

Os solos e o sensoriamento remoto: o uso de imagens Landsat 7 ETM para mapeamento dos horizontes coesos dos Tabuleiros Costeiros da Bahia

Rosângela Leal Santos^{1,2}
José Alberto Quintanilha¹
Irina Fukumori¹

¹ Universidade de São Paulo- Escola Politécnica
Departamento de Engenharia de Transportes – Laboratório de Geoprocessamento
Rua Professor Luciano Gualberto, Travessa 2, nº 80 - CEP 05508-900
Cidade Universitária - São Paulo – SP, Brasil
{rosaleal, jaquinta}@usp.br, irinafukumori@yahoo.com.br

² Universidade Estadual de Feira de Santana - Departamento de Tecnologia
Av. Universitária, s/n - Km 03 da BR 116 - Campus Universitário
CEP: 44031-460 - Feira de Santana – BA, Brasil

Abstract. The soil spatial information is represented as a discrete variable, but in real universe it features is perceived as a continuum in both parameter space and the geographic space. This paper analyse the compatibility, problems and possible solutions to solve the problem between the conventional mapping techniques and the new techniques of obtaining of information through the orbital remote sensing. This study is applied in an area of cohesion soils and the features of humidity of the soils mapping capacity is evaluated through images Landsat 7 ETM, through supervised classification.

Palavras-chave: Soils, remote sensing, image processing, supervised classification, solos, sensoriamento remoto, processamento de imagens, classificação supervisionada.

1. Introdução

A importância dos solos para o ser humano é indiscutível, seja como a base material para o desenvolvimento das atividades econômicas, seja o local de onde se retire nossa alimentação, abrigo e roupas, onde são erguidas nossas edificações, construções, monumentos e lares, ou onde andamos, trabalhamos, produzimos e vivemos.

Em nossa discussão sobre solos e sensoriamento remoto, será adotado o conceito pedológico dos solos, onde este é considerado como uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos, que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta, contém matéria viva e podem ser vegetados na natureza, onde ocorrem (Embrapa, 1999). As propriedades, referentes à concentração, organização, e interrelações entre todos os materiais dos solos afetam a reflexão da energia solar pelos solos (Irons *et al.*, 1989).

2. A cartografia convencional dos solos

Várias técnicas são utilizadas buscando-se representar a natureza especial dos solos. Dentre elas, destacam-se os modelos na representação de atributos 3 D e na interpolação de dados, através de diferentes técnicas.

A informação sobre a distribuição espacial dos solos é uma parte essencial dos atributos requeridos na superfície para a caracterização de uma variedade de ambientes e conseqüente modelagem das atividades nele presentes, desde que o solo se figura como um mediador entre

a energia e o fluxo de materiais na superfície da terra. A relevância da classificação de solos através de sensoriamento remoto, deve-se a necessidade de baixar os custos dos levantamentos de solos, principalmente do produto a ser utilizado na interpretação, assim como as técnicas utilizadas na geração de um produto final, o qual iria fornecer material de entrada (input) para os sistemas de informações geográficas (SIG).

Entretanto, quando se busca utilizar as informações derivadas de mapas de solos convencionais com outras informações obtidas por outras fontes de dados ambientais, como a modelagem digital de terrenos e dados de sensoriamento remoto, para modelagem ambiental em larga escala, existem duas grandes limitações inter-relacionadas (Band *et. al.*, 1993; Moore *et. al.*, 1993; Band & Moore, 1995). Estas limitações são, primariamente, a incompatibilidade entre a resolução do atributo e a incompatibilidade da resolução espacial entre as informações de solo obtida através dos mapas convencionais e os dados ambientais obtidos por análise digital do terreno e as técnicas de sensoriamento remoto.

3. Incompatibilidade do atributo

3.1 O processo de produção de mapas

O processo de mapeamento dos solos pode ser dividido em duas partes conceituais ou sub-processos (Zhu, 1997). Estes sub-processos, na prática, podem interagir ou se sobrepor. Na teoria iremos considera-los eventos independentes. O primeiro sub-processo na produção de mapas de solos é a *classificação*. Durante o processo de classificação, feições dos solos observadas em campo são agrupadas em tipos (classes) de acordo com suas propriedades-diagnóstico (Embrapa, 1999). Cada uma destas classes de solos é demarcada por um espécime típico, identificado a partir de bases e critérios definidos pelo perfil do solo com valores das propriedades e seus intervalos de tolerância para cada classe. Em outras palavras, a classificação dos solos é um processo de identificação de padrões (classes) de valores de propriedades dos solos no domínio das propriedades específicas, definidas pelo perfil das classes. Na verdade, o parâmetro espacial dominante das propriedades dos solos é sua intercambialidade (Zhu, 1997; 2001). Este parâmetro é importante para identificar estes padrões (classes dos solos) pois parte-se do conceito de que o desenvolvimento dos solos é controlado por processos pedogenéticos e que existe uma forte relação entre os grupos de solos, seus respectivos processos evolutivos e seus ambientes pedogenéticos.

