

INSERÇÃO DE DADOS ALTIMÉTRICOS NA DIFERENCIAÇÃO DE TIPOS FLORESTAIS EM BREJOS DE ALTITUDE

Insertion of Altimetric Data to Differentiation of Forest Types in Altitude Brejos

Aguinaldo Araújo da Silva¹
Ana Lúcia Bezerra Candeias²
João Rodrigues Tavares Junior¹

¹**Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**

Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação- DECART
Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n - Cidade Universitária - CEP 50740-530 - Recife-PE - Brasil
aguisilvafilho@yahoo.com.br
joaoufpe@gmail.com

²**Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**

Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Cartográfica
Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n - Cidade Universitária - CEP 50740-530 - Recife-PE - Brasil.
analucia@ufpe.br

RESUMO

O trabalho tem como objetivo estudar a integração de dados auxiliares para melhorar a classificação digital da imagem do TM (satélite Landsat 7) na diferenciação de tipos florestais. Os dados auxiliares são relacionados com a topografia do lugar. A área escolhida para estudo se localiza entre os paralelos de coordenadas 08° 00' 00" e 08° 29' 44" Sul e os meridianos de coordenadas 36° 29' 13" e 36° 29' 26" WGr. Parte dos municípios de Belo Jardim, Brejo da Madre de Deus e Tacaimbó, estão situados no Agreste pernambucano e dentro da área analisada. A metodologia consistiu em classificar a imagem que recobre a área de estudo pelo método supervisionado utilizando o algoritmo da máxima verossimilhança; Após isso, integrou-se os dados auxiliares (topografia) antes, durante e depois do processo de classificação da imagem; Finalmente, compararam-se os resultados gerados pela máxima verossimilhança com os dados auxiliares incorporados. O desempenho geral de classificação com máxima verossimilhança foi de 90,29 % e com a incorporação dos dados auxiliares passou para 94,74 %, 95,18 % e 94,57 %. A estatística kappa passou de 85,57 % para 91,57 %, 92,11 % e 91,34 % respectivamente. Observou-se que três técnicas com o integração da altimetria no processo de classificação supervisionada mostraram que são eficientes para diminuir a similaridade espectral entre classes de tipos florestais em áreas onde a topografia influencia no porte da vegetação (áreas de matas serranas e de brejos de altitudes). Conclui-se também que a técnica de mais fácil incorporação é a da pós-classificação utilizando a altimetria como dado auxiliar.

Palavras chaves: Classificação, Topografia, Dados Auxiliares.

ABSTRACT

This paper has as objective to study the integration of ancillary data to improve the digital classification of the image of the TM (satellite Landsat 7) in the differentiation of forest types. Ancillary data are related with the topography of the place. The study is located among the parallel of coordinates 08° 00' 00" and 08° 29' 44" South and the meridians of coordinates 36° 29' 13" and 36° 29' 26" WGR. Municipal districts of Belo Jardim, Brejo da Madre de Deus and Tacaimbó are in the test area in Pernambuco state. The methodology consists of classifying the image that recovers the area of study for the supervised method using the algorithm of the maximum likelihood and compare with integrate ancillary data before the classification, during and after the process of classification of the image. Maximum likelihood obtained general performance of 90,29 % and with the incorporation of ancillary data before classification obtained 94,74 %, during classification obtained 95.18 % and after it obtained 94,57 %. The kappa statistic for maximum likelihood is 85,57 % and for ancillary data are 91,57 %, 92,11 % e 91,34 % respectively with above methods mentioned.

The three methods of ancillary with altimetry improve the performance of classification of the forest types. An additional conclusion is that the incorporation after classification process is more easily than the other ones.

Keywords: Classification, Topography, Ancillary Data.

1. INTRODUÇÃO

A vegetação de regiões com clima semi-árido é caracterizada por ter a fenologia de grande parte de sua flora controlada pela disponibilidade de água, que por sua vez apresenta grande variabilidade espacial e temporal. Essa vegetação é denotada no Brasil por caatinga e, além de constituir um dos principais recursos renováveis do semi-árido, fornece refúgio e alimento para a fauna, madeira para diversos usos do homem (lenha, carvão, cocção de alimentos) e influi no balanço hídrico como protetor natural dos solos contra erosão. Esse tipo de vegetação, nos períodos de estiagem, representa uma alternativa de fonte de renda para os produtores rurais. Com as técnicas de Sensoriamento Remoto e processamento de imagens tem-se o monitoramento desenvolvimento vegetativo da cobertura vegetal e estimativa da área ocupada por cada tipo de cobertura nas regiões semi-áridas para que instituições responsáveis pelo gerenciamento desses recursos possam melhor administrá-los.

Portanto, uma forma de se observar os brejos de altitude seria por imagens de satélite onde a sua resolução temporal mostraria possíveis alterações em sua área.

A produção automática de cartografia de uso do solo a partir de imagens de satélite nem sempre é trivial. Ela pode ser prejudicada pelo fato de diferentes ocupações de uso do solo apresentar respostas espectrais semelhantes para um dado sensor, ou de algumas ocupações de solo e/ou classes de uso de solo poderem não ser identificáveis ao nível do pixel (Caetano e Santos, 2001).

Como a imagem traz a informação bidimensional do lugar que originalmente é tridimensional nem sempre se tem uma real classificação da área. Efeitos de sombra e do terreno podem gerar problemas na classificação. No caso dos brejos de altitude tem-se esse tipo de problema. Assim, faz-se necessário incorporar dados auxiliares, não espectrais, à classificação para obter um resultado mais refinado e que represente melhor a superfície imageada.

Nesse trabalho, avaliou-se o potencial da integração de dados auxiliares obtidos da topografia na classificação de imagens para fins de detecção de alteração da cobertura do solo escolhendo-se a melhor variável auxiliar derivada da topografia; comparando-se os diferentes métodos de integração de dados auxiliares. A metodologia foi desenvolvida no ambiente do sistema SPRING (INPE).

A altimetria foi usada como variável auxiliar no processo de classificação de imagens do satélite Landsat-7/ETM+. Para isto, um modelo digital do terre-

no foi gerado a partir de carta topográfica na escala 1:100.000, com a mesma resolução (30m) da imagem e este serviu na incorporação da altimetria nos processos que foram testados, conforme pode ser observado no conteúdo na seção 4.4.

1.1 A vegetação do estado de Pernambuco

A vegetação de brejos aqui estudada é abordada em Pernambuco (1998). Naquele documento é mostrada uma visão ampla da cobertura vegetal com relação às três zonas fisiográficas do Litoral e Mata, Agreste e o Sertão.

O Litoral corresponde à faixa de terra próxima ao mar, abrange as subzonas de praias, restingas e terraços litorâneos, matas e campos de restingas, e nas áreas de contato da água do mar com a dos rios ocorrem os mangues.

A Mata Úmida ocupa uma faixa que se estende no sentido norte-sul, a vegetação é do tipo Perenifólia Latifoliada Higrófila Costeira e em solos da formação barreiras, com boa drenagem ou em solos derivados do cristalino. Nessa região, distinguem-se dois tipos de cobertura florestal, sendo uma mais úmida situada ao Sul, exposta aos ventos alísios de Sudeste e outra, ao Norte, submetida a um menor regime pluviométrico. A Mata Seca caracteriza-se pela transição entre a Mata úmida e a Caatinga do Agreste, encontradas nos municípios não banhados pelo mar. A vegetação é do tipo Floresta Estacional Subcaducifólia, fisionalmente confundida com a Floresta Perenifólia no período chuvoso, enquanto, no período mais seco, assume um aspecto peculiar, em função da perda das folhas por grande parte de suas espécies.

As regiões do Agreste e Sertão são consideradas áreas de domínio das Caatingas, vegetação que caracteriza o Nordeste semi-árido. Ela é considerada por Kuhlmann (1974), como um dos tipos de vegetação mais difícil de ser definido, em vista da extrema heterogeneidade que apresenta, não somente quanto à fisionomia, como também quanto à composição. Assim, esse "complexo vegetacional", caracterizado normalmente como um conjunto de cactáceas espinhosas e árvores com ramos secos e sem folhas durante a maior parte do ano, possui uma multiplicidade de fisionomias, cuja interpretação por diversos pesquisadores ainda não veio a constituir uma classificação comum.

a) Classificação de Tipos de Caatinga

De acordo com Galvão (1967), o clima regional do domínio das caatingas é quente e seco, do tipo

semi-árido (BShw na classificação de Koppen), ou tropical quente de seca acentuada (4ath na classificação de Gaussen e Bagnouls). Exceção se faz às áreas elevadas, favorecidas por chuvas orográficas e temperaturas amenas. Tais áreas recebem denominação de serras frescas ou úmidas no nordeste ocidental e brejos no nordeste oriental.

