

OPERAÇÕES DE ANÁLISE GEOGRÁFICA

*Gilberto Câmara, Cláudio Barbosa e
Ubirajara Moura de Freitas*

“Se quisermos apreender a essência de um complexo de noções abstratas, devemos por um lado investigar as relações mútuas entre os conceitos e as afirmações feitas a seu respeito e, por outro, investigar como eles se relacionam com as experiências.”

Albert Einstein

3.1 INTRODUÇÃO

O que distingue um SIG de outros tipos de sistemas de informação são as funções que realizam análises espaciais. Tais funções utilizam os atributos espaciais e não espaciais das entidades gráficas armazenadas na base de dados espaciais e buscam fazer simulações (modelos) sobre os fenômenos do mundo real, seus aspectos ou parâmetros.

A partir do modelo de dados apresentado no capítulo anterior foi estabelecida uma taxonomia para as diversas operações de análise geográfica, que serão divididas em: *operadores sobre geo-objetos, operadores sobre geo-campos, operadores de transformação entre geo-campos e geo-objetos e operadores mistos entre geo-objetos e geo-campos*. Esta análise permitirá obter um entendimento formal sobre a natureza das operações em Geoprocessamento.

A literatura especializada apresenta um grande número de artigos sistematizando as operações em um SIG, como Goodchild (1987), Maguire and Dangermond (1991) e Burrough (1986).

Os trabalhos da literatura abordam o problema de duas perspectivas distintas: operações de consulta sobre geo-objetos (Egenhofer, 1994) e operações de manipulação sobre geo-campos (Tomlin, 1990), sem unificar as duas visões.

A caracterização adotada neste trabalho é inédita, pois deriva-se da diferenciação explícita entre geo-objetos e geo-campos. Isto tem conseqüências importantes, já que permite compreender melhor a natureza de cada operador. Sobretudo, este trabalho procura traçar uma ponte entre as duas visões tradicionais de operações geográficas (baseadas em entidades e baseadas em campos), sempre buscando uma visão integradora dos processos de análise espacial.

Devido à variedade de usos de Geoprocessamento, o critério utilizado neste trabalho foi baseado em aspectos práticos. Foram analisadas as operações disponíveis nos principais SIGs do mercado (e.g. ARC/INFO, MGE, SGI, SPANS, SPRING) e levou-se em conta a experiência prática do INPE e de seus parceiros no uso de sistemas de informação geográfica (veja-se, por exemplo, Assad e Sano, 1993).

3.2 OPERAÇÕES SOBRE GEO-CAMPOS

São descritas a seguir as operações sobre GEO-CAMPOS e suas especializações TEMÁTICO, NUMÉRICO e DADO_SENSOR_REMOTO, que podem ser classificados como pontuais, de vizinhança e zonais (Tomlin, 1990).

3.2.1 OPERAÇÕES PONTUAIS

As operações pontuais geram como saída um geo-campo cujos valores são função apenas dos valores dos geo-campos de entrada em cada localização correspondente. Podem operar apenas sobre um campo (e.g. *fatiar* um modelo numérico de terreno, *classificar* uma imagem) ou realizar intersecções entre conjuntos espaciais (e.g. *operações booleanas* entre mapas temáticos)¹.

Dependendo dos domínios e contradomínios dos mapas de geo-campos, diferentes possibilidades podem ser consideradas:

¹Estas operações podem envolver modificação da topologia (e.g. uma reclassificação é usualmente combinada com uma junção topológica).

- *operações unárias*: a entrada é um único geo-campo. Também são chamadas *operações de transformação*, pois a operação equivale a um mapeamento entre os contradomínios dos campos de entrada e saída;
- *operações booleanas*: são utilizadas em análise espacial qualitativa e geram um TEMÁTICO a partir de regras aplicadas a geo-campos (que podem ser instâncias de TEMÁTICO, NUMÉRICO ou DADO_SENSOR_REMOTO). As regras especificam o conjunto de condições a serem satisfeitas para cada tema de saída;
- *operações matemáticas*: funções aritméticas, logarítmicas e trigonométricas, aplicadas a MNTs e a DADO_SENSOR_REMOTO. Podem gerar MNT, DADO_SENSOR_REMOTO ou TEMÁTICOS.

Dentre os operadores matemáticos, vale destacar as seguintes subclasses:

- *operações de processamento de dados de sensoriamento remoto*: subclasse de operadores matemáticos onde a entrada é um DADO_SENSOR_REMOTO e a saída é um DADO_SENSOR_REMOTO;
- *operações de classificação de dados de sensoriamento remoto*: subclasse importante dos operadores matemáticos onde a entrada é uma instância da classe DADO_SENSOR_REMOTO e a saída é um TEMÁTICO.

A tabela 3.1 descreve os principais tipos de operações pontuais unárias (também chamados operações de transformação).

TABELA 3.1
OPERAÇÕES DE TRANSFORMAÇÃO

<i>F₁ - entrada</i>	<i>F₂ - saída</i>	<i>Nome do Operação</i>
TEMÁTICO	MNT	Ponderação
TEMÁTICO	TEMÁTICO	Reclassificação
DADO SEN. REMOTO	TEMÁTICO	Fatiamento
MNT	TEMÁTICO	Fatiamento de classes

Alguns exemplos de operações de transformação:

- “reclassificar um mapa de vegetação com as classes {Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Estacional Decidual } em um mapa com as classes {Floresta Densa, Floresta Estacional}”;
- “obter um mapa hipsométrico a partir de um mapa de altimetria com o mapeamento { (0-300m) → Planície, (300-500m) → Planalto, (>500m) → Serras}”.

PONDERAÇÃO

A Figura 3.1 mostra um exemplo da operação de ponderação (conversão de um mapa de solos em um mapa de solos ponderado). Neste caso, $V_1 = \{ Le, Li, Ls, Aq \}$, $V_2=[0.0,1.0]$ e a transformação é o conjunto de pares ordenados $\{(Le \rightarrow 0.60), (Li \rightarrow 0.20), (Ls \rightarrow 0.35), (Aq \rightarrow 0.10)\}$.

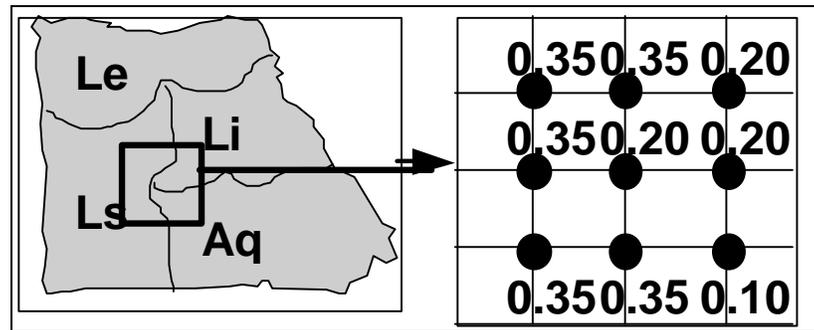


Figura 3.1 - Exemplo de operação de ponderação.

FATIAMENTO EM CLASSES

A Figura 3.2 mostra um exemplo de um operação de fatiamento em classes (conversão de um MNT em um TEMÁTICO) onde um mapa de declividade em graus é convertido para um mapa de classes de declividade a partir da transformação $\{(0-9\%) \rightarrow \text{“baixa”}; (10-19\%) \rightarrow \text{“média”}; (\text{acima de } 20) \rightarrow \text{“alta”}\}$.