Entretanto, isto poderia também ser realizado desde que cada uma das classes (padrões de valores das propriedades dos solos) é caracterizada pelos valores de suas propriedades típicas (as médias ou a moda dos valores das propriedades) e seus intervalos nestas classes. Em muitas das aplicações da modelagem ambiental, somente o valor da propriedade dos solos típicos são utilizados. Os valores mais específicos das propriedades não podem ser derivados, utilizando somente o intervalo dos valores das propriedades dos solos.

O capacidade de descrever a troca de valores das propriedades dos solos (resolução do atributo) no parâmetro dominante, é limitado pelos intervalos de valores típicos de duas classes de solos adjacentes. Os valores intermediários das propriedades dos solos situados entre dois valores típicos de duas classes adjacentes não podem ser obtidos. Esta redução da resolução do atributo dos solos é realizado no segundo sub-processo da produção de mapas de solos, o processo de mapeamento.

Durante a etapa de mapeamento, as áreas são delineadas e assinaladas, mapeando-se as classes, agora como unidades cartográficas. Estas unidades podem ser unidades de classes únicas (com uma única classe de solo) ou unidades mistas (agregados com mais de uma classe de solos). Para as áreas mapeadas como unidades únicas, todos os solos que são delimitados dentro de um mesmo polígono são considerados como solos típicos desta classe de solo. Para

áreas mapeadas como unidades mistas, cada um dos polígonos delimitantes subtende-se que contem vários tipos de solos diferentes e cada um deles ocupa uma percentagem da área do polígono, percentagem esta não especificada e não proporcional. A localização específica de cada uma destas classes de solos dentro do polígono é desconhecida (**Figura 1**).

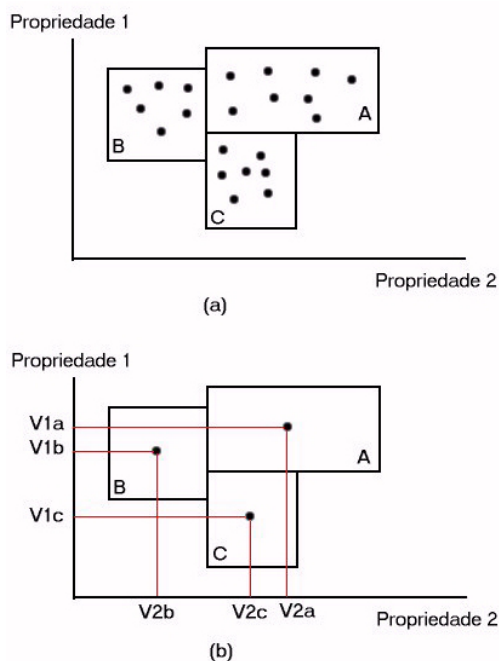


Figura 1 – Discretização dos solos no domínio dos parâmetros. (a) os pontos representam a localização dos solos no parâmetro do domínio e os retângulos representam as fronteiras das classes de solos no parâmetro do domínio. (b) Os pontos representam o centro das classes de solos. O intervalo entre os centros projetados em seus respectivos eixos representam a resolução do atributo nestes eixos (Zhu, 1997).

Durante o processo de mapeamento são realizados dois tipos de generalizações: *generalização da determinação da classe* e *generalização espacial*.