Sá (1991) mostra que existe uma gradação fisionômica da vegetação nessa região. Esse gradiente é altamente dependente da interação dos fatores ambientais, tais como: clima, solo e o relevo e principalmente da ação antrópica, capaz de alterar rapidamente essas fisionomias.

Segundo Dansereau (1968), nas atividades de classificação e mapeamento das comunidades vegetais, três observações são de relevante importância. A primeira é que certos limites das manchas de vegetação são de fácil traçado, por serem bastante evidentes em fotos aéreas, imagens de satélites ou diretamente no campo; porém, há outros limites de difícil delineamento, que são traçados indutivamente através de mudanças observadas na estrutura ou composição de espécies. A segunda é a compatibilização entre mapas elaborados para grandes áreas. Este problema decorre de classificações contínuas, que usualmente requerem repetidos ajustes durante o processo de mapeamento. A terceira observação diz respeito à definição das comunidades de plantas, portanto à classificação, que é tratada em uma escala geográfica, podendo-se discutir extensivamente sobre o mérito de um particular esquema de classificação, mas, uma vez fixada a escala, esta discussão fica limitada substancialmente.

Para obter a classificação supervisionada ou interpretação da imagem manualmente da caatinga é necessário antes conhecer e identificar os diferentes tipos dessa vegetação. A seguir têm-se diferentes classificações para a caatinga. Utiliza-se na confecção do trabalho a classificação de Eiten (1983).

Egler (1951), ao estudar as caatingas pernambucanas em função de sua aparência, fez a seguinte divisão: Caatinga seca e agrupada, Caatinga seca e esparsa, Caatinga arbustiva densa, Caatinga das serras e Caatinga do chapadão do Moxotó. Apesar de ter adotado um princípio fisionômico, esta classificação acrescenta um enfoque ecológico/geográfico.

Eiten (1983), classificou a vegetação de caatinga, sob o aspecto fisionômico, nas formas arbóreas e arbustivas, e acrescentou algumas informações de ordem fitogeográficas, ecológicas e mesmo antrópicas. Quanto à fisionomia, o autor evidenciou as seguintes formas: Caatinga Arbóreo-arbustiva fechada, Caatinga Arbóreo-arbustiva aberta, arbustiva fechada e arbustiva aberta.

Conforme, Pernambuco (1998), a região do Agreste pernambucano apresenta dois tipos de vegetação: a Caatinga, vegetação xerófila, com árvores retorcidas, dotadas de espinhos, caducifólias e com presença de cactáceas e bromeliáceas abundantes em algumas áreas (em geral nas mais áridas), e a Floresta Serrana, disjunção da Floresta Tropical Perenifólia, dentro do

domínio da Caatinga, que é o caso típico dos “Brejos de Altitudes”. Nesse documento, uma análise mais genérica evidencia que o Agreste e o Sertão de Pernambuco são partes de uma mesma formação florestal: a Caatinga, que apresenta o maior domínio florístico desta região. A vegetação do Agreste difere em porte e grau de xerofitismo em relação a do Sertão. Nos pontos mais elevados e úmidos, encontram-se as Matas Serranas.

Alcoforado-Filho e Sampaio (2003) apresentam detalhes a florística e fitossociologia de um remanescente de vegetação caducifólia espinhosa arbórea no município de Caruaru, Pernambuco. Já Ferraz, Rodal e Sampaio (2003) mostra a estrutura da vegetação em diferentes altitudes na região do semi-árido do Brasil.

b) Vegetação de Brejos de altitude

No interior da Caatinga, nas encostas mais úmidas de alguns planaltos ocorrem os brejos, ilhas de floresta que são verdadeiras testemunhas da complexa história paleoecológica do Nordeste Brasileiro. A existência dessas ilhas de floresta, onde as chuvas orográficas garantem níveis de precipitação superiores a 1.200 mm/ano, em uma região onde a precipitação média anual varia entre 240 a 900 mm, está associada à ocorrência de serras, planaltos e chapadas com 500 e 1100 m de altitude (Ex: Chapada do Araripe e Brejo da Madre de Deus).

A hipótese mais aceita sobre a origem vegetal dos brejos de altitude está associada às variações climáticas durante o Pleistoceno (últimos 2 milhões-10.000 anos) as quais permitiram que a Floresta Atlântica penetrasse nos domínios da Caatinga. Ao retornar à sua distribuição original, após períodos interglaciais, ilhas de Floresta Atlântica permaneceram em locais de micro clima (Pernambuco, 2002).

Assim, a grande maioria dos brejos de altitude são disjunções de Floresta Estacional Montana, um dos tipos vegetacionais que compõem a Floresta Atlântica brasileira. Em Pernambuco, Vasconcelos Sobrinho (1949), reconheceu a existência de 23 brejos, e desses, 9 foram identificados por Silva Filho et. al. (1998) através de imagens Landsat TM-5, como sendo os principais: brejo de Garanhuns, Serra dos Cavalos, Norte de Belo Jardim e Sanharó, Serra Negra de Bezerros, Taquaritinga do Norte, Tacaratú, Serra Negra, Triunfo, e Serra do Ororobá.

Na sua maioria, a literatura registra que os brejos de altitude são disjunções da Mata Atlântica que ocorre no Nordeste do País, em elevações e platôs, onde os ventos úmidos condensam excesso do vapor e criam um ambiente de maior umidade.

1.3 A Cartografia da Vegetação de Pernambuco

O conhecimento da cobertura vegetal do Nordeste tem sido objeto de trabalhos cartográficos em escalas pequenas, da ordem de 1:1.000.000, o que conduz a um baixo nível de informações de sua distribuição, pouco contribuindo com o gerenciamento desse

recurso e análise de suas relações com os fatores do meio.

O mais recente trabalho de mapeamento da cobertura vegetal de Pernambuco foi realizado por Silva Filho *et al.* (1998); o qual teve como objetivo a localização, estratificação e a estimativa de áreas com vegetação lenhosa nativa. A metodologia utilizada baseou-se na interpretação de imagens Landsat TM-5, composição colorida das bandas 5, 4 e 3 em papel fotográfico, escala aproximada 1:100.000 e teve como base cartográfica cartas topográficas em escala 1:100.000, elaboradas pela 3ª Divisão de Levantamento do Serviço Geográfico do Exército.

De acordo com Silva Filho (1998), o mapeamento permitiu identificar 3 tipos florestais em cada região fisiográfica do Estado, e que serão usados no trabalho: Tipo florestais AG 2, AG 3 e AG 4. Eles estão descritos a seguir.

1.3.1 Tipo Florestal Utilizado

Tipo Florestal AG 2 (Figura 1(b)) – Vegetação Arbustiva Arbórea Aberta, com espécies de altura média de 3,0 metros; ocorre em solos rasos arenosos e pedregosos, na maioria das vezes em áreas que indicam um processo de regeneração. Nestas áreas a topografia é suave e as maiores altitudes ficam em torno de 550 metros.

Tipo Florestal AG 3 (Figura 1(c)) – Vegetação Arbustiva Arbórea Fechada, caracterizada por espécies com altura média de 4,0 metros e indivíduos emergentes de 7,0 metros. Ocorre normalmente em áreas de topografia de suave a ondulada, em solos profundos do tipo areno-argilosos, sendo freqüente a presença da pedregosidade e afloramentos rochosos. Este tipo de vegetação apresenta-se nas encostas e topos de serras entre as altitudes de 550 a 750 metros.

Tipo Florestal AG 4 (Figura 1(d)) – Vegetação Arbórea Fechada, com presença de alguns arbustos, altura média de 5,0 metros e emergentes com mais de 8,0 metros, ocorre principalmente nas encostas e nos topos de serras. Nestas áreas a topografia é de ondulada a fortemente ondulada e acontece nas altitudes maiores de 750 metros, onde surgem os famosos “Brejos de Altitudes”.

