

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5280-TDI/450

APLICAÇÃO DA ABORDAGEM MULTIESTÁGIO EM SENSORIAMENTO REMOTO  
PARA MAPEAMENTO DA VEGETAÇÃO DE CAATINGA: ESTUDO DE CASO,  
PETROLINA, PE

Iêdo Bezerra Sá

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada  
pelos Dr. Vítor Celso de Carvalho e Dr. João Roberto dos  
Santos, aprovada em fevereiro de 1991.

INPE  
São José dos Campos  
Abril de 1991

528.711.7

SÁ, I.B.

Aplicação da abordagem multiestágio em sensoriamento remoto para mapeamento da vegetação da Caatinga: estudo de caso, Petrolina, PE. / I.B.Sá. -- São José dos Campos: INPE, 1991. 96p. -- (INPE-5280-TDI/450)

1. Vegetação. 2. Caatinga. 3. Mapeamento. I. Título

Aprovada pela Banca Examinadora  
em cumprimento a requisito exigido  
para a obtenção do Título de Mestre  
em Sensoriamento Remoto

Dr. Vitor Celso de Carvalho

Vitor Celso de Carvalho.  
Orientador/Presidente

Dr. João Roberto dos Santos

João Roberto dos Santos.  
Orientador

Dr. Ênio Giotto

Ênio Giotto  
Membro da Banca  
-convidado-

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro

Yosio E. Shimabukuro  
Membro da Banca

Candidato: Iêdo Bezerra Sá

São José dos Campos, 28 de fevereiro de 1991



## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

aos meus pais, Ivan e Toinha, por  
terem conduzido a minha formação;

à minha esposa, Socorro, pelo seu  
carinho, incentivo e dedicação na  
condução do lar;

aos meus filhos, Iêda e Diego, por  
terem entendido minhas ausências.



## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Vítor Celso de Carvalho pela orientação e apoio, e ao Dr. João Roberto dos Santos por sua receptividade e pelas sugestões durante a execução deste trabalho.

A minha esposa, Maria do Socorro D. dos Santos Sá, e aos meus filhos, Iêda e Diego, pelo estímulo e compreensão durante todas as fases de elaboração desta pesquisa.

Aos Srs. Luiz Leonardi e Lênio Soares Galvão pelas sugestões e estímulo na condução deste trabalho.

Aos técnicos da Imagem Sensoriamento Remoto Ltda pelo incentivo e aporte logístico.

Aos pesquisadores da EMBRAPA, Dr. José Luciano Santos de Lima, Dr. Georges André Fotius e Dr. Gilles Robert Riché, pela orientação nos trabalhos de campo e descrição dos solos.

Ao Dr. Renival Alves de Souza, ex-chefe da EMBRAPA/CPATSA, pela oportunidade deste treinamento.

Aos técnicos do Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais do INPE, Moacir Godoy Filho, Eliana Miglioranza e Adriana Abrahão, pela colaboração no tratamento digital realizado no presente estudo.

Às bibliotecárias do INPE e do CPATSA pelo inesgotável senso de colaboração.

Às instituições, EMBRAPA/CPATSA, INPE e CODE-  
VASF, que nas horas oportunas cooperaram para que este tra-  
balho fosse realizado.

A cada uma das pessoas que, a seu modo, con-  
tribuíram nas diversas etapas desta pesquisa, particular-  
mente aos colegas de curso.



## RESUMO

A região semi-árida do Nordeste brasileiro apresenta uma grande diversidade do seu quadro natural. A vegetação desta região, a Caatinga, ocupa cerca de 573.000 km<sup>2</sup>, ou seja 37% da superfície do Nordeste. O presente trabalho teve por objetivo aplicar a abordagem multiestágio, com probabilidade proporcional à área ocupada por classe mapeada, na escala final de 1:100.000. A área de estudo localiza-se no município de Petrolina-PE, compreendendo parte da bacia hidrográfica do riacho Pontal. Nesse sentido, foram conjugadas para o primeiro, segundo e terceiros estágios as informações orbitais do sensor Thematic Mapper (TM), fotografias aéreas pancromáticas na escala de 1:15.000 e trabalho de campo, respectivamente. Foram utilizados dois procedimentos de classificação no processamento digital dos dados TM/Landsat-5: o primeiro, através do algoritmo "MEDIA-K", e o segundo, agregado com as informações das fotografias aéreas e checagem de campo, através do algoritmo "MAXVER". No primeiro, segundo e terceiro estágios, foram selecionadas as Unidades Primárias de Amostragem (UPAs), as Unidades Secundárias de Amostragem (USAs) e as Unidades Terciárias de Amostragem (UTAs), respectivamente. Estas informações foram integradas num sistema de amostragem com probabilidade variada através de um estimador de três estágios. Os erros de amostragem para as classes de formações de Caatinga variaram de 8,26 a 23,07%. Os resultados alcançados evidenciam a potencialidade de mapear a vegetação natural desta região, com um nível de precisão aceitável, e que esta técnica otimiza tempo e custos por minimizar os trabalhos de campo.



APPLICATION OF THE MULTISTAGE APPROACH IN REMOTE SENSING  
FOR "CAATINGA" VEGETATION MAPPING: A CASE STUDY, PETROLINA  
(BRAZIL)

ABSTRACT

The Brazilian semiarid region presents a great diversity of its natural environment. The natural vegetation named "Caatinga" occupies around 573,000 km<sup>2</sup>, corresponding to 37 percent of the Northeast region. The objective of this work was to evaluate the application of the multistage approach in optimizing the mapping process of this vegetation, on a final scale of 1:100,000. To do this so, the orbital information of the Thematic mapper (TM) sensor, aerial panchromatic photographs on the scale of 1:15,000 and field works were conjugated. Two classification procedures were used in the digital processing of the TM/Landsat-5 data: The first one, through the "MEDIA-K" algorithm, and the second one, aggregated aerial photographs and field work information, through the "MAXVER" algorithm. In the first, second and third stages, Primary Sampling Units, Secondary Sampling Units and Terciary Sampling Units, respectively, were selected. These information were integrated within the three stage variable probability sampling system. For the class of vegetation, the sampling errors ranged from 8.26 to 23.07%. The results obtained show the potential in using multistage approach for the mapping process of vegetation, within an acceptable precision level, and that technique optimizes time and cost by minimizing field work.



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE TABELAS.....	xix
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
<u>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA.....</u>	<u>5</u>
2.1 - A Caatinga: visão ampla.....	5
2.2 - Aspectos edafo-climáticos.....	8
2.3 - Classificação da vegetação.....	9
2.4 - Cartografia da vegetação.....	11
2.5 - Abordagem multiestágio.....	12
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</u>	<u>21</u>
3.1 - Área de estudo.....	21
3.1.1 - Localização.....	21
3.1.2 - Descrição da área.....	23
3.1.3 - Descrição da vegetação.....	27
3.2 - Materiais.....	28
3.2.1 - Dados orbitais TM/Landsat-5.....	28
3.2.2 - Sistema de tratamento de imagem.....	28
3.2.3 - Dados aéreos.....	29
3.2.4 - Dados cartográficos.....	29
3.2.5 - Outros materiais e equipamentos auxiliares....	30
3.3 - Métodos.....	30
3.3.1 - Definição da área de estudo.....	31
3.3.2 - Aquisição e pré-processamento das imagens TM/Landsat-5.....	31
3.3.3 - Classificação não supervisionada.....	33
3.3.4 - Fotoanálise.....	33
3.3.5 - Checagem de campo.....	34

3.3.6 - Classificação supervisionada.....	35
3.3.7 - Abordagem multiestágio.....	35
3.3.7.1 - Definição da resolução da grade para deter- minação do número de Unidades Primárias de Amostragem (UPAs).....	38
3.3.7.2 - Determinação do número de UPAs.....	38
3.3.7.3 - Seleção das UPAs.....	40
3.3.7.4 - Definição da resolução da grade para deter- minação do número de Unidades Secundárias de Amostragem (USAs).....	40
3.3.7.5 - Determinação do número de USAs.....	41
3.3.7.6 - Seleção das USAs.....	41
3.3.7.7 - Definição da resolução da grade para deter- minação do número de Unidades Terciárias de Amostragem (UTAs).....	41
3.3.7.8 - Determinação do número de UTAs.....	41
3.3.7.9 - Seleção das UTAs.....	42
3.3.7.10 - Trabalho de campo.....	42
3.3.8 - Integração dos dados.....	42
<u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</u>	45
4.1 - Pré-processamento das imagens TM/Landsat-5.....	45
4.2 - Classificação híbrida.....	47
4.3 - Abordagem multiestágio.....	51
4.3.1 - Determinação e seleção do número de UPAs.....	51
4.3.2 - Determinação e seleção do número de USAs.....	52
4.3.3 - Determinação e seleção do número de UTAs.....	53
4.3.4 - Trabalho de campo.....	53
4.3.5 - Integração dos dados.....	55
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....</u>	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

APÊNDICE A - MODELO DE FICHA PARA LEVANTAMENTO DE CAM <u>PO</u> .....	75
APÊNDICE B - CARTA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA VEGETA <u>ÇÃO</u> : BACIA DO RIACHO PONTAL (PETROLINA - PE).....	77





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
3.1 - Localização da área de estudo e aspectos topográficos.....	22
3.2 - Principais grupos e associações de solos presentes na área de estudo.....	26
3.3 - Fluxograma metodológico.....	32
3.4 - Esquema do sistema de amostragem em múltiplo estágio para mapeamento de vegetação.....	37
4.1 - Histogramas do padrão de resposta espectral da área de estudo antes (a) e depois (b) do emprego do realce linear de contraste.....	46



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 - Estimativas de áreas para as classes de vegetação.....	50
4.2 - Parâmetros estatísticos das UPAs no primeiro estágio.....	52
4.3 - Parâmetros estatísticos das USAs no segundo estágio.....	53
4.4 - Áreas de cobertura vegetal (m <sup>2</sup> ) para as classes de formações no terceiro estágio.....	54
4.5 - Integração dos três estágios para a classe Arbórea-Arbustiva densa.....	56
4.6 - Integração dos três estágios a para classe Arbustiva densa.....	57
4.7 - Integração dos três estágios para a classe Arbustiva aberta.....	58
4.8 - Integração dos três estágios para a classe Subarbustiva aberta.....	59
4.9 - Integração dos três estágios para classe Subarbustiva esparsa.....	60
4.10 - Erro de amostragem da estimativa da área total para as classe de formações.....	61
4.11 - Total de áreas mapeadas em km <sup>2</sup> .....	62



CAPÍTULO 1INTRODUÇÃO

O Nordeste brasileiro, cuja dimensão territorial atinge aproximadamente 1.550.000 km<sup>2</sup>, envolve diversos e complexos ecossistemas, conduzindo a uma grande diversidade dos seus tipos de vegetação. Por decorrência, seu mapeamento torna-se uma tarefa difícil, obrigando a utilização de técnicas e métodos adequados, obviamente associados a uma ampla experiência fitogeográfica, sobretudo no que se refere à aplicação de uma classificação de âmbito universal.

A vegetação do trópico semi-árido (TSA), denominada Caatinga, classificada internacionalmente como Estepe, abrange uma área de aproximadamente 573.000 km<sup>2</sup>, equivalente a 37% da região Nordeste do Brasil. Esta vegetação tem o maior significado dentro do contexto nordestino, por isso, mereceu estudos especiais por parte de vários autores. A Caatinga, além de constituir um dos principais recursos naturais renováveis do TSA, fornece refúgio e alimento para a fauna, madeira para uso do homem e influi no balanço hídrico como protetor natural dos solos contra a erosão. Esta multiplicidade de funções da vegetação requer um conjunto de técnicas para o seu aproveitamento racional, tendo como base a precisa descrição da sua distribuição espacial, composição florística e fisionômica, além dos estudos das relações ecológicas entre as plantas e o ambiente.

As informações obtidas através de técnicas de sensoriamento remoto apresentam um grande potencial de contribuição às atividades de caracterização e mapeamento da vegetação, sobretudo para a região Nordeste, onde os trabalhos de campo são insuficientes e, muitas vezes, mal orientados, em função da grande heterogeneidade do quadro natu-

ral, da inacessibilidade de alguns locais e de fatores relacionados a problemas de ordem financeira.

Os produtos de sensoriamento remoto obtidos através de plataformas orbitais, pelas suas características multiespectrais e multitemporais, podem subsidiar o estudo desta região de forma mais integrada e, aliados aos recursos da informática, permitem um melhor controle dos processos de desenvolvimento da região. Deste modo facilitam a exploração de seus recursos naturais de uma forma mais racional.

Levando em consideração o estudo da vegetação de Caatinga, verifica-se que ela tem sido cartografada em escalas pequenas. Tal fato resulta na escassez de informações acerca de suas inter-relações com os fatores do meio. Juntamente com esta deficiência deve-se considerar a grande diversidade, em termos fisionômicos, da vegetação de caatinga, bem como os poucos estudos de sua distribuição espacial.

Dentro deste contexto, o objetivo do presente trabalho é aplicar a abordagem multiestágio como uma técnica de auxílio no processo de mapeamento da vegetação de Caatinga, ao nível das formações, na escala de 1:100.000. Esta técnica visa contribuir para a otimização de tempo e custos, garantindo um nível de precisão adequado para estas atividades. Para tanto, foi escolhida uma área teste com 15,0 X 15,0 km, equivalente a um módulo de 09 X 09 minutos na projeção Universal Transversa de Mercator, situada no alto sertão do Estado de Pernambuco, no município de Petrolina, compreendendo parte da bacia do riacho Pontal.

Neste trabalho é apresentada uma metodologia que utiliza os dados de sensoriamento remoto em múltiplo estágio para mapeamento de vegetação, bem como representa uma inovação técnica de investigação da vegetação de Caatinga, proporcionando a adaptação e desenvolvimento de métodos rápidos, precisos e econômicos para a região.





## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DE LITERATURA

As considerações apresentadas neste capítulo têm o propósito de dar um embasamento sobre alguns aspectos que estão relacionados com a natureza da pesquisa e fatores ambientais. Deste modo, são abordados os seguintes tópicos: uma visão ampla da Caatinga, mostrando sua complexidade e alguns conceitos ligados à fisionomia e ao grau de estruturação; aspectos edafo-climáticos, importantes na caracterização do meio físico e intimamente relacionados com a fisionomia da vegetação; classificação da vegetação, evidenciando o critério fisionômico e enfatizando as principais dificuldades encontradas nestas atividades; cartografia da vegetação, observando seus objetivos e discutindo alguns sistemas; e por fim a abordagem multiestágio em sensoriamento remoto, com aplicações na área de vegetação.

#### 2.1 - A CAATINGA: VISÃO AMPLA

A classificação dos diferentes tipos de caatingas existentes no Nordeste do Brasil há muito tempo vem provocando polêmicas e levantando debates, uma vez que as análises das comunidades vegetais têm tido como ponto de partida diferentes abordagens.

