

LIMITAÇÕES BÁSICAS NO TRATAMENTO DIGITAL DOS DADOS LANDSAT (MSS)

HANS-PETER BAHR

Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Universität Hannover

Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas

Universidade Federal do Paraná

Caixa Postal 1611, 80000 - Curitiba - Brasil

RESUMO

O autor resume as experiências do tratamento digital de dados LANDSAT (MSS) na Universidade de Hannover (República Federal da Alemanha). Na área da geometria, a precisão do processamento digital está limitada teoricamente a aproximadamente $1/3$ do comprimento de um pixel, correspondente a aproximadamente 25m. Praticamente, obtemos uma precisão de aproximadamente 40m, aplicando polinômios de segunda ordem. Modelos matemáticos mais rígidos ("soluções fotogramétricas") não fornecem resultados melhores para imagens LANDSAT. Na área do processamento semântico ("classificação multiespectral"), a precisão é também limitada através do comprimento de um pixel, tendo em vista "assinaturas mistas" nas margens dos objetos. Além disso, outros fatores contribuem erros, de modo que os resultados das classificações frequentemente são piores que do esperado. As análises teóricas são acompanhadas de exemplos práticos.

ABSTRACT

The paper resumes the experiences in digital processing of LANDSAT MSS data at Hannover University (Federal Republic of Germany). In the geometric domain, the precision of digital processing is theoretically limited to approx. $1/3$ of a pixel's diameter, which corresponds to approx. 25m. In practise we obtain approx. 40m using second-order polynomials. More rigorous mathematical models (so-called "photogrammetric solutions") do not produce better results for LANDSAT MSS imagery. In the semantic domain ("multispectral classification"), the precision is limited by the pixel's diameter, too, considering mixed signatures at object borders. Beyond this factor, others contribute errors, too, so that the final quality of classification results is frequently below the expected. The theoretical analysis is accompanied by practical examples.

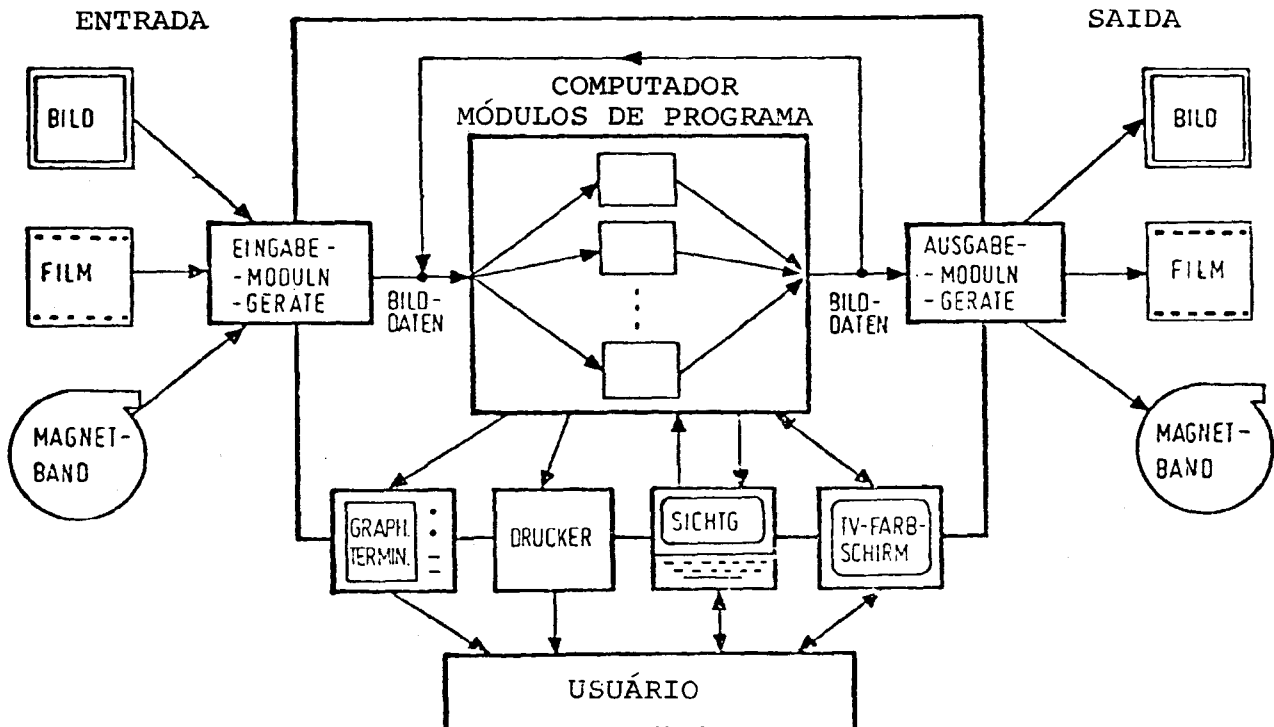
1. SISTEMAS DE TRATAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Sem dúvida, o progresso máximo no sensoriamento remoto foi possível mediante o processamento numérico de dados obtidos numa forma digital. Contudo, é necessário dar-se conta de umas limitações dos processos digitais, em outras palavras, de não esperar milagres através do método mais sofisticado e moderno.