A escolha da área para realização deste trabalho relaciona-se ao fato da mesma possuir uma topografia bastante variável apresentando um grau de correlação muito forte com a ocorrência dos tipos florestais o que justificou a utilização da altimetria como dado auxiliar. Um outro fator que pesou foi por esta ter sido objeto de estudos anteriores facilitando desta forma a obtenção de informações sobre a vegetação e o relevo. A Figura 1(a) mostra a imagem TM da área teste.

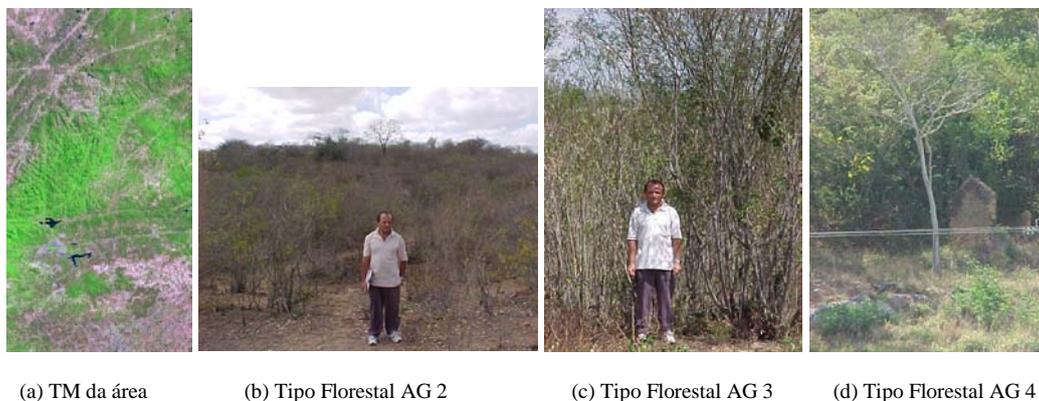


Figura 1 - Brejo de Altitude.

1.4 Efeitos Topográficos na Imagem

A vegetação de Brejo de altitude localiza-se em uma área movimentada e tanto uma fotografia aérea como uma imagem de satélite incluirá esta informação como uma área de sombra. Este efeito topográfico corresponde à mudança das propriedades direcionais da reflectância e da radiância de uma superfície ocasionada pela variação do seu relevo. Este tipo de problema este bem representado na Figura 2.

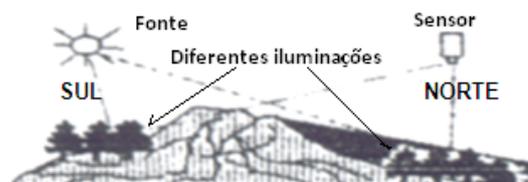


Figura 2 – Representação esquemática do efeito topográfico na aquisição da imagem. Fonte : Adaptada de Chuvieco, (1992).

Uma abordagem utilizada para reduzir o efeito topográfico é dada pela razão de bandas (Lillesand e Kiefer, 2000). A Figura 3 mostra a razão de bandas 4 com a banda 3. Percebe-se que o resultado mostra uma minimização do efeito topográfico, porém isto fica restrito a uma única banda sintética. Neste artigo utiliza-se a altimetria como dado auxiliar para melhorar a classificação por máxima verossimilhança.

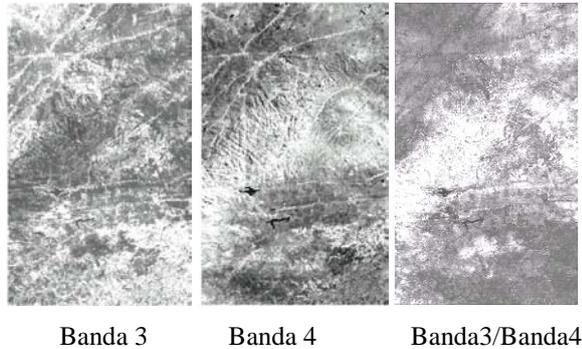


Figura 3 – Razão de bandas TM3 e TM4 de parte dos municípios de Belo Jardim, Tacaimbó e Brejo da Madre de Deus da imagem adquirida pelo sensor ETM+ do Landsat-7 em 07/05/2001.

O efeito topográfico pode alterar a estimativa de área plantada ou de vegetação remanescente. Supondo o exemplo de áreas de reflorestamento ligados à indústria de papel que plantam eucaliptos em regiões com relevo acidentado. Neste caso, o efeito topográfico, pode dificultar a estimativa da área plantada e o montante de madeira disponível, na imagem classificada por máxima verossimilhança.

Também quando se deseja mapear áreas de vegetação situadas em encostas com imagens e utilizando uma estratificação tem-se um problema em sua determinação.

2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA TESTE

A área de estudo escolhida localiza-se entre os paralelos de coordenadas 08° 00' 00" e 08° 29' 44" Sul e os meridianos de coordenadas 36° 29' 13" e 36° 29' 26" Oeste de WGr. Abrange parte dos municípios de Belo Jardim, Brejo da Madre de Deus e Tacaimbó, estes situados no Agreste pernambucano. A Figura 4 mostra a localização desta área no mapa de Pernambuco.

Na classificação de uma imagem de sensoramento remoto é necessário levar em considerações fatores como clima, relevo e situação fundiária que são destacadas a seguir na área de interesse.



Figura 4 - Localização da área.

a) Clima

A área teste fica situada na zona de transição entre duas regiões com situações geográficas distintas, o Litoral/Mata e o Sertão, refletidas pela umidade e relevo. Apresenta um tipo climático característico (Tropical Sub-úmido), de temperaturas médias anuais entre 22° e 24° C. As condições climáticas são muito heterogêneas, uma vez que o relevo é muito movimentado e tem forte influência, não só sobre a temperatura, como também sobre a umidade relativa do ar e o regime pluviométrico.

b) Relevo

O relevo se constitui de uma sucessão de degraus e superfícies aplainadas, com variações altimétricas que chegam a atingir altitudes superiores a 1000 metros. Contudo, nas áreas de maiores altitudes e expostas aos ventos alísios de sudeste, aparecem os “Brejos de Altitude” originalmente cobertos por matas serranas e são considerados disjunção da mata atlântica. A vegetação predominante é a Caatinga hipo e hiperxerófila, cujas espécies apresentam perda das folhas, árvores retorcidas, dotadas de espinhos e a presença de Cactáceas e Bromeliáceas.

c) Situação Fundiária

A situação fundiária dos municípios de Belo Jardim, Tacaimbó e Brejo da Madre de Deus é composta por 65% de minifúndios de 0 -10 ha, as propriedades de 0 -100 ha representam 20%, de 100 – 1000 ha somam 19% e 1% são maiores que 1000 ha, INCRA, (2003). De uma maneira geral a pecuária se desenvolve nas grandes e médias propriedades, enquanto nas pequenas predominam as lavouras de subsistência. Os principais cultivos temporários são: milho, feijão, algodão herbáceo, batata doce, hortaliças ao longo dos cursos d’água e os permanentes são: abacaxi, mandioca e algodão arbóreo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi desenvolvida em etapas e inclui: a seleção da área de estudo; seleção do material cartográfico e de imagens Landsat disponíveis; revisão bibliográfica; pesquisa de campo; identificação de software; geração de modelo numérico de terreno e de seus produtos de interesse; classificação da imagem pelo método supervisionado utilizando-se a técnica de máxima verossimilhança (MaxVer); incorporação de dados auxiliares antes, durante e depois do processo de classificação da imagem; análise dos resultados, considerações e recomendações.

Foram utilizados os seguintes materiais: carta topográfica, folha SC.24-X-B-III, escala 1:100.000, elaborada pela 3ª Divisão do Serviço Geográfico do Exército para a Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE, em 1986; carta de vegetação em 1:100.000, correspondente a folha SC.24-X-B-III, elaborada em 1998, por meio de classificação visual de imagens do satélite Landsat TM-5, em papel fotográfico, composição colorida das bandas 3, 4 e 5; carta altimétrica, da área de estudo em formato digital dxf e georreferenciadas; imagem Landsat ETM+, 215 / 066, data de obtenção 07/05/2001, georreferenciadas; GPS de navegação; máquina fotográfica digital; Pentium IV, e programas auxiliares.