A caatinga é o tipo de 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 só quanto à fisionomia, como quanto à composição. Assim, esse "complexo vegetacional", caracterizado normalmente como um conjunto de cactáceas espinhosas e árvores com ramos secos e sem folhas, possui uma multiplici-

dade de fisionomias, cuja interpretação por diversos pesquisadores ainda não veio a constituir uma classificação comum.

A vegetação da caatinga apresenta uma graduação de padrões que, num dos extremos, é representada por floresta caducifólia espinhosa e, no outro, por uma comunidade aberta subarbusciva estepária espinhosa.

Na floresta caducifólia observam-se indivíduos arbóreos com 10 a 16m de altura, com caules retilíneos, copas que se tocam, epífitas e lianas, e um estrato imediatamente abaixo, de diferentes espécies, com indivíduos de 6 a 8m de altura. Cactáceas arbóreas, como o Facheiro (Pilosocereus sp) e Mandacaru (Cereus jamacaru), estão presentes nos dois estratos. No estrato inferior são encontrados subarbuscos, diversas ervas, além de plântulas dos estratos superiores (Ferri, 1974).

Nas comunidades abertas subarbuscivas estepárias espinhosas, encontram-se indivíduos baixos, isolados, de tronco retorcido, apresentando copas de forma irregular em que ressaltam os comprimentos dos ramos pendentes e retorcidos, comumente mais longos que o próprio tronco da planta. Entre estes indivíduos encontram-se espaços de solo descoberto que, só no curto período das chuvas, são revestidos por vegetação herbácea. As principais cactáceas presentes são, de acordo com Gomes (1979): Quipá (Opuntia inamoena), Palmatória (Opuntia palmadora) e Xique-xique (Pilosocereus gounellei).

Duque (1980) define a caatinga como um conjunto de árvores e arbustos espontâneos, densos, baixos, retorcidos, de aspecto seco, de folhas pequenas caducas no verão seco, com proteção contra a desidratação pelo calor e pelo vento. As raízes são, em geral, muito desenvolvidas,

grossas e penetrantes.

Em muitos estudos, as caatingas recebem denominação de acordo com os nomes locais das regiões naturais onde se verificam, com as características edafo-climáticas ou ainda com a densidade e cobertura observadas, a saber: Agreste, Carrasco, Sertões, Cariri, Seridó etc. Estas terminologias regionais acarretam, muitas vezes, graves problemas, porque é aplicado o mesmo termo a tipos diferentes de vegetação.

Outra abordagem utilizada é a descrição baseada em caracteres fisionômicos, ou seja, a aparência geral da paisagem observada. O exemplo mais marcante deste critério é a própria denominação indígena, Caatinga, que significa mato branco ou esbranquiçado, ou mesmo ralo, ou ainda, como definiu Martius, "Silvae aestu aphyllae", isto é, floresta sem folhas no estio.

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 fitogeográfica, ecológica e mesmo antrópica. Quanto à fisionomia, o autor evidenciou as seguintes formas: Caatinga arbóreo-arbustiva fechada, arbóreo-arbustiva aberta, arbustiva fechada e arbustiva aberta.

## 2.2 - ASPECTOS EDAFO-CLIMÁTICOS

A atual cobertura vegetal do Nordeste brasileiro resulta tanto dos climas atuais como das flutuações paleoclimáticas. As oscilações climáticas da região tem seus ritmos peculiares de temperatura e umidade, e seus efeitos, bem definidos, sobre o solo e sobre os organismos. Partindo desta premissa, Dansereau (1957) afirmou que "todo afastamento dos valores ideais de qualquer elemento meteorológico induz a uma resposta climática característica".

Em ambiente de caatinga, as temperaturas são, em geral, elevadas (26°C), as umidades relativas médias são baixas (45%) e as precipitações pluviométricas médias anuais situam-se entre 250 e 750mm, aproximadamente. A duração da estação seca também é muito variável, em geral superior a sete meses. No Raso da Catarina, na divisa entre os Estados da Bahia e Pernambuco, e em certos pontos do interior do Estado da Paraíba, a estação seca pode durar de 9 a 10 meses (Ferri, 1974).

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 a denominação de serras frescas ou úmidas no nordeste ocidental, e brejos no nordeste oriental.

Existe uma graduação fisionômica da vegetação na 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. Entre os fatores ambientais,

é o clima, principalmente no que se refere à precipitação pluvial e a sua distribuição espacial, o fator que provoca alterações mais bruscas na paisagem semi-árida.

Os solos, quanto ao seu potencial químico, em geral são tidos como férteis. Do ponto de vista físico, via de regra apresentam boa permeabilidade e são bem arejados. Na superfície ocorrem, com frequência, fragmentos de rochas, de tamanhos variáveis, testemunhando intenso trabalho de desagregação mecânica (Ferri, 1974).

### 2.3 - CLASSIFICAÇÃO DA VEGETAÇÃO

Em geral, a aparência da vegetação é chamada fisionomia, e o maior número de tipos fisionômicos da vegetação mostram a estrutura e uma estratificação mais ou menos distinta com dois ou mais níveis. Cada nível, usualmente, consiste em plantas de mesma forma de vida (árvores, arbustos, ervas etc.). Kuchler (1956) relata que é possível descrever a vegetação em detalhe quando se analisam seus aspectos fisionômicos, motivo pelo qual os mapas fisionômicos são de grande utilidade. O critério fisionômico refere-se aos padrões morfológicos ou a formas de variações da cobertura vegetal. A unidade básica da comunidade de plantas é chamada formação, e os esquemas de classificação que usam critérios fisionômicos são normalmente chamados sistemas de formações (Braun-Blanquet, 1965).

Estas formações foram convenientemente definidas para sensoriamento remoto por Howard e Schade (1982), através dos seguintes parâmetros: zonas climáticas, altura principal do nível dominante, cobertura total do nível dominante e formas de vida. Eles definiram quatro classes de alturas principais dos níveis dominantes e cinco classes de cobertura vegetal.

## a) classes de altura:

- arbórea, com mais de 20m;
- arbóreo-arbustiva entre 5 e 20m;
- arbustiva alta, entre 2 e 5m;
- arbustiva baixa ou herbácea, com menos de 2m;

## b) classes de cobertura vegetal:

- fechada, com mais de 80%;
- densa, entre 40 e 80%;
- aberta, entre 10 e 40%;
- esparsa, entre 2 e 10%;
- ausente, com menos de 2%.

Segundo Dansereau (1968), nas atividades de classificação e mapeamento das comunidades vegetais, três observações são de relevante importância. A primeira observação é que certos limites das manchas de vegetação são de fácil traçado, por serem bastante evidentes em fotos aéreas 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 observação 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.

## 2.4 - CARTOGRAFIA DA VEGETAÇÃO

A cartografia da vegetação tem como principais objetivos facilitar o registro e recuperação da informação de uma maneira ordenada, ajudar o entendimento do próprio fenômeno e tornar possível a comunicação sobre a cobertura vegetal de uma determinada região. Para Fosberg (1961), o registro e as formas de comunicação são os maiores interesses nas atividades de mapeamento da vegetação.

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 conduziu a um baixo nível de informações de sua distribuição, pouco contribuindo para a análise de suas relações com os fatores do meio.

Vários métodos, que adotam sistemas de amostragem aleatória ou sistematizada, têm sido utilizados no mapeamento de áreas semi-áridas. Mueller-Dombois e Ellenberg (1974) salientam que estes produtos, obtidos através de métodos convencionais de mapeamento, ou seja, através de caminhamentos ao longo de transectos, revelam uma determinada incerteza na sua precisão, em função de não se considerar, de uma forma bem ampla, a homogeneidade da vegetação .

A cobertura vegetal é comumente cartografada após o uso de esquemas de classificação bioclimáticos, segundo as propostas de Holdridge (1947) e Walter (1971), ou ainda utilizando-se de esquemas de classificação da paisagem, como nos trabalhos da UNESCO (1973) e Ellenberg e Mueller-Dombois (1967). Os mapas de vegetação obtidos a partir de parâmetros bioclimáticos podem ser usados como estimadores da produção primária. Outros esquemas para mapear a vegetação são baseados nos critérios fisionômicos ou

florísticos. O critério fisionômico produz uma melhor estimativa da fitomassa, por levar em conta as variações devidas à sucessão vegetacional e ao ambiente, como destacou Mueller-Dombois (1984). Segundo este mesmo autor, a cartografia vegetal, através de parâmetros bioclimáticos e da paisagem, promove um mesmo nível de informações, tanto para zonas temperadas quanto para as tropicais, quando o produto final é expresso em pequena escala. Os maiores problemas do mapeamento em grande escala para as regiões tropicais decorrem da grande diversidade de espécies, dos diferentes padrões de distribuição da vegetação e dos poucos estudos de campo.

#### 2.5 - ABORDAGEM MULTIESTÁGIO

O termo multiestágio, na literatura de sensoriamento remoto, frequentemente tem sido aplicado à técnica na qual vários níveis de informações de sensoriamento remoto são obtidos e combinados de forma integrada sobre uma mesma área geográfica, por exemplo: levantamentos de campo, fotografias aéreas de baixa altitude (grande escala), fotografias aéreas de elevada altitude (pequena escala) e produtos obtidos através de plataformas orbitais (escala sinóptica) (Langley, 1975a; Bonner e Morgart, 1980).

O conceito multiestágio tem uma regra básica similar a de outros levantamentos: do geral para o particular. Conforme destacou Reichert (sd), seu principal propósito é economizar tempo e custos, selecionando-se a escala apropriada de dados de sensoriamento remoto necessários para um determinado objetivo, otimizando-se um esquema de amostragem que minimize a variância de um ou mais parâmetros.



A amostragem em multiestágio consiste na seleção de Unidades Primárias de Amostragem (UPAs), no primeiro estágio, e na extração de uma série de subamostras destas UPAs, para serem amostradas nos estágios subsequentes. A cada estágio sucessivo, as unidades tornam-se menores e uma estimativa mais refinada do parâmetro analisado da população é feita. As unidades amostrais podem ser selecionadas basicamente de dois modos: por Amostragem com Probabilidade Variável (PPV) e por amostragem com igual probabilidade. Se a amostragem com probabilidade variável for utilizada, a probabilidade de uma unidade ser selecionada é proporcional ao seu tamanho ou valor estimado (por exemplo, volume de madeira, volume de forragem, percentagem de cobertura, etc). Por outro lado, se a amostragem com igual probabilidade for empregada, cada unidade terá igual chance de ser selecionada. O conceito de amostragem com probabilidade variável (PPV) é bem descrito na literatura sobre técnicas de amostragem (Raj, 1963; Cochran, 1977). A viabilidade e ganho potencial do uso da PPV em relação a outros esquemas de amostragem foi discutida por Langley (1975a).

Embora a teoria ou procedimentos matemáticos para amostragem multiestágio estivessem disponíveis desde os anos 50, o que despertou a atenção dos pesquisadores foi o uso potencial de novas fontes de dados de sensoriamento remoto, especialmente a de imagens de satélite (Hardins e Scott, 1978). Um exemplo hipotético do conceito multiestágio neste contexto foi dado por Reichert (s.d.b), incluindo a avaliação de dados MSS/Landsat para o inventário de madeira de uma área florestal e seleção das Unidades Primárias de Amostragem (UPAs) sobre a imagem Landsat. Segundo este autor, fotografias aéreas foram então tomadas das UPAs selecionadas. Unidades Secundárias de Amostragem (USAs) foram selecionadas sobre estas fotografias aéreas, um subconjunto das quais foi novamente amostrado (Unidades Terciária-

rias de Amostragem - UTAs) para efetivação de medidas em campo e estabelecimento das correlações entre o volume de madeira e os parâmetros medidos ou interpretados nas fotografias aéreas.

Na literatura, as primeiras aplicações do procedimento multiestágio foram feitas por Langley (1969, 1971), usando fotografias espaciais infravermelhas colorida da missão Apolo 9, dois níveis de fotografias aéreas e informações de campo. O objetivo foi desenvolver e aplicar técnicas de amostragem em multiestágio, que tivessem amplas utilizações nos levantamentos de recursos da terra, usando sensoriamento remoto. De forma mais específica, estas técnicas foram direcionadas para o inventário de madeira em áreas dos Estados de Louisiana, Mississippi e Arkansas (EUA). Amostras do primeiro estágio foram selecionadas das imagens orbitais com probabilidade variada, como, por exemplo, a quantidade relativa de recursos contidos nas unidades da população. Aumentando o poder resolutivo das imagens, foram obtidas subamostras em estágios subsequentes, novamente com probabilidade variada. Finalmente, efetivou-se uma amostragem no terreno para obtenção dos dados da verdade terrestre.

Um esquema de amostragem em multiestágio com probabilidade variada foi também utilizado por Heller e Wear (1969), para estudar a infestação por besouro na Floresta Nacional de Black Hills em Wyoming e South Dakota (EUA). A idéia foi determinar, com o uso conjunto de fotografias aéreas coloridas e observações de campo, a orientação da propagação da infestação, o número e o volume das áreas atingidas.

Aldrich (1971) utilizou uma abordagem multiestágio para propósito de inventário de floresta em duas áreas, uma no Estado do Mississippi e outra na Geórgia

(EUA). Um esquema de amostragem de probabilidade variável foi adotado sobre os produtos fotográficos obtidos pela Missão Apolo 9, para ambas as áreas. Bons resultados de estimativa de volume total de madeira foram alcançados na área do Mississippi, o que não ocorreu na Geórgia. Segundo este autor, uma das explicações possíveis para este fato é decorrente dos problemas de amostragem nesta última área, em face das condições ambientais mais heterogêneas de uso da terra.

O trabalho de Nichols et al. (1973) é uma aplicação das técnicas de amostragem multiestágio similar às desenvolvidas previamente por Langley (1969, 71) usando imagens Apolo. Eles usaram estes procedimentos para estimar volume de madeira presente numa área de coníferas mistas em "Floresta Nacional de Plumas", ao norte da Califórnia (EUA). Neste trabalho, imagens Landsat, fotografias aéreas de baixa altitude e dados de campo foram analisados. O volume de madeira foi estimado a partir de três estágios: a) classificação automática das imagens Landsat como suporte à obtenção das classes de volume de madeira e seleção das Unidade Primárias de Amostragem (UPAs); b) aquisição de fotografias aéreas de baixa altitude das UPAs selecionadas, para a escolha de unidades nas fotos, sobre as quais se fez uma estimativa preliminar do volume de madeira; e c) seleção individual de árvores nestas unidades para efetivação de medidas em campo do volume de madeira. Os resultados obtidos mostraram a validade da metodologia empregada, a qual reduz substancialmente custo e tempo necessários para a execução de um inventário de madeira numa grande área, em comparação com os métodos convencionais. Segundo Gialdini et al. (1975), o trabalho de Nichols et al. (1973) é um dos exemplos de estudo de caso que indica a utilidade e efetividade do uso do sensoriamento remoto no auxílio de sistemas de inventário, quando aplicado com esquema de amostragem, imagens espaciais e aéreas e subsequente trabalho de

campo adequados.