3.1.1 A incompatibilidade com os resultados da generalização

A generalização da determinação de classe é o processo de atribuir e agregar solos similares em uma única unidade de mapeamento. Ou seja, todos os solos similares em propriedade e com proximidade ou contigüidade espacial podem ter suas propriedades agrupadas em uma única unidade cartográfica, dentro do intervalo de valor que compreende a classe padrão. Isto ocorre porque a elaboração dos mapas de solos tradicionais, são orientados segundo a lógica *crisp*. (Duch *et al*, 2001). Sob esta lógica, os solos em um dado ponto pertencem a uma e somente uma classe de solos e este solo possui propriedades da classe de solos para a qual ele foi atribuído. Sob esta noção, a diferença entre as propriedades de dois solos vizinhos podem ser percebidos como a diferença de duas unidades de mapeamento (quando estes dois solos-objetos são duas diferentes unidades de mapeamento) ou serem completamente ignoradas (quando os dois solos são agrupados em uma única unidade de mapeamento). Por outro lado, dados derivados da análise digital de terreno e técnicas de sensoriamento remoto, normalmente captam as diferenças abruptas nos valores do atributo entre os objetos vizinhos devido a elevada resolução do atributo destes dados. A manifestação espacial desta incompatibilidade da resolução dos atributos entre as informações espaciais dos mapas de solos convencionais e outros dados ambientais derivados de técnicas de sensoriamento remoto são mostradas na **Figura 2**, a qual descreve as alterações das condições ambientais ao longo de um perfil em Esplanada, Bahia (**Figura 2**, de (a) à (g)). Devido a elevada resolução do atributo dos dados digitais da imagem (Imagem Landsat 7 ETM, 30m), a

gradação detalhada dos valores das propriedades ambientais sobre o espaço pode ser preservado (**Figura 2 (e) e (f)**). Entretanto, a mudança de textura do horizonte A é percebida como uma função em patamar nos mapas de solos convencionais (**Figura 2 (b), (d) e (g)**). Esta incompatibilidade pode ter sérias implicações na interpretação de resultados nas aplicações de modelagem ambiental em grande escala.