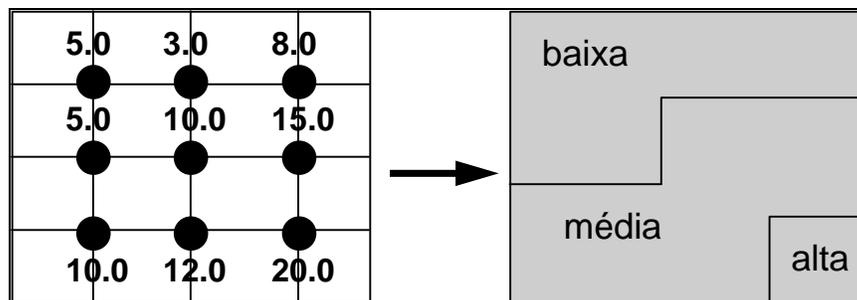


Figura 3.2 - Exemplo de operação de fatiamento em classes.

OPERAÇÃO BOOLEANA

Estas funções utilizam operadores lógicos (booleanos) e permitem realizar cruzamentos entre dois ou mais planos de informação. A operação lógica do tipo A AND B retorna todos os elementos contidos na intersecção entre A e B; A NOT B retorna somente os elementos contidos exclusivamente em A; A OR B retorna todos os elementos contidos tanto em A como em B; A XOR B retorna todos os elementos contido em A e B não incluídos na intersecção de A e B.

Como exemplo de *operação booleana*, tome-se o caso de determinar um mapa de aptidão agrícola a partir dos mapas de solo, declividade, precipitação e do conjunto hipotético de regras expresso na tabela abaixo.

TABELA 3.2
REGRAS PARA APTIDÃO AGRÍCOLA

<i>Aptidão Agrícola</i>	<i>Solos</i>	<i>Precipitação Média mensal</i>	<i>Declividade</i>
Boa	Latossolos	> 100 mm	0-3.5%
Média	Podzólicos	100-50 mm	3.5-12%
Inapto	Litólicos	< 50 mm	>12%

OPERAÇÃO MATEMÁTICA

Como exemplo de *operação matemática*, tome-se a Figura 3.3, onde f_1 é um mapa de solos ponderado e f_2 é um mapa de declividade (a declividade é o módulo das derivadas parciais da altimetria). A operação

$$\lambda_{\text{new}}(p) = \lambda_1(p) + 1/\lambda_2(p)$$

poderia ser utilizada como passo intermediário ao se calcular um mapa de adequação de solos (quanto maior o valor, mais adequado).

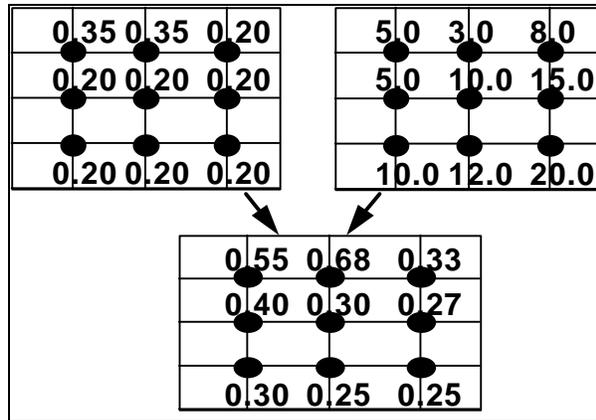


Figura 3.3 - Exemplo de uma operação matemática.

3.2.2 OPERAÇÕES DE VIZINHANÇA

Nesta classe de operações, dado um geo-campo, computa-se o geo-campo de saída com base na dimensão e forma de uma vizinhança em torno de cada localização p . Exemplos incluem:

- cálculos de valores *mínimo*, *máximo*, *médio*, *modal* para uma vizinhança em torno de um ponto;
- *filtros* para processamento de DADO_SENSOR_REMOTO;
- *métodos de interpolação espacial* para MNT (como médias por vizinho mais próximo);
- *mapas de declividade e exposição* para MNT;
- *índices de diversidade* para TEMÁTICO (onde o valor de saída está associada ao número de vizinhos de um ponto de entrada de uma classe que pertencem a classes distintas).

Como exemplo de operação de vizinhança, tome-se o caso da estimação da diversidade de vegetação de uma região, computado a partir de uma vizinhança 3 x 3 em torno de cada ponto. A idéia é que a diversidade seja maior em áreas de contato ecológico entre regiões homogêneas. A Figura 4.4 apresenta um mapa de vegetação e mostra a estimativa de diversidade computada para uma parte do mapa.

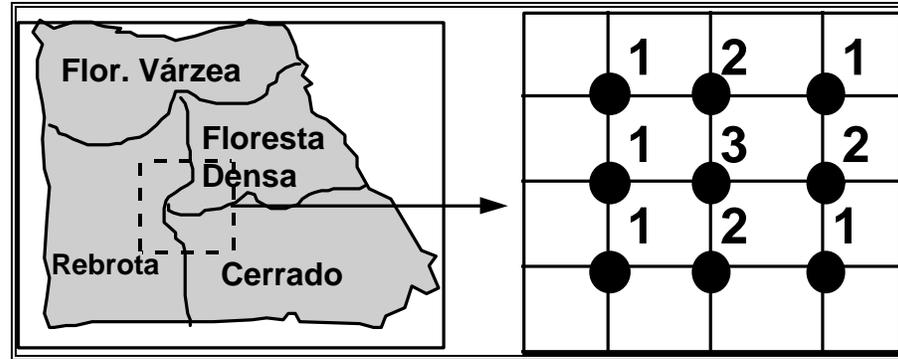


Figura 3.4 - Exemplo de operação de “estimativa de diversidade”.

3.2.3 OPERAÇÕES ZONAIS

As operações *zonais* são definidas sobre regiões específicas de um geo-campo de entrada, onde as restrições são fornecidas por outro geo-campo temático. Um exemplo seria: “dado um mapa de solos e um mapa de declividade da mesma região, obtenha a declividade média para cada tipo de solo”.

Estas operações são sempre definidas sobre geo-campos das classes MNT ou DADO SENSOR REMOTO. Como a restrição desta operação pode ser um TEMÁTICO ou CADASTRAL, considerar-se-ão duas definições distintas. Nesta seção, apresenta-se o caso de operações zonais onde a restrição é um TEMÁTICO. O segundo caso será discutido na seção “Operações Mistas”.

No caso de operadores zonais, um geo-campo temático é utilizado para definir uma região de interesse aonde é computada a função. Os operadores zonais incluem:

- *média, máximo e mínimo e desvio padrão* dos valores sobre uma região especificada;
- *índice de variedade* dos valores, onde cada valor no mapa de saída será computado a partir do número de valores diferentes do geo-campo de entrada que pertencem a uma mesma região zonal.

Considere-se, por exemplo, a operação MÁXIMO ZONAL, onde se toma um TEMÁTICO como restrição sobre um MNT, e se retorna o maior valor do MNT para cada tema (vide Figura 3.5).