Ampliando a dimensão da área de estudo de Nichols et al. (1973), Titus et al. (1975) implementaram um sistema de amostragem baseado na análise visual e automática dos dados Landsat-1, juntamente com fotografias aéreas de grande escala e medidas de campo. Técnicas de amostragem em multiestágio foram adotadas. Segundo estes autores, as demandas de custo e de tempo para aquisição de inventários de recursos florestais nativos foram substancialmente reduzidas com relação a métodos convencionais, o que está de acordo com as observações feitas por Nichols et al. (1973).

Langley (1975a) avaliou o ganho na precisão da amostragem, obtido com um dado tamanho de amostra e com a introdução de informações MSS/Landsat no primeiro nível de uma amostragem multiestágio, para estimativa de volume de madeira de florestas de coníferas na Califórnia (EUA). O modelo interpretativo das imagens Landsat, baseado em classificação não-supervisionada e análise de regressão, foi altamente significativo nos casos estudados por ele. Entretanto, os ganhos de precisão da amostragem variaram conforme a população.

Detalhes matemáticos da derivação da teoria multiestágio e alguns exemplos selecionados do uso desta abordagem, na tentativa de fazer inventário de madeira, foram discutidos por Langley (1975b). Ele também demonstra quantitativamente as vantagens do uso da Amostragem de Probabilidade Variável (PPV) em relação a outras técnicas de amostragem existentes. Questões como a melhor configuração e tamanho das unidades amostrais foram abordadas, numa tentativa de fornecer um conjunto de procedimentos que possa servir de guia para os usuários da técnica multiestágio.

Collwel (1976) desenvolveu e implementou procedimentos de inventário de madeira na Floresta Nacional de San Houston (Texas, EUA), usando dados Landsat, fotografias aéreas convencionais e medidas diretas de campo. Devido à homogeneidade da vegetação e do terreno, os dados Landsat não foram úteis para uma identificação detalhada das classes de vegetação. Um modelo de aquisição de amostras, baseado numa abordagem multivariada, foi utilizado. Entretanto, erros relativos, próximos aos níveis desejados, estimados para volume de madeira, foram obtidos a partir do uso de fotografias aéreas de grande escala.

Kirby e Eck (1977) utilizaram imagens Landsat, fotografias aéreas em pequena e grande escala, incorporando-as num esquema de amostragem multiestágio para estimativa do volume de madeira comercializável em uma típica região de floresta boreal (Norte de Alberta, Canadá). Comparando a eficiência entre uma amostragem de probabilidade variável (PPV) e uma amostragem aleatória, os autores concluíram que para um dado nível de precisão apenas um terço do total de amostras do esquema de amostragem aleatória é necessário para o uso do esquema PPV. Isto reduz em muito o custo de fotointerpretação e trabalho de campo.

Utilizando os dados digitais do MSS/Landsat, Rohde et al. (1979) realizaram uma pesquisa com a finalidade de avaliar o uso de um procedimento multiestágio para estimar, em termos de área, as classes de vegetação de uma área no Estado do Arizona (EUA). Além das imagens orbitais, foram utilizadas fotografias aéreas coloridas e informações de campo. Os dados Landsat foram usados para segmentar a área de estudo em estratos relativamente homogêneos e dividir estes estratos em unidades de amostra. As fotografias aéreas, na escala de 1:6.000, foram usadas para estimativas de área de cada tipo de cobertura de vegetação dentro das unidades de amostra selecionadas. Os autores consideraram

bom o desempenho das estimativas de área, resultantes da integração das informações provenientes de dados Landsat, de fotografias aéreas e de campo. Eles enfatizaram a necessidade de estudos adicionais para determinar o tamanho e número adequados das unidades de amostra e para tornar mais eficiente a classificação dos tipos de cobertura vegetal presentes na área.

Ao inventariar florestas no Estado do Arizona (EUA) utilizando amostragem multiestágio, Anderson (1979) concluiu que esta técnica produziu estimativas de cobertura florestal mais confiáveis, quando comparada com técnicas convencionais, por levar em consideração a homogeneidade do povoamento. Imagens MSS/Landsat, fotografias aéreas de pequena e grande escala e dados de campo foram utilizados em seu trabalho, o que propiciou a otimização de recursos humanos, de tempo e de custos.

Bonner e Morgart (1980) avaliaram a utilização de imagens Landsat, juntamente com fotografias aéreas e dados de campo, como uma base de amostragem para mapeamento e classificação de cobertura do terreno ao nível de formações e associações e, principalmente, para inventário de florestas e pastagens. A área escolhida para o estudo, típica de deserto, localiza-se no Estado do Arizona (EUA). Técnicas de amostragem multiestágio foram usadas diferentemente para os dois objetivos. Os resultados alcançados demonstraram que as imagens Landsat constituem um quadro de amostragem preciso e econômico para a execução de inventários. De acordo com estes autores, a técnica pode ser efetivada em grandes áreas de ambiente árido, com razão de custo bem razoável.

Para estimar o número e volume de árvores mortas, Klein (1982) utilizou fotografias aéreas panorâmicas e infravermelhas coloridas numa abordagem multiestágio,

com Amostragem de Probabilidade Variável (PPV).

No Brasil, os trabalhos de Lee et al. (1983), Lee et al. (1984) e Hernandez Filho et al. (1989) constituem bons exemplos da aplicação da abordagem multiestágio.

Lee et al. (1983) aplicaram esta abordagem numa área de reflorestamento em Mogi-Guaçu (SP) com os gêneros Pinus e Eucalyptus em diferentes idades de plantio. Duas fases de trabalho foram executadas. Na primeira, dados Landsat, fotografias aéreas pancromáticas (escala 1:35.000) e dados de campo foram analisados para o primeiro, segundo e terceiro estágios, respectivamente. Na segunda fase, fotografias aéreas infravermelhas coloridas (escala 1:10.000) estiveram disponíveis e possibilitaram a seleção das Unidades Terciárias de Amostragem (UTAs). O sistema de amostragem foi o de probabilidade variável ou proporcional à grandeza, e os erros para as classes Eucalyptus e Pinus variaram de 8,34 a 21,89 % e de 7,18 a 8,60 %, respectivamente. Os dados Landsat possibilitaram o mapeamento de duas classes de Pinus e Eucalyptus em função da idade e homogeneidade do plantio.

Para fins de inventário do volume de floresta de uma área do Estado de São Paulo, Lee et al. (1984) novamente aplicaram uma abordagem multiestágio com probabilidade proporcional à grandeza. Dados TM/Landsat-4, fotografias aéreas infravermelhas coloridas (escala 1:10.000) e dados de campo propiciaram uma estimativa precisa de volume de madeira, embora os autores reconhecessem a necessidade da definição de um melhor esquema para aquisição de amostras.

Finalmente, Hernandez Filho et al. (1989) estimaram o volume de madeira das áreas reflorestadas do Estado do Mato Grosso do Sul através de um sistema de

amostragem de probabilidade variável em multiestágio. Imagens Landsat, fotografias aéreas coloridas (escala 1:20.000) e dados de campo foram utilizados, gerando bons resultados. Segundo estes autores, uma redução no erro de amostragem seria possível se a estratificação das classes de Pinus e Eucalyptus fosse feita em intervalos de 1 ano de idade.



CAPÍTULO 3MATERIAIS E MÉTODOS3.1 - ÁREA DE ESTUDO3.1.1 - LOCALIZAÇÃO

A área de estudo, com uma extensão aproximada de 225km<sup>2</sup>, localiza-se no alto sertão do Estado de Pernambuco, no município de Petrolina, bacia hidrográfica do riacho Pontal, entre os paralelos 9°00' e 9°09' de latitude sul e entre os meridianos 40° 25' e 40° 34' de longitude oeste, correspondendo a um módulo de 15,0km X 15,0km, conforme ilustra a Figura 3.1.



### 3.1.2 - DESCRIÇÃO DA ÁREA

Segundo o Projeto RADAMBRASIL (1983), as principais características climáticas da unidade de mapeamento são :

- temperatura média anual - 25°C;
- pluviometria média anual - 500mm;
- evapotranspiração potencial anual - 1.300mm;
- evapotranspiração real anual - 500mm;
- deficiência hídrica média anual - 750mm;
- número médio de meses por ano com deficiência hídrica- 10,5;
- excedente hídrico anual - 0;
- índice de umidade de Thornthwaite - -40.

Os mínimos e os máximos valores pluviométricos ocorrem, respectivamente, de maio a novembro e de dezembro a abril.

Quanto aos aspectos geológicos, a área de estudo caracteriza-se por dois principais tipos de formações:

- depósitos eluvionares e secundariamente coluvionais, predominantemente arenosos e argilo-sílticos-arenosos com níveis conglomeráticos e variedades ferruginosas e carbonáticas, relacionadas com as superfícies de pediplanação e denudação sul-americana;

- granito-gnaisses, gnaisses enderbíticos, rochas ultrabásicas, piri-clasitos, biotita e/ou hornblenda gnaisses, gnaisses quartzo-feldspáticos, gnaisses bandeados e anfibolitos bem foliados.

A área de estudo constitui uma parte da unidade geomorfológica denominada Pediplano Sertanejo. Apresenta superfície de aplanamento retocada inumada e planos inclinados uniformizados por coberturas de origem diversas, resultantes de retoques e remanejamentos sucessivos, indicando predominância de processos de erosão areolar (Projeto RADAMBRASIL, 1983). Esta unidade geomorfológica apresenta dois principais tipos de relevo: modelado de aplanamento e modelado de acumulação, além de relevos residuais. A maior parte da área de estudo caracteriza-se pelo modelado de aplanamento, com altitude média em torno de 400 metros.

Os aspectos geomorfológicos da área, segundo o Projeto RADAMBRASIL (1983), são de transição fraca e média com as seguintes características:

- tabuleiros e rampas colúvias com graus de declividade variando de fracos (2 a 5°) a moderados (5 a 10°);
- depósitos colúviais contínuos, com espessura variada e textura arenosa e areno-argilosa.

Estas características apresentam os seguintes processos predominantes:

- escoamento freático, com precipitação total anual entre 350 a 700mm, atingindo eventualmente 800mm;

- escoamento superficial difuso e concentrado, com precipitação total anual variando de 400 a 700mm.

Segundo o Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco (1969), a área de estudo apresenta os seguintes tipos de solos (Figura 3.2):

- solos com horizonte B textural e argila de atividade alta (não-hidromórfico) e solos com horizonte B latossólico (não-hidromórfico), representados pelas associações de Bruno-não-cálcico vértico, fase pedregosa;
- solos litólicos eutróficos, com horizonte A fraco, textura arenosa e/ou média fase pedregosa e rochosa e associações complexas de Latossol Vermelho-amarelo eutrófico com textura média, fase caatinga hiperxerófila;
- solos indiscriminados concrecionários tropicais eutróficos, textura indiscriminada, fase pedregosa e Podzólico vermelho amarelo equivalente eutrófico, textura média, fase caatinga hiperxerófila;
- solos como o Planosol, Regosol, associações complexas de solos litólicos eutróficos e areias quartzozas distróficas.

A principal ocupação da área é a pecuária extensiva, com rebanhos constituídos de bovinos, caprinos e ovinos. As atividades agrícolas baseiam-se em pequenas parcelas de agricultura de subsistência, com cultivo de milho, feijão, mandioca e algodão.

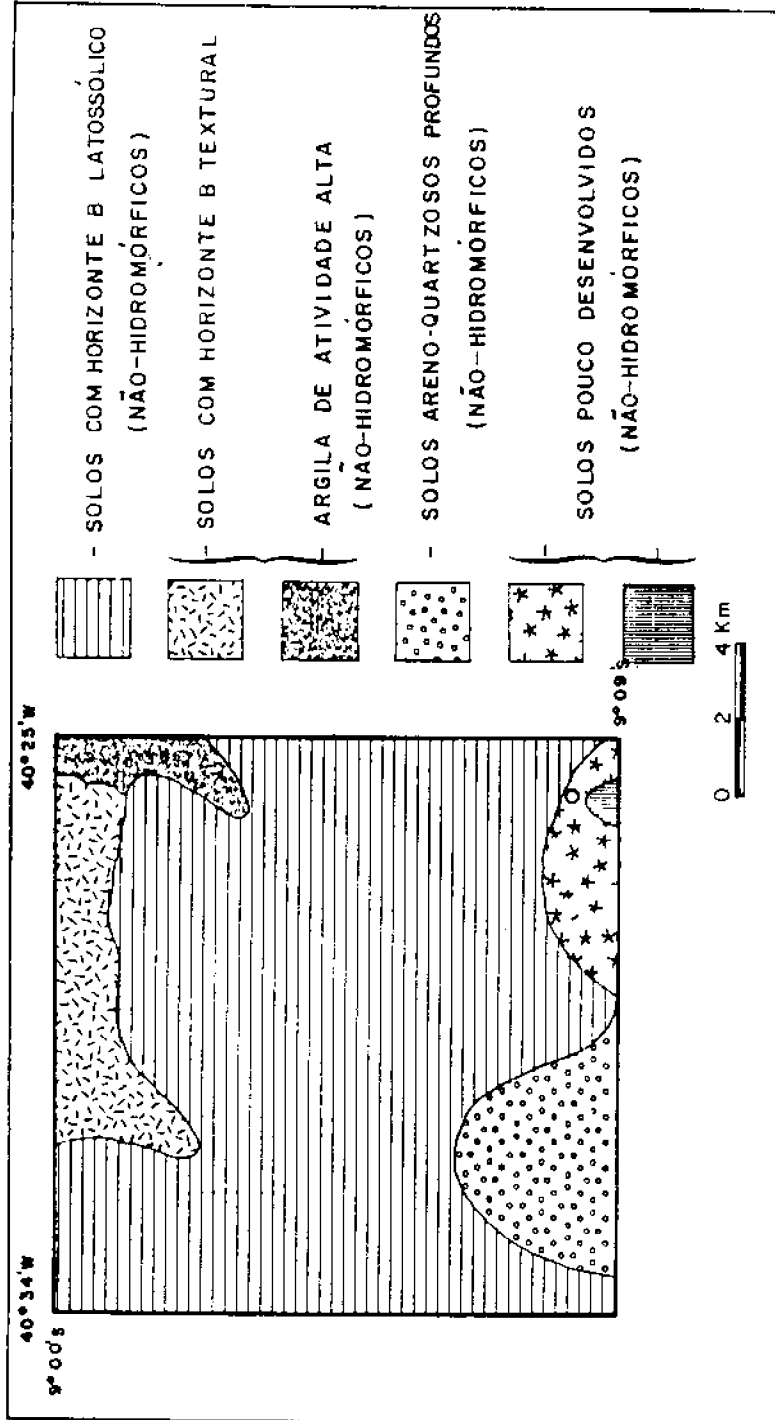


Fig. 3.2 - Principais grupos e associações de solos presentes na área de estudo.

FONTE: Mapa Exploratório - Reconhecimento de solos do estado de Pernambuco (1969).

O extrativismo vegetal tem a maior expressão na coleta de madeira para cercas (estacas e moirões) e uso como material energético na forma de lenha e carvão.