A fig. 1 mostra o esquema de um sistema comum de processamento digital de imagens (tipo "diálogo"). Todos os sistemas modernos têm uma estrutura semelhante. Infelizmente, o maior número dos usuários usa o sistema como "caixa preta", sem conhecer o funcionamento dos módulos que aplicam. Conseqüentemente será difícil, ou mesmo impossível, para aquele grupo de usuários de avaliar a qualidade dos resultados obtidos. É indispensável, particularmente para entidades de pesquisa como universidades ou o INPE, desenvolver seus próprios módulos em vez de simplesmente comprar sistemas completos.

Figura 1

Sistema DIBIAS do "Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR)" em Oberpfaffenhofen/Bavaria (Fonte: DIBIAS - Handbuch, DFVLR)



2. LIMITAÇÃO NA RESOLUÇÃO

Dois aspectos afetam a resolução das imagens digitais tomadas do satélite: a quota limitada da transmissão dos dados coletados, e os custos do processamento digital nos computadores. A quantidade de aproximadamente 3200 por 2300 pixels (por 4 canais) de LANDSAT-MSS ainda significa hoje um limite para o processamento digital a custos razoáveis. Se nos quisermos reproduzir os dados originais do scanner rigorosamente, sem perder informação, seria necessário interpolar entre os pixels numa linha através da função seguinte:

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} f(n\tau) \frac{\text{sen}\left(\frac{\pi x}{\tau} - n\pi\right)}{\frac{\pi x}{\tau} - n\pi} \quad (1)$$

ver (Pratt, Bähr, 1980).

τ é a distância entre os pixels ("o período de amostragem"), $f(n\tau)$, o valor do pixel n . Claro que geralmente essa interpolação é negligenciada (por motivos econômicos, porque a interpolação aumentaria consideravelmente a quantidade das pixels), resultando numa perda da resolução original. Assim, comparando a resolução de LANDSAT MSS com a resolução e fotos comuns, temos que proporcionar um par de linhas com três pixels.

Câmaras fotogramétricas têm uma resolução de mais ou menos 35 pares de linhas por milímetro (lp/mm), o que não é muito bom, porque no "design" da lente foi considerado mais importante as qualidades geométricas. A resolução de LANDSAT-MSS, todavia, corresponde só a uma foto 23cmx23cm com 3,3 lp/mm ou a 237m para um par de linhas na terra. Por consequência, não podemos esperar a densidade de informação em imagens LANDSAT-MSS que encontramos em fotos comuns. Ao olho humano, o tamanho 15cm x 15cm para uma imagem de LANDSAT-MSS é adequado, tendo uma resolução de aproximadamente 5 lp/mm a uma distância de 30cm. Isto corresponde a uma escala de 1:1.000.000. As ampliações enormes, que nós encontramos freqüentemente, não melhoram a qualidade das imagens, apresentando só "bonito papel pintado para as paredes" (*).

3. A PRECISÃO GEOMÉTRICA

Existe um limite teórico para a precisão geométrica em imagens numéricas, sendo aproximadamente

$\pm A/3$ (ver Bähr, 1976), onde A é a dimensão dos pixels. Com respeito a LANDSAT-MSS chegamos assim a uma precisão de $\pm 25m$ que poderíamos derivar teoricamente. Os resultados práticos têm que ser considerados com vista a esse valor.

