

# MAPEAMENTO DE ÁREAS PERMEÁVEIS USANDO UMA METODOLOGIA ORIENTADA A REGIÕES E IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO

Jorge A. S. Centeno<sup>1</sup>

Alzir F.B. Antunes<sup>1</sup>

Sérgio Trevizan<sup>2</sup>

Fábio Correa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geomática UFPR

<sup>2</sup>Curso de Engenharia Cartográfica – UFPR

CP 19001 – Centro Politécnico, Jardim das Américas

Curitiba – PR

email: centeno@geoc.ufpr.br; felippe@ufpr.br;

sertre@bol.com.br; fabioc.moraes@bol.com.br

## RESUMO

No presente artigo, uma metodologia para a estimativa da porcentagem de áreas impermeabilizadas em bacias urbanas é apresentada e discutida. A abordagem se baseia no uso de imagens de alta resolução, fotografias aéreas e a análise orientada a regiões como alternativa para a identificação de diferentes tipos de objetos numa cena urbana. A projeção horizontal dos objetos, como telhados, ruas, pátios e calçadas, é estimada usando técnicas de segmentação de imagens e classificação fuzzy. Os resultados obtidos são comparados com o mapeamento obtido por restituição fotogramétrica, mostrando que o método proposto viabiliza uma estimativa confiável do percentual de áreas permeáveis e impermeáveis na região coberta pela imagem.

**Palavras chaves:** Segmentação, classificação orientada a regiões, áreas impermeáveis

## ABSTRACT

A methodology to estimate the percentage of impermeable areas in urban basins is presented and discussed. The approach is based on the use of high resolution images as an alternative that allows to identify object within an urban scene. The horizontal projection of the objects, as roofs, streets, gardens and sidewalks, are estimated using image segmentation techniques and fuzzy classification. The resulting thematic map is compared to the map obtained by photogrammetric restitution, showing that the proposed method makes it possible to obtain a reliable estimate of the total area of impervious objects.

**Key words:** segmentation, region-orientate classification, impermeable areas.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos estudos de hidrologia urbana, uma questão que merece especial atenção é a estimativa da permeabilidade do solo, pois o aumento indiscriminado de áreas impermeáveis é um dos principais agentes do incremento do escoamento superficial e ocorrência de enchentes. Embora os planos diretores determinem uma porcentagem de áreas permeáveis para cada região, tal diretriz é muitas vezes desrespeitada. O acompanhamento adequado é uma tarefa muito difícil, pois implica a observação de toda a superfície da bacia. Entre as alternativas para o mapeamento das áreas impermeabilizadas encontram-se os dados do sensoriamento remoto, seja sob

forma de fotografias aéreas ou sob forma de imagens de satélite.

As fotografias aéreas mostraram ser valiosas ferramentas para estudos urbanos, pois permitem a discriminação mais detalhada dos elementos que compõe a paisagem urbana. No entanto, a restituição fotogramétrica é uma tarefa onerosa. Até recentemente, os dados colhidos por sistemas de sensoriamento remoto a bordo de satélites encontravam uso limitado no estudo do ambiente urbano, devido a sua baixa resolução espacial. Recentemente, tais limitações foram superadas e imagens com resolução espacial em torno de um metro podem ser adquiridas, sendo que a expectativa é que imagens com maior resolução estejam disponíveis num

futuro próximo. A implementação de processos automáticos de análise de imagens de alta resolução espacial, sejam estas obtidas por sensores espaciais ou fotografias aéreas, requer a implementação de novos métodos e entre as opções disponíveis na atualidade se destaca a abordagem orientada a regiões, que em lugar de analisar a imagem pixel a pixel, adota como unidade de análise regiões uniformes, das quais pode ser obtida maior quantidade de informação para a classificação. No presente artigo, uma metodologia alternativa para o mapeamento de áreas permeáveis em regiões urbanas é apresentada e seus resultados comparados com a fotointerpretação visual.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Grande parte dos modelos hidrológicos que tratam da drenagem urbana necessita conhecer a área impermeável e a modificação das condições de escoamento das bacias devido à ocupação do solo, pois o aumento de áreas impermeáveis aumenta o escoamento superficial. A tabela 1 mostra a relação do aumento do volume de escoamento em bacias urbanas em função da taxa de impermeabilização, quando comparado com uma bacia rural, segundo estimado por TUCCI (2000). Nota-se que a impermeabilização de 7% da área dos lotes já acarreta a duplicação do escoamento superficial e que casos mais extremos, como a impermeabilização de 80% do lote, geram um volume de escoamento superficial oito vezes maior.

TABELA 1- IMPACTO DA URBANIZAÇÃO EM BACIAS URBANAS EM RELAÇÃO A UMA ÁREA RURAL.

Área impermeável No lote (%)	Aumento do volume de escoamento superficial em relação a uma bacia rural
7,0	2,1
20,0	3,2
33,3	4,3
46,7	5,4
60,0	6,4
73,0	7,5
80,0	8,6

Fonte: TUCCI (2000).

