INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
Programa Integrado de Pós-graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais
Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais

CARACTERIZAÇÃO E MAPEAMENTO DA VEGETAÇÃO E USO DO SOLO DA RESERVA EXTRATIVISTA DO BAIXO JURUÁ, AMAZONAS.

RAPHAEL LEDUC DO ESPIRITO SANTO

Manaus, Amazonas
Junho, 2007

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM
Programa Integrado de Pós-graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais
Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais

CARACTERIZAÇÃO E MAPEAMENTO DA VEGETAÇÃO E USO DO SOLO DA RESERVA EXTRATIVISTA DO BAIXO JURUÁ, AMAZONAS.

RAPHAEL LEDUC

ORIENTADOR: DR. JOAQUIM DOS SANTOS
CO-ORIENTADOR: DR. PAULO MAURÍCIO LIMA DE ALENCASTRO GRAÇA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS, área de concentração em Manejo Florestal.

Manaus, Amazonas
Junho, 2007

E77 Leduc, Raphael
Caracterização e mapeamento da vegetação e uso do solo da Reserva Extrativista do Baixo Juruá, Amazonas/ Raphael Leduc do Espirito Santo. --- Manaus : [s.n.], 2007.
Xi, 96f. : il.

Dissertação (mestrado)—INPA/UFAM, Manaus, 2007
Orientador: Santos, Joaquim dos
Co-orientador: Graça, Paulo Maurício Lima de Alencastro
Área de concentração: Manejo Florestal

1. Sensoriamento remoto 2. Uso do solo 3. Manejo Florestal 4. Reserva Extrativista do Baixo Juruá. I. Título.
CDD 19.ed. 634.928

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todas as pessoas que diretamente ou indiretamente contribuíram com a realização deste trabalho.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação do INPA e ao CNPQ pelo auxílio financeiro através da concessão da bolsa de mestrado.

Aos meus orientadores, Dr. Joaquim dos Santos e Dr. Paulo Maurício Graça pela amizade, atenção e ensinamentos.

Aos bravos amigos de trabalho de campo: Wanderley, Raycleuton, Valdo e Vando, sempre dispostos a embrenhar-se mata adentro. Selva!

Ao Laboratório de Manejo Florestal do INPA, aos amigos Adriano e Vilany e ao Dr. Niro Higuchi.

Ao Dr. Moacir Campos (INPA/ SIPAM) pelo grande apoio dado no início dos trabalhos.

Ao IBAMA-Tefé e ao Projeto ARPA, em especial a Dra. Maria Goretti pelo apoio logístico e financeiro do levantamento de campo.

À ASTRUJ (Associação dos Trabalhadores Rurais do Baixo Juruá), em especial ao amigo Sr. Joãozinho e sua família sempre prestativa e eficiente.

Aos comunitários da Resex pela hospitalidade e amizade. Ao povo do Juruá, pessoas como Sr. Raimundo, Sr. Chicó, Dona Cota e muitos outros, os verdadeiros guardiões da floresta.

Agradeço a todos os amigos, em especial aos Galerosos CFT/2005. À Paty e ao Kinkas pela amizade de longa data e pelo gancho de rede disponibilizado logo quando cheguei à Manaus. À Juliana, minha querida princesa do Solimões, pelo entusiasmo e sorriso cativante, companheira pra toda hora. Ao Rod e seus conselhos madrugada adentro, a doce Clarinha. Ao Seu Emílio que manteve o mesmo preço do aluguel nesses 2 anos, à Gale, à Morla, enfim, minha família amazonense. Aos colegas da turma de 2004, ao amigo Ralph pelas informações geograficamente indispensáveis. Muito obrigado!

Ao Departamento de Engenharia Florestal da UFPR, professores, amigos e pessoal do xerox, à toda turma de 1999, a rapaziada do rock.

Agradeço ao apoio e carinho “à distância” da minha família curitibana: Aos meus pais pela educação e por terem sempre acreditado no meu esforço. À Cã, à Tita, e em especial à querida Lorena. Aos queridos avós, bisavós, tios, primos, cunhados, chegados, anexados em geral, enfim, minha família!

Finalmente, aos que contribuíram nesta dissertação de maneira direta e indiretamente, mas que foram omitidos neste momento.