### 3.1.3 - DESCRIÇÃO DA VEGETAÇÃO

A fisionomia da vegetação da área, segundo Eiten (1983), em função das condições de solo, relevo e disponibilidade hídrica, chega a ser florestal, com espécies arbóreas como a Braúna (Schinopsis brasiliensis), Aroeira (Astronium urundeuva), Angico brabo (Anadenanthera macrocarpa) e Juazeiro (Ziziphus joazeiro), que atingem de 10 a 16m de altura. Nelas, além das espécies típicas da caatinga, ocorrem outras menos tolerantes a ambientes mais secos como: Cedro (Cedrella sp.), Feijão brabo (Capparis flexuosa) e Pau d'Arco (Tabebuia sp.), todas elas de porte arbóreo.

Um segundo tipo de vegetação arbóreo-arbustiva também ocorre na área, já no domínio da caatinga propriamente dita ou hiperxerófila, também chamada sertão. As espécies que compõem esse tipo são aquelas comuns na caatinga, como a Braúna, Catingueira (Caesalpinia pyramidalis), Juremas (Mimosas spp.), Aroeira, Imburanas (Bursera leptophloeos), Angicos e Pereiros (Aspidosperma pyrifolium). Essas espécies assumem porte variável, normalmente entre 4 e 10m de altura.

O terceiro tipo é a caatinga arbustiva, normalmente associada a solos arenosos ou rasos, com ou sem afloramentos de rocha. Também é observada em solos argilosos férteis, por degradação antrópica. No seu conjunto, tem porte médio de 2 a 3m de altura, com arbustos ramificados e multicaules de espécies de Juremas (Mimosa spp. e Pithecellobium sp.), Pinhão (Jatropha sp.), Marmeleiro (Croton sonderianus), em geral com predominância de Marmeleiros e

Quebra-facas (Croton sp.), de grande capacidade de tolerância à seca em diferentes tipos de solos e de forte poder de regeneração.

### 3.2 - MATERIAIS

Os materiais e equipamentos utilizados neste trabalho constam basicamente de produtos orbitais do satélite Landsat-5, de um sistema de tratamento de imagens digitais (SITIM), de dados aéreos e de dados cartográficos.

#### 3.2.1 - DADOS ORBITAIS TM/LANDSAT-5

Foram utilizados os dados gravados em fitas magnéticas (CCTs-Fitas Compatíveis com Computador) do sensor TM/Landsat-5 da órbita 217, ponto 66 do quadrante sul, correspondentes às bandas 3 (0,63-0,69 $\mu$ m), 4 (0,76-0,90 $\mu$ m) e 5 (1,55-1,75 $\mu$ m) da passagem do satélite em 14 de setembro de 1988, para o tratamento digital das imagens da área de estudo. A escolha destas bandas foi fundamentada nos trabalhos sobre vegetação em regiões áridas e semi-áridas de: Degloria et al. (1986); Carvalho (1986) e Valeriano et al.. A opção pela utilização dos dados desta época do ano se deu em função da disponibilidade de imagens sem cobertura de nuvens sobre a área, do alto ângulo de elevação solar (53°) e por se tratar da estação seca, que registra o maior contraste do estado vegetativo.

#### 3.2.2 - SISTEMA DE TRATAMENTO DE IMAGEM

O tratamento digital das imagens orbitais foi realizado no SITIM-150 do Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais do INPE. O SITIM é um sistema de tratamento de imagens destinado a extração de informações a partir de dados de sensoriamento remoto, obtidos principalmente por satélites. Esta extração de informações pode se dar de



forma qualitativa, através da observação de imagens realçadas pelo sistema, ou de forma quantitativa, através da utilização de procedimentos de classificação automática, cujas saídas são imagens temáticas e tabelas de área associadas a cada classe discriminada na imagem.

O SITIM é constituído basicamente por um microcomputador (e seus periféricos) e por uma unidade visualizadora de imagens, composta de um "hardware" especializado e de um monitor de imagens.

### 3.2.3 - DADOS AÉREOS

Foram utilizadas fotografias aéreas pancromáticas em preto e branco na escala de 1:15.000. Na falta de recursos financeiros para realizar um levantamento aerofotográfico específico da área, utilizou-se o levantamento aerofotográfico realizado pela Prospec S.A. no mês de setembro de 1986. Devido à pequena defasagem de tempo em relação aos dados orbitais, verificou-se que houve modificações mínimas e localizadas da paisagem.

A escala de 1:15.000 das fotografias aéreas foi satisfatória em função da Distância de Resolução no Terreno (DRT), expressa em metros e definida pelo denominador da escala e poder de resolução dinâmico do sistema fotográfico (Sabins Jr., 1978).

### 3.2.4 - DADOS CARTOGRÁFICOS

As folhas topográficas SC.24-V-D-I e SC.24-V-C-III, Petrolina e Itamotinga, respectivamente, na escala de 1:100.000, foram utilizadas como bases cartográficas. Estes materiais foram publicados pela Diretoria do Serviço Geográfico do Exército (DSG), em 1977.

Foram utilizados ainda os seguintes mapas:

- Mapa Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco, Convênio MA/EPE - SUDENE/DRN (1979);
- Mapas de Solo, Vegetação, Geomorfologia e Geologia do PROJETO RADAMBRASIL (1983).

### 3.2.5 - OUTROS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS AUXILIARES

Além dos produtos supracitados, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- REMBRANDT (câmara fotográfica);
- PROCON-2 (projetor de transparências);
- METLER (balança de precisão 0,0001g);
- KARTOMASTER (pantógrafo ótico).

### 3.3 - MÉTODOS

A aplicação da abordagem multiestágio para mapeamento da vegetação de Caatinga, ao nível das formações, na escala de 1:100.000, utilizando dados orbitais, aéreos e de campo, foi sequenciada em etapas que serão descritas a seguir e ilustradas no fluxograma apresentado na Figura 3.3.

Foi utilizado um procedimento híbrido no processamento digital dos dados TM/Landsat-5, para classificar a vegetação da área, em conformidade com a orientação proposta por Swain e Davis (1978).

### 3.3.1 - DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi escolhida em função de sua representatividade em termos fisionômicos e da composição florística para a região do trópico semi-árido brasileiro e por representar as condições ecológicas do domínio das Caatingas.

### 3.3.2 - AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS TM/LANDSAT-5

Foram adquiridas imagens da área de estudo, em formato digital (bandas TM3, TM4 e TM5). Após a aquisição das imagens, procedeu-se a dois pré-processamentos, utilizando-se do Sistema de Tratamento de Imagens (SITIM 150):

a) Realce linear de contraste - Este procedimento, fundamentado nos trabalhos de Lillesand e Kiefer (1979) e Ni (1984), teve por finalidade aumentar o contraste das imagens que ocupavam, originalmente, uma faixa limitada de níveis de cinza, tornando-as de melhor aspecto visual e conseqüentemente de melhor "interpretabilidade" das feições passíveis de reconhecimento.

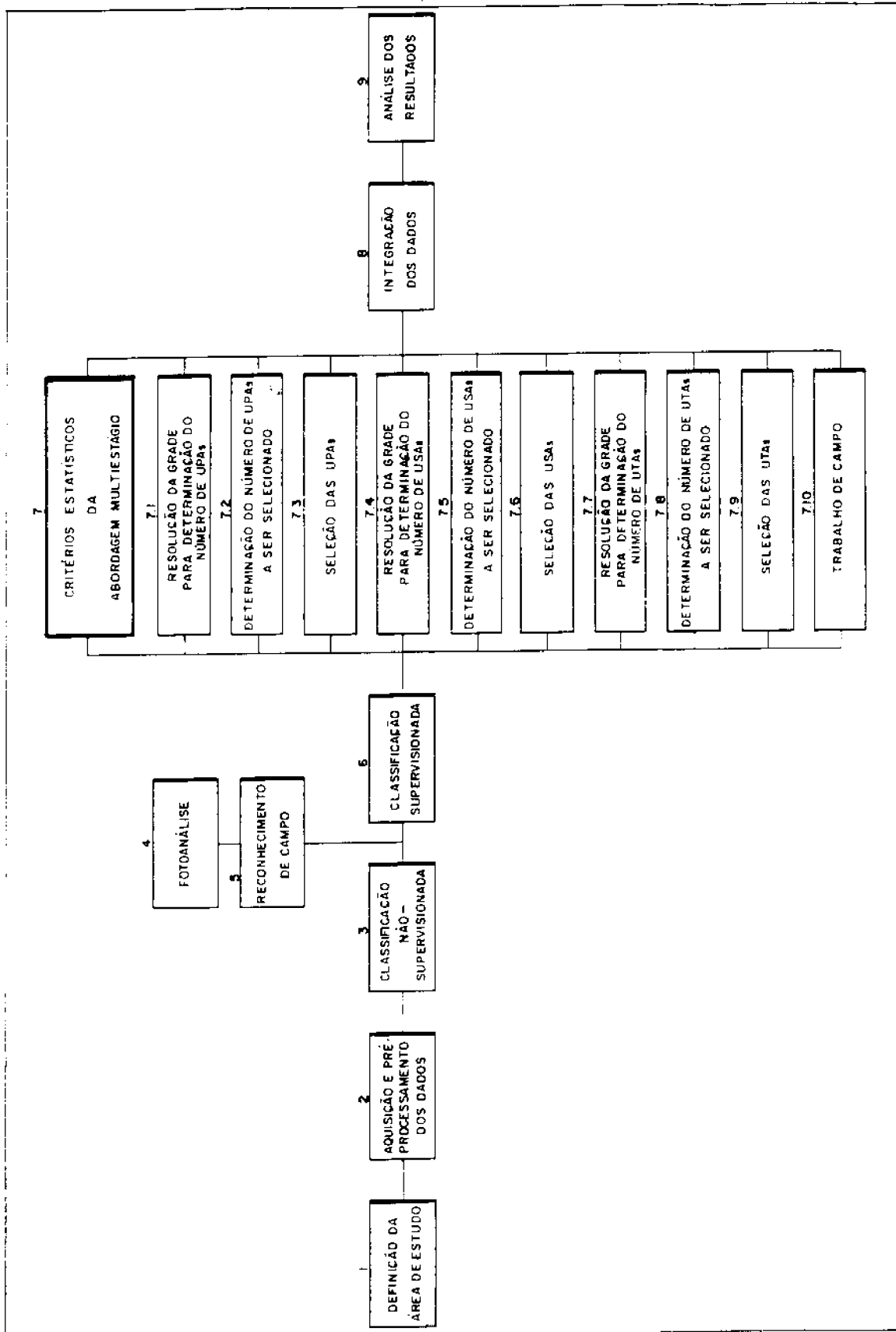


Fig. 3.3 - Fluxograma metodológico.

Fig. 3.3 - Fluxograma metodológico.

b) Correção geométrica - As feições presentes nas imagens realçadas foram localizadas sobre as cartas topográficas da área, na projeção UTM, e se consistiram em pontos de controle para a correção geométrica deste produto. O processo de correção geométrica foi executado através do registro de pontos conhecidos nas imagens com aqueles das cartas topográficas da área. Para a correção geométrica dos produtos TM/Landsat-5 foram adquiridos 6 pontos de controle para o mapeamento polinomial entre coordenadas da imagem e coordenadas de projeção. Tendo em vista que apenas 4 dos 6 pontos de controle foram utilizados no mapeamento polinomial, em virtude da magnitude dos resíduos internos em relação aos eixos x e y da imagem, foi utilizado um polinômio do primeiro grau. Informações adicionais sobre registro de imagens digitais podem ser encontradas nos trabalhos de Câmara Neto (1982), Machado e Silva e D'Alge (1986) e Ii et al. (1986).

### 3.3.3 - CLASSIFICAÇÃO NÃO-SUPERVISIONADA

Para a classificação não-supervisionada da vegetação da área de estudo, foi utilizado o algoritmo de classificação MÉDIA-K de agregamento "clustering", cuja finalidade foi determinar o número de classes passíveis de mapeamento na escala proposta e conhecer a dimensão e distribuição espacial dessas classes. Informações adicionais sobre o algoritmo de classificação MÉDIA-K podem ser encontradas em Ribeiro et al. (1982).

### 3.3.4 - FOTOANÁLISE

Nesta fase do trabalho foram utilizadas as fotografias aéreas pancromáticas em preto e branco na escala de 1:15.000. A etapa inicial da interpretação visual foi a demarcação das coordenadas geográficas nas fotos, o traçado da rede viária e hidrográfica e, por fim, a

identificação das classes de vegetação (zonas homólogas). Na fase de identificação das classes de vegetação, foi executado um esboço preliminar da distribuição das classes, elaborado a partir de atributos básicos de fotoanálise da vegetação, como: textura, tonalidade, forma, posição relativa, etc. (Sabins Jr., 1978). Este esboço preliminar foi analisado com a checagem de campo, para avaliar a adequação das classes de vegetação predefinidas.

### 3.3.5 - CHECAGEM DE CAMPO

A checagem de campo se consistiu no reconhecimento visual das classes de vegetação preliminarmente mapeadas com a classificação não-supervisionada e o exercício da fotoanálise. As informações levantadas nesta fase foram basicamente sobre a identificação e localização das classes de formações, espécies dominantes e características estruturais da vegetação. Foi utilizada uma ficha de campo, elaborada com base na análise fitossociológica da vegetação, tendo como referência o modelo de ficha de Emberg et al. (1968), modificada para atender as necessidades do trabalho de mapeamento fisionômico em questão, (Apêndice A). Os dados de verdade terrestre serviram para definição da legenda final e observação das manchas de solos associados a cada classe de formação da área. Os solos foram descritos pela equipe de pedologia do Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-árido- CPATSA da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA.

A fisionomia da vegetação da área de estudo foi evidenciada em função do grau de recobrimento do solo e da estratificação vertical, medida com auxílio de balizas métricas. O critério adotado nesta discriminação foi o mesmo proposto por Horward e Schade (1982), descrito na Seção 2.4.

### 3.3.6 - CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA

A classificação supervisionada foi gerada através do algoritmo MAXVER (Velasco, 1979), que utiliza o critério da máxima verossimilhança. Na escolha das áreas de treinamento (amostras), dentro de cada uma das classes de vegetação, foram utilizados tanto dados referentes à classificação não-supervisionada como informações de fotografias aéreas e de checagem de campo. Deste modo, gerou-se um documento cartográfico na unidade visualizadora do SITIM, recuperado através da câmara REMBRANDT, na forma de diapositivos, e ampliado para a escala de 1:100.000 por intermédio do PROCON-2, sobre a base cartográfica. Este documento temático (Apêndice B) evidenciou a distribuição espacial e a dimensão das classes de formações de Caatinga na área.

### 3.3.7 -ABORDAGEM MULTIESTÁGIO

O desenvolvimento da abordagem multiestágio neste trabalho compreendeu a análise dos dados em três principais etapas interdependentes, referentes ao primeiro estágio (nível orbital), segundo estágio (nível aéreo) e terceiro estágio (nível de campo).