As tecnologias de sensoriamento remoto e do SIG são usadas de forma para coletar, analisar e descrever informações a respeito dos recursos da terra. As duas tecnologias proporcionam capacidades e mecanismos complementares, (Aronoff, 1989).

O Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas; (SPRING, 2010) é um sistema computacional desenvolvido pela equipe da Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Este sistema objetiva a integração e análise de diferentes tipos de dados espaciais. O modelo de dados do SPRING está baseado no paradigma de orientação a objetos (Câmara, 1995).

Diante do exposto, para o processamento dos dados, optou-se por um desenvolvimento metodológico utilizando-se o sistema SPRING, que consiste basicamente em três etapas:

1. Classificação de parte da imagem que recobre a área de estudo pelo método supervisionado utilizando o algoritmo da máxima verossimilhança (experimento I).
2. Realização da integração dos dados auxiliares antes (experimento II), durante (experimento III) e depois (experimento IV) do processo de classificação da imagem.
3. Análise dos resultados que foram gerados.

4. CLASSIFICAÇÃO NA ÁREA DE ESTUDO

A realização do processo de classificação da vegetação por imagem de satélite requer que seja feita uma estratificação de tipos florestais existentes na área de estudo para a definição das classes temáticas. Esta

atividade tem grande importância no momento da montagem das áreas de treinamento que serão descritas mais adiante. Assim, as observações realizadas em campo e esta visão da vegetação de Pernambuco deram suporte a tarefa de estratificação e formação do conjunto de treinamento utilizado na classificação da vegetação por meio da imagem de satélite.

Um dos mais frequentes métodos usados para extração de informações é a classificação multiespectral, (Jensen, 1996).

O Sistema SPRING permite a classificação supervisionada e não supervisionada. Portanto, nesta pesquisa, classificou-se parte da imagem, que recobre a área de estudo, pelo método supervisionado utilizando-se a técnica de máxima verossimilhança (MaxVer), com este sistema. O treinamento foi obtido com base no mapa de vegetação e na pesquisa do campo. Iniciando o processo de classificação, fez-se a composição das bandas 5,4 e 3 da imagem e em seguida o realce.

Segundo Lillesand & Kiefer (2000), teoricamente, o número mínimo de pixels que o conjunto de treinamento deve possuir é $n+1$, onde n é o número de bandas espectrais. Na prática, de acordo com Chuvieco (1990), o número mínimo de pixels varia de $10n$ a $100n$. Isto se deve ao fato do valor da média e das matrizes de covariância serem mais precisos à medida que o número de pixels do conjunto aumenta.

De acordo com Chen (1989), a escolha das áreas de treinamento influi diretamente nos resultados de classificação de uma área de estudo. Portanto, deve ser coletado o maior número possível de informações a seu respeito. Estas informações são chamadas de “verdade terrestre” e normalmente são coletadas nas observações realizadas durante a visita de campo.

A escolha de uma amostra constitui uma fase crítica num processo de classificação assistida. Na bibliografia são raras as indicações que auxiliem o analista de imagens de satélite na recolha da amostra. As regras mais citadas na bibliografia são regras empíricas segundo as quais o número de pixels em cada classe deve depender do número de variáveis (p) consideradas. Por exemplo, Swain e Davis (1978) sugerem que esse número seja superior a $10p$ e preferencialmente a $100p$. Já Mather (1999) sugere $30p$.

A falta de indicações a esse respeito na bibliografia deve-se à inexistência de resultados teóricos suficientemente gerais sobre a questão da dimensão das amostras. Existem sobre esta questão dois pontos de vista:

1. para um dado classificador procura saber-se qual é a dimensão da amostra necessária para se garantir uma boa generalização dos resultados, ou
2. dada uma amostra procura-se obter os melhores resultados possíveis a partir dessa mesma amostra. O segundo ponto de vista é, em muitos casos, o ponto de vista adaptado na prática.

Para o treinamento supervisionado identificou-se no mapa de vegetação áreas representativas de cada

classe e as correspondentes na imagem. Neste procedimento teve-se o cuidado de escolher amostras bastante homogêneas de cada classe na imagem, mas ao mesmo tempo procurou-se incluir toda a variabilidade dos níveis de cinza do tema em questão. Utilizou-se um GPS de navegação na obtenção das amostras de campo e fez o registro fotográfico. Sendo assim, o conjunto de treinamento foi formado por 45 amostras, 15 para cada tipo florestal.

Este sistema permite também realizar, antes da classificação, a análise quantitativa das amostras que participarão do treinamento no momento da classificação. Assim, foram eliminadas as amostras que apresentaram confusão média acima de 10%. De posse das amostras e das bandas escolhidas, a imagem foi classificada com um limiar de aceitação de 95%.

4.1 Classificação por Máxima Verossimilhança

O método MaxVer, bem como outros métodos de classificação supervisionada, parte do princípio no qual o intérprete (usuário) conhece bastante a região abrangida pela imagem a ser classificada e isso ajuda na representatividade da definição das classes.

Este tipo de classificador é baseado no princípio segundo o qual um dado pixel poderia ser atribuído numa classe a qual, mais provavelmente, ele pertence. Uma estratégia comum usada é chamada de “Otimização de Bayes” ou “Método Bayesiano”, a qual minimiza o erro de classificação sobre toda entrada de dados classificados. Este é outro modo de empregar o princípio de probabilidade máxima.

O método utiliza o parâmetro FDP (Função de Densidade de Probabilidade). O método MaxVer considera que as classes representam distribuições normais multivariadas e, conseqüentemente, dependem do vetor médio e da matriz de covariância de cada classe, sendo assim, classifica o novo valor na classe de maior verossimilhança.

Os algoritmos de classificação supervisionados utilizam conhecimento “a priori” sobre as áreas de interesse. Este conhecimento é utilizado para fornecer amostras de treinamento confiáveis para o algoritmo e assim permitir a classificação com base na distribuição de probabilidade da classe, com base no treinamento.

Portanto, o vetor X será classificado numa classe C_i se a probabilidade “a posteriori” associada a C_i para X for maior entre as possíveis. Isto é:

$$MáxP(C_i | X) = \frac{P(X | C_i)P(C_i)}{P(X)} \quad (1)$$

Onde:

$P(C_i / X)$: probabilidade de que o vetor X pertença à classe C_i (probabilidade a posteriori)

$P(X / C_i)$: probabilidade condicional da classe C_i

$P(C_i)$: probabilidade de que a classe C_i ocorra na imagem (probabilidade a priori)

$P(X)$: probabilidade de ocorrer o evento X

Enfim, a regra de decisão de Bayes do tipo atribuir o vetor X de pixels à classe C_i é dada como :

$$D_i(X) > D_j(X); \forall, i \neq j \text{ e } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

Conforme (Schowengerdt, 1980), a função discriminante $D_i(X)$ pode ser escrita como:

$$D_i(X) = \ln[P(i)] - \frac{K}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln|\Sigma_i| - \frac{1}{2} (X - M_i)^T \Sigma_i^{-1} (X - M_i) \quad (3)$$

onde, X = vetor do píxel medido;

M_i = vetor das médias para a classe i ;

Σ_i = matriz covariância (simétrica de ordem

$K \times K$) para a classe i .

Quando duas ou mais funções discriminantes assumem o mesmo valor, que ao mesmo tempo é o máximo do conjunto para um determinado píxel, deve-se adotar um critério de decisão que deve ser pré-estabelecido, mas no geral faz-se uma escolha aleatória sem maiores prejuízos, (Schowengerdt, 1980).

É importante ressaltar que este método é passível de enganos ou imprecisões como mostra a Figura 8 na qual pixels pertencentes à classe 2 são atribuídos, pela regra de decisão do método, a uma classe diferente (área sombreada na Figura 5). Neste caso, o método MaxVer tenta manter a percentagem dos pixels classificados erroneamente a mais baixa possível, (Crósta, 1992).

Conforme Menezes (1991), supondo-se a probabilidade de ocorrência de cada classe seja igual um ponto Z será pertencente à classe 1 se: $P(Z/C_1) > P(Z/C_2) > \dots > P(Z/C_n)$ e $P(Z/C_1) > \text{Limiar}$. O limiar é utilizado para evitar pixels que possuam pequenas probabilidades de pertencer a uma determinada classe sejam incluídos nesta classe (Richards, 1986). Se os pixels não atingirem um valor de probabilidade superior a esse limiar em nenhuma classe, não serão classificados.