Uma boa estimativa da taxa de permeabilidade do solo pode ser alcançada por meio da restituição de fotografias aéreas. A restituição pode ser efetuada utilizando aparelhos que permitam a visão estereoscópica, como também pode ser efetuada usando técnicas de monorestituição digital (MITISHITA, 1997). O produto da restituição digital, em geral, é um mapa de alta qualidade, porém demanda muito tempo de execução e experiência na interpretação das fotografias.

Como a estimativa da taxa de permeabilidade demanda a análise de toda a região, a correlação entre a permeabilidade ou a ocorrência de áreas permeáveis/impermeáveis com outras informações, de mais fácil obtenção, foi pesquisada. Por exemplo, STANKOWSKI (1972) apontou que a densidade populacio-

nal pode ser utilizada como um indicador indireto da extensão da área impermeável em regiões urbanas. Utilizando esta abordagem, tornar-se-ia possível estimar a taxa de áreas permeáveis dos bairros de uma cidade, como Curitiba, segundo é mostrado na tabela 2 (CAMPANA e TUCCI, 1994). Outros autores, como MONDAY ET AL., 1994, apontam a possibilidade de estimar a taxa de áreas permeáveis em uma bacia urbana a partir do cálculo do tamanho dos lotes.

TABELA 2 - VALORES DE IMPERMEABILIZAÇÃO PARA A REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA, SEGUNDO A DENSIDADE POPULACIONAL EM 1988.

(Bairro)	Taxa de Áreas Impermeáveis (%)	Densidade Populacional (hab / Ha)
Água Verde	46,3	> 90
Centro	57,9	> 90
Rebouças	36,4	70 – 90
Prado Velho	22,0	35 – 50
J. d Américas	24,3	35 – 50
Bairro Alto	21,7	35 – 50
Xaxim	32,6	50 – 70
C. Comprido	5,3	10 – 20
Uberaba	14,0	20 – 35
Boqueirão	23,6	50 – 70

Fonte: CAMPANA e TUCCI (1994).

A utilização de processos automáticos de classificação de imagens de satélite tornou-se uma opção interessante para obter um mapa da cobertura do solo e, a partir dele, estimar a extensão de áreas permeáveis. Num trabalho pioneiro, RAGAN e THOMAS (1980) propuseram uma metodologia para estimar a permeabilidade do solo numa bacia a partir de imagens de satélite de média resolução, adaptando para isto os coeficientes do método do Soil Conservation Service (SCS). Sendo os principais parâmetros de entrada deste modelo definidos em termos do uso e do tipo do solo, uma estimativa foi obtida classificando imagens do sistema LANDSAT. Como o conjunto de classes que podem ser identificadas nestas imagens é muito menor em relação às classes do método do SCS, a lista de tipos de cobertura do solo teve que ser reduzida, conforme é mostrado na tabela 3.

TABELA 3. TIPO DE CURVA CARACTERÍSTICA EM RELAÇÃO AO USO DO SOLO.

Descrição do Uso do Solo	Tipo de Curva para os Grupos Hidrológicos de Solo			
	A	B	C	D
Árvores	25	55	70	77
Gramado	36	60	73	78
Residencial	60	74	83	87
Solo exposto	72	82	88	90
Altamente Impermeável	90	93	94	95

Fonte: RAGAN e THOMAS (1980)

Muitos dos trabalhos de estimativa de áreas impermeáveis a partir de dados espectrais de sensores orbitais são baseado na classificação do uso e cobertura do solo utilizando técnicas de classificação supervisionada e técnicas de análise de agrupamento estatístico informação (DEGUCHI e SUGIO, 1994; WILLIAMS e NORTON, 2000).

A resolução espacial dos sensores até recentemente disponíveis, que variava em torno de 10 a 30 metros, era insuficiente para o reconhecimento e adequado mapeamento dos objetos presentes numa cena urbana. Consequentemente, era difícil encontrar pixels puros numa imagem de satélite e a estimativa das classes de cobertura do solo era prejudicada. A incompatibilidade entre a resolução do sensor e a dimensão dos objetos presentes em uma cena urbana resulta em erros de estimação das áreas impermeáveis. Novas técnicas de classificação, como o modelo linear de mistura espectral (SHIMABUKURO e SMITH, 1991) e os métodos de classificação baseados em redes neurais (CIVCO e HURD, 1997) permitiram efetuar estimativas ao nível de sub-pixel.

Uma tentativa de estimar as diferentes proporções de tipos de cobertura do solo numa imagem de satélite SPOT é descrita em CAMPANA et al. (1992). O método proposto por CAMPANA et al. (1992), estima a presença de diferentes objetos dentro de um pixel utilizando funções de pertinência fuzzy. A lógica fuzzy permite representar graus de pertinência parcial de um pixel a uma classe e neste tipo de lógica, em contraste com a lógica booleana, um elemento pode pertencer a mais de uma classe. Comparando os valores da função de pertinência de um pixel em várias classes de uso do solo, a presença destas diferentes classes no pixel pode ser inferida.