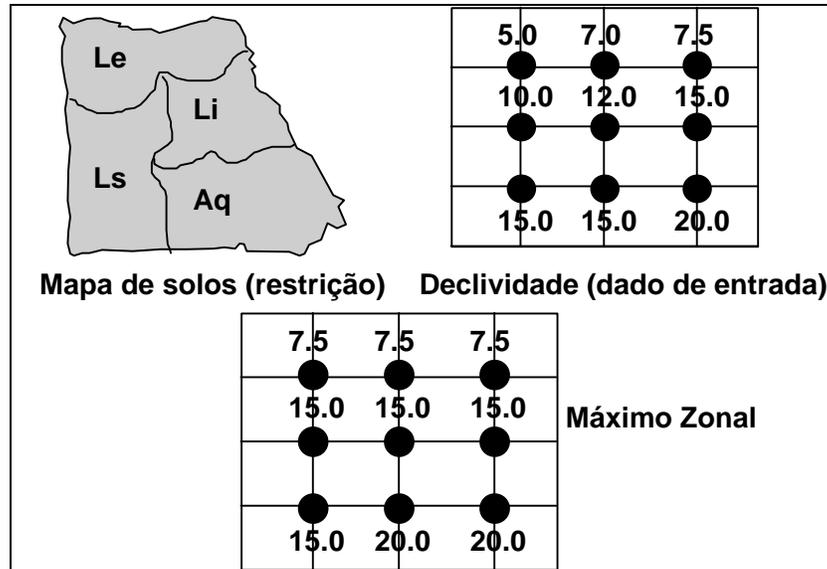


Figura 3.5 - Operação de máximo zonal.

A importância teórica das operações zonais é dupla: permite materializar num SIG os conceitos de unidade de paisagem (Bertrand, 1981; Tricart, 1977; Tricart e KiewietdeJonge, 1992) e área-unidade (Hartshorne, 1978) e permite a ligação entre dados do meio físico-biótico e dados sócio-econômicos, essencial para estudos de ordenação do território.

Alternativamente aos procedimentos manuais e de forma análoga ao exemplo anterior, uma operação de *média zonal* pode ser conveniente na determinação da vulnerabilidade natural à erosão (Crepani et al, 1996) ou da fragilidade (Ross, 1990) das “unidades de paisagem” ou das “unidades territoriais básicas” mapeadas a partir das imagens de satélites. Toma-se o geo-campo temático ou cadastral “unidade de paisagem” como restrição sobre geo-campos numéricos (MNT), que por sua vez, são resultantes de ponderações sobre os geo-campos temáticos de geologia, geomorfologia, solos, vegetação e clima. Obtém-se com o resultado um geo-campo numérico, cujo valor médio para cada “unidade de paisagem” mapeada representa sua vulnerabilidade ou fragilidade natural. Este geo-campo numérico (MNT) pode ser “fatiado” em classes de vulnerabilidade (muito alta, alta, média, baixa e muito baixa), obtendo-se um geo-campo temático.

3.2.4 OPERAÇÕES DE CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA

O uso de técnicas de classificação contínua busca utilizar as noções de conjuntos nebulosos (“fuzzy”), para substituir os processos tradicionais de geração de mapas.

Este aspecto é particularmente evidente no manuseio de mapas temáticos para análises de meio-ambiente. Uma fronteira arbitrária, definida precisamente por uma linha, entre dois tipos de solo, representa erradamente o que é, na realidade, uma variação contínua (Burrough, 1986). Quando realizamos operações de superposição entre mapas temáticos, o erro inerente à divisão arbitrária dos mapas em áreas estanques é propagado.

Sui (1992) demonstrou a utilização da lógica nebulosa (fuzzy logic) para a modelagem em GIS do uso do solo urbano. Os resultados indicaram que este tipo abordagem permite acrescentar mais detalhes sobre a transição gradual e reduz a perda de informação relacionados com os atributos de cada parcela do solo urbano, possibilitando uma identificação mais realística destas parcelas.

Estudos realizados pelo Centro Nacional de Pesquisa em Solos da EMBRAPA evidenciaram que os processos tradicionais de análise geográfica (discretizar variáveis para posteriormente combiná-las) engendram uma grande perda de sensibilidade no resultado final.

A alternativa é trabalhar sempre com dados em representação contínua, e utilizar análises quantitativas sobre mapas geográficos. Isto equivale, na prática, a trabalhar sempre com modelos numéricos de terreno para representar variáveis espaciais como solo, geomorfologia, vegetação.

Para uma discussão em maior detalhe sobre o problema, veja-se Druck e Braga (1995). Uma aproximação de uma função de pertinência nebulosa é dada pelas equações quadráticas $\mu_L(x)$ e $\mu_U(x)$, como segue:

$$\begin{aligned} \mu_L(x) &= 1 && \text{se } x \geq \beta, \\ \mu_L(x) &= 1/[1 + \alpha(x - \beta)^2] && \text{se } x < \beta. \\ \mu_U(x) &= 1 && \text{se } x < \beta, \\ \mu_U(x) &= 1/[1 + \alpha(x - \beta)^2] && \text{se } x \geq \beta. \end{aligned}$$

Na equação $\mu_L(x)$, o parâmetro β indica o valor máximo, acima do qual a pertinência “fuzzy” é considerada total (isto é, igual a 1). Abaixo deste valor, a função tem uma forma quadrática, dependendo da variação do parâmetro α .

Conversamente, na equação $\mu_U(x)$, o parâmetro β indica o valor mínimo, abaixo do qual a pertinência “fuzzy” é considerada total (isto é, igual a 1). Acima deste valor, a função tem uma forma quadrática, dependendo da variação do parâmetro α . A figura 3.6 ilustra a função $\mu_L(x)$ para o caso $\alpha = 1$ e $\beta = 3$.

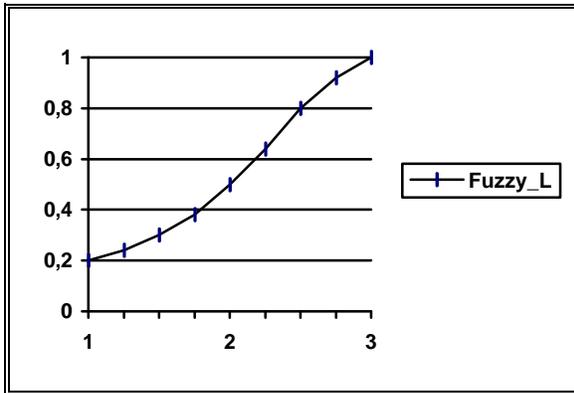


Figura 3.6 - Exemplo de função de pertinência “fuzzy”.

Em seu trabalho, Druck e Braga (1995) mostram um caso aonde se procura determinar classes de fertilidade de solos. As terras foram classificadas conforme sua exigência em termos de utilização dos insumos. A Tabela 3.3 mostra os níveis de propriedades químicas para alguns parâmetros: cálcio e magnésio, fósforo e alumínio.

TABELA 3.3

CLASSES DE FERTILIDADE DE SOLOS

Propriedade	Classes Fertilidade			
	1	2	3	4
Ca+++Mg++	Ca+Mg>3	2<Ca+Mg<=3	Ca+Mg<=2	Ca+Mg<2
P	P >= 30	10 < P < 30	P < 10	P < 10
Al++	Al > 0,3	0,3 < Al < 1,5	1,5 < Al < 4	Al > 4

Na Tabela 3.3, a classe 1 indica o solo mais fértil e 4, o menos fértil. Para determinar as funções “fuzzy” correspondentes é escolhido o parâmetro β tal que a primeira classe de níveis de fertilidade de solo tenha o valor nebuloso 1; o parâmetro α é tal que o valor da função nebulosa $\mu_A(x)$ seja igual a 0,5 quando x tiver o valor inferior da segunda classe de fertilidade. A Tabela 3.4 mostra os parâmetros “fuzzy” obtidos por este critério.