Uma solução rigorosa ("fotogramétrica") para o processamento geométrico de LANDSAT-MSS exige a aplicação de equações de colinearidade:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \underline{D}_{u,i,\Omega}^T \left(\underline{D}_{\phi,\omega,\kappa}^T \underline{D}_{\theta}^T \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -d'_{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{pmatrix} \right) \quad (2)$$

ver (Bähr, 1976). $(X,Y,Z)^T$ significam as coordenadas geocêntricas, $\underline{D}_{u,i,\Omega}$ a matriz de rotação com elementos orbitais, $\underline{D}_{\phi,\omega,\kappa}$ a matriz de rotação com elementos de orientação do satélite, \underline{D}_{θ} a matriz de rotação para a posição dos pixels, d'_{θ} a distância entre o satélite e um

ponto na Terra, e r a distância entre o satélite e o geocentro.

Felizmente é possível, na prática, substituir as fórmulas rigorosas através de expressões muito mais simples, como transformação de similaridade:

$$X = a_0 + a_1 x' - a_2 y' \quad (3)$$

$$Y = b_0 + a_2 x' + a_1 y'$$

transformação afim:

$$X = a_0 + a_1 x' + a_2 y' \quad (4)$$

$$Y = b_0 + b_1 x' + b_2 y'$$

Polinômio de segunda ordem:

$$X = a_0 + a_1 x' + a_2 y' + a_3 x'^2 + a_4 y'^2 + a_5 x' y' \quad (5)$$

$$Y = b_0 + b_1 x' + b_2 y' + b_3 x'^2 + b_4 y'^2 + b_5 x' y'$$

X,Y são as coordenadas terrestres planas (mapas), x',y' coordenadas das imagens e a,b parâmetros particulares, a determinar mediante um cálculo de ajustamento. A transformação de similaridade corresponde a uma projeção da imagem num mapa, não afeta a geometria interna da imagem. A transformação afim introduz duas escalas nas direções x' e y' . Polinômios de segunda ordem, finalmente modificam a geometria das imagens de uma maneira não-linear, independentemente das duas direções. É possível mostrar que os resultados obtidos através de polinômios de segunda ordem correspondem aos resultados obtidos com as fórmulas rigorosas (2).

Tabela 1 mostra resultados obtidos por (3), (4) e (5), para duas imagens LANDSAT-MSS: "Bavária" e "Alemanha do Norte". Pontos de apoio usados para calcular os parâmetros a,b foram determinados em mapas na escala de 1:50.000, As imagens foram subdivididas nos quadrantes 2, 3,4,5, enquanto que a parte 1 corresponde à área total das imagens.

(*) Segundo palavras do Senhor Presidente da Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, F.DOYLE (Canberra,4/82).

Nós constatamos os efeitos seguintes:

Área	"BAVÁRIA"						"ALEMANHA DO NORTE"							
	Pontos apoio max.	Pontos apoio usados	Similaridade		Polinômios		Pontos apoio max	Pontos apoio usados	Similaridade		afim		Polinômios	
			m _x [±]	m _y [±]	m _x [±]	m _y [±]			m _x [±]	m _y [±]	m _x [±]	m _y [±]	m _x [±]	m _y [±]
1	234	234	215,0	245,3	43	49	82	82	322,8	356,3	112,4	109,4	65,7	80,5
		9	239,5	260,7	53	54	9	9	340,9	359,8	77,7	125,9	77,7	104,3
		4	223,2	309,7	-	-	4	4	293,2	479,1	130,8	168,7	-	-
2	43	43	133,3	118,2	41	32	26	26	92,4	112,1	81,3	85,6	58,5	43,6
		9	130,4	133,9	54	42	9	9	97,6	118,0	78,6	90,4	64,4	45,9
		9	114,9	178,6	-	-	4	4	95,2	120,1	88,2	97,2	-	-
3	62	62	112,9	136,6	37	45	18	18	193,2	201,1	66,3	55,2	27,8	24,9
		9	162,6	108,9	39	55	9	9	159,4	246,1	67,7	54,6	33,0	34,2
		4	141,8	138,2	-	-	4	4	187,6	258,3	92,4	74,0	-	-
4	49	49	75,3	98,9	39	47	17	17	160,1	103,6	57,0	50,7	42,0	33,1
		9	76,8	97,6	42	52	9	9	147,7	127,0	55,3	58,7	60,4	59,4
		4	77,1	98,4	-	-	4	4	166,7	99,1	65,9	56,9	-	-
5	80	80	180,2	171,1	45	44	21	21	241,6	296,2	94,2	153,1	37,3	47,1
		9	176,8	175,6	56	48	9	9	306,0	268,1	133,3	133,7	45,0	57,0
		4	189,1	171,6	-	-	4	4	285,0	325,4	117,6	160,2	-	-
2,3 4,5	234	4	145,7	148,9	-	-	82	4	208,2	218,6	93,1	106,2	-	-
		9			49	50		9					53,2	49,9

Tabela 1 - Erros residuais em metros depois de diferentes transformações geométricas .
(Área 1: imagem completa, áreas 2...5: quadrantes).