Atualmente, dispõe-se de imagens que permitem diferenciar melhor os objetos presentes numa cena urbana devido à alta resolução espacial dos sistemas sensores. Com isto, a mistura de elementos é reduzida, mas o novo problema consiste em identificar adequadamente estes objetos, como casas, pátios e jardins, que frequentemente possuem características espectrais similares, e graus de permeabilidade diferentes. O aumento da resolução espacial aumenta a variabilidade dos objetos na cena e provoca diminuição da eficiência do agrupamento de pixels baseado somente na análise das variáveis espectrais, como fazem a maioria dos classificadores (SCHIEWE, TUFTE e EHLERS, 2001). Métodos alternativos, que utilizem também informação espacial, são necessários para contornar esta deficiência e aproveitar de melhor maneira os dados de imagens de alta resolução. Neste artigo, é apresentada uma metodologia que possibilita identificar estes objetos em imagens de satélite de alta resolução e com isto estimar a cobertura do solo e a permeabilidade numa bacia urbana, baseada na segmentação espacial-espectral de imagens e a posterior classificação dos segmentos seguido usando um classificador fuzzy.

### **3 ÁREA DE ESTUDO**

A área selecionada para o estudo compreende uma região residencial no município de Curitiba, pertencente ao bairro do Guabirota. As características principais deste bairro, quanto ao uso e ocupação do solo, são regulamentadas pela Lei nº 9800 de 03 de janeiro de 2000, que dispõe sobre o “Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo no Município de Curitiba”. De acordo com esta Lei, a maior parte do bairro do Guabirota está compreendida na Zona Residencial.

As classes presentes na região foram determinadas através de visitas de campo, sendo elas:

- edificações residenciais e comerciais de até dois pavimentos;
- arruamento pavimentado;
- calçamento nos jardins;
- cobertura residencial com diferentes tipos de materiais;
- cobertura vegetal rasteira, de médio porte, e árvores.

A base de dados utilizada neste trabalho é composta por fotografias aéreas e por uma imagem pancromática do sistema IKONOS. O sistema IKONOS diferencia-se de seus antecessores por sua alta resolução espacial, de 1 metro em seu modo pancromático. Este sistema também possibilita a obtenção de imagens multiespectrais, não disponíveis para este trabalho. No entanto, a informação multiespectral que poderia ser obtida de uma imagem IKONOS multiespectral (bandas 1, 2 e 3) é similar à contida em uma fotografia aérea vertical. Como não se encontravam disponíveis as bandas multiespectrais deste sistema, uma fotografia aérea colorida vertical, com resolução similar à oferecida pelo sistema IKONOS, foi usada para simular uma imagem multiespectral. A combinação da fotografia aérea com a imagem IKONOS permite utilizar informação da região do visível e do infravermelho próximo, pois a banda pancromática do IKONOS cobre uma faixa espectral de 0,7 a 0,9  $\mu\text{m}$ .

### **4 METODOLOGIA**

O primeiro passo foi a obtenção de um mapa das áreas impermeáveis ou permeáveis a partir de fotografias aéreas pelo método da monorestituição digital. Este mapa foi adotado como verdade de campo confiável para avaliar a qualidade do mapa temático obtido pelo processamento das imagens de satélite de alta resolução.

As fotografias aéreas foram interpretadas visualmente, traçando polígonos em torno dos objetos reconhecidos e atribuindo estes objetos a uma das classes de consideradas no estudo, que são: “edificações residenciais e comerciais de até dois pavimentos”, “arruamento pavimentado”, “calçamento nos jardins”, “pátios com diferentes tipos de materiais”, “cobertura vegetal rasteira de médio porte” e “árvores”. Estas classes foram separadas em dois grupos: áreas permeáveis e áreas impermeáveis, sendo consideradas áreas impermeáveis

as cobertas por: “edificações residenciais e comerciais”, “arruamento pavimentado”, “calçamento nos jardins” e “pátios”.

A seguir, uma segunda estimativa das áreas ocupadas pelas diferentes coberturas foi obtida a partir da imagem pancromática e a fotografia aérea, utilizando a abordagem automatizada orientada a regiões.

As imagens foram inicialmente submetidas ao processo de correção geométrica usando pontos de controle levantados por GPS. O levantamento por GPS foi executado pelo método de posicionamento relativo, utilizando a técnica estática rápida (KRUEGER, 1999). Os resíduos médios quadráticos dos pontos de controle foram analisados para avaliar a qualidade do produto, tendo sido calculado um erro quadrático médio de 1,06 pixels, considerado satisfatório por se tratar de imagens com resolução espacial de 1 metro.

#### 4.1 Segmentação

Após a correção geométrica, as imagens foram segmentadas e interpretadas usando o sistema *eCognition* de processamento de imagens. A segmentação consiste em dividir a imagem em regiões contínuas menores, de maneira que todos os pixels em um segmento tenham propriedades similares (GONZALES e WOODS, 2000). No caso mais geral, a propriedade comum é a cor dos pixels. Então, o objetivo do algoritmo de segmentação nada mais é do que identificar regiões uniformes que correspondam aos objetos (ou partes deles) visíveis na imagem.