TABELA 3.4 - PARAMETROS FUZZY

<i>Propriedades</i>	α	β	Função
Ca+++Mg++	1	3	$\mu_L(x)$
P	0,0025	30	$\mu_L(x)$
Al++	0,3	0,694	$\mu_U(x)$

3.3 OPERAÇÕES SOBRE GEO-OBJETOS

Estando definidos os relacionamentos topológicos sobre geo-objetos, pode-se definir as operações sobre geo-objetos:

1. *restrições sobre atributos*: computados em função das atributos de entidades espaciais (e.g. “selecione todas as cidades de Alagoas com mortalidade infantil maior que 10% ”);
2. *restrições espaciais*: derivados a partir dos relacionamentos *topológicos* das entidades geográficas (e.g. “dê-me todas as escolas municipais do bairro Jardim Satélite”), de *direção* (“ao norte de”, “acima de”) ou *métricos* (e.g. “dê-me todas as escolas a menos de 500 m da Via Dutra”);
3. *propriedades de geo-objetos*: os resultados correspondem a predicados de um geo-objeto ou de um conjunto de geo-objetos (e.g. “calcule a média do valor venal das casas do bairro Jardim Esplanada” ou “indique o caminho ótimo para o ônibus que vai do Centro ao Jardim Uirá”).

Estas operações utilizam as primitivas definidas anteriormente: as relações topológicas *toca*, *dentro de*, *disjunto*, *cruza* e *sobreposição*, as relações métricas unárias (comprimento, área, perímetro) e binárias (distância, direção).

3.3.1 SELEÇÃO POR ATRIBUTOS

O operador de seleção por atributos sobre um conjunto de geo-objetos GO , dada uma restrição baseada apenas nos atributos descritivos de GO , gera como resultado um sub-conjunto $GO' \subseteq GO$, cujos membros satisfazem a restrição.

Esta é uma operação semelhante à seleção da álgebra relacional, como indica o exemplo: "Recupere as cidades do Estado de São Paulo com população entre 100.000 e 500.000 habitantes".

3.3.2 SELEÇÃO ESPACIAL

Para definir as operações de consulta espacial, é necessário lançar mão do conceito de predicado espacial. Dados uma região geográfica R , um conjunto de geo-objetos GO e um mapa cadastral que mapeia objetos de GO em R , um *predicado espacial* é uma restrição espacial definida através de um relacionamento topológico (*dentro de, toca, cruza, subrepõe e disjunto*) ou de um relacionamento métrico (*distância*).

Intuitivamente, os predicados espaciais utilizados nas operações envolvendo geo-objetos são assertivas do tipo "rio que cruza o município de São José dos Campos, no mapa do Vale do Paraíba".

Assim, dados uma região geográfica R , um conjunto de geo-objetos GO , um mapa cadastral que mapeia objetos de GO numa região geográfica R e um *predicado espacial*, o operador de *seleção espacial* é tal que o resultado desta operação é um subconjunto do conjunto original composto de todos os geo-objetos que satisfazem o predicado espacial, como ilustrado no exemplo da Figura 4.9:

- "selecione todas as regiões da França adjacentes à região de Midi-Pirenées (que contém a cidade de Toulouse)".

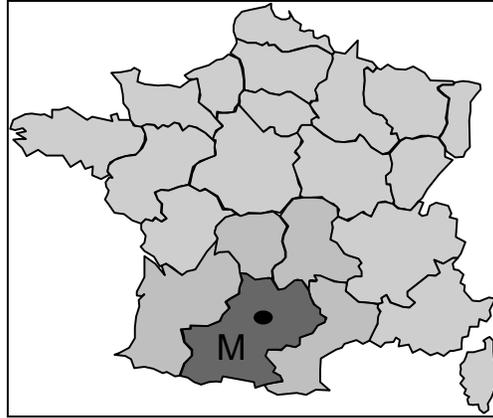


Figura 3.7 - Exemplo de operação de seleção espacial.

3.4 OPERAÇÕES ENTRE GEO-CAMPOS E GEO-OBJETOS

Analisar-se-ão a seguir as operações que combinam geo-campos e geo-objetos. Elas apresentam particular interesse pois representam o vínculo entre as duas visões de dados em Geoprocessamento. Como os trabalhos da literatura abordam as operações geográficas privilegiando um dos pontos de vista, a ligação entre geo-campos e geo-objetos é tema ainda pouco explorado.

3.4.1 GERAÇÃO DE GEO-OBJETOS A PARTIR DE GEO-CAMPOS

Definem-se ainda duas grandes classes de operações: a operação de identificação e a operação de intersecção espacial.

A operação de identificação transforma um geo-campo temático em um mapa cadastral, que mapeia um conjunto de geo-objetos de modo que um dos atributos de cada geo-objeto é o valor de geo-campo temático. O mapa cadastral terá a mesma representação geométrica do geo-campo temático que o originou.

A operação de *intersecção espacial* produz um *mapa cadastral* (e um conjunto de geo-objetos associados) a partir da *intersecção espacial* de um conjunto de geo-campos. Esta situação é típica de aplicações de *diagnósticos geoambientais*²,

²Este exemplo (e toda a teoria de geração de mapas de geo-objetos a partir de geo-campos) foram inspirados pelo trabalho das equipes do IBGE e IPEA, sob a Coordenação técnica da Prof^a. Tereza Cardoso da Silva, que desenvolveram os Projetos PMACI I e II (Projeto de Proteção do Meio Ambiente e das Comunidades Indígenas - Diagnóstico Geoambiental e Sócio-Econômico). Ver também, **Silva, 1987**.

quando se faz a intersecção entre mapas temáticos para obter as unidades geoambientais.

Quando um mapa cadastral (e um conjunto de geo-objetos nele representado) é criado a partir da intersecção de geo-campos, cada geo-objeto resultante terá, como seus atributos descritivos, os valores de cada geo-campo de entrada (constante para cada geo-objeto).

- Veja-se o exemplo: “determine as grandes unidades geoambientais da Austrália, com o cruzamento dos mapas de vegetação, geomorfologia e solos.” (Figura 3.8).

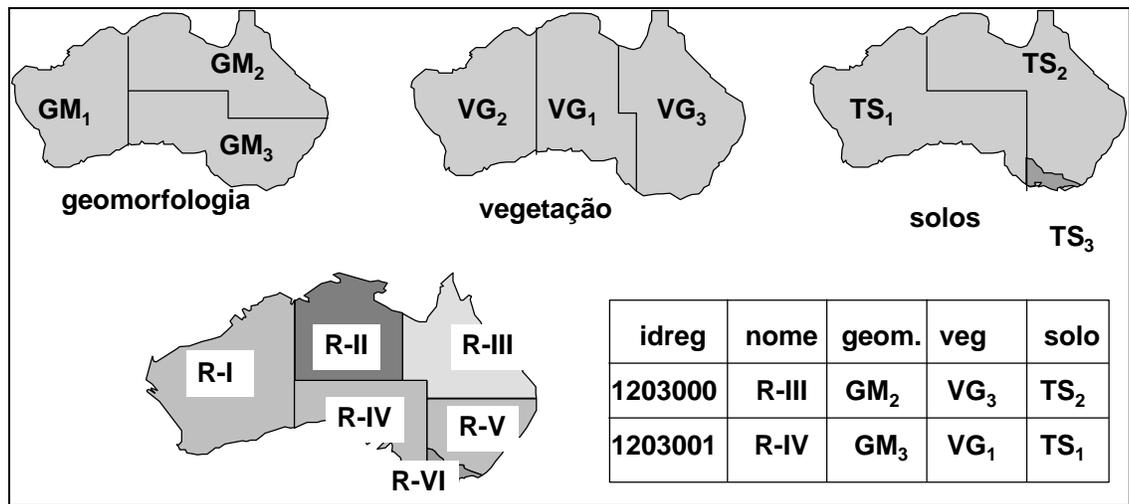


Figura 3.8 - Exemplo de intersecção espacial.