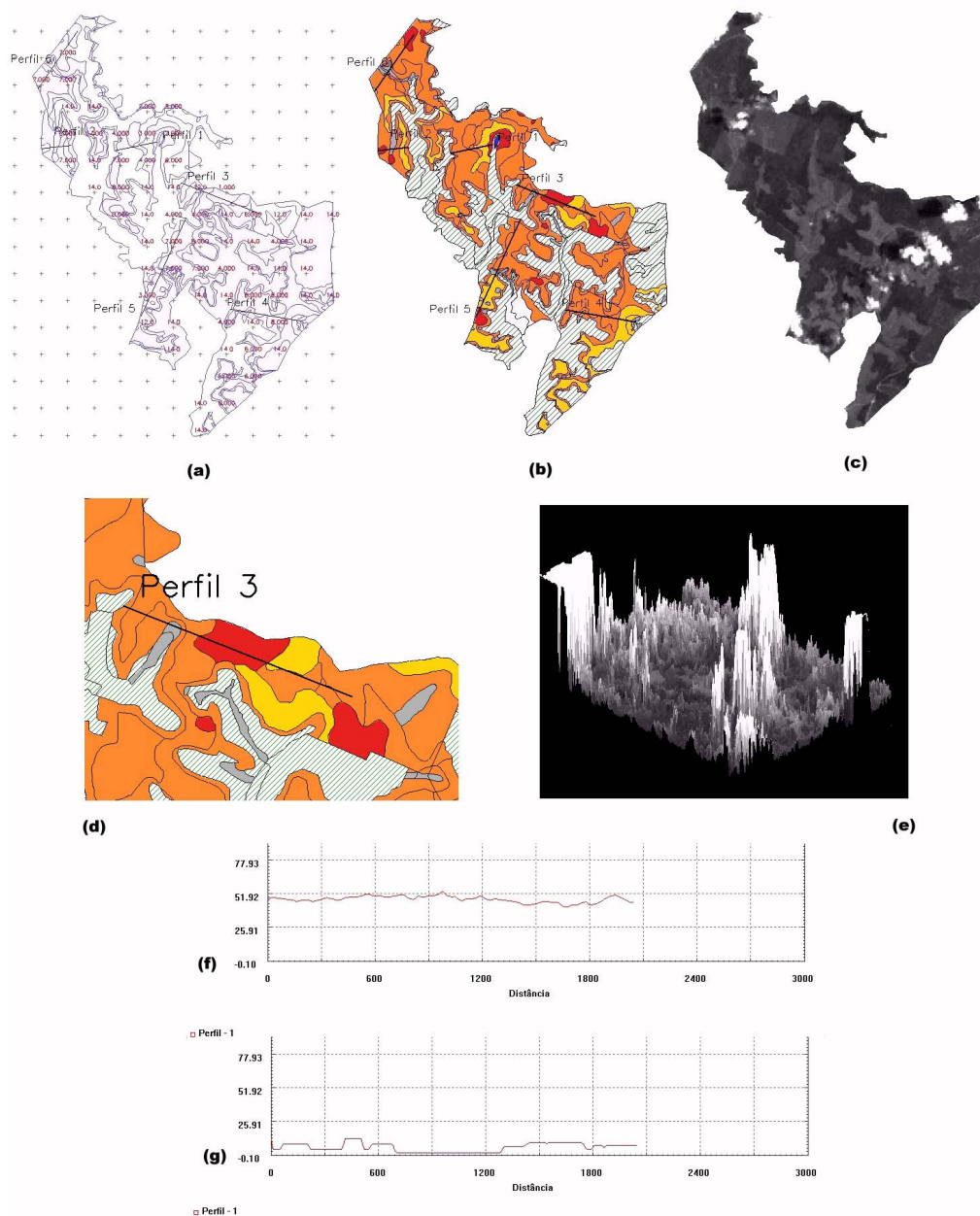


Figura 2 – Incompatibilidade de dados entre as informações contidas nos mapas de solos convencionais e os dados obtidos por sensoriamento remoto. **(a)** Grade numérica obtida pela transformação dos valores de textura do horizonte A das unidades de solos; **(b)** Mapa de solos obtidos por levantamento convencional, no Distrito de Altamira, município de esplanada, Bahia; **(c)** Recorte da imagem na área estudada. Banda 3, Landsat 7 ETM; **(d)** Detalhe do mapa de solos, com localização do transecto para a elaboração dos perfis; **(e)** Visualização 3D da Banda 3 do Landsat 7 ETM, com exagero vertical igual a 1. Os valores de Z correspondem aos níveis de cinza da imagem. Os elevados valores (próximos à 255, correspondem as nuvens sobre a imagem); **(f)** Perfil correspondente ao transecto 3, na Banda 3 do Landsat 7 ETM (c), em sendo x=distância no terreno; y= nível de cinza da imagem; **(g)** Perfil correspondente ao transecto 3, no mapa de solos (b), transformado em grade (a) para extração dos valores numéricos, sendo x=distância no terreno; y= textura do horizonte A.

4. O uso do sensoriamento remoto no estudo dos solos

Apesar das técnicas de sensoriamento remoto não poderem captar as características dos perfis dos solos, muitos dos seus parâmetros podem ser detectados através dela (Irons *et al.*, 1989; Barret & Curtis, 1992). A natureza dos produtos orbitais hoje disponíveis, são incompatíveis para as reais necessidades ao se realizar um mapeamento de solos, no sentido mais convencional, desde que estes produtos do sensoriamento remoto são incapazes de captar a natureza tridimensional que é inerente a este elemento natural, principalmente quanto à classificação das classes e/ou unidades que os compõem, haja vista o intrincado e complexo número de variáveis envolvidas nesta classificação. Entretanto, os produtos de sensoriamento remoto, inegavelmente possuem uma inestimável utilidade no mapeamento de feições ou de propriedades específicas dos solos, estas sim fundamentais às suas diversas práticas de uso, principalmente as agrícolas, que utilizam basicamente as informações superficiais. Para a identificação e análise destas feições, se poderia utilizar técnicas de processamento digital de imagens, destacando-se a classificação, para se obter os padrões espaciais destas feições e o comportamento da sua distribuição espacial.

A classificação é um método de agrupamento de objetos em classes baseado em suas similaridades com respeito a uma ou mais variáveis, sendo que a discriminação é a determinação dos objetos para uma classe pré-definida baseada nas propriedades do objeto, sendo que ambas utilizam critérios diagnóstico bem definidos, os classificadores. O objetivo da maioria das aplicações em sensoriamento remoto é para discriminar e pré-determinar através de mapas as informações das classes a serem encontradas no campo, comumente com a ajuda de agrupamentos estatísticos ou métodos discriminantes. Partindo-se do conceito de que a transição dos solos é gradual, e que as feições e/ou atributos dos solos que se deseje analisar raramente sofrem uma transição brusca, acreditamos que um classificação pixel-a-pixel seria adequada.

