Alegre e outras vinculadas ao SAD-69.

O antigo datum planimétrico, Córrego Alegre, usa o elipsóide de Hayford, cujas dimensões sempre foram consideradas convenientes para a América do Sul. Atualmente, no entanto, o datum SAD-69 utiliza o elipsóide da União Astronômica Internacional (IAU), homologado em 1967 pela Associação Internacional de Geodésia, quando passou a se chamar elipsóide de Referência 1967.

Neste ponto torna-se oportuno colocar o conceito de datum planimétrico. Começa-se com um certo elipsóide de referência, que é escolhido a partir de critérios geodésicos de adequação ou conformidade à região da superfície terrestre a ser mapeada (veja, por exemplo, Snyder, 1987, para uma lista de elipsóides usados em diferentes países ou regiões). O próximo passo consiste em posicionar o elipsóide em relação à Terra real. Para isto impõe-se inicialmente a restrição de preservação do paralelismo entre o eixo de rotação da Terra real e o do elipsóide. Com esta restrição escolhe-se um ponto central (ou origem) no país ou região e se impõe, desta vez, a anulação do desvio da vertical, que é o ângulo formado entre a vertical do lugar no ponto origem e a normal à superfície do elipsóide. Fica definida então a estrutura básica para o sistema geodésico do país ou região: o datum planimétrico. Trata-se, portanto, de uma superfície de referência elipsoidal posicionada com respeito a uma certa região. Sobre esta superfície realizam-se as medições geodésicas que dão vida à rede geodésica planimétrica da região.

Um datum planimétrico é formalmente definido por cinco parâmetros: o raio equatorial e o achatamento elipsoidais e os componentes de um vetor de translação entre o centro da Terra real e o do elipsóide. Na prática, devido a incertezas na determinação do centro da Terra real, trabalha-se com translações relativas entre diferentes datums planimétricos.

Dado um ponto sobre a superfície do elipsóide de referência de um certo datum planimétrico, a latitude geodésica é o ângulo entre a normal ao elipsóide, no ponto, e o plano do equador. A longitude geodésica é o ângulo entre o meridiano que passa no ponto e o meridiano origem (Greenwich, por convenção). Fala-se aqui da definição do sistema de paralelos e meridianos sobre a superfície elipsoidal do datum (veja seção 2.2).

Outro conceito importante é o de datum vertical ou altimétrico. Trata-se da superfície de referência usada pelo geodesta para definir as altitudes de pontos da superfície terrestre. Na prática a determinação do datum vertical envolve um marégrafo ou uma rede de marégrafos para a medição do nível médio dos mares. Faz-se então um ajustamento das medições realizadas

## **2 - Natureza dos dados espaciais**

A caracterização da localização geográfica é uma das especificidades dos dados espaciais. Há outros fatores importantes inerentes aos dados espaciais, mas a localização é preponderante. Um objeto qualquer (como uma cidade, a foz de um rio ou o pico de uma montanha) somente tem sua localização geográfica estabelecida quando se pode descrevê-lo em relação a outro objeto cuja posição seja previamente conhecida ou quando se determina sua localização em relação a um certo sistema de coordenadas.

O estabelecimento de localizações sobre a superfície terrestre sempre foi um dos objetos de estudo da Geodésia, ciência que se encarrega do estudo da determinação da forma e das dimensões da Terra. A seguir são apresentados alguns conceitos de Geodésia que desempenham um papel de extrema importância na área de Geoprocessamento.

### **2.1 – Conceitos de Geodésia**

A definição de posições sobre a superfície terrestre requer que a Terra possa ser tratada matematicamente. Para o geodesta a melhor aproximação dessa Terra matematicamente tratável é o geóide, que pode ser definido como a superfície equipotencial do campo da gravidade terrestre que mais se aproxima do nível médio dos mares.

A adoção do geóide como superfície matemática de referência esbarra no conhecimento limitado do campo da gravidade terrestre. À medida que este conhecimento aumenta, cartas geoidais existentes são substituídas por novas versões atualizadas. Além disso, o equacionamento matemático do geóide é intrincado, o que o distancia de um uso mais prático. É por tudo isso que a Cartografia vale-se da aproximação mais grosseira aceita pelo geodesta: um elipsóide de revolução. Visto de um ponto situado em seu eixo de rotação, projeta-se como um círculo; visto a partir de uma posição sobre seu plano do equador, projeta-se como uma elipse, que é definida por um raio equatorial ou semi-eixo maior e por um achatamento nos pólos.