Nesta operação pode ser conveniente permitir que o usuário forneça um nome ou rótulo (“label”) que identifique a região. O atributo “nome” da tabela apresentada na figura seria então gerado pelo usuário, de forma individual para cada geo-objeto.

Na literatura, a *intersecção espacial* é muitas vezes classificada erroneamente como “um tipo particular de junção espacial” (cf. Güting, 1994). Como se viu anteriormente, a operação de *junção espacial* parte de dois conjuntos de geo-objetos e produz, como resultado, pares de geo-objetos já existentes que satisfazem à restrição desejada. A intersecção espacial cria novos geo-objetos a partir de geo-campos. Deste modo, embora haja semelhanças entre os algoritmos gráficos utilizados para implementá-las, a operação de intersecção espacial (“*overlay*”) é

conceitualmente diferente dos casos de *operações booleanas* entre geo-campos e *operações de junção espacial* entre geo-objetos³.

3.4.2 GERAÇÃO DE GEO-CAMPOS A PARTIR DE GEO-OBJETOS

A partir de atributos (descritivos ou espaciais) de conjuntos de geo-objetos, pode-se fazer a geração de geo-campos. O novo mapa representa *uma restrição espacial definida a partir de um geo-objeto* ou *a variação de um atributo do conjunto de geo-objetos*, como ilustram os exemplos:

- “gere um mapa das distâncias a partir da via Dutra na região de São José dos Campos.” (operação de *mapas de distância*);
- “para este conjunto de lotes, calcule um temático a partir do valor venal do terreno com as classes: temas A (até R\$ 300), B (de R\$ 300 a 1.000), C (de R\$ 1.000 a R\$ 4.000) e D (mais de R\$ 4.000).” (operação de *reclassificação por atributos*).

Um *mapa de distâncias* é um mapa de geo-campos contendo as distâncias de cada ponto do mapa a um geo-objeto de referência (representado por um ponto, linha ou região). Trata-se de operação puramente geométrica (espacial). A Figura 3.9 ilustra esta operação.

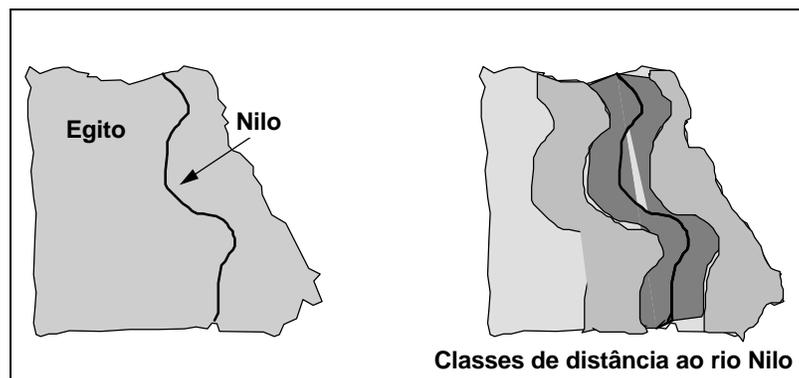


Figura 3.9 - Exemplo de mapa de distâncias.

A operação de *reclassificação por atributos* gera, a partir dos valores de um atributo específico dos geo-objetos de um mapa, um geo-campo com a distribuição espacial deste atributo. Pode haver necessidade de recalcular a topologia do mapa

³Muitos sistemas comerciais (orientados para as estruturas gráficas) utilizam a mesma função (“overlay”) para implementar as três operações.

resultante pois algumas regiões serão combinadas. Veja-se o exemplo ilustrado na Figura 3.10:

“Para todos os países da América do Sul, gere um geo-campo temático com o crescimento demográfico de cada país, dividido em classes: { (de 0 a 2% ao ano), (de 2 a 3% a.a.), (mais de 3% a.a.)}.”

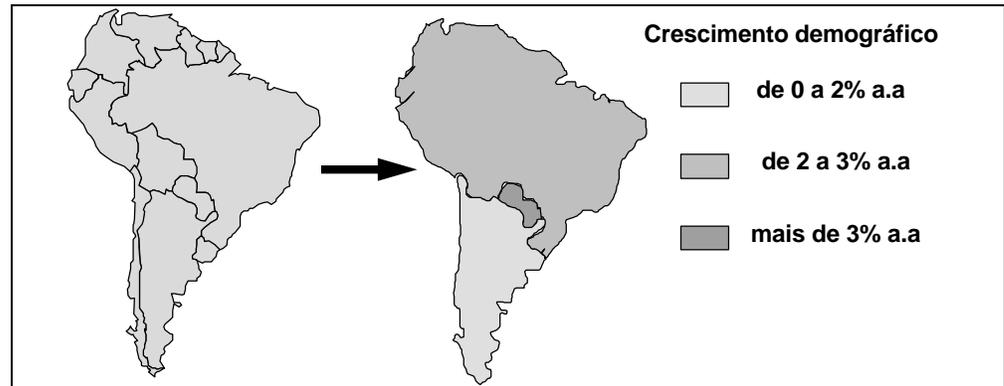


Figura 3.10 - Exemplo de *reclassificação por atributo*.

3.4.3 OPERAÇÕES MISTAS

Um conjunto importante de operações envolve operações sobre geo-campos aonde as restrições são dadas por geo-objetos (e vice-versa). No primeiro caso, pode-se pensar numa variante das *operações zonais* e no segundo, num outro tipo de junção espacial. Apresentam-se a seguir dois exemplos:

1. *operações zonais sobre geo-campos onde geo-objetos são restrições*: “Dados a altimetria e o mapa de municípios do Vale do Paraíba, crie um novo mapa aonde cada município será representado por sua altitude média”;
2. *operações de seleção espacial aonde geo-campo é restrição*: “Dado um mapa de solos e um mapa de rios do Estado do Paraná, indique todos os rios que cruzam áreas com solos podzólicos”.

3.5 RESUMO DAS OPERAÇÕES SOBRE GEO-CAMPOS E GEO-OBJETOS

Apresentam-se a seguir um resumo das operações propostas, aplicáveis a geo-campos e geo-objetos, na Tabela 4.5. Estão indicados para cada operação: a classe dos objetos de entrada e de saída, e dos objetos modificadores (quando cabível). Indicam-se ainda as restrições de cada operação.

TABELA 4.5

RESUMO DAS OPERAÇÕES

<i>Operação</i>	<i>Objeto Entrada</i>	<i>Objeto Modificador</i>	<i>Objeto Saída</i>	<i>Restrição</i>
Ponderação	TEMÁTICO		NUMÉRICO	(função unária)
Fatiamento	NUMÉRICO		TEMÁTICO	(função unária)
Reclassificação	TEMÁTICO		TEMÁTICO	(função unária)
Booleana	NUMÉRICO, TEMÁTICO		TEMÁTICO	(regras)
Matemática	NUMÉRICO		NUMÉRICO	(fórmula)
Vizinhança	NUMÉRICO, TEMÁTICO		NUMÉRICO, TEMÁTICO	(função local e forma da vizinhança)
Zonais	NUMÉRICO	TEMÁTICO	NUMÉRICO	

TABELA 4.5

RESUMO DAS OPERAÇÕES (cont.)