Para a aplicação da abordagem multiestágio no contexto de mapeamento da vegetação, utilizando técnicas de sensoriamento remoto, delineou-se um sistema de amostragem com probabilidade variada, referente às áreas de cobertura de solo para cada classe no primeiro e segundo estágios e cobertura vegetal no terceiro estágio. A fórmula geral de um estimador de três estágios, modificada a partir de Langley (1975a), é:

$$A_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{p_i n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{p_{ij} t_{ij}} \sum_{k=1}^{t_{ij}} \frac{A_{ijk}}{P_{ijk}}, \quad (3.1)$$

onde:

$A_i$  = cobertura vegetal da área total para cada classe;

$A_{ijk}$  = cobertura vegetal no terceiro estágio;

$p_i$  = probabilidade do sorteio da  $i$ -ésima unidade no primeiro estágio;

$p_{ij}$  = probabilidade do sorteio da  $j$ -ésima unidade do segundo estágio, dada a  $i$ -ésima unidade do primeiro estágio;

$p_{ijk}$  = probabilidade do sorteio da  $k$ -ésima unidade do terceiro estágio, dadas as unidades do segundo e primeiro estágios;

$m$ ,  $n_i$  e  $t_{ij}$  = são os números de amostrado primeiro, segundo e terceiro estágios, respectivamente.

A Figura 3.4 mostra o esquema adotado neste trabalho para uso da abordagem multiestágio no mapeamento da vegetação de Caatinga.

A seqüência metodológica para o desenvolvimento da abordagem multiestágio é apresentada a seguir.



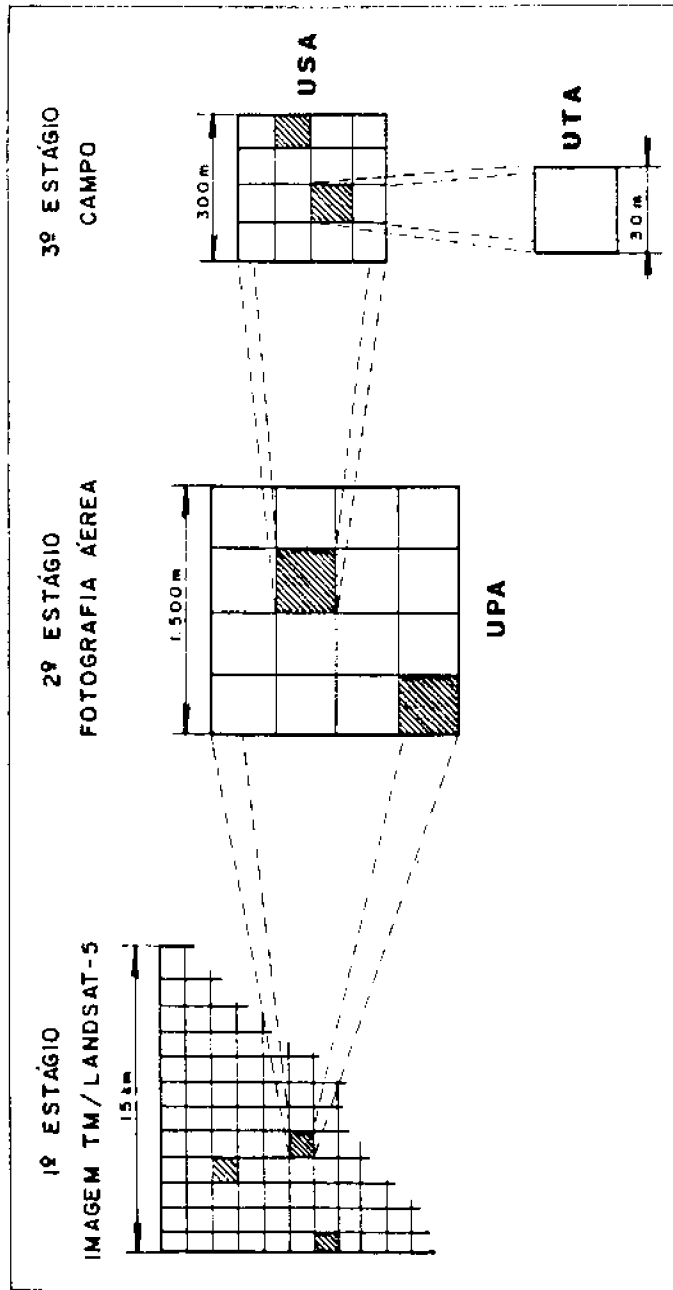


Fig. 3.4 - Esquema do sistema de amostragem em múltiplo estágio para mapeamento de vegetação.

FONTE: Hernandez Filho et al. (1989), p.6.

### 3.3.7.1 - DEFINIÇÃO DA RESOLUÇÃO DA GRADE PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE UNIDADES PRIMÁRIAS DE AMOSTRAGEM (UPAs)

Nesta etapa foi utilizado o mapeamento temático (escala 1:100.000) obtido através da classificação híbrida dos dados TM/Landsat-5 (Apêndice B).

Considerando os parâmetros citados na literatura (Langley, 1975a; Bonner e Morgart, 1980) para definição da resolução da grade (escala de trabalho, distribuição dos temas na área, exequibilidade das medições de campo, custos, etc.), optou-se por uma resolução de 1,5 x 1,5cm. Desta forma, foram geradas 100 UPAs de 1,5 x 1,5cm, para a área de estudo de 15 x 15km. Assim, cada UPA correspondeu no terreno a 1500 x 1500m.

Por intermédio de planimetria, utilizando-se de grade de pontos milimetrada sobre o mapa de distribuição das classes de vegetação (Apêndice B), foi medida a área coberta por cada uma das classes, em cada uma das UPAs.

### 3.3.7.2 - DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE UPAs

Neste trabalho o número de UPAs foi definido em função dos coeficientes de variação da área coberta por cada classe dentro das UPAs, do erro de estimativa admitido e do nível de confiança da amostragem. Procedimento semelhante foi utilizado por Langley (1975a), Wiant Jr (1976) e Lee et al (1983).

O erro de estimativa admitido neste trabalho foi escolhido em função das considerações existentes na literatura, a exemplo do trabalho de Bonner e Morgart (1980), que discutiram a amostragem de vegetação nativa de regiões áridas e semi-áridas. Durante esta análise, foram feitas

também considerações acerca do coeficiente de variação das classes para a escolha do erro.

O nível de confiança foi introduzido na análise a partir da estatística "t" de Student. O valor  $t = 1$ , utilizado neste trabalho, corresponde a um nível de confiança de 75% (Wiant Jr., 1976).

Para o cálculo dos coeficientes de variação e número de amostras por classe, foram utilizadas as seguintes equações:

$$a) CV = \frac{s}{\bar{x}} 100, \quad (3.2)$$

onde:

CV = coeficiente de variação,

s = desvio padrão da média e

$\bar{x}$  = média da estimativa de cobertura de cada classe nas UPAs.

$$b) m_i = \frac{t^2 cv^2}{EE^2}, \quad (3.3)$$

onde:

$m_i$  = número de amostras para a classe i,

$t = 1$  (Student) correspondente a um nível de confiança da amostragem de 75% e

EE = erro de estimativa admitido.

### 3.3.7.3 - SELEÇÃO DAS UPAs

A seleção das UPAs foi efetuada segundo o método estatístico de amostragem com probabilidade variada, ou seja, proporcional à grandeza da área de cada classe, avaliada dentro de cada UPA. Segundo este método, as UPAs com maiores representatividades em termos de área coberta para a classe, têm maior probabilidade de ser selecionadas. Em outras palavras, o método de amostragem com probabilidade proporcional à grandeza aumenta a chance de seleção das UPAs que apresentam maior percentagem de área ocupada pela classe que está sendo avaliada. Este método tem grande aplicação nos trabalhos de abordagem multiestágio (Langley, 1975a; Langley, 1975b; Bonner e Morgart, 1980; Lee et al., 1983; Lee et al., 1984; Hernandez Filho, et al., 1989).

### 3.3.7.4 - DEFINIÇÃO DA RESOLUÇÃO DA GRADE PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE UNIDADES SECUNDÁRIAS DE AMOSTRAGEM (USAs)

As UPAs selecionadas no primeiro estágio foram posicionadas sobre as fotografias aéreas, na escala de 1:15.000, e representaram 1500 x 1500m, o que equivale a quadros de 10 x 10cm sobre as fotografias aéreas. Seguindo o esquema amostral apresentado na Figura 3.4, foi sobreposta uma grade com dimensão de 2 x 2cm, gerando assim 25 USAs (300 x 300m) sobre cada UPA selecionada. A resolução desta grade foi baseada na escala das fotos e na distribuição espacial das classes de vegetação sobre cada UPA, de acordo com as proposições de Langley (1975a).

#### 3.3.7.5 - DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE USAs

Para determinação do número de USAs no segundo estágio, foi utilizado o mesmo procedimento do primeiro estágio, por ocasião da determinação do número de UPAs.

#### 3.3.7.6 - SELEÇÃO DAS USAs

A seleção das USAs foi efetuada segundo o método estatístico de amostragem com probabilidade proporcional à grandeza de cada classe, dentro de cada USA, procedimento este semelhante ao utilizado na seleção das UPAs.

#### 3.3.7.7 - DEFINIÇÃO DA RESOLUÇÃO DA GRADE PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE UNIDADES TERCIÁRIAS DE AMOSTRAGEM (UTAs)

Após a fotoanálise das USAs selecionadas no segundo estágio, com dimensão de 2 x 2cm (300 x 300m no terreno), estas USAs foram ampliadas 5 vezes, por intermédio de um pantógrafo ótico, para facilitar a sobreposição de uma grade de resolução de 1 x 1cm. Cada USA foi subdividida em 100 UTAs, com dimensão no terreno de 30 x 30m. A definição da resolução desta grade seguiu os mesmos critérios adotados nos estágios anteriores (UPAs e USAs).

#### 3.3.7.8 - DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE UTAs

Para determinação do número de UTAs a ser medido em campo, foram utilizados os mesmos procedimentos dos estágios anteriores (avaliação do coeficiente de variação, erro de estimativa admitido e nível de confiança da amostragem).

### 3.3.7.9 - SELEÇÃO DAS UTAs

A seleção das UTAs foi efetuada de modo semelhante ao dos estágios anteriores, através do método estatístico de amostragem com probabilidade proporcional à grandeza (área de cada classe), dentro de cada UTA.

### 3.3.7.10 - TRABALHO DE CAMPO

O trabalho de campo sobre as UTAs selecionadas, realizado no terceiro estágio, consistiu na medição da cobertura vegetal das classes, utilizando balizas para demarcação das parcelas (30 x 30m) e trena. Após as medições das manchas de vegetação, elas foram transpostas para papel milimetrado, montando-se assim um esboço esquemático da cobertura vegetal em relação à área da parcela.

Posteriormente, procedeu-se à avaliação quantitativa das áreas das diversas classes através do método gravimétrico. Este método consistiu na pesagem inicial de um papel com área conhecida, tomado como padrão (papel milimetrado). O cálculo de área das manchas transpostas para o papel milimetrado foi obtido então por comparação com o peso do papel padrão. Uma balança METLER de precisão de 0,0001g foi utilizada para esta finalidade. Adotou-se este método em função e de sua praticidade e nível de precisão e do elevado número de UTAs a serem medidas.

### 3.3.8 - INTEGRAÇÃO DOS DADOS

A integração dos três estágios foi feita a partir da Equação 3.1 (Seção 3.3.7). No que se refere à estimativa de variância, Langley (1975a) propôs um estimador simplificado para ser utilizado na determinação da variância do primeiro estágio, em substituição à variância total,

procedimento este utilizado neste trabalho, através da Equação 3.4:

$$\text{Var} (\hat{A}_t) = \frac{1}{m(m-1)} \left( \sum_{i=1}^m \frac{A_i^2}{p_i} - m\hat{A}_t^2 \right), \quad (3.4)$$

onde:

$\hat{A}_t$  = estimador da área total;

$A_i$  = estimador da área total da  $i$ -ésima unidade do primeiro estágio;

$p_i$  = probabilidade de selecionar a  $i$ -ésima unidade do primeiro estágio;

$m$  = número de unidades primárias na amostra.

O erro da amostragem (E.A.) foi calculado a partir da variância de  $\hat{A}_t$  pela seguinte fórmula:

$$\text{E.A.} = \sqrt{\text{Var} (\hat{a}_t)}. \quad (3.5)$$

Com base nos procedimentos metodológicos discutidos neste capítulo, obtiveram-se os resultados que são apresentados e discutidos a seguir.





## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tópicos apresentados neste capítulo obedecem a uma ordem similar, embora simplificada, dos passos metodológicos para a aplicação da abordagem multiestágio apresentadas no Capítulo 3. Deste modo, são analisados e discutidos sequencialmente os resultados correspondentes às fases: (1) pré-processamento das imagens TM/Landsat-5 (realce linear de contraste e correção geométrica); (2) classificação híbrida da vegetação da área de estudo (classificação não-supervisionada, fotoanálise, checagem de campo e classificação supervisionada); (3) abordagem multiestágio propriamente dita (análise estatística do primeiro, segundo e terceiro estágios e integração dos dados).

#### 4.1 - PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS TM/LANDSAT-5

Através do presente estudo constatou-se que a técnica de realce linear de contraste empregada foi de fundamental importância na localização dos pontos de controle utilizados na correção geométrica das imagens e na escolha das amostras para a classificação supervisionada, conforme já havia sido observado por Ni (1984). O efeito do realce linear de contraste é apresentado em forma de histogramas de frequência dos níveis de cinza das imagens (Figura 4.1).

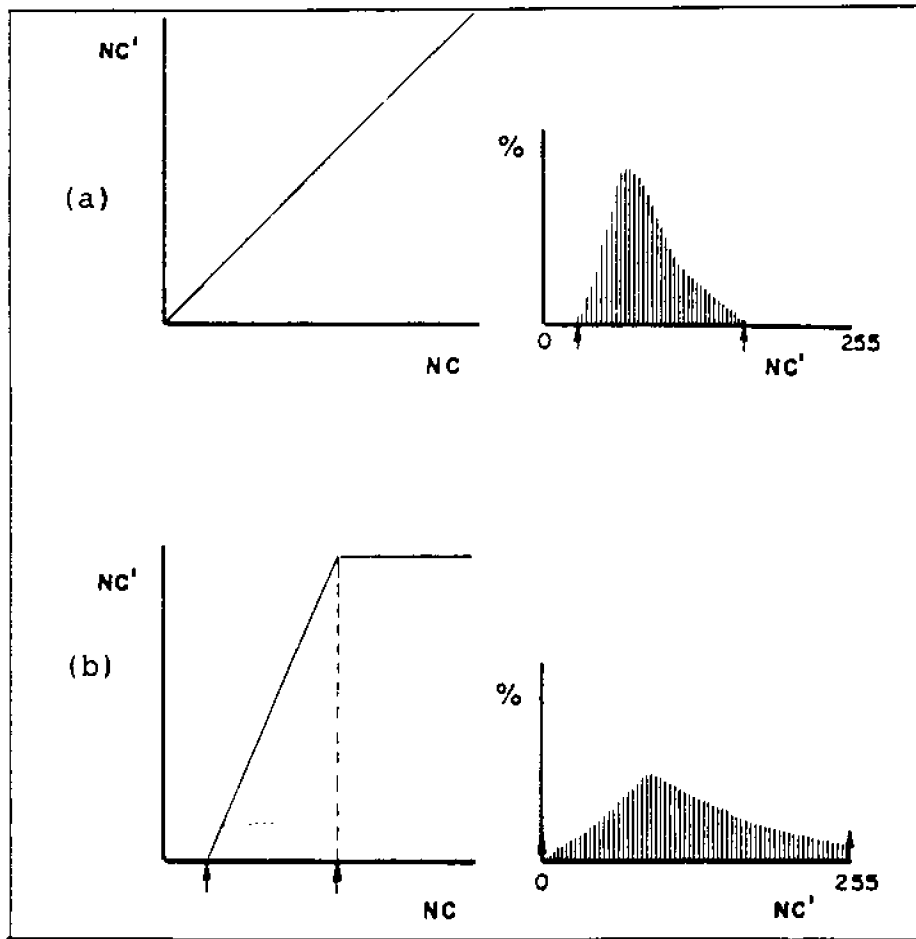


Fig. 4.1 - Histogramas do padrão de resposta espectral da área de estudo antes (a) e depois (b) do emprego do realce linear de contraste.