O algoritmo utilizado divide a imagem em pequenos segmentos com alto grau de uniformidade, guardando a associação espacial entre os segmentos. Esta informação permite, posteriormente, combinar segmentos adjacentes para formar regiões maiores, não apenas com características espectrais similares, mas também obedecendo a um critério de forma pré-estabelecido. Um balanço entre a forma dos segmentos e sua uniformidade espectral é responsável pelo crescimento direcionado dos segmentos.

Para segmentar a imagem, optou-se por utilizar a “segmentação espacial-espectral” do programa *eCognition*, pois uma das grandes desvantagens do agrupamento puramente espectral convencional é não considerar a característica espacial dos objetos na imagem, o que resulta em baixa eficiência quando aplicados a imagens de alta resolução espacial. Segundo SCHIEWE, TUFTE e EHLERS (2001), a alta resolução dos sensores aumenta o campo de variabilidade, e conseqüentemente o decréscimo operacional do agrupamento baseado somente na variância espectral.

A fim de superar as limitações dos segmentadores convencionais em imagens multiespectrais de alta resolução espacial, os estudos mais recentes se voltam a analisar a imagem como uma coleção de objetos de estrutura vetorial aos quais podem ser associadas as informações espectrais. Desta forma, o aspecto espacial possui um importante papel e pode ser descrito por relações topológicas entre os objetos vizinhos e o pro-

cedimento de segmentação pode ser moldado de acordo com a resolução da imagem e com a escala (tamanho) esperada para os objetos (BAATZ e SCHÄPE, 2001).

BLASCHKE et al. (2000) comenta que não existe uma escala ideal para os objetos. O olho humano reconhece pequenos e grandes objetos simultaneamente, mas não consegue distinguir exatamente dimensões. A detecção de um objeto pode ser tratada de acordo com a resolução do sensor, em geral a escala de um objeto da imagem deve ser significativamente maior que a escala do ruído relativo à textura. Isto assegura que a segmentação subsequente possa ser gerada a partir de objetos significativos. Os objetos relativos aos diferentes níveis de segmentação, tanto no âmbito espacial quanto no âmbito temático, podem ser combinados de forma a compor um determinado aplicativo.

Usando este algoritmo, a imagem multiespectral e a imagem pancromática do IKONOS foram segmentadas juntas, procurando estabelecer regiões que correspondessem às seguintes classes:

- Áreas permeáveis: caracterizadas por áreas de vegetação, tais como: jardins, gramados, árvores e solo exposto.
- Áreas impermeáveis: telhados, pátios, pavimentação asfáltica e calçamento.

Em alguns casos foi necessário subdividir as classes de interesse para facilitar a diferenciação espectral. Por exemplo, três tipos de telhado foram diferenciados em função da resposta espectral de seu material: telhados de zinco, telhados cerâmicos novos e telhados cerâmicos velhos. As áreas de vegetação também foram divididas em função de sua densidade, como sendo vegetação arbustiva e vegetação rasteira (gramados e jardins). O resultado é um grande número de segmentos, objetos primitivos da imagem, que numa fase posterior podem ser classificados.

#### 4.2 Classificação dos segmentos

O método de classificação utilizado neste trabalho é do tipo supervisionado. Neste caso, o usuário é responsável pela determinação das características das classes escolhendo amostras representativas na imagem. A partir das amostras de treinamento, é possível analisar a variação dos parâmetros espectrais e espaciais que caracterizam cada classe e iniciar um processo de classificação de todos os segmentos.

O algoritmo de classificação é baseado na lógica fuzzy. Nesta abordagem, o grau de pertinência de um elemento em um conjunto é descrito por uma função contínua, com valores variando entre zero (o elemento não pertence ao conjunto) e um (quando o elemento pertence totalmente ao conjunto). Valores intermediários descrevem um grau de pertinência parcial e um elemento pode ser associado a mais de um conjunto. A figura 1 mostra duas funções de pertinência fuzzy: uma que descreve o grau de pertinência dentro da classe “telhado” e outra que descreve a pertinência no conjunto “árvore” em função de um parâmetro de forma. Como pode ser visto neste gráfico, um mesmo elemento pode

pertencer a dois, ou mais, conjuntos com diferentes graus de pertinência (eixo vertical), sendo que o grau de pertinência depende do valor do fator de forma em questão (eixo horizontal).

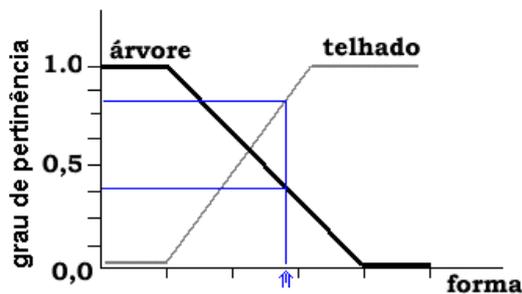


FIGURA 1- EXEMPLO DE FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA FUZZY.