<i>Operação</i>	<i>Objeto Entrada</i>	<i>Objeto Modificador</i>	<i>Objeto Saída</i>	<i>Restrição</i>
Seleção Espacial	GEO-OBJETO (conjunto)	CADASTRAL	GEO-OBJETO (conjunto)	(predicado espacial)
Junção Espacial	GEO-OBJETO (conjuntos)	CADASTRAL	GEO-OBJETO e VALORES (conjunto)	(predicado espacial)
Identificação	TEMÁTICO		GEO-OBJETO (conjunto) CADASTRAL	
Intersecção Espacial	TEMÁTICO (n)		GEO-OBJETO (conjunto) CADASTRAL	
Mapa Distâncias	GEO-OBJETO	CADASTRAL	TEMÁTICO	(predicado métrico)
Reclassificação ou Atributos	GEO-OBJETO (conjunto)	CADASTRAL	TEMÁTICO	(atributo)
Zonal sobre geo-objetos	TEMÁTICO, NUMÉRICO	GEO-OBJETO, CADASTRAL	TEMÁTICO, NUMÉRICO	
Seleção espacial (restr= geo-campo)	GEO-OBJETO (conjunto)	CADASTRAL, TEMÁTICO, NUMÉRICO	GEO-OBJETO (conjunto)	(predicado espacial)

3.6 EXEMPLO DE LINGUAGEM DE MANIPULAÇÃO

A equipe do INPE engajada no desenvolvimento do SPRING tem procurado caracterizar, de forma ampla, as operações sobre dados geográficos. Deste estudo nasceu o projeto da linguagem LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico), descrita em Câmara (1995).

A álgebra de campos proposta em Câmara (1995) foi usada como base para a implementação parcial da linguagem LEGAL no SPRING-2.0, com os seguintes tipos de operações: *transformação*, *booleanas*, *matemáticas* e de *classificação contínua* (Cordeiro et al., 1996). Um programa em LEGAL é estruturado em três partes: *declarações*, *instanciações* e *operações*. No que segue, as sentenças em LEGAL serão escritas em fonte Courier New e as palavras reservadas da linguagem começam com Maiúscula.

3.6.1 COMPARAÇÃO COM LINGUAGEM MAP

Para realizar operações de modelagem espacial sobre geo-campos, Tomlin (1990) propõe a linguagem MAP (Map Analysis Package), que serve de base para muitas implementações comerciais. A implementação mais difundida das idéias de Tomlin é a linguagem GRID, disponível no sistema ARC/INFO. Esta linguagem permite realizar operações como:

```
OUTGRID = INGRID1 + INGRID2
OUTGRID = INGRID1 XOR 5
OUTGRID = SIN(INGRID1) * 4 / LOG(INGRID2)
```

A linguagem GRID, embora muito flexível, tem o sério inconveniente de não distinguir entre os diferentes tipos de operandos. Isto decorre do fato de estar ligada às estruturas de dados (matrizes) e não levar em conta a semântica das operações. Nos exemplos acima, se INGRID1 for um geo-campo numérico e INGRID2 um geo-campo temático, o resultado pode não ter sentido. Em GRID, um geo-campo temático no formato matricial é chamado de “grade de inteiros”, e um geo-campo numérico de “grade de ponto flutuante”, o que estabelece uma confusão entre o dado geográfico e sua representação. Em função deste tipo de problemas, optou-se por fazer de LEGAL uma linguagem onde os operadores estão ligados a um contexto semântico definido pelas diferentes especializações de geo-campos.

3.6.2 DECLARAÇÃO

Toda variável em LEGAL deve ser declarada antes de ser utilizada, de acordo com a sintaxe:

```
Tematico <var> (<categoria>);
```

```
Numerico <var> (<categoria>);
```

```
Imagem <var> (<categoria>);
```

No SPRING, o termo “*categoria*” identifica uma especialização das classes geográficas básicas, no caso de geo-campos, as classes TEMÁTICO, NUMÉRICO e IMAGEM. Por exemplo, pode-se definir uma categoria “Altimetria” como especialização de GEO-CAMPO NUMÉRICO.

3.6.3 INSTANCIÇÃO

A instanciação é caracterizada pelos operadores Recupere e Novo. O operador Recupere associa uma variável a um geo-campo existente no banco de dados geográfico a partir de seu nome. O operador Novo cria um novo geo-campo no banco de dados e requer parâmetros, dependendo da representação geométrica associada:

- imagem em tons de cinza: resolução horizontal e vertical;
- grade regular: resolução horizontal e vertical, valores máximos e mínimos aceitáveis;
- imagem temática (geo-campo temático em representação matricial): resolução horizontal e vertical e escala;
- representação vetorial: escala.

3.6.4 OPERAÇÕES DE TRANSFORMAÇÃO

Operações de transformação são usadas para realizar mapeamentos entre diferentes tipos de campos geográficos:

- PONDERA: transforma uma instância do campo TEMÁTICO em uma NUMÉRICO;

- FATIA: transforma uma instância do campo NUMÉRICO ou IMAGEM em um TEMÁTICO ;
- RECLASSIFICA: transforma uma instância do campo TEMÁTICO em outra com diferentes classes.

Como regra geral, os operadores de transformação exigem que o usuário defina um mapeamento entre os domínios de entrada e de saída sob a forma de uma *tabela*. A linguagem permite a definição de tabelas específicas para cada tipo de tais mapeamentos. As especializações de tabelas previstas pela linguagem são: PONDERAÇÃO, FATIAMENTO e RECLASSIFICAÇÃO.

3.6.5 OPERAÇÕES BOOLEANAS

Nas operações booleanas, o valor do geo-campo resultante em cada posição é uma função apenas do valor da posição correspondente nos geo-campos de entrada. A saída de uma operação booleana é um GEO-CAMPO TEMÁTICO, cujos valores do contra-domínio necessitam ser especificados em função dos valores dos campos de entrada. Essas condições são calculadas através do operador *Atribua*, com as condições E (&&), OU (||) e NÃO (~). Um exemplo de uso desta operação é dado abaixo, onde um mapa de aptidão agrícola é calculado com base na declividade e no tipo de solo.

```

Tematico mapa_solos ("Solos"),mapa_aptidao ("Aptidão");

Numerico    mapa_decl ("Declividade");

mapa_decl = Recuperar(Nome="Decl92");

mapa_solos = Recuperar(Nome="Solos92");

mapa_aptid = Novo (Nome = "Aptidao92", Representacao = Matricial,
                  ResX = 250, ResY =250, Escala =100000);

mapa_aptid = Atribua (CategoriaFim = "AptidaoAgricola")

{ "Bom" : mapa_solos.Tema = "Le" && mapa_decl >= 0.05;
  "Medio" : mapa_solos.Tema = "Aq" && mapa_decl >= 0.1;
  "Ruim" : Outros;
};

```

No exemplo acima, o termo "Outros" expressa todos os casos não indicados especificamente nas condições anteriores.