1. A precisão geométrica é consideravelmente melhor para áreas menores que para a área completa das imagens.
2. O número dos pontos de apoio não influencia significativamente os resultados (*).
3. A transformação afim aumenta consideravelmente a precisão da geometria original. Por consequência, a aplicação de um fator de descompressão exato no processamento inicial tem uma importância básica para a qualidade geométrica dos produtos.
4. Polinômios de segunda ordem, só aplicáveis digitalmente, chegam a uma precisão de ±40m (um valor que foi confirmado mediante outros exemplos). Aproxima-se ao valor teórico e não pode ser reduzido significativamente com polinômios de grau superior.

4. A PRECISÃO SEMÂNTICA

Enquanto que a precisão geométrica pode facilmente ser definida e determinada, a precisão semântica apresenta muito mais dificuldades neste respeito. Vamo-nos limitar aqui ao método da classificação multiespectral digital.

Para essa classificação existem numerosos algoritmos; contudo, o da "máxima verossimilhança (maximum likelihood)" é o mais comum e o mais potente:

Um vetor \underline{x} fica como elemento numa classe ω_i e não numa outra classe ω_j , se

$$p(\underline{x}/\omega_i)p(\omega_i) > p(\underline{x}/\omega_j)p(\omega_j), \tag{6}$$

onde a probabilidade é expressa por:

$$p(\underline{x}/\omega_i) = \frac{1}{\sqrt{\det(\underline{C}_i)} \cdot (2\pi)^n} \exp\left(-\frac{1}{2}(\underline{x}-\underline{\mu}_i)^T \underline{C}_i^{-1}(\underline{x}-\underline{\mu}_i)\right) \tag{7}$$

(ver por exemplo Swain/Davies).

(*) Contudo, temos que observar, por motivos analíticos, que usamos uma quantidade de aproximadamente o dobro das coordenadas conhecidas que parâmetros incôgnitos, isto é, 4 pontos de apoio para (3), 6 para (4) e 12 para (5). Os pontos de apoio têm que ficar bem distribuídos.

n representa a dimensão do vetor, $\underline{\mu}_i$ o vetor médio da classe i e \underline{C} a matriz covariância computada com valores dos pixels das áreas de treinamento na classe i. Esse algoritmo é "matematicamente correto" sob condição que as classes representem uma distribuição normal. Se admitimos aquele pré-requisito, o problema único consiste em "só" separar as diferentes classes através da fórmula (6).

Existem muitas fontes de erros que limitam basicamente a aplicação do método, resultando no efeito que as classes não podem ser separadas do rigor desejado. Vamos considerar exemplar o efeito dos pixels fronteiriças bem como as dificuldades na definição geral de uma classe.

Na determinação de áreas em imagens digitais existem erros, porque os contornos das áreas sob consideração não coincidem com os pixels. Pixels, que contêm uma parte do contorno, apresentam uma informação misturada. O número n daqueles "pixels fronteiriças" depende do tamanho F da área e de um fator k que considera a forma da área. Chegamos a