4.1 Um estudo de caso: a identificação de horizontes coesos em solos dos Tabuleiros Costeiros a Bahia

Os Tabuleiros Costeiros da Bahia ocupam uma área de quase 11% de todo o Estado. Por sua topografia e proximidade aos grandes centros é amplamente explorada nas práticas agrícolas, tanto de subsistência como de exportação. Entretanto, os solos desenvolvidos sobre esta litologia apresentam como peculiaridade a formação de horizontes coesos, que dificultam o enraizamento de plantas, além de dificultar a recarga do lençol freático e desenvolver área temporárias de hidromorfia. Buscando mapear esta feição acreditamos que o teor de umidade, é um bom parâmetro para refletir os graus de coesão, decorrente das diferentes velocidades de infiltração, sendo que as diferenças de drenagem são refletidas por uma clara mudança na cor ou tom de cinza, fazendo com que a mesma possa ser mapeada. A umidade é uma feição do solo muito bem documentada, desde o trabalho pioneiro de Bowers & Hanks (1965), até os trabalhos de Sano (1999), Moran *et al* (2000), Carlson (2001).

4.1.1 Área de Estudo

Escolheu-se para área de estudo as ocupadas pelo Projeto Altamira I, II e III, situado no distrito de Altamira, no município de Esplanada, no Litoral Norte da Bahia (Figura 3) pertencente a Copener Florestal S.A., uma empresa internacional de silvicultura, e que realizaram e disponibilizaram um mapeamento convencional detalhado dos solos (1:10.000), abrangendo área de plantio.

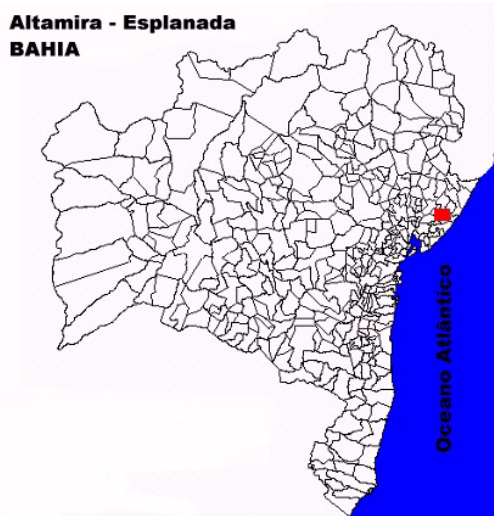


Figura 3 – localização da área de estudo, correspondente aos Projetos de Silvicultura (*Eucaliptus*) Altamira I, II, e III, no Distrito de Altamira, do município de Esplanada, no estado da Bahia

A área apresenta, ao todo 12 unidades de solos, sendo 2 unidades da classe Podzol, 8 unidades da classe Podzólico Amarelo e 2 unidades da classe Podzólico Acinzentado. Estes solos foram reclassificados de acordo com o grau de coesão, pela presença de *fragipan* (coesão mais fraca e que se dissolve na água), *duripan* (coesão mais forte e que não se dissolve na água) ou ausência de coesão. Foram determinados 5 classes (**Figura 4**).

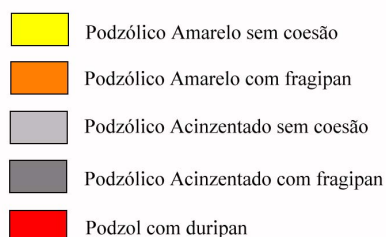


Figura 4 – Determinação da reclassificação das classes de solo, segundo o critério da coesão. A legenda ao lado foi utilizada na classificação da imagem e na vetorização do mapa temático de solos.

4.1.2 A classificação

Como dispúnhamos do mapa detalhado da área de estudo, com sua respectiva descrição dos solos e dos seus respectivos perfis, optou-se pela classificação supervisionada, desde que já tínhamos, através do mapa, a verdade de campo em formato digital, o que nos possibilitaria um bom controle da amostragem. Como função discriminante, optou-se pelo estimador de máxima verossimilhança, onde o vetor de média espectral e a matriz de covariância das amostras de treinamento são analisados para serem a fonte da informação comparativa (para serem a base de comparação para a realização da classificação). Posteriormente se pretende utilizar os estimadores Bayesianos, onde a função de densidade da probabilidade (FDP) da classe de informação (classe de referência) é assumida para ser conhecida *a priori* e amostras de treinamento são utilizadas para refinar a FDP para obter uma função discriminante *a posteriori*. Utilizou-se o software Spring 4.0 para realizar o processamento. Utilizou-se uma imagem Landsat 7 ETM, de 02/11/2004. No primeiro processo, utilizou-se as 6 bandas (1, 2, 3, 4, 5 e 7). No segundo, optou-se somente por utilizar 3 bandas: a 7 e 5, que apresentam as melhores respostas para elementos dos solos e a banda 2, por ser do visível e apresentar uma boa resposta a água.