3.6.6 OPERAÇÕES MATEMÁTICAS

As operações matemáticas sobre geo-campos que são especializações de NUMÉRICO e IMAGEM incluem:

- operações aritméticas: soma (+), subtração (-), multiplicação (*) e divisão(/);
- funções matemáticas: seno (sin), cosseno (cos), tangente (tan), arco tangente (atan), logaritmo (log), exponencial (exp), raiz quadrada (sqrt);
- relações: menor que (<), maior que (>), menor ou igual (<=), maior ou igual (>=), igual (==), diferente (!=).

3.6.7 CLASSIFICAÇÃO CONTÍNUA

Como indicado na seção 6.2, o uso de técnicas de classificação contínua busca utilizar as noções de conjuntos nebulosos (“fuzzy”) para substituir os processos tradicionais de geração de mapas.

Em LEGAL, estão disponíveis operadores de transformação de um geo-campo numérico num campo nebuloso (“fuzzy”), cujos valores variam entre [0,...1] e que implementam as funções $\mu_L(x)$ e $\mu_U(x)$ (ver seção 6.2), com a seguinte sintaxe:

```
<mnt>= FUZZYL(<mnt_entrada>, <alfa>, <beta>);
```

```
<mnt>= FUZZYU(<mnt_entrada>, <alfa>, <beta>);
```

Nas equações acima α e β são parâmetros definidos pelo usuário de modo a se obter uma função nebulosa de forma adequada. Para maiores detalhes sobre a operação, o leitor deverá consultar Druck e Braga (1995).

3.6.8 ATRIBUTOS DE GEO-OBJETOS A PARTIR DE GEO-CAMPOS

Esta operação é uma variação da operação zonal sobre geo-campos, gerando atributos de geo-objetos a partir de valores de geo-campos, onde a restrição é a representação espacial dos geo-objetos. Por exemplo, considere a operação “obtenha a altitude média de todas os municípios do Estado de São Paulo”. Ela pode ser representada por:

```
Municipios."altitude" = MEDIAZONAL ( Altimetria,
                                     municipios ONMAP mapa_SP);
```

Numa formulação mais geral, esta classe de operações pode ser indicada por:

```
<objeto>.<atributo> = <OPERACAOZONAL> ( <geo-campo>,
                                       <objeto> ONMAP <cadastral>);
```

Uma operação adicional computa atributos de geo-objetos a partir de uma condição dada. Por exemplo, a operação “Calcule o desmatamento de cada município da Amazônia, baseado num mapa de uso de solo” pode ser feita em LEGAL por

```
Municipio."desmat" = AREA ( usosolo = "Desmatamento",
                           municipio ONMAP mapa_AMZ);
```

3.6.9 RECLASSIFICAÇÃO POR ATRIBUTOS

A operação de reclassificação por atributos pode ser realizada em LEGAL pela seguinte sintaxe:

```
<geo-campo> = MAPATEMATICO ( <objeto>.<atributo>
                             ONMAP <cadastral>);
```

Por exemplo, a operação “Gere um mapa de renda dos municípios do estado de São Paulo, baseado no atributo de *renda per capita*, pode ser feita com o seguinte comando em LEGAL:

```
MapaRenda = MAPATEMATICO ( municipio."renda"
                          ONMAP mapa_SP);
```

3.7 EXEMPLO DE OPERAÇÕES

Para ilustrar uma sequência de operações sobre geo-campos, considerem-se inicialmente dois geo-campos temáticos, indicados na Figura 4.14. O geo-campo indicado pela letra A corresponde ao mapa temático de geomorfologia para a região da Chapada dos Parecis, em Rondônia, e o geo-campo indicado por B corresponde ao mapa de vegetação da mesma região.

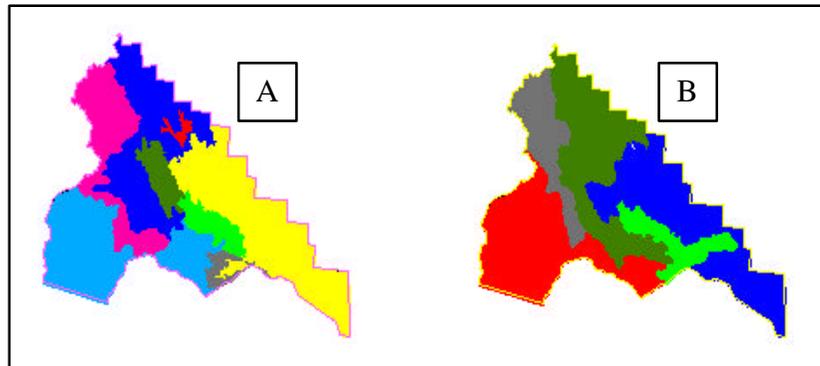


Figura 4.14 - Geo-campos temáticos originais.

As classes de cada geo-campo temático estão indicadas na tabela 4.6.

TABELA 4.6 - LEGENDAS DOS GEO-CAMPOS A E B

número	cor	Classe no Mapa de Geomorfologia (A)	Classe do Mapa de Vegetação (B)
1	Branco	Formas Estruturais Tabulares (St)	Savana Arbórea Aberta (Saf)
2	Cinza	Formas Erosivas em Pedimento (Epd)	Savana ou Floresta Ombrófila (Soe)
3	Vermelho	Superfície Tabular Erosiva (Et)	Floresta Aberta Submontana (Asc)
4	Azul	Formas convexas com dissecção forte (a22)	Floresta Semidecidual Submontana (Fse)
5	Verde	Formas convexas com dissecção forte e aprofundamento da drenagem fraco (c22)	Floresta Ombrófila Densa (Dse)
6	Magenta	Formas convexas com dissecção forte e aprofundamento da drenagem muito fraco (c31)	
7	Amarelo	Formas tabulares com aprofundamento da drenagem muito fraco e dissecção baixa (t42)	
8	Azul claro	Formas convexas com dissecção média e aprofundamento da drenagem fraco (c31)	

Fonte: Projeto RADAMBRASIL, vol. 19, Folha SD-20 Guaporé.

A partir dos geo-campos A e B gerou-se um novo geo-campo temático C através de operação booleana (vide Figura 4.15).

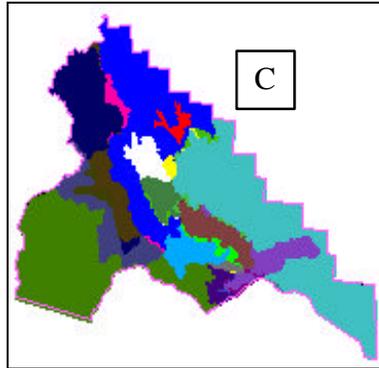


Figura 4.15 - Geo-campo resultante de operação booleana.

No caso da Figura 4.14 o geo-campo A possui oito classes e o geo-campo B, cinco. Foi utilizado uma operação lógica do tipo AND (intersecção), sendo possível a ocorrência de até 40 classes diferentes no geo-campo resultante C (Figura 4.15). Estas operações são efetuadas entre classes de dois ou mais geo-campos; o usuário cria as regras de combinação, conforme um arquivo de regras, que produzirão as novas classes do plano de informação resultante. O SIG interpreta estas regras e executa as combinações determinadas pelo usuário, criando uma imagem temática no plano de informação resultante.