Seja  $X$  um espaço de objetos (neste caso os segmentos) e  $x$  um elemento qualquer de  $X$ . Um conjunto clássico  $A$ ,  $A \subseteq X$ , é definido como uma coleção de elementos ou objetos  $x \in X$ . Nesta relação, cada  $x$  pode pertencer ou não ao conjunto. Na lógica fuzzy, o elemento pode pertencer ao conjunto com diferentes graus de pertinência. Esta relação é representada por uma função de pertinência fuzzy  $\mu_A(x)$ .

A escolha destas funções, na prática, é feita a partir de amostras. Na imagem segmentada, regiões características para cada classe são escolhidas e elas são utilizadas para analisar a faixa de variação de cada parâmetro (cor, forma, textura). Nesta análise, é também possível determinar as variáveis que mais contribuem para a caracterização de cada classe. Para cada uma destas variáveis, a função de pertinência é determinada de maneira interativa, escolhendo funções e analisando o efeito de cada uma delas na discriminação dos objetos. As funções de pertinência podem então ser combinadas usando os operadores lógicos fuzzy. Assim, uma descrição de cada classe é obtida em função dos parâmetros espaciais e espectrais. Os operadores lógicos utilizados foram a união, a interseção e a negação. Dado dois conjuntos fuzzy  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ , os operadores citados podem ser escritos como:

$$U(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)); \quad (1)$$

$$\cap(\mu_A(x) \text{ e } \mu_B(x)) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)); \quad (2)$$

$$\neg \mu_A(x) = 1 - \mu_A(x). \quad (3)$$

#### 4.3 Parâmetros para a descrição das classes

Um segmento pode ser descrito em termos dos valores de todos os pixels que o compõem (informação espectral) e a distribuição espacial dos mesmos na imagem (informação espacial). Neste trabalho, apenas os dados espectrais foram considerados. Para a descrição das características das classes de interesse foram usados os parâmetros: média, brilho e proporção de cor.

**Média:** É o valor médio ( $C_k$ ) de todos os pixels ( $x_{ki}$ ) que compõem o segmento em uma determinada banda espectral:

$$C_k = (1/n) \sum x_{ki} \quad (4)$$

onde, “n” é a área do segmento “j”.

**Brilho:** Corresponde ao valor da intensidade espectral média, calculado como a soma dos valores médios em todas as bandas espectrais ( $C_k$ ) dividido pelo número de bandas ( $n_L$ ):

$$b = (1/n_L) \sum C_k \quad (5)$$

**Proporção de cor:** Representa o predomínio de uma determinada cor acima das outras. A relação ( $r_k$ ) de uma banda qualquer “k” é o valor médio desta banda ( $C_k$ ), dividido pela soma de todos os valores médios das bandas espectrais ( $C_i$ ):

$$r_k = C_k / \sum C_i \quad (6)$$

## 5 RESULTADOS

Um recorte da imagem foi utilizado para efetuar os testes. Este recorte abrange uma área de 426x436 pixels, com resolução espacial de 1 metro. Uma série de testes foi efetuada com a finalidade de determinar os parâmetros mais apropriados para a segmentação da cena urbana. Devido à variada resposta espectral dos objetos, o tamanho dos segmentos foi mantido pequeno, pois um mesmo objeto pode ter diferentes aparências, como por exemplo telhados de diferentes materiais. A geração de segmentos menores favorece sua posterior combinação para a obtenção de regiões maiores, estas sim associadas aos limites espaciais dos objetos.

Os segmentos resultantes foram posteriormente classificados dentro dos grupos de tipos de cobertura do solo. Para cada classe, são escolhidos segmentos de treinamento, representativos e, a partir deles, a variação dos parâmetros espectrais é analisada. Com estes dados, as propriedades mais relevantes para cada classe são identificadas e funções de pertinência são propostas para cada variável. A combinação de variáveis é feita usando o operador fuzzy lógico “e”. Por exemplo, um telhado de cerâmica é descrito como uma região que satisfaz:

“proporção de cor (vermelho)” = “alta” e  
 “variância da intensidade” = “baixa” e  
 “compacidade” = alta.

Ou, utilizando funções de pertinência fuzzy, a função de pertinência associada ao evento “o segmento pertence à classe telhado de cerâmica” pode ser obtida a partir das funções de pertinência associadas a cada variável:

$$\mu_{\text{Cerâmica}} = \mu_{(\text{vermelho ALTA})} \cap \mu_{(\text{variância(I) BAIXA})} \cap (\mu_{\text{Compacidade ALTA}}) \quad (7)$$

A escolha das funções é a etapa mais crítica do trabalho, visto que a definição das funções de pertinência envolve um alto grau de subjetividade e é função da experiência do analista. O resultado da aplicação destas regras para todos os segmentos é uma imagem temática onde é possível discriminar as fronteiras dos objetos presentes. As classes de objetos foram então agrupadas nos dois grupos de interesse: “Áreas permeáveis”, composto por “jardins”, “gramados”, “árvores” e “solo exposto” e “Áreas impermeáveis”, que agrupa as classes: “telhados”, “pátios”, “pavimentação asfáltica” e “calçamento”.