$$n_{(PIX)} = 2k \sqrt{\pi F_{(PIX)}} \tag{8}$$

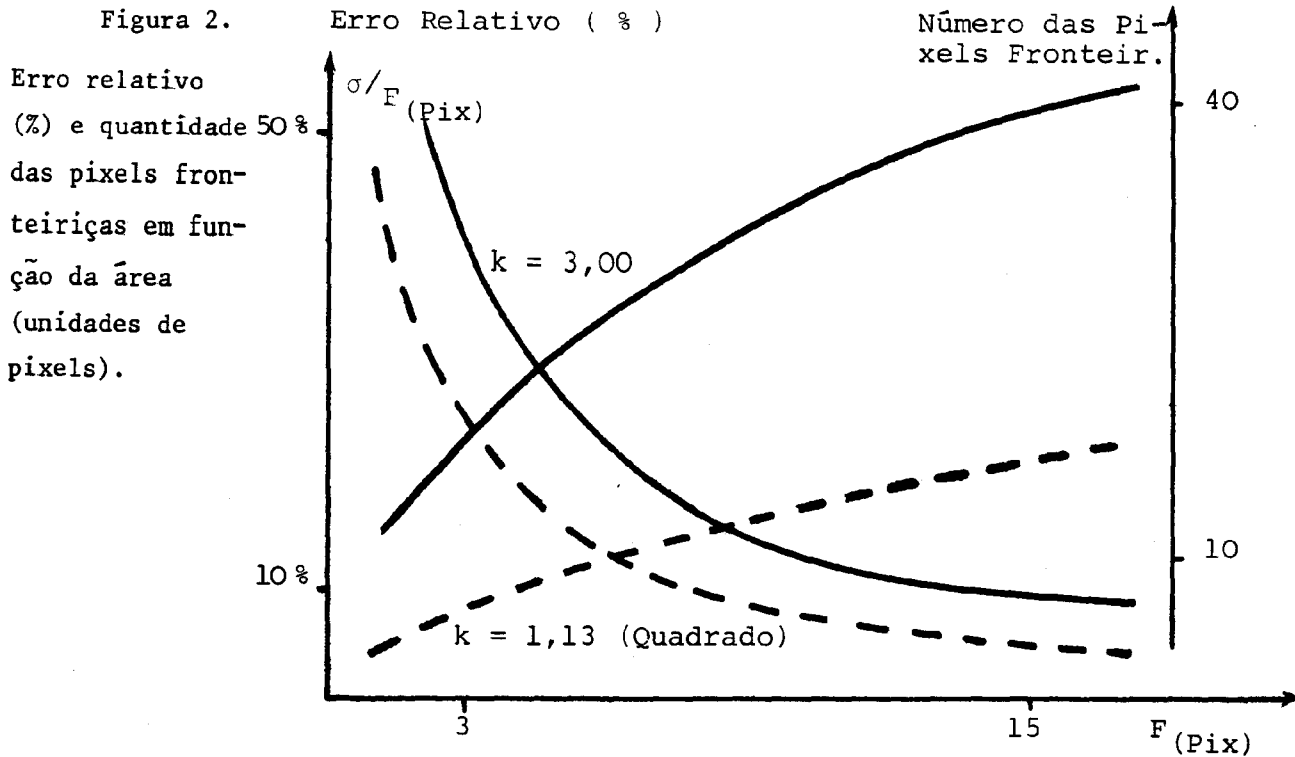
(ver Crapper, Bähr, 1982), e a

$$\sigma_{F(PIX)}^2 = 0,222 k \sqrt{F_{(PIX)}} \tag{9}$$

onde $\sigma_{F(PIX)}^2$ significa a variância do erro da área $F_{(PIX)}$ em unidades de pixels. k é 1,0 por formas estritamente circulares, 2,0 por retângulos com relação lateral de 1:10, e pode facilmente atingir valores de 3 por áreas com formas menos regulares.

A figura 2 mostra o erro relativo σ/F e o número das pixels fronteiriças em função da área $F_{(PIX)}$. É evidente que os erros relativos são muito grandes para áreas pequenas. Para a classificação multiespectral, o número das pixels fronteiriças tem uma importância elevada. Cada pixel fronteira contém informação misturada e apresenta assim um desvio da distribuição normal

obrigatória para as classes. Até áreas com 110 pixels o número dos pixels perturbadas é maior que o número dos pixels não perturbadas ($k=3,0$).



O efeito na classificação depende dos valores específicos da área mesma e da parte ao redor. Por causa do grande número dos pixels fronteiriços os erros são maiores que os esperados.

Como outra fonte de erros, vamos considerar as dificuldades na definição das classes próprias. Frequentemente, as classes a determinar são dadas a-priori e assim representam uma generalização que não corresponde à situação na natureza.

As tabelas 2 e 3 resultam de um trabalho executado em colaboração entre a Universidade de Hannover e a entidade estadual responsável para a Geodésia e a Cartografia na Baixa Saxônia ("Landesvermessungsamt", ver Dennert-Müller, Bähr, Lichtner, 1980). Tratava-se de determinar, através de classificação digital de imagens LANDSAT-MSS, as classes de uso da terra como apareceu nos mapas públicos de 1:100.000. Sem considerar o resultado ao total, vamos examinar só a classe "pântano".

Na tabela 2, o pântano mostra o resultado mais fraco de todas as classes. Achamos a maior parte das áreas de teste nas classes "bosque", "pinheiros" e "grama". A tabela 3 apresenta o resultado da classificação das mesmas áreas, mas eliminando a classe "pântano". Obviamente, áreas de pântano agora são registradas como "bosque" e "pinheiros". Além disso, aquelas áreas ficam classificadas consideravelmente melhor.