Em resumo, o processo de classificação pelo método da Máxima Verossimilhança, é considerado puramente espectral, visto que a classificação de um píxel de uma determinada posição depende unicamente dos níveis de cinza de cada classe C_i , não levando-se em consideração quaisquer informações espacial, temporal ou contextual a respeito desse píxel.

Nesse processo a função discriminante utiliza somente o espaço multiespectral definido pelas bandas da imagem, tais como os vetores de médias, as matrizes de covariância e os vetores de estado (X) dos pixels. Por outro lado este método é baseado em premissas estatísticas da área de treinamento e, se o usuário por algum motivo não conseguir definir adequadamente as áreas de treinamento com bastante representatividade, corre-se o risco de que a imagem classificada contenha sérias imprecisões.

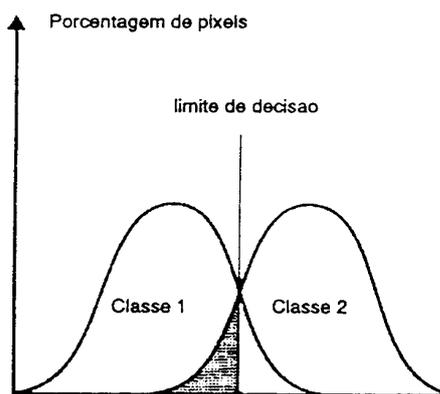


Figura 5 – Enganos ou Imprecisões do MaxVer. Fonte: Crósta (1992)

4.2 Classificação da imagem que recobre a área de estudo

Uma imagem de sensoriamento remoto, por sua natureza digital, é constituída por um arranjo de números sob a forma de malha, associados às características espectrais dos objetos na cena. A interpretação desses dados é possível através de uma análise que associe os valores de cinza aos fenômenos naturais de interesse da cena, isto é, em outras palavras, necessita-se classificar estes dados para que os mesmos descrevam um objeto real da superfície terrestre.

Um dos mais frequentes métodos usados para extração de informações é a classificação multispectral (Jensen, 1986).

A classificação das imagens multispectrais de satélites consiste da associação de cada pixel da imagem a um “rótulo” (atributo, por ex. uma cor) que descreva um objeto real (por ex. água, vegetação e tipo de solo). Assim, os valores numéricos associados a cada pixel, definido pela reflectância dos materiais que compõem esse pixel, são identificados em termos de um tipo de cobertura da superfície terrestre imageada, podendo ser chamadas de temas ou classes.

Neste trabalho classifica-se parte da imagem (experimento I), que recobre a área de estudo, pelo método supervisionado utilizando-se a técnica de máxima verossimilhança (MaxVer) e o sistema SPRING (Figura 6 (f)).

O treinamento foi obtido com base no mapa de vegetação e na pesquisa de campo. Este sistema permite também realizar, antes da classificação, a análise quantitativa da qualidade das amostras que participarão do treinamento no momento da classificação. Assim, foram eliminadas as amostras que apresentaram confusão média acima de 10%. De posse das amostras e das bandas escolhidas, classificou-se a imagem com um limiar de aceitação de 95%.

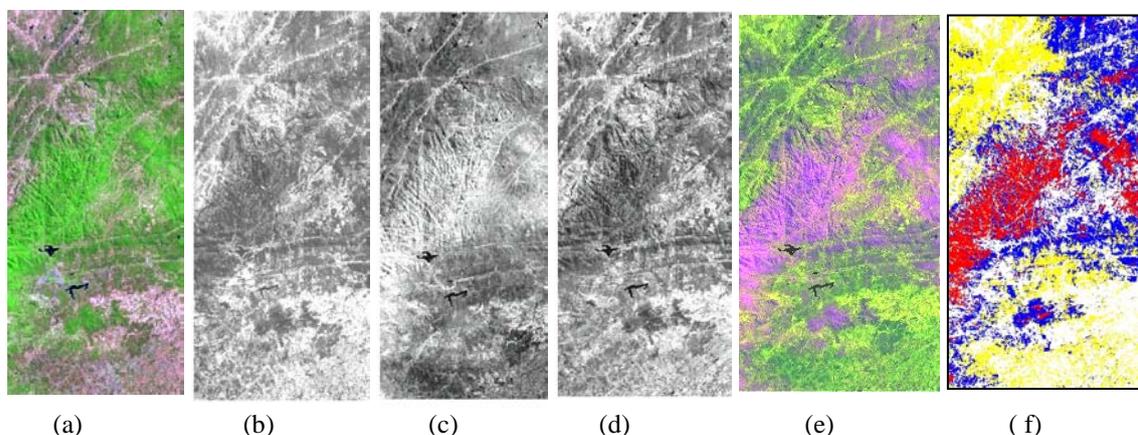


Figura 6 – Imagem cobrindo parte dos municípios de Belo Jardim, Tacaimbó e Brejo da Madre de Deus e adquirida pelo sensor ETM+ do Landsat-7 em 07/05/2001. (a). Composição colorida, bandas 5,4 e 3 e as bandas: (b) 3, (c) 4, (d) 5, (e) Composição colorida b4(R), b5(G) e b4/b3 (B) e (f) classificação MaxVer da composição b5(r), b4(g) e b3(b).

4.3 Geração dos dados auxiliares

Os dados auxiliares têm sido utilizados para ajudar a determinar a distribuição de classes de ocupação do solo, incluindo classes, como agricultura; cobertura vegetal; e classes mais detalhadas, como espécies florestais (Skidmore, 1989; Woodcock et al., 1994 e Woodcock et al., 1997).

A integração de informação auxiliar com dados espectrais têm sido realizada sobretudo em regiões montanhosas, onde a distribuição da ocupação do solo pode ser regida pela topografia e por fatores edafo-climáticos a ela associados.

Os dados auxiliares mais utilizados são derivados de modelos digitais de terreno (MDT): altitude, declive e exposição (e.x., Strahler et al., 1978; Wood-

cock et al., 1994; Campagnolo e Caetano, 1997). Contudo, também tem sido utilizado outro tipo de dados, como fatores ambientais que afetam a distribuição de vegetação, e.x. vento e insolação (Frank, 1988).

Portanto nesta pesquisa, para incorporar a altimetria no processo de classificação dos tipos florestais contidos na imagem, segundo os intervalos de altura pré-definidos por meio da superposição do mapa de vegetação com topográfico, foi preciso gerar um modelo numérico de terreno.

A formação do modelo numérico de terreno-MNT é iniciada com entrada da altimetria (formato (dxf)) no sistema por meio da importação dos dados. A partir desses dados gera-se uma grade retangular de 30m x 30m (compatível com a resolução da imagem utilizada) e a declividade no modo MDT do sistema.

O fatiamento do terreno foi gerado a partir da grade retangular e os temas da imagem temática terão como base os intervalos de ocorrência dos tipos florestais identificados na pesquisa de campo e na observação dos mapas de vegetação e topográfico da área de estudo (altitudes menores que 550, entre 550 e 750 e maiores que 750 metros).

Desta forma, um Plano de Informação de categoria numérica originou um Plano de Informação de categoria temática (fatiamento) representando um aspecto particular do modelo numérico de terreno.

O sistema também permite a geração da imagem em níveis de cinza (de 0 a 255) para o modelo numérico de terreno, onde a resolução (em metros) da imagem de saída tem a mesma da grade retangular que a gerou.

Os dados que foram gerados (fatiamento e imagem de cinza) são utilizados na incorporação da altimetria no processo de classificação da imagem, Figura 7.

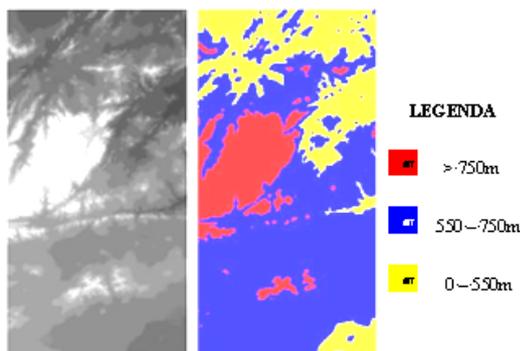


Figura 7 - (a) Fatiamento do terreno (b) Imagem NC (representação da altimetria em níveis de cinza)

4.4 Incorporação dos dados auxiliares no processo de classificação antes, durante e depois

Na estratificação geográfica, dados auxiliares podem ser usados antes da classificação com o objetivo de dividir a imagem regional em estratos que podem então ser processados independentemente.