4.1.3 Resultados e discussões

Dos critérios de classificação adotados para o MaxVer, para este trabalho, adotamos o limiar de aceitação de 95%. Utilizou-se apenas as 5 classes de solos, sem considerar as nuvens nem as sombras de nuvens como classes.

4.1.3.1 Classificação MaxVer para as bandas 7-5-2 (95%)

Obteve-se um desempenho geral de 40.14 % e uma confusão média de 57.14 %, um resultado abaixo do esperado. Os maiores erros se referiam ao Podzólico Amarelo com fragipan, pois, embora a exatidão da amostra fosse elevada (88%) esta classe foi a que apresentou a maior confusão com as outras classes, em particular como Podzólico Amarelo, fazendo com que a exatidão do usuário desta classe fosse de apenas 24 %. A classe que menos se confundiu com as outras foi o Podzol. (**Quadro 1**). O resultado desta classificação pode ser observada na **Figura 5(f)**. Detalhe para as áreas em branco (não classificadas) representando as nuvens.

Quadro 1 – Matriz de erros de classificação (MaxVer) para 5 classes referentes as unidades de solos para as bandas 7-5-2 do Landsat 7 ETM de 02/11/2002 (Limiar de aceitação 95%)

Colunas: dados de referências	PA		PAf		PC		PCf		P		Abstenção		Σ Linha
	Tot.	%	Tot.	%	Tot.	%	Tot.	%	Tot.	%	Tot.	%	
PA	8	5.44	1	0.68	0	0.00	2	1.36	4	2.72	0	0.00	15
PAf	27	18.37	15	10.20	0	0.00	14	9.52	6	4.08	1	0.68	63
PC	3	2.04	0	0.00	4	2.72	2	1.36	0	0.00	1	0.68	10
PCf	2	1.36	1	0.68	0	0.00	11	7.48	1	0.68	0	0.00	15
P	7	4.76	1	0.68	2	1.36	11	7.48	21	14.29	2	1.36	44
Σ Coluna	47	-----	18	-----	6	-----	40	-----	32	-----	4	-----	147

4.1.3.2 Classificação MaxVer para as bandas 1-2-3-4-5-7 (95%)

Na classificação seguinte, com a utilização das 6 bandas, conseguiu-se uma melhora do desempenho geral em 50%, obtendo-se 60.54 % de precisão, e a confusão média reduziu para 35.37 %. O maior erro de classificação ainda se refere ao Podzólico Acinzentado sem coesão, que continua ainda muito confuso com o Podzólico Amarelo sem coesão, mas o acréscimo de bandas reduziu o erro desta classe em quase 100% . Em geral, ocorreu uma melhoria na exatidão do usuário em todas as classes, mas em particular, o Podzólico Acinzentado sem coesão (PC), melhorou sua exatidão em 100% (**Quadro 2**). O resultado geral da classificação pode ser observado na **Figura 5(e)**.

Quadro 2 – Matriz de erros de classificação (MaxVer) para 5 classes referentes as unidades de solos para as bandas 1-2-3-4-5-7 do Landsat 7 ETM de 02/11/2002 (Limiar de aceitação 95%)

Colunas: dados de referências	PA		PAf		PC		PCf		P		Abstenção		Σ Linha
	Tot.	%	Tot.	%	Tot.	%	Tot.	%	Tot.	%	Tot.	%	
PA	14	9.52	0	0.00	0	0.00	1	0.68	0	0.00	0	0.00	15
PAf	10	6.80	33	22.45	2	1.36	8	5.44	7	4.76	3	2.04	63
PC	0	0.00	0	0.00	8	5.44	1	0.68	0	0.00	1	0.68	10
PCf	0	0.00	1	0.68	0	0.00	11	7.48	3	2.04	0	0.00	15
P	5	3.40	2	1.36	2	1.36	10	6.80	23	15.65	2	1.36	44
Σ Coluna	29	-----	36	-----	12	-----	31	-----	33	-----	6	-----	147