### 5.1 Avaliação da estimativa de áreas permeáveis

Com a finalidade de verificar a eficiência da metodologia proposta para a estimativa do percentual de áreas permeáveis, o resultado obtido foi comparado com a estimativa derivada da monorestituição digital, considerada isenta de erros, contendo apenas erros pertinentes aos procedimentos fotogramétricos.

Para fins de comparação, escolheu-se duas quadras dentro da área de estudo e comparou-se o resultado da classificação temática das imagens em relação à restituição. As figuras 2 e 3 mostram a distribuição espacial das áreas permeáveis na primeira quadra, bem como os limites espaciais dos objetos obtidos por ambos os métodos. Os respectivos valores da percentagem de área permeável por lote, estimados por meio da monorestituição e da classificação das imagens multiespectrais, são mostrados nas tabelas 4 e 5.

TABELA 4. ESTIMATIVA DA PORCENTAGEM DE ÁREAS PERMEÁVEIS PELOS MÉTODOS DA MONORESTITUIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO PARA A QUADRA 1 DE VERIFICAÇÃO.

lote	área total (m <sup>2</sup> )	Monorestituição	Classificação
1	650,2	51,1	58,2
2	543,9	35,5	47,2
3	562,5	44,5	49,3
4	505,7	45,8	18,3
5	555,6	23,8	23,6
6	345,0	46,5	29,6
7	332,5	44,2	49,9
8	278,7	22,3	18,6
9	387,3	26,4	29,0
10	562,0	6,2	3,4
11	498,9	41,1	62,9
12	528,0	100,0	66,8
13	564,8	12,3	1,9
14	587,7	3,9	6,2
	média	36,0	33,2

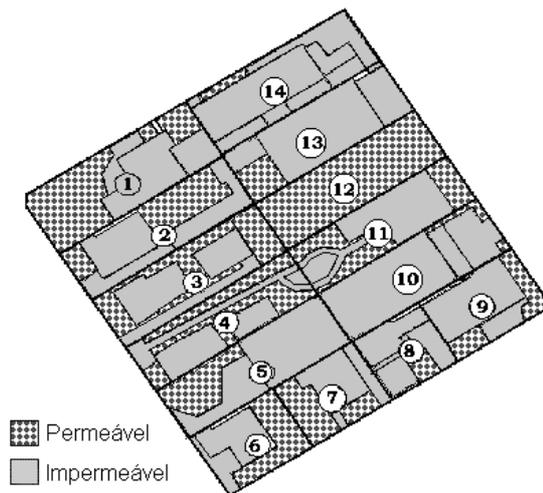


Figura 2. Produto da Monorestituição.

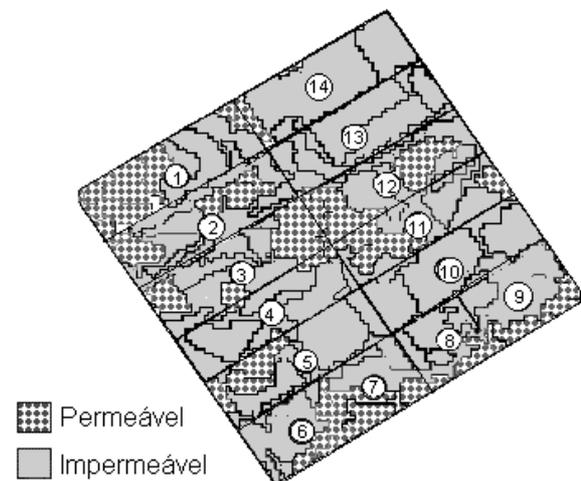


Figura 3. Produto da Segmentação.

Pode-se observar que a discrepância entre o valor médio do percentual de permeabilidade obtido pela classificação temática em relação à restituição, para a quadra 1, é de 6,7%. Já para a segunda quadra, este valor chega a 36,0%. A diferença chega a ser grande quando se analisa cada lote, principalmente porque as construções, pátios e jardins não foram bem delineados na segmentação. Esta constatação fica evidente ao analisar visualmente as figuras 2 e 3. A diferença também pode ser explicada pelo fato da monorestituição ser feita ao nível do chão, restituindo os contornos dos jardins e prédios. Já a análise baseada na segmentação da imagem se refere à cobertura do solo à altura do dossel. Com isto, as copas das árvores são identificadas como áreas permeáveis, mesmo quando elas ocorrem acima de outros objetos, como tetos e pátios.

Para fins de verificação, comparou-se a taxa de permeabilidade por lote obtida pelos dois métodos com a taxa mínima de permeabilidade, especificada pela Lei municipal nº 9800, que regulamenta o uso e a ocupação do solo para o município de Curitiba. Segundo esta

regulamentação, os lotes deveriam ter um mínimo de 25% de área permeável. A verificação aponta lotes nos quais tais limites não são respeitados e esta constatação é visível também na imagem temática. Na maioria dos casos, a estimativa derivada da imagem temática coincide com o resultado da monorestituição, mas existem diferenças significativas, como é o caso do lote 21 da segunda quadra.