Com a análise numérica dos valores de níveis de cinza das imagens, foi constatado que as bandas TM3 e TM4 obtiveram maior expansão radiométrica, melhorando o aspecto visual das imagens. Como estas bandas se situam na região do vermelho e do infravermelho próximo, com sensibilidade aos pigmentos foliares e estrutura foliar, respectivamente (Valeriano et al.), e por se tratar de uma imagem da época seca, onde o vigor vegetativo é bastante limitado, o realce de contraste mostrou-se como uma técnica de grande utilidade em função da melhor separabilidade espectral dos alvos na cena. Com relação à banda TM5, não

ocorreram grandes transformações, em função de sua expressiva variância original.

A correção geométrica das imagens TM/Landsat-5 apresentou uma precisão de registro da ordem de 0,404 "pixel", que, segundo Brooks et al. (1984), com base nas especificações adotadas pela NASA (0,5 "pixel" para os dados TM), é considerada satisfatória.

#### 4.2 - CLASSIFICAÇÃO HÍBRIDA

De posse das imagens realçadas e corrigidas geometricamente, aplicou-se a técnica de classificação não supervisionada (algoritmo Média-K), que, após um trabalho interativo, dividiu o espaço amostral em cinco classes de vegetação passíveis de mapeamento na escala proposta (1:100.000).

Estas classes foram também identificadas sobre fotografias aéreas pancromáticas em preto e branco (escala 1:15.000), que, juntamente com a checagem de campo, possibilitaram uma melhor análise e delimitação das classes de vegetação presentes na área, a saber:

- classe 1 - Caatinga Arbóreo-arbustiva densa;
- classe 2 - Caatinga Arbustiva densa;
- classe 3 - Caatinga Arbustiva aberta;
- classe 4 - Caatinga Subarbustiva aberta;
- classe 5 - Caatinga Subarbustiva esparsa.

As informações de verdade terrestre, além de contribuir para definição da legenda final, evidenciaram as seguintes características para as 5 classes de formações identificadas:

- Formação Arbóreo-arbustiva densa (classe 1) - apresenta em média 5,5m de altura e é representada principalmente pelas seguintes espécies: Astronium urundeuva (Aroeira); Schinopsis brasiliensis (Baraúna); Spondias tuberosa (Imbuzeiro); Pseudobombax simplicifolium (Imbirassú); Aspidosperma pyriforme (Pereiro); Tabebuia spongiosa (Sete cascas); Bursera leptophloeos (Imburana de cambão); Anadenanthera macrocarpa (Angico); Ziziphus joazeiro (Juazeiro); Fraunhoferia multiflora (Pau branco); Cnydoscolus phyllacanthus (Favela de cachorro); etc.

- Formação Arbustiva (classes 2 e 3) - com altura média de 3,0m é representada pelas seguintes espécies: Caesalpinia pyramidalis (Catingueira verdadeira); Caesalpinia microphilla (Catingueira rasteira); Mimosa hostilis (Jurema preta); Mimosa spp. (Juremas); Croton sonderianus (Marmeleiro); Croton spp. (Quebra faca); Bauhinia cheilantha (Mororó); Aspidosperma pyriforme (Pereiro); Cnidocolus phyllacanthus (Favela de cachorro); Tabebuia spongiosa (Sete cascas); Fraunhoferia multiflora (Pau branco); Erythroxylum mumularia (Rompe gibão); Manihot spp. (Maniçoba); Cassia excelsa (Canafístula); etc.

- Formação Subarbustiva (classes 4 e 5) - possui em média 1,0m de altura, com uma composição florística representada principalmente pelas seguintes espécies: Calliandra depauperata (Carqueija); Pilosocereus gounellei (Xique-xique); Bromelia laciniosa (Macambira); Neoglaziovia variegata (Caroã); Opuntia inamoema (Quipã); Lippia microphylla (Alecrim); Herissantia crispa (Malva de lavar prato); Cassia sericea (Mata pasto); Cordia leucocephala

(Moleque duro); Jatropha spp. (Pinhão); etc.

Quanto à florística dominante das classes de formações, verificou-se que algumas espécies ocorrem tanto na classe Arbóreo-arbustiva quanto na classe Arbustiva. Este fato está ligado à degradação do meio, principalmente no que se refere à extração dos indivíduos de maior porte, e, conseqüentemente, ao rebaixamento de algumas espécies.

Como pôde ser observado em campo, as classes 2 e 3 e as classes 4 e 5 apresentaram, correspondentemente, as mesmas características de porte e composição florística. A diferenciação entre estas classes (2-3 e 4-5) se deu em função do grau cobertura do solo.

Ainda de acordo com a checagem de campo, verificou-se, quanto aos solos, que as classes de vegetação apresentaram a seguinte distribuição:

- Formação Arbóreo-arbustiva densa - esteve presente principalmente em duas classes de solos (Colúvio aluvial e Podzólico amarelo);
- Formação Arbustiva densa - presente principalmente nas classes de solos Podzólico amarelo e Podzólico vermelho;
- Formação Arbustiva aberta - presente principalmente em três classes de solos (Planossolos, Podzólico vermelho e Colúvio aluvial);
- Formações Subarbustiva aberta e Subarbustiva esparsa - estiveram presentes basicamente nas classes de solos Bruno-não-cálcico planossólico, Planossolo vértico e Podzólico vermelho. Esta distinção no grau de cobertura, em primeira aproximação, estaria ligada à

espessura e à profundidade da camada compactada do solo.

Na fase de classificação supervisionada (algoritmo MAXVER), o desempenho de classificação obtido foi da ordem de 96%, que, segundo Murine (1975), representa um bom nível de acerto na classificação. Este desempenho, associado ao baixo número de pontos não-classificados (0,4%) para o total da área, deve-se às informações de distribuição espacial das classes de vegetação na área, obtidas a partir da classificação não-supervisionada e complementadas com as informações da fotoanálise e checagem de campo. O mapa temático gerado a partir desta classificação, apresentado no Apêndice B, serviu de base de referência para a abordagem multiestágio.

A Tabela 4.1 apresenta as estimativas de área para as classes de vegetação mapeadas, segundo a classificação híbrida realizada.

TABELA 4.1 - ESTIMATIVAS DE ÁREAS PARA AS CLASSES DE VEGETAÇÃO

CLASSE	ÁREA (km )
1	9,562
2	54,337
3	32,850
4	34,087
5	94,162

#### 4.3 - ABORDAGEM MULTIESTÁGIO

No primeiro estágio foi utilizado o resultado da classificação híbrida das imagens TM/Landsat-5, apresentado na Seção anterior, estabelecendo as classes de vegetação conforme a Tabela 4.1 e o Apêndice B.

A partir dos resultados desta classificação apresentados na forma de um mapa temático, foram feitas as medições de áreas das cinco classes de vegetação em cada UPA, o que possibilitou determinação dos parâmetros estatísticos apresentados na Tabela 4.2. Estes valores foram obtidos a partir das Equações 3.2 e 3.3 (Capítulo 3, Seção 3.3.7.2).

##### 4.3.1 - DETERMINAÇÃO E SELEÇÃO DO NÚMERO DE UPAS

A percentagem de erros de estimativa admitida (EE) foi de 30% para as classes de formação de Caatinga Arbórea arbustiva densa (classe 1) e Caatinga Arbustiva densa (classe 2) e 20% para as classes de Caatinga arbustiva aberta (classe 3), Caatinga Subarbustiva aberta (classe 4) e Caatinga Subarbustiva esparsa (classe 5). Esta diferenciação em termos de erro amostral admitido foi estabelecida em função da magnitude dos coeficientes de variação das classes. Os coeficientes de variação (CV) foram determinados através de uma análise do número total das UPAs, salientando-se que, quanto maior o coeficiente de variação, maior será a quantidade de UPAs necessárias para representar a classe, dado o erro amostral admitido. Os números de UPAs determinados para as classes 1, 2, 3, 4 e 5 foram 8, 6, 9, 10 e 2, respectivamente, totalizando 35 UPAs, que foram selecionadas pela probabilidade proporcional à área ocupada pelas classes em cada uma das UPAs.

TABELA 4.2 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS UPAs NO PRIMEIRO ESTÁGIO

CLASSE	CV(%)	EE(%)	NÚMERO DE UPAs
1	87,31	30	8
2	74,30	30	6
3	60,72	20	9
4	63,83	20	10
5	28,54	20	2

4.3.2 - DETERMINAÇÃO E SELEÇÃO DO NÚMERO DE USAs

Para determinação do número de USAs no segundo estágio, sobre as fotografias aéreas, utilizou-se o mesmo procedimento do estágio anterior.

A Tabela 4.3 apresenta os valores dos parâmetros estatísticos das USAs no segundo estágio. Tendo em vista que os coeficientes de variação das classes foram inferiores aos do primeiro estágio, adotaram-se erros de estimativa mais reduzidos, com o propósito de refinar a amostragem. Desta forma, foram utilizados os seguintes erros: 20% para as classes 1 e 2 e 10% para as classes 3, 4 e 5. Os números de USAs determinados para as classes 1, 2, 3, 4 e 5 foram 16, 12, 18, 20 e 4, respectivamente, totalizando 70 USAs, e foram selecionadas pela probabilidade proporcional à área ocupada pelas classes dentro das USAs.



TABELA 4.3 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS USAs NO SEGUNDO ESTÁGIO

CLASSE	CV(%)	EE(%)	NÚMERO DE UPAs
1	81,15	20	16
2	69,34	20	12
3	42,50	10	18
4	45,31	10	20
5	20,22	10	4

#### 4.3.3 - DETERMINAÇÃO E SELEÇÃO DO NÚMERO DE UTAs

No terceiro estágio, dado o elevado número de USAs do segundo estágio (70) e o elevado coeficiente de variação das UTAs, obteve-se um grande número de UTAs a serem visitadas em campo. Diante da impossibilidade de efetuar tais medições, em função de tempo, utilizou-se apenas uma UTA para cada USA amostrada. Este procedimento, normalmente adotado na prática (Lee et al., 1983; Lee et al., 1984; Hernandez Filho et al. 1989), mostrou-se suficiente tendo em vista a análise do erro padrão de amostragem realizada após a integração dos dados dos três estágios. As 70 UTAs, seguindo os mesmos procedimentos anteriores, foram selecionadas pela probabilidade proporcional à área ocupada por cada classe nas UTAs.

#### 4.3.4 - TRABALHO DE CAMPO

O trabalho de campo, realizado sobre as UTAs selecionadas, evidenciou os seguintes valores de cobertura vegetal para as classes de formações da área, apresentados na Tabela 4.4.

TABELA 4.4 - ÁREAS DE COBERTURA VEGETAL (m<sup>2</sup>) PARA AS CLASSES DE FORMAÇÕES NO TERCEIRO ESTÁGIO

	CLASSE 1	CLASSE 2	CLASSE 3	CLASSE 4	CLASSE 5
1	354,39	622,35	715,43	725,14	815,32
2	354,39	638,17	701,24	711,13	790,87
3	656,04	598,64	698,45	550,14	845,64
4	429,80	575,43	703,19	548,69	803,18
5	557,02	604,71	768,17	652,83	
6	548,24	612,52	730,47	610,03	
7	750,58	551,23	712,71	613,66	
8	723,85	575,84	705,96	611,78	
9	544,78	668,40	685,58	615,64	
10	657,41	654,92	693,79	608,33	
11	745,70	505,81	652,14	698,08	
12	684,13	507,75	686,75	703,29	
13	593,17		750,83	683,13	
14	605,45		762,95	700,07	
15	705,19		683,47	738,37	
16	591,26		689,73	731,09	
17			695,44	705,63	
18			697,89	697,77	
19				680,42	
20				691,756	

#### 4.3.5 - INTEGRAÇÃO DOS DADOS

Os resultados obtidos com a integração dos dados dos três estágios, utilizando a fórmula geral do estimador de três estágios (Equação 3.1), são apresentados nas Tabelas 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9.

A Tabela 4.5 apresenta o resultado da integração dos dados para a classe 1 (Caatinga Arbóreo-arbustiva densa). Estes resultados são relativos à probabilidade proporcional à área ocupada pela classe na amostra, portanto, com probabilidade variável. Com a análise numérica no conjunto das tabelas, verifica-se que a classe 1 apresenta a menor área ocupada no mapeamento e a classe 5, a maior. Este fato, como já era previsto, decorre da intensa atividade antrópica na área, no que diz respeito ao extrativismo vegetal, principalmente na retirada dos espécimens arbóreos e arbóreos arbustivos.

As Tabelas 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam as integrações dos dados das classes 2 (Caatinga Arbustiva densa), classe 3 (Caatinga Arbustiva aberta), classe 4 (Caatinga Subarbustiva aberta) e classe 5 (Caatinga Subarbustiva esparsa), respectivamente.