A explicação é fácil: "pântano" apenas existe nos mapas públicos como classe de uso da terra, porque o solo é desse tipo. A vegetação real nas áreas sob consideração consiste em bosque e pinheiros.

Neste exemplo, o fracasso na classificação não depende do algoritmo, mas da seleção das classes próprias. Isso mostra a necessidade de acompanhar o processamento digital através de operadores humanos experimentados.

	Água	Pântano	Gramma	Bosque	Pinheiros	Áreas urbanas (poc.pov.)	Áreas urbanas (dens.pov.)	Não Classif.
Água	99.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
	99.6	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2
	76.9	0.0	2.6	2.6	5.1	7.7	5.1	0.0
	97.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0
	0.0	0.0	55.5	44.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Pântano	0.0	78.2	0.0	17.1	2.2	2.5	0.0	0.0
	0.0	60.1	0.0	34.3	0.0	0.0	0.0	0.6
	0.0	12.0	0.0	0.0	87.5	0.5	0.0	0.0
	4.0	12.3	0.0	0.4	68.3	7.1	6.0	2.0
	0.0	0.0	99.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
	0.0	1.4	95.7	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9
Gramma	0.0	0.0	55.0	0.0	0.0	4.4	0.0	40.6
	0.0	0.0	98.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7
	0.0	0.9	91.9	0.4	0.0	0.2	0.0	6.6
	0.0	0.0	62.9	0.0	0.0	4.2	0.0	32.9
	0.0	22.6	0.0	77.1	0.2	0.0	0.0	0.0
	0.0	17.9	0.0	74.1	2.7	0.3	0.0	0.0
	0.0	45.6	0.0	52.9	1.2	0.0	0.0	0.2
Bosque	0.0	14.2	0.0	85.3	0.0	0.0	0.0	0.5
	6.0	5.8	0.0	93.8	0.4	0.0	0.0	0.0
	0.0	35.8	0.4	63.0	0.0	0.4	0.0	0.4
	0.0	7.3	0.0	0.2	88.7	3.6	0.0	0.2
	0.0	1.5	0.0	0.0	91.7	5.9	0.9	0.0
	0.0	2.0	0.0	0.0	94.3	0.6	3.1	0.0
Pinheiros	0.0	2.2	0.0	0.2	50.8	29.7	2.0	15.1
	0.0	14.3	0.0	4.0	80.9	0.2	0.0	0.7
	0.0	0.3	0.0	1.9	97.9	0.0	0.0	0.0
	0.0	1.1	0.0	0.0	98.9	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	96.6	0.0	3.4
Áreas urb.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	92.0	0.0	8.0
(poc.pov.)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	69.1	28.2	2.7
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	98.0	0.0	2.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.9	0.0	18.1
	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	80.8	0.0	19.2
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	87.0	11.8	0.9
	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	84.4	0.0	14.3
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.3	61.7	0.0
Áreas urb.	15.3	0.0	0.0	0.0	11.7	1.8	69.4	1.8
(dens.pov.)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.3	92.7	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	5.1	92.4	1.4
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.4	94.3	7.2

Tabela 2: Resultado duma classificação multiespectral de LANDSAT-MSS (região Hannover/RFA). Os números indicam a porcentagem das áreas de teste classificadas nos 8 diferentes grupos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BÄHR, H.P. : Analyse der Geometrie auf Photodektoren abgetasteter Aufnahmen von Erderkundungssatelliten. Universität Hannover, 1976.

BÄHR, H.P. : Wechselwirkung von Photogrammetrie und Fernerkundung. Universität Hannover, 1979.

BÄHR, H.P. : Analog versus Digital Image Processing of Photographic Imagery. Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, Comissão III, Hamburg 1980.

BÄHR, H.P. : Aspectos Fotogramétricos em Sistemas de Uso da Terra. X Congresso Brasileiro de Cartografia, Brasília 1981.

CRAPPER, P.F. : Errors Incurred in Estimating an Area of Uniform Land Cover Using LANDSAT. Photogrammetric Engineering, 1980.

DENNERT- MÖLLER, E.; BÄHR, H.P.; LICHTNER, W. : Herstellung einer Landnutzungskarte 1 : 200 000 aus LANDSAT- Bilddaten für den Raum Hannover. Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, Comissão VII, Hamburg 1980.

PRATT, W.K. : Digital Image Processing. New York 1978.

SWAIN, P.H. ; DAVIS, S.M. : Remote Sensing - The Quantitative Approach. New York 1979.