TABELA 5 - ESTIMATIVA DA PORCENTAGEM DE ÁREAS PERMEÁVEIS PELOS MÉTODOS DA MONORESTITUIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO PARA A QUADRA 2 DE VERIFICAÇÃO.

lote	área total (m <sup>2</sup> )	Monorestituição	Classificação
15	568,0	24	10,6
16	394,7	16,7	14,1
17	404,1	10,8	8,1
18	385,5	10,2	14,3
19	591,7	37,9	37,6
20	570,1	48,5	34,2
21	389,7	42,8	5,5
22	394,7	14,2	6,6
23	389,9	22,4	4,6
24	522,0	24,7	18,7
	média	25,2	14,0

Aplicando um teste T, foi verificado que, a um nível de significância de 95%, o resultado obtido pela análise da imagem temática é compatível com o resultado da monorestituição. Isto é, não existe diferença significativa entre as médias populacionais dos dois métodos.

A correlação existente entre as estimativas do percentual da permeabilidade obtido a partir da imagem temática e a resultante da monorestituição, considerando os 24 lotes, foi de 77%, portanto existe um alto grau de correspondência entre as estimativas. A figura 4 mostra um gráfico onde as duas estimativas são confrontadas. Para a elaboração deste gráfico, o lote 21 não foi incluído, por ser considerado um erro grosseiro.

A diferença entre as estimativas da permeabilidade é ainda menor quando se comparam regiões maiores, como um conjunto de quadras, pois os erros tendem a se compensar mutuamente. Por exemplo, considerando as duas quadras de verificação, a monorestituição aponta um percentual de áreas permeáveis de 26,8%, enquanto da imagem temática é deduzido um valor de 32%. Nestas circunstâncias, o erro da imagem temática em relação à monorestituição é de 16,4%.

A análise anterior é uma comparação da cobertura do solo ao nível de quadra. No entanto, para a estimativa do percentual de áreas permeáveis numa bacia deve-se levar em consideração também ruas e outras áreas como parques e áreas verdes. Neste caso, a diferença entre a estimativa obtida pelo processo de segmentação em relação à monorestituição é ainda menor. A tabela 6 mostra a comparação das proporções de áreas

permeáveis dentro de toda a área de estudo obtida pelos dois métodos. Na mesma tabela, a estimativa de áreas permeáveis segundo o critério da densidade populacional também é mostrada.

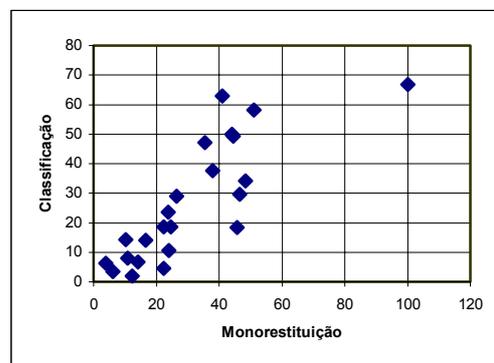


FIGURA 4 - COMPARAÇÃO DA PORCENTAGEM DE ÁREA PERMEÁVEL USANDO OS DOIS MÉTODOS.

TABELA 6. COMPARAÇÃO DA ESTIMATIVA DE ÁREAS PERMEÁVEIS ENTRE VÁRIOS MÉTODOS.

Taxa (%)	Restituição	Classificação	Dens. Pop.
Impermeável	61,1	61,2	75,7
Permeável	37,6	38,8	24,3
Outros	1,3	-	-

A análise comparativa destes resultados comprova que a diferença absoluta do percentual de permeabilidade é de 1,2%, validando o uso do método proposto. As vantagens do método baseado na análise da imagem temática tornam-se mais evidente quando se compara seu resultado com aquele obtido usando a densidade populacional. Neste caso, adotou-se o valor correspondente ao bairro vizinho Jardim das Américas, pois possui as mesmas características de ocupação. O método baseado na densidade populacional subestima a ocorrência de áreas permeáveis nesta região. Isto já era esperado, pois este método é simples e não leva em consideração as características da urbanização, como o tamanho do lote, o tamanho das casas e o grau de pavimentação dos pátios, fatores que são visíveis nas imagens de alta resolução.

O mapa temático gerado para toda a área de estudo mostra coerência e permite analisar a distribuição espacial da cobertura em termos de permeabilidade. Os erros do método da segmentação de imagens podem ser atribuídos à inadequada identificação dos objetos. Por um lado, a representação em formato varredura traz implícito um erro na estimativa de áreas. Por outro lado, houve deficiência na identificação dos contornos de alguns objetos, principalmente pela presença de sombra e a confusão espectral das classes. Algumas classes, como por exemplo telhados de cimento e pátios pavimentados, possuem as mesmas características espectrais e, ao mesmo tempo, ocorrem com formas similares. Este fato torna impossível sua diferenciação. No entanto, este erro pode ser desconsiderado, visto que ambos objetos são, na análise final, atribuídos à classe de áreas

impermeáveis. Por outro lado, quando esta confusão ocorre entre solo nu e telhados, o erro na estimativa do total de áreas permeáveis passa a ser significativo. Neste experimento, algumas edificações com cobertura de telhas cerâmicas, de cor vermelha, foram confundidas com áreas cobertas por vegetação rasteira, onde o solo encontra-se visível, visto que a cor das telhas é parecida à cor do solo na região. Da mesma forma, edificações com cobertura de zinco não foram diferenciadas de solos claros.