TABELA 4.5 - INTEGRAÇÃO DOS TRÊS ESTÁGIOS PARA A CLASSE ARBÓREO-ARBUSTIVA DENSA

UTA				USA				UPA				ÁREA TOTAL (km <sup>2</sup> )		
A <sub>ijk</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>ijk</sub>	$\frac{A_{ijk}}{P_{ijk}}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{k=1}^{ij} \frac{A_{ijk}}{P_{ijk}}$ (m <sup>2</sup> )	t <sub>ij</sub>	A <sub>ij</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>ij</sub>	$\frac{A_{ij}}{P_{ij}}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{j=1}^{ni} \frac{A_{ij}}{P_{ij}}$ (m <sup>2</sup> )	n <sub>i</sub>	A <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>i</sub>		$\frac{A_i}{P_i}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{i=1}^m \frac{A_i}{P_i}$ (m <sup>2</sup> )
354,39	0,012	29532,5	29532,5	1	29532,5	1,000	29532,5	29532,5	2	29532,5	0,011	2.694.772,7		
354,39	0,012	29532,5	29532,5	1	29532,5	1,000	29532,5	29532,5						
656,04	0,019	34528,4	34528,4	1	34528,4	0,116	297658,6	493022,2	2	2.46511,1	0,070	3.521.587,1		
429,80	0,010	42980,0	42980,0	1	42980,0	0,220	195363,6	310522,8	2	155.261,4	0,023	6.750.495,6		
557,02	0,100	5.570,2	5.570,2	1	5.570,2	0,061	91.314,7	2076971,7	2	1.038.485,8	0,141	7.365.147,8		
548,24	0,041	13.371,7	13.371,7	1	13.371,7	0,061	219.206,1	362.101,8	2	191.050,9	0,047	4.064.913,8		
750,58	0,010	75.058,0	75.058,0	1	75.058,0	0,071	10.57464,7	943505,0	2	17.4385,5	0,011	15.853.233,4		
723,85	0,010	72.385,0	72.385,0	1	72.385,0	0,071	10.19507,0	3.00953,8	2	15.0476,9	0,035	42.99340,0		
544,78	0,016	34.048,7	34.048,7	1	34.048,7	0,181	188.114,6	548771,1	2				51278812,3	8
580,41	0,011	52.764,5	52.764,5	1	52.764,5	0,272	19.3887,2							
590,03	0,010	59.030,0	59.030,0	1	59.030,0	0,135	437.259,2							
613,57	0,012	51.130,8	51.130,8	1	51.130,8	0,101	50.6245,8							
593,17	0,010	59.317,0	59.317,0	1	59.317,0	0,270	219.692,5							
707,48	0,029	24.395,8	24.395,8	1	24.395,8	0,189	12.9078,6							
462,32	0,129	3.583,8	3.583,8	1	3.583,8	0,035	102.396,4							
708,85	0,010	70.885,0	70.885,0	1	70.885,0	0,357	198.557,4							

TABELA 4.6 - INTEGRAÇÃO DOS TRÊS ESTÁGIOS PARA A CLASSE ARBUSTIVA DENSA

UTA				USA				UPA				ÁREA TOTAL (km <sup>2</sup> )		
A <sub>ijk</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>ijk</sub>	$\frac{A_{ijk}}{P_{ijk}}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{k=1}^{t_{ij}} \frac{A_{ijk}}{P_{ijk}}$ (m <sup>2</sup> )	t <sub>ij</sub>	A <sub>ij</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>ij</sub>	$\frac{A_{ij}}{P_{ij}}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{j=1}^{n_i} \frac{A_{ij}}{P_{ij}}$ (m <sup>2</sup> )	n <sub>i</sub>	A <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>i</sub>		$\frac{A_i}{P_i}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{i=1}^m \frac{A_i}{P_i}$ (m <sup>2</sup> )
622,35	0,010	62.535,0	62.535,0	1	62.535,0	0,075	833.800,0	1.550.844,9	2	775.422,4	0,016	48.463.904,4		
638,17	0,010	63.817,0	63.817,0	1	63.817,0	0,089	717.044,9							
598,64	0,010	59.864,0	59.864,0	1	59.864,0	0,051	1.173.803,9	3.430.392,1	2	1.715.196,0	0,031	55.328.905,4		
575,43	0,005	115.086,0	115.086,0	1	115.086,0	0,051	2.256.588,2							
604,71	0,020	30.235,5	30.235,5	1	30.235,5	0,059	305.409,0	658.243,1	2	328.121,5	0,024	13.713.397,9		
612,52	0,014	43.751,4	43.751,4	1	43.751,4	0,124	352.834,1							
551,23	0,010	55.123,0	55.123,0	1	55.123,0	0,034	1.612.264,7	3.032.637,2	2	1.546.318,6	0,020	75.815.931,2	298.619.428,6	6
573,84	0,012	47.986,6	47.986,6	1	47.986,6	0,034	1.411.372,5							
668,40	0,012	55.700,0	55.700,0	1	55.700,0	0,109	511.009,1	1.038.318,3	2	519.159,1	0,016	32.447.448,7		
654,92	0,023	28.474,7	28.474,7	1	28.474,7	0,054	527.309,2							
505,81	0,011	45.982,7	45.982,7	1	45.982,7	0,019	2.420.142,1	2.622.594,2	2	1.311.297,1	0,018	72.849.840,3		
507,75	0,038	13.361,8	13.361,8	1	13.361,8	0,066	202.452,1							

TABELA 4.7 - INTEGRAÇÃO DOS TRÊS ESTÁGIOS PARA A CLASSE ARBUSTIVA ABERTA

A <sub>ijk</sub> (m <sup>2</sup> )	UTA				USA				UPA				ÁREA TOTAL (km <sup>2</sup> )	
	P <sub>ijk</sub>	$\frac{A_{ijk}}{P_{ijk}}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{k=1}^{(j)} \frac{A_{ijk}}{P_{ijk}}$ (m <sup>2</sup> )	(i)	A <sub>ij</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>ij</sub>	$\frac{A_{ij}}{P_{ij}}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{j=1}^{(i)} \frac{A_{ij}}{P_{ij}}$ (m <sup>2</sup> )	n <sub>i</sub>	A <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>i</sub>	$\frac{A_i}{P_i}$ (m <sup>2</sup> )		$\sum_{i=1}^m \frac{A_i}{P_i}$ (m <sup>2</sup> )
715,43	0,010	71.543,0	71.543,0	1	71.543,0	0,065	1.100.661,5	1.636.368,1	2	816.184,0	0,034	24.064.237,4		
701,24	0,010	41.249,4	41.249,4	1	41.249,4	0,077	535.706,6							
698,45	0,010	69.845,0	69.845,0	1	69.845,0	0,094	743.031,9	1.789.443,5	2	894.722,7	0,034	26.315.376,3		
703,19	0,012	58.599,1	58.599,1	1	58.599,1	0,056	1.045.413,6							
768,17	0,010	76.817,0	76.817,0	1	76.817,0	0,210	365.795,2	723.893,2	2	361.846,6	0,010	36.184.664,4		
730,47	0,013	56.190,0	56.190,0	1	56.190,0	0,157	357.898,0							
712,71	0,010	71.271,0	71.271,0	1	71.271,0	0,185	385.248,6	946.844,9	2	458.422,4	0,017	26.966.028,9		
705,96	0,008	88.245,0	88.245,0	1	88.245,0	0,166	531.596,3							
685,58	0,012	57.131,6	57.131,6	1	57.131,6	0,148	386.024,7	776.672,2	2	388.336,1	0,010	38.833.611,1	253.188.818,1	9
693,79	0,018	43.361,8	43.361,8	1	43.361,8	0,111	390.647,5							
652,14	0,015	43.476,0	43.476,0	1	43.476,0	0,214	203.156,8	368.242,5	2	184.121,4	0,006	30.686.911,2		
686,75	0,026	26.413,4	26.413,4	1	26.413,4	0,160	165.084,1							
750,63	0,112	6.703,8	6.703,8	1	6.703,8	0,105	63.846,0	751.186,3	2	375.594,1	0,023	46.330.181,3		
762,95	0,010	76.295,0	76.295,0	1	76.295,0	0,111	687.342,3							
683,47	0,010	68.347,0	68.347,0	1	68.347,0	0,125	546.776,0	1.064.591,3	2	532.295,6	0,017	31.311.509,2		
689,73	0,012	57.477,5	57.477,5	1	57.477,5	0,111	517.815,3							
695,44	0,014	49.674,2	49.674,2	1	49.674,2	0,098	506.880,4	1.031.609,7	2	515.804,8	0,023	22.428.298,3		
697,89	0,010	69.789,0	69.789,0	1	69.789,0	0,133	524.729,3							

TABELA 4.8 - INTEGRAÇÃO DOS TRÊS ESTÁGIOS PARA A CLASSE SUBARBUSTIVA ABERTA

UTA				USA				UPA				ÁREA TOTAL (km <sup>2</sup> )		
A <sub>ijk</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>ijk</sub>	$\frac{A_{ijk}}{P_{ijk}}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{k=1}^K \frac{A_{ijk}}{P_{ijk}}$ (m <sup>2</sup> )	t <sub>ij</sub>	A <sub>ij</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>ij</sub>	$\frac{A_{ij}}{P_{ij}}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{j=1}^J \frac{A_{ij}}{P_{ij}}$ (m <sup>2</sup> )	n <sub>i</sub>	A <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>i</sub>		$\frac{A_i}{P_i}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{P_i}$ (m <sup>2</sup> )
725,14	0,042	17.265,2	17.265,2	1	17.265,2	0,076	227.174,9	814.885,6	2	407.442,8	0,026	15.670.876,2		
711,13	0,010	71.113,0	71.113,0	1	71.113,0	0,121	587.710,7							
550,14	0,012	45.845,0	45.845,0	1	45.845,0	0,066	694.621,2	1.275.234,9	2	637.617,4	0,026	24.523.749,1		
546,68	0,027	20.321,4	20.321,4	1	20.321,4	0,035	580.613,7							
652,83	0,016	40.801,6	40.801,6	1	40.801,6	0,202	201.989,4	343.200,0	2	171.600,0	0,008	28.600.004,0		
610,03	0,020	30.501,5	30.501,5	1	30.501,5	0,216	141.210,6							
613,66	0,018	34.092,2	34.092,2	1	34.092,2	0,241	141.461,5	326.849,3	2	163.424,6	0,006	27.237.448,2		
611,76	0,012	50.981,6	50.981,6	1	50.981,6	0,275	185.387,8							
615,64	0,021	29.316,1	29.316,1	1	29.316,1	0,082	357.514,5	613.876,0	2	406.938,0	0,023	17.692.956,5	336.826.398,9	10
608,33	0,031	19.623,5	19.623,5	1	19.623,5	0,043	456.361,5							
698,08	0,018	38.782,2	38.782,2	1	38.782,2	0,095	408.233,9	2.153.370,3	2	1.076.685,1	0,023	46.812.399,4		
703,29	0,013	54.099,2	54.099,2	1	54.099,2	0,031	1.745.136,4							
683,13	0,016	42.695,4	42.695,4	1	42.695,4	0,231	184.829,5	522.050,1	2	261.025,0	0,013	20.078.850,6		
700,07	0,012	58.339,1	58.339,1	1	58.339,1	0,173	337.220,6							
738,37	0,029	25.461,0	25.461,0	1	25.461,0	0,106	240.196,4	1.278.678,5	2	639.339,2	0,026	24.589.971,4		
731,09	0,008	91.386,2	91.386,2	1	91.386,2	0,088	1.038.480,1							
705,63	0,013	54.279,2	54.279,2	1	54.279,2	0,129	420.769,2	1.110.265,2	2	555.132,6	0,009	61.681.402,6		
697,77	0,011	63.433,6	63.433,6	1	63.433,6	0,092	689.496,0							
680,42	0,012	56.701,6	56.701,6	1	56.701,6	0,153	370.599,1	839.264,4	2	419.632,2	0,006	69.938.700,9		
691,75	0,012	57.645,8	57.645,8	1	57.645,8	0,123	468.665,3							

TABELA 4.9 - INTEGRAÇÃO DOS TRÊS ESTÁGIOS PARA A CLASSE SUBARBUSTIVA ESPARSA

UTA						USA				UPA				ÁREA TOTAL (km <sup>2</sup> )
A <sub>ijk</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>ijk</sub>	$\frac{A_{ijk}}{P_{ijk}}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{k=1}^{ij} \frac{A_{ijk}}{P_{ijk}}$ (m <sup>2</sup> )	n <sub>ij</sub>	A <sub>ij</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>ij</sub>	$\frac{A_{ij}}{P_{ij}}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{j=1}^{i1} \frac{A_{ij}}{P_{ij}}$ (m <sup>2</sup> )	n <sub>i</sub>	A <sub>i</sub> (m <sup>2</sup> )	P <sub>i</sub>	$\frac{A_i}{P_i}$ (m <sup>2</sup> )	$\sum_{i=1}^m \frac{A_i}{P_i}$ (m <sup>2</sup> )	
815,32	0,013	62.716,9	62.716,9	1	62.716,2	0,037	1.100.296,6	1.761.559,3	2	880.779,6	0,008	110.097.490,0		
790,87	0,023	34.385,6	34.385,6	1	34.385,6	0,052	661.262,5							
845,64	0,010	84.564,0	84.564,0	1	84.564,0	0,098	862.897,9	1.221.140,5	2	610.570,2	0,007	87.224.314,2	197.321.764,3	2
803,18	0,019	42.272,6	42.272,6	1	42.272,6	0,118	358.242,6							



A Tabela 4.10 apresenta os erros de amostragem da estimativa da área total para as classes de formações.

TABELA 4.10 - ERRO DE AMOSTRAGEM DA ESTIMATIVA DA ÁREA TOTAL PARA AS CLASSES DE FORMAÇÕES

CLASSE	ÁREA TOTAL (km <sup>2</sup> )	ERRO PADRÃO (km <sup>2</sup> )	ERRO DE AMOSTRAGEM (%)
1	6,409	1,479	23,07
2	49,769	9,738	19,56
3	28,124	2,324	8,26
4	33,682	6,030	17,90
5	98,660	11,401	11,56

Pela análise da Tabela 4.10, verifica-se que todas as classes apresentaram erros de amostragem inferiores ao erro admitido. Diante desta evidência, constata-se que os números de amostras foram plenamente satisfatórios para todas as classes mapeadas.

Outra análise pode ser realizada utilizando a Tabela 4.11, que apresenta o total das áreas estimadas nas UPAs e no mapeamento em três estágios.

TABELA 4.11 - TOTAL DE ÁREAS MAPEADAS EM km

CLASSE	ESTIMADA NAS UPAS (1)	ESTIMADA NO MAPEAMENTO (2)	DIFERENÇA (%)
1	9,562	6,409	- 32,97
2	54,337	49,769	- 8,40
3	32,850	28,124	- 14,38
4	34,087	33,682	- 1,18
5	94,162	98,660	+ 4,77

(1) A estimativa da área das classes englobou toda a área de estudo, desconsiderando as áreas alteradas (estradas, habitações, campos de culturas, etc.).

(2) A estimativa da área das classes, em função do cálculo probabilístico e medições em campo, excluiu tais alterações.

Como pode ser observado na Tabela 4.11, apenas a classe de Caatinga Subarrestiva esparsa obteve uma expansão em sua área mapeada com os três níveis de informação, em comparação com a classificação híbrida. Este fato é decorrente da homogeneização das classes proporcionada pela geração do documento temático, eliminando pontos dispersos para uniformizar os temas da área. Com isso, pequenas manchas da classe de vegetação Subarrestiva esparsa são eliminadas da classificação.

CAPÍTULO 5CONCLUSÕES

A aplicação da técnica abordagem multiestágio neste trabalho, utilizando-se de modo integrado, imagens TM/Landsat-5, fotografias aéreas e dados de campo, possibilitou a estimativa de área das classes da vegetação de Caatinga da área de estudo. Através da integração destes três estágios de informação, obtiveram-se os seguintes valores de áreas para as classes de vegetação:

- Caatinga Arbóreo-arbustiva densa - 6,409 km<sup>2</sup>;
- Caatinga Arbustiva densa - 49,769 km<sup>2</sup>;
- Caatinga Arbustiva aberta - 28,124 km<sup>2</sup>;
- Caatinga Subarbustiva aberta - 33,682 km<sup>2</sup>;
- Caatinga Subarbustiva esparsa - 98,660 km<sup>2</sup>.