RESUMO

As Reservas Extrativistas tem sido uma vitrina do movimento mundial pela devolução do controle de terra de áreas de florestas tropicais às comunidades tradicionais. A justificativa deste movimento é que a devolução de terras de florestas tropicais aumentaria as chances de promoção do desenvolvimento sustentável. No planejamento do uso do solo, os diversos atributos da terra devem ser analisados e avaliados com vistas a um uso ótimo e sustentável. A aliança entre técnicas do sensoriamento remoto e indicadores biofísicos pode ser valiosa para estudos de diagnose e monitoramento, como uma ferramenta para preencher o abismo entre os estudos locais/ intensivos e aqueles globais/ amplos, respondendo às necessidades dos tomadores de decisão e gestores. Desta forma, o presente trabalho teve como finalidade mapear e caracterizar a vegetação e o uso do solo da Reserva Extrativista do Baixo Juruá, no Estado do Amazonas, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e dados de coleta de campo. Os dados utilizados foram imagens do satélite *Landsat TM*, do radar *SRTM* e dados de inventário florestal. As imagens de satélite e radar foram pré-processadas e ajustadas. Das imagens de satélite foram derivadas imagens fração solo, sombra e vegetação por meio da técnica de modelo linear de mistura espectral. Da imagem de radar foram gerados mapas altimétricos e de declividade. As imagens fração, os mapas e 6 bandas do sensor *TM* serviram de dados de entrada em uma classificação por árvore de decisão, sendo gerado um mapa final de cobertura e uso do solo da RESEX do Baixo Juruá. Foram obtidas 9 classes de cobertura e uso do solo. As variáveis mais utilizadas na distinção das classes foram as imagens fração. O *SRTM* foi fundamental na separação das florestas de Terra-firme e alagadas. O índice de exatidão global da classificação foi 93,4%, e a estatística *Kappa* foi de 0,92. Nesta avaliação foi detectada uma grande área de floresta derrubada por distúrbio natural (*Blowdown*) de aproximadamente 400 ha, próximo da cidade de Juruá. Na imagem fração sombra foram detectadas manchas de floresta com valores de fração sombra diferenciados do restante da área. Em campo foi verificado que essas manchas correspondem a adensamentos populacionais mono específicos pertencentes ao gênero *Discocarpus sp*.

ABSTRACT

The Extractivist Reserves have been a show window for the world-wide movement for the devolution of the land control of areas of tropical forests for the traditional communities. The justification of this movement is that the land devolution of tropical forests would increase the possibilities of promotion of the sustainable development. The alliance enters the techniques of the remote sensing and the biophysical pointers can be valuable for studies of diagnose and monitoring, as a tool that fills the abyss between global and the local studies, answering to the necessities of the borrowers of decision and managers. The present work intends to consider a characterization of the natural resources of the Extractivist Reserve of the Baixo Juruá using techniques of remote sensing and data of collection of field and Forest Inventory, discriminating the different landscapes of the RESEX and quantifying its lumber potential. The data used in this work had been images of satellite (Landsat 5TM), radar (SRTM) and data of carried through forest inventories for the implantation of the Plan of Handling of the RESEX of the Baixo Juruá. The images of satellite and radar were pre-processed and had been adjusted. From the satellite images, had been derived fraction images of soil, shade and vegetation using the technique of linear model of spectral mixture. Of the radar image hypsometric and declivity maps had been generated. The fraction images, the maps and the 7 bands of the satellite had served of input data in a classification for decision tree, to generate the map of covering of the ground of the Rexes of the Baixo-Juruá. 9 classrooms of vegetal covering and use of the ground had been gotten. The most used variable in the distinction of the classrooms had been the fraction images. The SRTM was basic in the separation of the flooded forests of the terra-firme. The global accuracy of the classification was 93,4%, and the Kappa statistics it was of 0,92. In this evaluation a great area of forest knocked down for natural riot (Blowdown) of 400 ha was detected, approximately next to the city of Juruá. In the fraction image of shade spots of forest with different values of shade fraction had been detected. In field it was verified that these spots correspond to monospecific population pertaining to the genera *Discocarpus sp.*