O objetivo é aumentar a homogeneidade de cada conjunto de imagens a ser classificado (Jensen, 1996). Portanto, na incorporação da altimetria antes do processo de classificação, estratificou-se a área de estudo com base na informação auxiliar (segundo intervalos altimétricos pré-definidos), e a classificação da imagem é realizada separadamente para cada tipo florestal.

Assim, a metodologia utilizada no experimento II consistiu em recortar as bandas da imagem original conforme os intervalos de altimetria do terreno, estabelecidos anteriormente; formação das composições dos recortes das bandas e realces; classificação das composições dos recortes das bandas separadamente e união das classificações dos recortes para obtenção do resultado.

Na obtenção dos recortes da imagem original, segundo intervalos de alturas, utilizou-se um programa na linguagem LEGAL do SPRING.

A informação auxiliar pode ser utilizada para estratificar a área de estudo (Frank, 1988), como bandas auxiliares no processo de classificação (Strahler et al., 1978).

Assim, a metodologia da incorporação de dados auxiliares durante o processo de classificação, no caso do experimento III, consistiu na formação de uma composição das bandas 5 (R), 4 (G) da imagem original adicionada a imagem de cinza (B) do MNT representando a altimetria como dado auxiliar (canal lógico), gerando uma nova imagem e em seguida fez-se o realce da composição e a classificação pelo processo supervisionado utilizando-se o algoritmo da Máxima Verossimilhança.

Com esta metodologia já se pode observar uma separação de classes, conforme se observa na Figura 8.

Hutchinson (1982) classificou dados MSS-Landsat para uma área de deserto na Califórnia em nove classes. Em seguida registrou mapas de declividade e aspecto, derivados de um modelo digital do terreno, com o mapa da classificação e aplicou 20 regras de condição utilizando *if-then* ao conjunto de dados (ex. se o pixel foi inicialmente classificado como duna e se a declividade <1%, então o pixel é um leito de um lago seco). Isto elimina a sobreposição entre várias das classes mais importantes na região. Baseado nesta metodologia, o experimento IV foi realizado com a incorporação dos dados de altimetria após o processo de classificação da imagem. Este processo é realizado com o cruzamento de dois planos de informações PI1 (Imagem classificada sem o dado da altimetria, experimento I), e PI2 (fatiamento do terreno, obtido com base nos intervalos de altimetria que definem a ocorrência das classes de tipos florestais).

A definição de 9 regras possibilitou o cruzamento dos dois planos de informações para a obtenção da imagem reclassificada. Com base nestas regras mostradas a seguir, elaborou-se um programa na linguagem legal do SPRING e efetuou-se o cruzamento dos dois planos de informações envolvidos no problema.

Supõe-se que IT seja a Imagem classificada e MNT seja o Intervalo do fatiamento. No caso da ima-

gem classificada o vermelho é a vegetação arbórea (Ag 4), o azul é a vegetação arbustiva arbórea fechada (Ag 3) e o amarelo é a vegetação arbustiva arbórea aberta (Ag 2).

Sabendo-se que a vegetação do tipo Ag 2 ocorre em geral em altimetria menor que 550 metros, que a vegetação Ag 3 ocorre em altimetria entre 550 e 750 metros e que a vegetação Ag 4 ocorre em altimetria superior a 750 metros, tem-se as regras abaixo para corrigir possíveis classificações erradas de pixels nas classes de vegetação. Para melhor entendimento das regras tem-se que amarelo indica tipo Ag 2, azul indica tipo Ag 3 e vermelho tipo Ag 4. IT é a classificação pela máxima verossimilhança (apenas espectral).

Se IT = Vermelho e MNT \geq 750 metros \rightarrow Faça vermelho

Se IT = Vermelho e $550 \leq$ MNT < 750 metros \rightarrow Faça azul

Se IT = Vermelho e MNT < 550 metros \rightarrow Faça amarelo

Se IT = Azul e MNT \geq 750 metros \rightarrow Faça vermelho

Se IT = Azul e $550 \leq$ MNT < 750 metros \rightarrow Faça azul

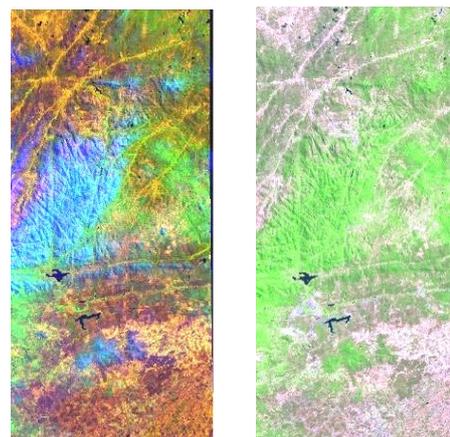
Se IT = Azul e MNT < 550 metros \rightarrow Faça amarelo

Se IT = Amarelo e MNT \geq 750 metros \rightarrow Faça vermelho

Se IT = Amarelo e $550 \leq$ MNT < 750 metros \rightarrow Faça azul

Se IT = Amarelo e MNT < 550 metros \rightarrow Faça amarelo

Antes do cruzamento dos planos de informações fez-se necessário transformar a imagem classificada em uma imagem temática, pois o sistema utilizado (SPRING) só permite realizar o cruzamento de dados de duas categorias iguais, nesse caso temáticas, então para isso utilizou-se uma função disponível no aplicativo do SPRING chamada Mapeamento de classes para imagem Temática, que permitiu a transformação da imagem classificada em uma imagem temática, e com as devidas associações de atributos (cores associadas as classes), obteve-se a transformação da imagem classificada para uma classificada temática. A imagem resultante forma um novo plano de informação que recebeu o nome de Mapaorg. Esta metodologia na realidade é um processo de pós-classificação da imagem classificada no experimento I.



a

b

Figura 8(a) Composição das bandas 5 (R), 4 (G) + (NC) (B). (b) Composição original

4.5 Avaliação da Classificação

Segundo Chuvieco (1992), a estimativa da precisão alcançada pela classificação pode ser determinada por diversos processos tais como: comparação da classificação com outra fonte convencional; análise da confiabilidade obtida ao classificar as áreas de treinamento usando a matriz de confusão (contingência) e seleção de áreas da imagem classificada para serem verificadas no terreno.

Na prática, esta verificação é feita checando-se em campo áreas da imagem classificada (amostras diferentes das de treinamento), utilizando-se um processo amostral de verificação. O ideal é que o trabalho esteja sendo desenvolvido na mesma época de obtenção da imagem, o que não é o caso desta pesquisa.

Assim, para verificar se as informações que compõem o mapa resultante da classificação possuem confiabilidade temática, faz-se necessário avaliar a exatidão da classificação.

Uma das formas mais simples e completa para apreciar os resultados de uma classificação é através da designada matriz de erro (matriz de confusão ou tabela de contingência). Para fazer isso ela compara os dados da verdade de campo com os dados da Classificação (Classes do mapa temático). Essa representação é adequada quando se considera um número baixo ou moderado de classes.

Em Chuvieco (1992) tem-se que a matriz de erros (contingência) é usada para representar a frequência das combinações de duas variáveis e permite: mostrar a relação entre os dados de referência e os resultados da classificação; detecção de mudanças temporais quando comparação de duas imagens obtidas em épocas distintas.

Se for utilizada para fins de detecção de alterações temporais, a diagonal indicará, em pixels, o quanto uma determinada área permanece intacta (por exemplo, quanto de vegetação ainda não foi desmatada), e as demais posições da matriz permitem estabelecer quanto

uma classe se alterou para outra classe (por exemplo, quanto de vegetação foi transformada em solo exposto).

Se for utilizada para fins de verificação exatidão da classificação, consistirá de uma matriz bidimensional quadrada $n \times n$ onde, nas linhas representam as classes previstas pelo classificador e as colunas a realidade (as classes a que efetivamente pertencem as observações amostrais).