Os erros de amostragem obtidos para as classes de vegetação foram: 23,07 para a classe de Caatinga Arbórea arbustiva densa; 19,56 para a classe de Caatinga Arbustiva densa; 8,26 para a classe de Caatinga Arbustiva aberta; 17,90 para a classe de Caatinga Subarbustiva aberta e 11,56 para a classe de Caatinga Subarbustiva esparsa.

Com base na análise desses erros de amostragem, verificou-se que todas as classes de vegetação apresentaram índices inferiores ao admitido, evidenciando um quadro amostral adequado e suficiente.

Em comparação ao mapeamento que utiliza apenas o nível orbital, verificaram-se diferenças percentuais que variaram de 1,18 a 32,97 para as classes de Caatinga Subarbustiva aberta e Caatinga Arbóreo-Arbustiva Densa, respectivamente. Este último valor (32,97%) ressalta o fato de o procedimento multiestágio considerar a heterogeneidade natural existente nas classes de vegetação, principalmente ao nível de campo, muitas vezes uniformizada durante o processo de classificação das imagens digitais. Deste modo, torna o trabalho de mapeamento mais detalhado e conseqüentemente de maior contribuição para o monitoramento deste importante ecossistema.

Em relação aos métodos convencionais de mapeamento, a técnica multiestágio apresenta a vantagem de reduzir a obtenção de dados no campo, diminuir a quantidade de fotografias aéreas e determinar as áreas das classes de vegetação de modo mais rápido e preciso.

Os resultados alcançados revelam a potencialidade da abordagem multiestágio como técnica auxiliar no processo de mapeamento da vegetação de Caatinga. Nesse sentido, sugere-se a continuidade deste estudo para determinação de inventários dendrométricos desta vegetação, associado a modelos de volumetria diferenciados por classes e/ou espécies.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDRICH, R.C. Space photos for land use and forestry. Photogrammetric Engineering, 37(4):389-401, 1971.
- ANDERSON, J.E. Multistage variable probability forest volume inventory. Mississippi, National Space Technology Laboratories, 1979. (NASA-TM-82198).
- BONNER JR., W.J.; MORGART, J. Landsat: a sampling frame for arid land inventories. In: Arid Land Resource Inventories: developing cost-efficient methods: International Workshop, La Paz, México, Nov. 30-Dec. 6., Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture. Forest Service, 1980, p. 230-239. (General Technical Report WO-28).
- BRAUN-BLANQUET, J. Plant sociology: the study of plant communities. London, Hafner, 1965. 439p.
- BROOKS, J.; JAI, A.; KELLER, T.; KIMMER, E.; SU, J. Thematic mapper geometric correction performance evaluation. In: Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium. 10., West Lafayette, IN, June 12-14, 1984. Proceedings. West Lafayette, IN, Purdue University, 1984. p.22-28.
- CÂMARA NETO, G. Métodos de interpolação em imagens digitais por meio de técnicas de projeto de filtros F.I.R. São José dos Campos, INPE, 1982. (INPE-2663-TDL1/120).
- CARVALHO, V.C. de. Structure et dynamique de la végétation en milieu tropical semi-aride. La Caatinga de Quixaba (Pernambouc, Brésil) du terrain a l'analyse des données MSS/Landsat. (These présentée pour le Doctorat) - Université de Toulouse le Mirail/Geographie-Aménagement. Toulouse, 1986. Relatório (INPE-4049-RPE).

- COCHRAN, W.G. Sampling techniques. 2.ed. New York, Wiley, 1977.
- COLWELL, R.N. Forest applications project/timber resource San Houston National Forest inventory and development of a survey planning model. Berkeley, CA. University of California, 1976. (Final Report NASA 14452).
- DANSEREAU, P. The continuum concept of vegetation: responses. Botanical review, 34(3):253-332, 1968.
- DANSEREAU, P. Biogeography and ecological perspective. New York, The Ronald Press, 1957. 394p.
- DEGLORIA, S.D.; BERNSTEIN, R.; DIZENZO, S. Discrimination of natural and cultivated vegetation using Thematic Mapper spectral data. In: SLATER, P.N., ed. Earth remote sensing using the Landsat Thematic Mapper and SPOT Sensor systems, Innsbruck, Austria, Apr. 15-17, 1986. Proceedings. Bellingham, Whas, SPIE, 1986.
- DUQUE, G. O Nordeste e as lavouras xerófilas. 3.ed. Mossoró, Escola Superior de Agricultura de Mossoró, 1980. (Coleção Mossoroense). 315p.
- 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.
- ELLENBERG, G.H.; MUELLER-DOMBOIS, D. Tentative physiognomic-ecological classification of plant formations of the earth. Zurich, Ber. Geobot. Inst. ETH, Stiftg. Rubel, 1967.

- EMBERG, L.; GODRON, M.; FLOCH, E.L.; SAUVAGE, C. L'analyse phytosociologique de la végétation. In: GODRON, M. Code pour le relevé methodique de la végétation et du milieu: principes et transcription sur cartes perforées. Paris, Centre National de la Recherche Scientifique, 1968. cap. 4, p. 59-87.
- FERRI, M.G. Ecologia; temas e problemas brasileiros. São Paulo, EDUSP/Itatiaia, 1974.
- FOSBERG, F.R. A classification of vegetation for general purposes. Tropical Ecology, 2:1-28, 1961.
- GALVÃO, M.V. Regiões bioclimáticas do Brasil. Revista Brasileira de Geografia, 29 (1):3-6, jan./mar, 1967.
- GIALDINI, M.J.; TITUS, S.J.; NICHOLS, J.; THOMAS, R. The integration of manual and automatic image analysis techniques with supporting ground data in a multistage sampling framework for timber resource inventories: three examples. In: Nasa Earth Resources Survey Symposium, Proceedings. NASA, Lyndon B. Johnson Space Center, 1975, v.I-B, p.1377-1387.
- GOMES, M.A.F. Padrões de caatinga nos Cariris Velhos, Paraíba. (Dissertação de Mestrado em Botânica) - UFRPE, Recife, 1979. 89p.
- HARDINS, R.A.; SCOTT, R.B. Forest inventory with Landsat-Phase II- Washington forest productivity study: State of Washington. Olympia, WA, Department of Natural Resources, Apr., 1978.

- HELLER, R.C.; WEAR, J.F. Sampling forest insect epidemics with color films. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 6., Ann Arbor, MI, 1969. Proceedings. Ann Arbor, MI, Willow Run Laboratories, 1969, v.2 p.1157-1167.
- HERNANDEZ FILHO, P.; LEE, D.C.L.; SHIMABUKURO, Y.E.; ASSIS, O.R. de.; MEDEIROS, J.S. de Estimativa do volume de madeira em múltiplo estágio utilizando um sistema de amostragem com probabilidade variável. São José dos Campos, INPE, 1989. (INPE-4897-PRE/1498).
- HOLDRIDGE, L.R. Determination of world formations from simple climatic data. Science, 105, 1947.
- HOWARD, J.A.; SCHADE, J. Towards a standardizer hierarchical classification of vegetation for remote sensing. Rome: FAO, 1982, 30p. (FAO. RSC series. bulletin, 11).
- Ii F.A.M.; D'ALGE, J.C.L.; Ii, S.S.; CASTELARI, S.P.; CORREIA, V.R. DE M. Geocodificação de imagens orbitais para utilização em sistemas de informações geográficas. In: Simpósio Latino-Americano de Sensoriamento Remoto, Gramado, 10-15 ago. 1986. Anais. São José dos Campos, INPE. 1986.
- KIRBY, C.L.; ECK, P.I.V. A basic for multistage forest inventory in the boreal forest region. In: Canadian Symposium on Remote Sensing, 4., Quebec, 1977. Proceedings. Ottawa, Ontario, Canadian Aeronautics and Space Institute, 1977, v.4, p.72-94.



- KLEIN, W.H. Estimating bark beetle-killed lodgepole pine with high altitude panoramic photography. Journal of the American Society of Photogrammetry, 45(4):733-737, Apr. 1982.
- KUCHLER, A.W. Classification and purpose in vegetation maps. Geography Review, 46(2): 1956.
- KUHLMANN, E. O domínio da caatinga. Boletim Geográfico, 33(241): 65-72. jul./ago. 1974.
- LANGLEY, P.G. New multistage sampling techniques using space and aircraft image for forest inventory. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 6., Ann Arbor, MI, 1969. Proceedings. Ann Arbor, MI, Willow Run Laboratories, 1969, v.2, p.1179-1183.
- LANGLEY, P.G. Multistage sampling of earth resources with aerial and space photography. In: Monitoring Earth Resources from Aircraft and Spacecraft, 1971. (NASA SP-275).
- LANGLEY, P.G. Multistage variable probability sampling: theory and use in estimating timber resources from space and aircraft photography. (Ph.D. Dissertation) - University of California. Berkeley, CA, 1975a.
- LANGLEY, P.G. Investigation to develop a multistage forest sampling inventory system using ERTS-1 imagery. Berkeley, CA, Goddard Space Flight Center, 1975b. (Final Report type III).
- LEE, D.C.L.; HERNANDEZ FILHO, P.; ASSIS, O.R. de; MEDEIROS, J.S. de Forest inventory using multistage sampling with probability proportional to size. São José dos Campos, INPE, 1984. (INPE-3084-PRE/494).

- LEE, D.C.L.; HERNANDEZ FILHO, P.; SHIMABUKURO, Y.E.  
Inventário de floresta plantada através da amostragem em múltiplo estágio com probabilidade proporcional à grandeza. São José dos Campos, INPE, 1983. (INPE-2869-RPE/441).
- LILLESAND, T.M. E KIEFER, R.W. Remote sensing and image interpretation. New York, NY, John Wiley, 1979. 562p.
- MACHADO E SILVA, A.J.F.; D'ALGE, J.C.L. Avaliação da qualidade geométrica das imagens TM-LANDSAT. In: Simpósio Latino-Americano de Sensoriamento Remoto, Gramado, 1986.
- Mapa exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco: escala 1:600.000. Convênio MA/EPE-SU-DENE/DRN. Recife, Serviço Aerofotogramétrico Cruzeiro do Sul, 1969.
- MUELLER-DOMBOIS, D. Classification and mapping of plant communities: a review with emphasis on tropical vegetation. In: WOODWELL, G.M. The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle. Chichester, John Wiley, 1984. cap. 2, p. 21-88.
- MUELLER-DOMBOIS, D.; ELLENBERG, H. Aims and methods of vegetation ecology. New York, NY, John Wiley, 1974. 547p.
- MURINE, G.E. The effects of varying training set size on multispectral scanner data classification. In: SHAKROKHI, F., ed. Remote sensing of earth resources. Tullahoma, TN., University of Tennessee, 1975. v.4, p.743-758.

- NI, S.X. Application of digital image enhancement processing of Landsat data for terrain mapping of Southern Huairou County of Beijing (Peking), China. In: Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium. 10., West Lafayette, IN, June 12-14, 1984. Proceedings. West Lafayette, IN, Purdue University, 1984, p.108-116.
- NICHOLS, J.D.; GIALDINI, M. JAAKOLA, S. A timber inventory based upon manual and automated analysis of ERTS-1 and supporting aircraft data using multistage probability sampling. In: Earth Resources Technology Satellite - 1 Symposium, 3., Washington, D.C., Proceedings. Washington, D.C., NASA, 1973, v.1A, p. 145-157.
- PROJETO RADAMBRASIL. Folhas SC. 24/25 Aracaju/Recife, geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1983. 856p. 7 mapas (Levantamento de Recursos Naturais, 30).
- RAJ, D. Sampling theory. New York, NY, McGraw-Hill, 1968. 302p.
- REICHERT, P. Recent developments and trends of relevance to multilevel remote sensing. Rome, Remote sensing officer, FAO, s.d.a
- REICHERT, P. Overview on remote sensing data sources available for multistage land use surveys. Rome, Remote sensing officer, FAO, s.d.b
- RIBEIRO, E.A.; Ii, F.A.M.; MOREIRA, J.C.; DUTRA, L.V. Manual de usuários dos sistemas de tratamento de imagens digitais. São José dos Campos, INPE, Departamento de informática -DSC-LTID, 1982. 158p.

- ROHDE, W.G.; MILLER, W.A.; BONNER, K.G. A stratified-cluster sampling procedure applied to a willand vegetation inventory using remote sensing. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 13., Ann Arbor, MI, 1979. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM, 1979, v. 1, p. 167-179.
- SABINS Jr, F.F. Remote sensing: principles and interpretation. San Francisco, CA, W.H. Freeman, 1978. 426p.
- SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. Remote sensing: the quantitative approach. New York, NY, McGraw-Hill, 1978.
- TITUS, S.J.; GIALDINI, M.J.; NICHOLS, J.D. A total timber resource inventory based upon manual and automated analysis of Landsat-1 and supporting aircraft data using stratified multistage sampling techniques. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 10., Ann Arbor, MI, 1975. Proceedings. Ann Arbor, MI, 1975, v.2, p.1093-1099.
- UNESCO. International classification and mapping of vegetation. Paris, 1973. (Ecology and conservation Series. 6.93).
- VALERIANO, D.M.; CARVALHO, V.C. de; LEE, D.C.L. Avaliação dos dados TM/Landsat e HRV-M/SPOT, para levantamento dos recursos vegetais do trópico semi-árido: Caso de estudo Quixaba-PE. No prelo.
- VELASCO, F.R.D.; PRADO, L.O.C. e SOUZA, R.C.M. de Sistema Maxver: manual de descrição de programas. São José dos Campos, INPE, 1979. (INPE-1499-RPI/004).

WALTER, H. Ecology of tropical and subtropical vegetation.  
Edinburgh, Oliver and Boyd, 1971.

WIANT Jr, H.V. Elementary 3p sampling. West Virginia  
University, Agricultural and Forestry Experiment Station,  
1976. 31p.









APÊNDICE B

CARTA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA VEGETAÇÃO; BACIA DO  
RIACHO PONTAL (PETROLINA - PE)



40°34'W  
9°00'S

40°25'W  
9°00'S



9°09'S  
40°34'W

9°09'S  
40°25'W






Escala: 1/100 000



Convenções Cartográficas:

- POVOADO
- FAZENDA OU SÍTIO
- ESTRADA PRINCIPAL
- - - - - ESTRADA SECUNDÁRIA
- - - - - RIACHO
- LAGOA

Legenda: (Classes de Formação)

-  CAATINGA ARBÓREO ARBUSTIVA DENSA
-  CAATINGA ARBUSTIVA DENSA
-  CAATINGA ARBUSTIVA ABERTA
-  CAATINGA SUBARBUSTIVA ABERTA
-  CAATINGA SUBARBUSTIVA ESPARSA

Carta da distribuição espacial da vegetação:  
Bacia do Riacho Pontal (Petrolina-PE)