O programa em LEGAL que realiza esta operação está mostrado a seguir. Apenas algumas classes de saída são indicadas, para ilustrar o procedimento de operação.

```

{
Tematico veget ("Vegetacao"), geom ("Geomorfologia"),

    veget_geom ("Veget_Relevo");

veget      = Recuperar(Nome="Veget_RADAM");
geom       = Recuperar(Nome="Geomorf_RADAM");

veget_geom = Novo (Nome = "Veget_Geom", Representacao = Matricial,
                  ResX = 50, ResY =50,      Escala =100000);

veget_geom = Atribua (CategoriaFim = "Veget_Relevo")

{ "V1G1" : veget.Tema = "St"  &&  geom.Tema = "Saf";

  "V1G2" : veget.Tema = "St"  &&  geom.Tema = "Soe";

  "V3G4" : veget.Tema = "Asc" &&  geom.Tema = "a22";

  "V4G5" : veget.Tema = "Fse" &&  geom.Tema = "c22";

  "V5G7" : veget.Tema = "Dse" &&  geom.Tema = "t42";

};

}

```

Outro exemplo de operação possível a partir dos geo-campos A e B é a geração de um geo-campo temático de classes de fragilidade a partir de vegetação e relevo. Para gerar este produto, utilizam-se as operações de *ponderação*, *operação matemática* e *fatiamento*. Inicialmente, gera-se um conjunto de regras de ponderação, atribuindo um conjunto de *pesos* a cada classe, de acordo com Crepani et al (1996). A seguir, realiza-se uma *operação* “média ponderada” entre dois geo-campos numéricos resultantes da *ponderação*. O resultado desta operação é um novo geo-campo numérico (MNT) e não temático, que necessita ser *fatiado* em intervalos de classe, por exemplo , baixa, média e alta, obtendo-se um novo geo-campo

temático. Na figura 4.16, o geo-campo D indica o resultado da *operação matemática* e o geo-campo E, o resultado do *fatiamento*.

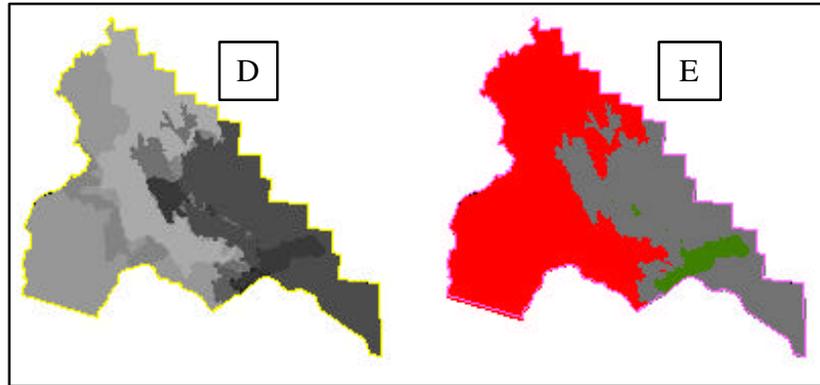


Figura - 4.16. Resultado da *Ponderação* (D) e *Fatiamento* (E) sobre os mesmos geo-campos A e B, da Figura 4.14.

O programa em LEGAL que realiza estas operações é mostrado a seguir.

```
{
//Declaração das variáveis
Tematico veget ("Vegetacao"), geom ("Geomorfologia"),
    classes_frag ("Fragilidade_Tematica");
Numerico fragil ("Fragilidade_Numerica");
veget          = Recuperar(Nome="Veget_RADAM");
geom           = Recuperar(Nome="Geomorf_RADAM");
fragil         = Novo (Nome = "Fragilidade", Representacao =
Matricial, ResX = 50, ResY =50, Escala =100000);
classes_frag   = Novo (Nome = "Classes_Fragildade",
Representacao = Matricial, ResX = 50, ResY =50,
Escala =100000);
Tabela tab_veg (Ponderacao), tab_geo(Ponderacao),
    tab_fat (Fatiamento);
// Ponderacao da Vegetacao
tab_veget = Novo (CategoriaIni="Vegetacao",
    "Saf" : 2.5, "Soe" : 2.3,
```

```

        "Asc" : 2.0,          "Fse" : 1.5,
        "Dse" : 2.0 ) ;
// Ponderacao da Geomorfologia
tab_geo = Novo (CategoriaIni = "Geomorfologia",
        "St" : 1.0,   "Epd" : 1.2,
        "Et" : 1.3,   "a22" : 2.5,
        "c22" : 2.0,  "c21" : 1.9,
        "t42" : 1.4,  "c31" : 1.8 );
// Media ponderada para obter fragilidade
fragil = 0.5 * (Pondere (veget, tab_veg)) + 0.5* (Pondere (geom,
tab_geo));
// Fatiamento de Fragilidade
tab_fat = Novo (CategoriaFim = "Fragilidade_Tematica",
        "Baixa":   [0.6, 1.2],
        "Média":   [1.2, 1.8],
        "Alta":    [1.8, 2.5]);
classes_frag = Fatie (fragil, tab_fat);
}

```

Quando é atribuído maior ou menor importância a um geo-campo temático ou a qualquer uma de suas classes, realiza-se a interpretação do referido geo-campo segundo um determinado objetivo. É o que ocorre, por exemplo, quando se atribuem *pesos* (numa escala de valores arbitrários, por exemplo, entre 1 e 3) às classes de um geo-campo temático de vegetação, considerando sua capacidade de proteger o solo da ação das chuvas. Esta atribuição de *pesos* às classes de vegetação pode ser observada no texto realçado em vermelho dentro do programa em LEGAL acima.

Para ilustrar o conceito de mapas de distância, tomou-se como exemplo um geo-campo com a rede hidrográfica de uma região sobre a qual se precisa mapear uma suposta legislação que determine: **“é vedada a exploração predatória da flora e da fauna em uma faixa terra de 200 metros ao longo das margens dos rios”**.

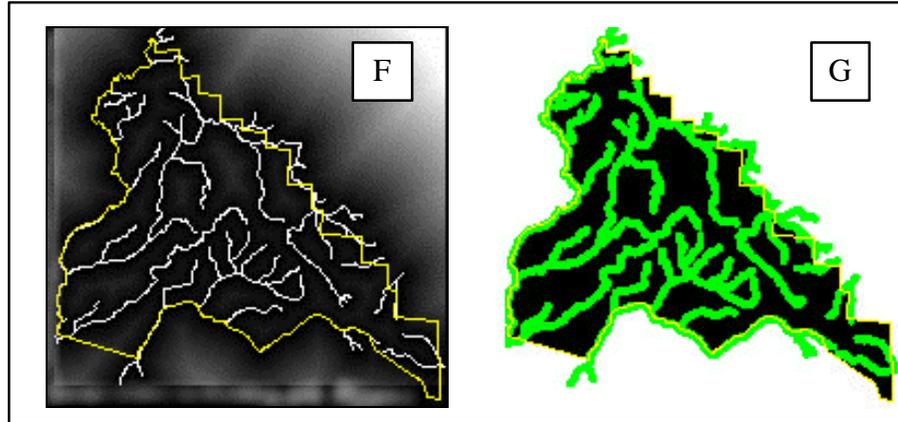


Figura. 4.17. *PI* de hidrografia sobre *PI* de distâncias (F) e *PI* legislação (G).

A Figura 4.17F mostra um *PI* de distâncias (numérico) gerado a partir do *PI* de hidrografia. A Figura 4.17G apresenta o resultado (temático) do *fatiamento* do *PI* de distâncias de acordo com a legislação estabelecida, ou seja, **uma faixa de proteção de 200 metros ao longo dos rios**.