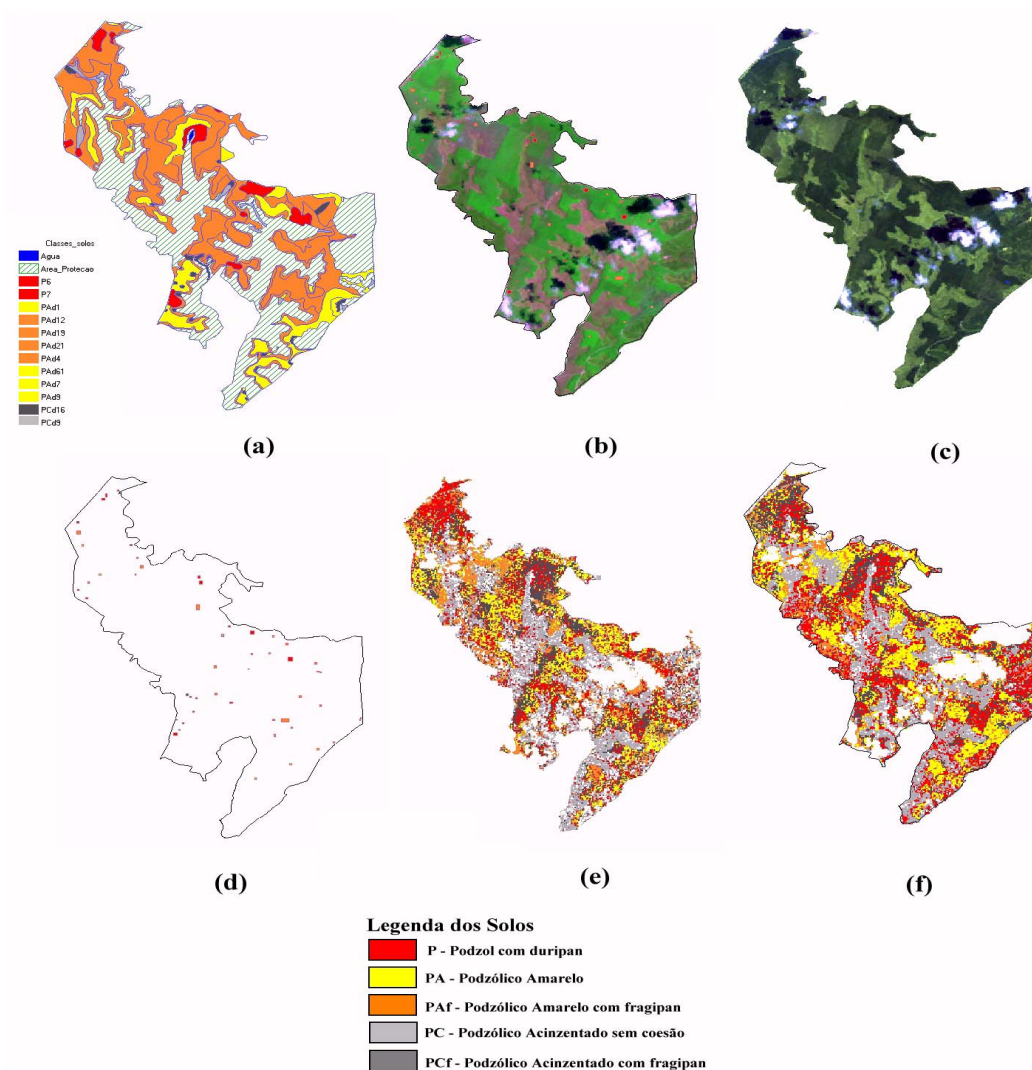


Figura 5 – Etapas da classificação do recorte das imagens Landsat 7 ETM, pela Máxima Verossimilhança. (a) Mapa vetorial das classes de solos utilizada como referência do polígono do recorte da imagem. Também considerada “verdade de campo” e que balisou a escolha das áreas de amostragem; (b) Recorte da imagem Landsat 7 ETM (composição colorida 5-4-3); (c) Recorte da imagem Landsat 7 ETM (composição colorida 7-5-2); (d) Localização das amostras para a classificação supervisionada; (e) Imagem classificada utilizando-se as bandas 6 bandas (1, 2, 3, 4, 5 e 7) do Landsat; (f) Imagem classificada utilizando-se somente 3 bandas do Landsat (7, 5 e 2).