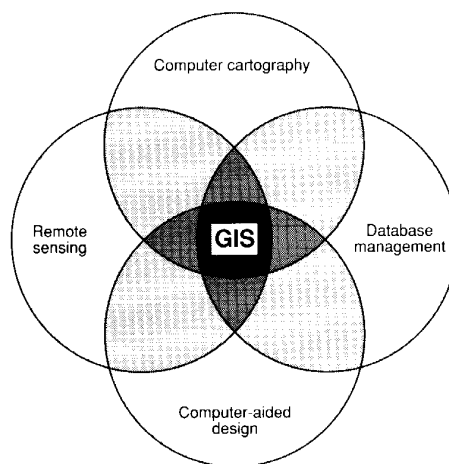
O vínculo entre Cartografia e Geoprocessamento é explorado de forma prática neste documento através de uma apresentação do que há de essencial quanto à natureza dos dados espaciais. Complementa-se o assunto pela exposição de aspectos funcionais e de apresentação presentes em SIG, que coincidem com aqueles oriundos de preocupações eminentemente cartográficas com respeito a dados espaciais.



# 1 – Introdução

A razão principal da relação interdisciplinar forte entre Cartografia e Geoprocessamento é o espaço geográfico. Cartografia preocupa-se em apresentar um modelo de representação de dados para os processos que ocorrem no espaço geográfico. Geoprocessamento representa a área do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais, fornecidas pelos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), para tratar os processos que ocorrem no espaço geográfico, ou seja, a informação geográfica. Isto estabelece de forma clara a relação interdisciplinar entre Cartografia e Geoprocessamento.

Uma razão histórica, que reforça o vínculo que aqui se discute, é a precedência das iniciativas de automação da produção cartográfica em relação aos esforços iniciais de concepção e construção das ferramentas de SIG (veja, por exemplo, Maguire, Goodchild e Rhind, 1991). A figura 1 sintetiza a discussão ora apresentada, estendendo-a apropriadamente às áreas de Sensoriamento Remoto, CAD (Computer Aided Design) e Gerenciamento de Banco de Dados.

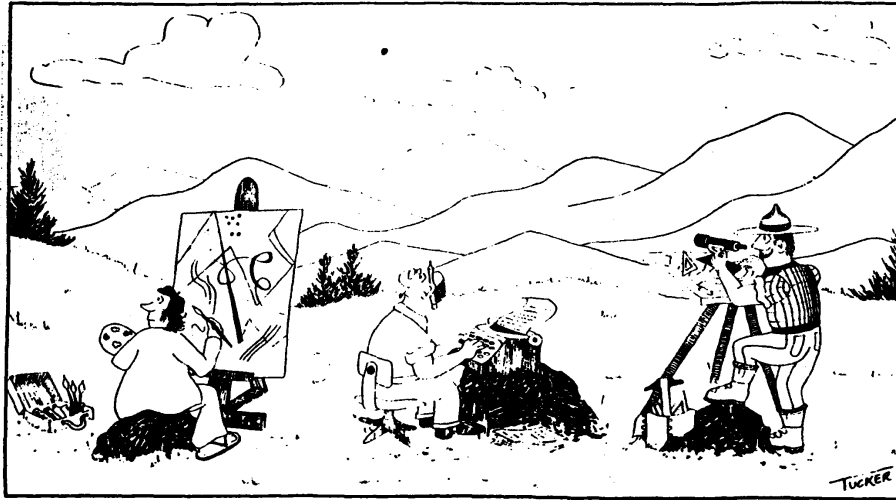


**Figura 1 - Relações interdisciplinares entre SIG e outras áreas  
(fonte: Maguire, Goodchild e Rhind, 1991)**

# Cartografia para Geoprocessamento

Júlio Cesar Lima d'Alge

julio@dpi.inpe.br



(fonte: Muehrcke e Muehrcke, 1992)

- 1 - Introdução
- 2 - Natureza dos Dados Espaciais
  - 2.1 - Conceitos de Geodésia
  - 2.2 - Sistemas de Coordenadas
  - 2.3 - Projeções Cartográficas
  - 2.4 - Transformações Geométricas
  - 2.5 - Conhecimento da Incerteza
- 3 - Aspectos Funcionais e de Apresentação
  - 3.1 - Modelagem Cartográfica
  - 3.2 - Integração de Dados
  - 3.3 - Integração com Sensoriamento Remoto
  - 3.4 - Generalização Cartográfica
- 4 - Bibliografia