## 6 CONCLUSÕES

Em geral, o resultado derivado da análise da imagem temática apresentou-se compatível com a monorestituição e demonstrou que é possível utilizar a segmentação orientada a objeto e classificação fuzzy em imagens de alta resolução para a determinação da porcentagem de permeabilidade do solo urbano. As estimativas coincidem com os resultados de uma monorestituição digital, especialmente quando a análise é feita numa área extensa. Ao nível de lote, a identificação dos mesmos ainda é precária, mas esta deficiência não é relevante quando se deseja conhecer a porcentagem de áreas permeáveis numa área maior, pois neste caso os erros se compensam.

O uso da lógica fuzzy permite a representação de conhecimento, adaptando o método para a identificação de áreas impermeabilizadas. A vantagem é que, uma vez escolhidas, as funções podem ser aplicadas a imagens com características similares, oferecendo uma boa alternativa para uma classificação digital. O problema pode tornar-se complexo quando o número de funções é elevado, o que tornaria sua escolha uma tarefa crítica no processo. Por este motivo, é recomendado usar um número restrito de variáveis, que devem ser escolhidas criteriosamente.

## 7 REFERÊNCIAS

- BAATZ, M & SCHÄPE, A. **Mutiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation**. München. Disponível em <www.definiens.com> (março 2001).
- BLASCHKE, T, LANG, S, LORUP, E, STROBL, J & ZEIL, P. **Objected oriented image processing in an integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for environmental applications**. Environmental information for planning. Vol 2. Metropilis-Verlag. 2000.
- CAMPANA, N.A. ; HAERTEL, V.; TUCCI, C.E.M.: **Estimativa de Áreas Impermeáveis através de Sensoriamento Remoto**, Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Recursos Hídricos, ABRH, Vol. 10, Nº. 2, Pág. 51-59, Porto Alegre, 1992.
- CAMPANA, N.A. ;TUCCI, C.E.M.: **Estimativa de Área Impermeável de Macro-Bacias Urbanas**, Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Recursos Hídricos, ABRH, Vol. 2, Nº. 2, pág. 79-93, 1994.
- CIVCO, D.L. e HURD, J.D.: **Impervious Surface Mapping for the State of Connecticut. Proceedings of the 1997 ASPRS Annual Conference**, Seattle, WA, 3: 124-135. 1997.
- DEGUCHI, C.; SUGIO, S.: **Estimations for Percent Impervious Area by the Use of Satellite Remote Sensing Imagery. Water Science and Technology**, 29(1-2): 135-144. 1994.
- GONZALES, R.C.; WOODS, R.E.: **Processamento de Imagens Digitais**, Ed. Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 2000.
- IPPUC-IPARDES. : **Histórico de Dados do Município de Curitiba**, Pág. 163, Curitiba, 1991.
- KRUEGER, C.P.: **GPS: Conceitos e Aplicações**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.
- MONDAY, H.M.; URBAN, J.S.; MULAWA, D.; BENKELMAN, C.A., 1994. **City of Irvine Utilizes High Resolution Multispectral Imagery for N.P.D.E.S. Compliance. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 60(4): 411-416.
- MITISHITA, E. A. : **Monorestituição Digital da Aero-fotos, Associada com Sistema de Computação Gráfica C.A . D., para Fins de Mapeamento na Área Florestal**, Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, UFPR, Curitiba, 1997.
- RAGAN, R. M.; THOMAS, J. J.: **Runoff Synthesis using Landsat and SCS Model**, Jornal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.106, Nº. HY5, Pág. 667-678, Maio,1980.
- SCHIEWE, J , TUFTE, G, EHLERS, M. **Potencial and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing**. Disponível em: <www.definiens.com/documentation>. (Nov. 2001).
- SHIMABUKURO, Y.; SMITH, J. A.: **The least-squares mixing models to generate fraction images derived from Remote Sensing multispectral data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.29, n.1, p.16 - 20, 1991.
- STANKOWSKI, S.F.: **Population Density as na Indirect Indicator of Urban and Suburban Land Surface Modifications**, U.S. Geological Survey Professional Paper, 800-B, PP b219-b224, 1972.

TUCCI, C. E. M.: **Coefficiente de Escoamento e Vazão Máxima de Bacias Urbanas.**, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, RBRH, Vol. 5, Nº. 1, Pág. 61-68, Janeiro/Março, 2000.

WILLIAMS, D.J.; NORTON, S.B.: Determining Impervious Surfaces in Satellite Imagery using Digital Orthophotography. **Proceedings of the ASPRS Annual Conference**, Washington D.C. Maio 22-26, 2000.

## **8 AGRADECIMENTOS**

Os autores desejam agradecer à fundação Araucária que financiou o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, através do projeto 2000/1, No.234.

Recebido em 24 de julho de 2003 – Aceito para publicação em 30 de novembro de 2003.