5. Conclusões

Os resultados não se mostraram muito satisfatórios, principalmente pela própria natureza complexa dos solos, mesmo que fosse para avaliar uma única feição como a umidade. O próprio sensor Landsat não pode ser considerado como ideal para imagear a umidade, devido a resolução espectral de suas bandas. Por outro lado, o número de pixels nas amostras podem ter sido insuficientes, para a atuação do MaxVer. Assim, acredita-se ser possível melhorar os resultados com aperfeiçoamento das técnicas de amostragens e alteração dos parâmetros do classificador, com o estabelecimento da inferência bayesiana, e a utilização de ponderações sobre o valor a ser atribuído ao pixel. A outra opção é avaliar outros sensores ópticos, em particular o Aster, tanto pela melhoria técnica em seu sistema, como pelo maior número de bandas disponíveis, o que daria ao MaxVer uma melhor particionamento do espaço de atributos na formulação das regras de decisão.

A natureza das propriedades dos solos que se deseja estimar, seja qual for, sempre apresentará dificuldades devido à natureza *crisp* onde a transição gradual das feições é representado como uma média intervalar para todo o polígono que representa a dada unidade, como acontece com o mapeamento convencional o qual serve de parâmetro aos resultados obtidos por processamento digital. Mas acreditamos que isto seja apenas uma questão de escala, pois os dados de satélite também são valores discretos e, numa escala de solos de maior detalhe, como para mapeamento de precisão, por exemplo, os dados de um sensor com 900m² também obedeceriam a mesma lógica. Assim acreditamos o desenvolvimento de novos métodos de representação cartográfica para os solos sejam necessárias assim como o desenvolvimento de uma metodologia adequada para melhorar a correlação de dados gerados de modos distintos.

6. Referencias

- BAND, L. E. ; PETTERSON, J.P.; NEWANI, R.; RUNNING, S.W. Ecosystem processes at the watershed scale: incorporating hill-slope hidrology. **Agriculture for Meteorology**. n. 63, 1993, pag. 93-126.
- BAND, L. E. e MOORE, I.D. Scale: landscape attributes and geographical information systems. **Hidrological Process**. n. 9, 1995, pag. 401-22.
- BARRET, E. & CURTIS, L. Introduction to environmental remote sensing. 3th ed. London: Chapman & Hall, 1992
- BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflection of radiant energy from soils. **Soil Science**, Baltimore, v.100, p.130-138, 1965.
- DUCH, W; ADAMCZAK, R; GRAŁCZEWSKI, K. (2001) A new methodology of extraction, optimization and application of crisp and fuzzy logical rules. **Final version was published in IEEE Transactions on Neural Networks 12** (2001) 277-306 (PDF, 282 KB) <http://www.phys.uni.torun.pl/kmk/publications.html>
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.
- INPE, Divisão de Processamento de imagens. Manual do Spring (Versão 4.0). INPE: São José dos Campos, 2004. <www.dpi.inpe.br/spring/portugues/manual>. Acesso em 15/11/2004.
- IRONS, J.R.; WEISMILLER, R.A.; PETERSEN, G.W. Soil reflectance. pag. 66-106. In ASRAR, G. (Ed.) **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- MOORE, I.D.; GESSLER, P.E.; NIELSEN, G.A.; PETTERSON, G.A. Soil attributes prediction using terrain analysis. **Soil Sci. Soc. Am. Journal**, n. 57, 1993, pag. 443-52.
- MORAN, M. S., HYMER, D. C., QI, J., SANO, E. E. Soil moisture evaluation using multi-temporal synthetic aperture radar (SAR) in semiarid rangeland. *Agricultural and Forest Meteorology*. , v.105, p.69 - 80, 2000.
- SAMPAIO, R; CATALDO, E.; RIQUELME, R. **Introdução à Análise e ao Processamento de Sinais Usando o MATLAB**, Porto Alegre: Erica, 1998.
- SANO, E. E., HUETE, A. R., MORAN, M. S. Estimation of surface roughness in a semiarid region from C-band ERS-1 synthetic aperture radar data. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa, MG: , v.23, n.4, p.903, 1999.
- ZHU, A.-X. "Fuzzy inference of soil patterns: implications for watershed modeling", in D.L. Corwin, K. Loague, and T.R. Ellsworth (eds.) **Application of GIS, Remote Sensing, Geostatistical and Solute Transport Modeling to the Assessment of Nonpoint Source Pollution in the Vadose Zone**, American Geophysical Union, Washington, DC. 1998.
- ZHU, A.-X. A similarity model for representing soil spatial information. **Geoderma**, n. 77, 1977, pag. 217 – 42.
- ZHU, A.-X. e SCOTT-MACKAY, D.. "Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling", **Journal of Hydrology**, Vol. 248, 2001, pp. 54-77.