A diagonal desta matriz expressa o número de pixels de treinamento que estão de acordo com a realidade (confronta classificação e realidade terrestre). Os valores localizados nas outras posições da matriz expressam os pixels classificados erroneamente ou a confusão entre classes.

A relação entre o número de pixels corretamente classificados e o total de pixels de treinamento expressa a exatidão total (desempenho global) da classificação gerada. Portanto, o desempenho global da classificação é a estimativa da probabilidade de um indivíduo ser corretamente classificado pelo Classificador.

Para avaliação do desempenho global (sobre a totalidade das classes) pode ser usada a precisão global na imagem. Mas existem outros indicadores de precisão igualmente usados em classificação de imagens de satélite. O coeficiente Kappa, deduzido por Cohen (1960) e mostrado em Oliveira (1999), é o mais usado para avaliar a precisão de classificação de mapas produzidos a partir de imagens de satélite.

Os valores do índice Kappa são inferiores aos valores de precisão global pois traduzem o ganho de precisão relativamente a uma distribuição aleatória dos indivíduos pelas classes.

Se por um lado a utilização do índice kappa apresenta algumas vantagens (o estimador correspondente tem uma distribuição de probabilidade conhecida, sob certas hipóteses, o que permite a realização de testes de hipóteses ao desempenho do classificador quando se dispõe de uma única matriz de confusão), por outro

lado, o valor da estimativa de Kappa não é tão facilmente interpretável como o da precisão global (que é a estimativa da probabilidade de um indivíduo ser corretamente classificado pelo estimador).

O coeficiente Kappa pode mostrar o desempenho da classificação segundo a Tabela 1.

Tabela 1: Classificação em função de Kappa

Kappa	Desempenho da Classificação
$K < 0$	Péssimo
$0,0 < K < 0,2$	Mau
$0,2 < K < 0,4$	Razoável
$0,4 < K < 0,6$	Bom
$0,6 < K < 0,8$	Muito Bom
$0,8 < K < 1,0$	Excelente

Pode-se dizer de Kappa (K) que: quando $K < 0$ não ocorre discriminação entre as classes; quanto mais K se aproxima de 1 melhor é a classificação e para $K = 1$ isto acontece como se não houvesse os erros de omissão e inclusão.

5. RESULTADOS

A Figura 9 mostra os resultados qualitativos dos experimentos. Considera-se como experimento I a classificação sem uso da altimetria, experimento II classificação com uso da altimetria antes processo de classificação, experimento III classificação com uso da altimetria durante o processo de classificação e experimento IV classificação com uso da altimetria após o processo de classificação.

Foi utilizado o sistema SPRING (versão 4.0) do INPE e a linguagem LEGAL para desenvolver os resultados a seguir mostrados.

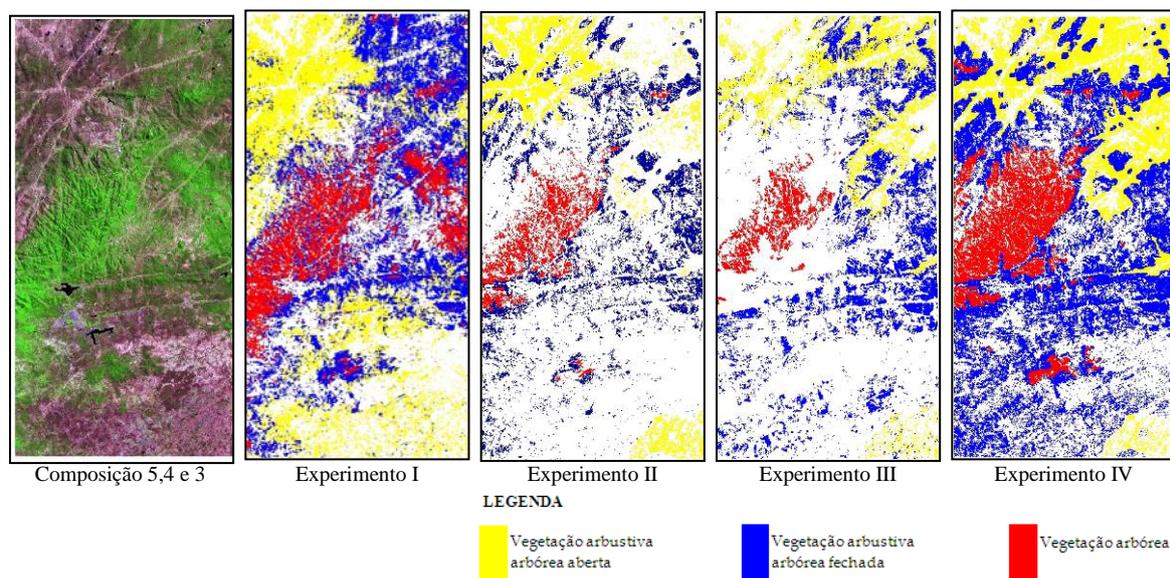


Figura 9 - Resultados qualitativos dos experimentos I, II, III e IV.

Os resultados quantitativos dos experimentos são apresentados em forma de matrizes de classificação onde se pode observar o percentual de pixel classificado corretamente em cada classe, o percentual de confusão média dos pixels entre classes, abstenção média e ainda o desempenho global e o valor de Kappa para cada experimento, Tabela 2.

Na Tabela 2 observa-se, na matriz de classificação do experimento I que houve confusão de similaridade espectral entre as classes Ag2 com Ag3 e Ag3 com Ag4. O experimento II apresenta uma matriz de classificação mostrando que não houve confusão de similaridade espectral entre classes em virtude dessas serem classificadas em separado, o que é uma particularidade

da técnica utilizada. O sucesso desse método é atingido quando se tem um bom conjunto de treinamento.

Já a matriz de classificação do experimento III se comparada a do experimento I observa-se que a confusão de similaridade espectral entre as classes Ag2 com Ag3 não existe e Ag3 com Ag4 diminuiu significativamente, quando incorpora-se a altimetria durante o processo de classificação da imagem.

Finalmente, a matriz de classificação correspondente ao experimento IV não apresenta confusão de similaridade espectral entre as classes, visto que, a técnica pós-classificação utilizada promove a reclassificação dos pixels classificados incorretamente no experimento I.

Tabela 2 - Resultados quantitativos dos experimentos I, II, III e IV.

Experimento I						
Classes do mapa temático	Verdade de campo					Desempenho geral: 90,29 % Confusão média : 4,28 % Abstenção média: 5,42 % Estatística KHAT: 85,57 %
	Ag 2	Ag 3	Ag 4	Abst.	Soma	
Ag 2	92,42%	2,89%	0,00%	4,69%	100%	
Ag 3	3,42%	90,11%	2,28%	4,19%	100%	
Ag 4	0,00%	4,87%	88,64%	6,49%	100%	
Experimento II						
Classes do mapa temático	Verdade de campo					Desempenho geral: 94,74 % Confusão média : 0,00 % Abstenção média: 5,26 % Estatística KHAT: 91,57 %
	Ag 2	Ag 3	Ag 4	Abst.	Soma	
Ag 2	92,67%	0,00%	0,00%	7,33%	100%	
Ag 3	0,00%	97,37%	0,00%	2,63%	100%	
Ag 4	0,00%	0,00%	97,92%	2,08%	100%	
Experimento III						
Classes do mapa temático	Verdade de campo					Desempenho geral: 95,18 % Confusão média: 0,31 % Abstenção média: 4,51 % Estatística KHAT: 92,11 %
	Ag 2	Ag 3	Ag 4	Abst.	Soma	
Ag 2	94,74%	0,00%	0,00%	5,26%	100%	
Ag 3	0,00%	97,17%	0,00%	2,83%	100%	
Ag 4	0,00%	0,54%	94,38%	5,08%	100%	
Experimento IV						
Classes do mapa temático	Verdade de campo					Desempenho geral: 94,57 % Confusão média: 0,00 % Abstenção média: 5,42 % Estatística KHAT: 91,34 %
	Ag 2	Ag 3	Ag 4	Abst.	Soma	
Ag 2	94,65%	0,00%	0,00%	5,35%	100%	
Ag 3	0,00%	95,23%	0,00%	4,77%	100%	
Ag 4	0,00%	0,00%	92,58%	7,42%	100%	

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia que melhorasse a classificação por máxima verossimilhança, empregando dados auxiliares

quando se tem confusão entre classes. No caso aqui estudado foi utilizado como dado auxiliar a altimetria, visto que os tipos florestais estudados ocorrem em determinados intervalos de altitude.

A incorporação de dados auxiliares no processo de classificação do sensoriamento remoto é uma alternativa importante em estudos baseados especificamente na análise per-pixel da informação. Entretanto a escolha de variáveis a serem incluídas é crítica. O bom senso sugere que analistas devem escolher inteligentemente, somente variáveis de significado prático e conceitual para o problema da classificação que se apresenta.

Incorporar dados auxiliares ilógicos ou suspeitos pode consumir rapidamente recursos limitados para a análise de dados e conduzir a resultados inexatos (Jensen, 1986).

A técnica de pós-classificação utilizando a altimetria como dado auxiliar oferece diversas vantagens. Primeiramente, é simples, rápida e facilmente implementada. Segundo é eficiente porque funciona somente com classes de "problemas". Terceiro, é relativamente simples incluir diversos tipos de dados auxiliares. Finalmente, porque são utilizados após a classificação, erros produzidos na seleção das normas podem ser corrigidos facilmente e não requerem que a classificação seja refeita.

A determinação da matriz de erros permite verificar e analisar as confusões ocorridas entre as classes temáticas levantadas e a exatidão da classificação por meio do desempenho global e do coeficiente Kappa. Entretanto, os valores obtidos do coeficiente Kappa, menores que a Exatidão Global justifica-se pelo fato do índice Kappa considerar todas as células da matriz de erros.

Houve uma melhora de aproximadamente 5% na classificação com a incorporação da altimetria antes, durante e depois do processo de classificação, que pode ser vista pelos desempenhos e coeficientes Kappa apresentados na Tabela 2. Isto mostrou que a altimetria incorporada como dado auxiliar no processo de classificação é uma técnica que serve para minimizar a similaridade entre classes quando se deseja classificar a vegetação por meio de imagem de satélite.

As três técnicas de integração da altimetria no processo de classificação supervisionada utilizadas mostraram que são eficientes para diminuir a similaridade espectral entre classes de tipos florestais em áreas onde a topografia influencia no porte da vegetação (áreas de matas serranas e de brejos de altitudes). Porém o número de classe que apresentam a similaridade espectral deve ser pequeno.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação do Departamento de Engenharia Cartográfica – Decart da Universidade Federal de Pernambuco por disponibilizar sua estrutura.

Aos professores Jorge Silva Centeno e Hideo Araki, do Curso de Pós-Graduação de Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pelo incentivo e apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCOFORADO-FILHO, F.G.; SAMPAIO, E.V.S.B.; RODAL, M.J.N. Florística e fitossociologia de um remanescente de vegetação caducifolia espinhosa arbórea em Caruaru, Pernambuco. *Acta Botanica-Brasilica*, v. 17, p. 289-305, 2003.
- ARONOFF, S.; **Geographic information systems: A management perspective**. 1.ed. Ottawa, WDL, 1989. 295p.
- CAETANO, M., SANTOS, J. & NAVARRO, A. A **multi-strategic approach for land use mapping of urban areas by integrating satellite and ancillary data**, proceedings of the 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS,1997). 240-242. Singapura. 1997.
- CÂMARA, G. Anatomia de sistemas de informações geográficas: visão atual e perspectivas de evolução. In: ASSAD, E.D., SANO, E.E. **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Brasília, EMBRAPA, 1993.
- CÂMARA, G. *Modelos, Linguagens e Arquiteturas para Bancos de Dados Geográficos*. Tese de Doutorado, INPE - São José dos Campos, SP, 1995.
- CAMPAGNOLO, M. L. & CAETANO M. **Abordagens multi-estratégicas para classificação de imagens de satélite**. Relatório do Projecto DGOT/JNIT (28/94). Publicação Técnica. CNIG. 1997.
- CHEN, S. C. Metodologia de Análise Digital de Dados Orbitais. In: FORMAGGIO et al. **O Sensoriamento Remoto na Agricultura: Conceitos Básicos, Metodologia e Aplicações**. São José dos Campos, INPE, p. 107-126,1989.
- CHUVIECO, E. Fundamentos de Teledeteccion Espacial. Espanha, ed. Unigraf s/a, 1990. 451p.
- CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992.
- DANSEREAU, P. **The continuum concept of vegetation: responses**. *Botanical review*, 34(3) 253-332, 1968.
- EGLER, W. A. Contribuição ao estudo da caatinga pernambucana. **Revista Brasileira de Geografia**, 13 (4): 577-590, out./dez. 1951.
- EITEN, G. **Classificação da vegetação do Brasil**. Brasília, CNPq, 1983. cap 5, p. 18-19.
- FRANK, T. D. Mapping dominant vegetation communities in the Colorado Rocky Mountain front rang with Landsat Thematic mapper and digital terrain

- data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 54: 1727-1734. 1988.
- FERRAZ, E.M.N.; RODAL, M.J.N.; SAMPAIO, E.V.S.B., Physiognomy and structure of vegetation along an altitudinal gradient in the semi-arid region of northeastern Brazil. *Phytocoenologia*, v. 33, p. 71-92, 2003.
- GALVÃO, M. V. Regiões Bioclimáticas do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia**, 29 (1): 3-6, jan./mar., 1967.
- HUTCHINSON, F. Techniques for combining Landsat and Ancillary Data for Digital Classification Improvement. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 48 (1): 123-130, 1982.
- JENSEN, J. R. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. 2nd. Ed., Saddle River, N. J. : Prentice-Hall, 1986, 316p.
- JENSEN, J. R. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1996. 379 p.
- LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. Remote Sensing and Image Interpretation. Second edition, John Wiley & Sons, New York, 1994.
- KUHLMANN, E. O domínio da caatinga. **Boletim Geográfico**, 33 (241) : 65 – 72. jul./ago. 1974.
- MATHER, P. M. Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction. Second Edition, Chichester: John Wiley and Sons, 1999.
- MENEZES, P. R. et al. **Introdução ao processamento de imagens digitais de satélites de Sensoriamento Remoto**. Brasília, DF, UNB, 1991. 96p.
- OLIVEIRA, H. N. B. **Segmentação e Classificação de Imagens Landsat TM**. Curitiba, 1999. Dissertação (Mestrado em Informática) – Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.
- PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência, tecnologia e Meio Ambiente. **Atlas da Biodiversidade de Pernambuco**. Recife: SECTMA, 2002.
- PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência, tecnologia e Meio Ambiente. **Diagnóstico do Setor Florestal do Estado de Pernambuco**. Recife: SECTMA, 1998.
- RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Image Analysis**. New York: Springer-Verlag, 281p., 1986.
- SÁ, I. B. **Aplicação Multiestágio em Sensoriamento Remoto para Mapeamento da Vegetação de Caatinga : Estudo de Caso, Petrolina-PE**. Dissertação de Mestrado. INPE, 1991.
- SCHOWENGERDT, R.A. **Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing**. Academic Press, London, 1980.
- SILVA FILHO, A. A. et al. Mapeamento do Cobertura Florestal Nativa Lenhosa do Estado de Pernambuco. In: **Desenvolvimento Florestal Integrado no Nordeste**. FO: BRA/87/007, Documento de Campo N°17, Recife, 26p, 1998.
- SKIDMORE, A. K. An expert system classifies eucalypt forest types using thematic mapper data and a digital terrain model. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 55: 1449-1464. 1989.
- SPRING - *Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas;ciadas*, INPE, São José dos Campos, SP, <http://www.dpi.inpe.br/spring>, acessado em março de 2010.
- SKIDMORE, A. K. An expert system classifies eucalypt forest types using thematic mapper data and a digital terrain model. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 55: 1449-1464. 1989.
- STRAHLER, A. H. , Logan, T. L. & BRYANT, N. A. Improving forest cover classification accuracy from Landsat by incorporating topographic information. **Proceedings of the Twelfth international symposium on remote sensing of environment**, 927-942. Michigan, USA. 1978.
- SWAIN, P. & DAVIS, S. M. Remote Sensing: The Quantitative Approach. 1^a edição. Editora McGraw-Hill, United States of America, 1978, 327 p.
- VASCONCELOS SOBRINHO, J. **As Regiões Naturais de Pernambuco, o Meio e a Civilização**. Livraria Bast. 1949.