LISTA DE TABELAS

Tab.1- Faixas Espectrais de cada Banda do Sensor TM do LANDSAT 5 19
Tab.2- Características da imagem LANDSAT-TM utilizada..... 31
Tab.3- Características da imagem SRTM utilizada. 32
Tab.4- Valores de radiância Lmax e Lmin (W / m^2.sr. µm) e irradiância solar (E_{solar}) (W / m^2.µm) utilizados na conversão de número digital para reflectância aparente. 35
Tab.5- Variável e o seu respectivo arquivo associado, utilizada pelo classificador.. 50
Tab.6- Relação de atributos e a quantidade de vezes que eles foram utilizados pelo algorítmo. (*Atributos não utilizados)..... 50
Tab.7- Índices de Jeffries-Matusita e Transformada de divergência Os números em vermelho mostram os valores abaixo de 1,9 e os números acima deste valor estão em verde..... 51
Tab.8- Panorama comparativo dos valores médios das proporções dos componentes extraídos de 20 amostras de 4 x 4 pixels 53
Tab.9- Matriz de confusão; TF=Terra Firme; FS=Floresta secundária; A/solo= Bancos de areia e solo exposto; Desm=Desmatamento recente/roça nova; F.A.A=Floresta Alagável alta; Agrop=Agropastoril; F.A.B=Floresta Alagada baixa; F.I=Floresta de Igapó. 61
Tab.10- Quantificação da cobertura da terra separada em classes, obtidas pelo classificador por árvore de decisão 62
Tab.11- Valores médios por hectare dos parâmetros biométricos nos transectos... 72

LISTA DE FIGURAS

Fig.1- Mapa de vegetação com a classificação feita pelo Projeto RADAMBRASIL. 14
Fig.2- Curva espectral representando a reflectância típica de uma folha verde e sadia. FONTE: adaptada de Hoffer (1978, p.232). 17
Fig.3- Área de cobertura do sobrevôo da SRTM..... 26
Fig.4- Exemplo da entrada de dados do classificador por Árvore de decisão..... 27
Fig.5- Localização da área de estudo. Reserva Extrativista do Baixo Juruá/AM. 29
Fig.6- Na figura da esquerda: Vista aérea da sede do município de Juruá/AM. Na figura da direita: Pastagem na área rural da cidade. 30
Fig.7- Espaço bidimensional compreendendo as Bandas 3 e 4 do sensor TM5Landsat. O triângulo vermelho corresponde a área da distribuição de pontos e os retângulos brancos indicam a provável localização dos pixels puros. 36
Fig.8- Fluxograma da metodologia aplicada na classificação temática..... 39
Fig.9- Esquema da instalação no campo de um transecto composto de 6 sub-unidades. 40
Fig.10- Modelo de unidade amostral composta por 4 sub-amostras. Higuchi et al (1982). 40
Fig.11- Curva espectral dos alvos: vegetação (a), solo (b) e água (c), em reflectância aparente (sem correção) e reflectância de superfície (após correção). Os valores para as bandas 5 e 7 estão em reflectância aparente. 43
Fig.12- Curvas espectrais dos alvos puros selecionados para a determinação do modelo linear de mistura espectral. 44
Fig.13- (A) Composição colorida TM/Landsat 5 (R5G4B3) da região de Juruá/AM; (B) Imagem fração solo; (C) Imagem fração sombra; e (D) Imagem fração vegetação. 45
Fig.14- Imagem SRTM da região do Baixo Juruá /AM, na resolução 30 metros..... 46
Fig.15- Perfil esquemático da divisão em sub-classes das Florestas Alagáveis, adaptado de Wittmann et al. (2002)..... 47
Fig.16- Fotografia aérea da região da Floresta Alagada Baixa de Igapó, em 10/10/2007. Em “A” e “B” as setas pretas indicam a linha limítrofe entre áreas alagáveis e não alagáveis. 48
Fig.17- Árvore de Decisão. Retângulos em cinza (nó de decisão) apresentam as expressões utilizadas pelo algoritmo. Os retângulos coloridos representam os nós da classificação final..... 49
Fig.18- Área de uso do solo na Comunidade do Botafogo, Juruá/AM. Em (A) Composição colorida TM/Landsat 5 (R5G4B3). Setas brancas indicam novas áreas agrícolas; (B) Imagem fração solo; (C) Imagem fração sombra, setas vermelhas indicando áreas sem floresta e círculo vermelho indicando floresta intacta, e (D) Imagem Fração Vegetação, círculos vermelhos indicam florestas secundárias..... 52
Fig.19- (a) Regeneração densa de Cecrópia, (b) área em regeneração pós-roçado, juntamente com plantios de andiroba (agrofloresta)..... 54
Fig.20- Área abandonada pós-roça..... 54
Fig.21- Em (A) plantio de Andiroba consorciado com outras frutíferas em meio a floresta secundária formada após abandono do roçado, e (B) características espectrais das classes em uma composição RGB543 Landsat/TM. 55
Fig.22- Comunidade de Arati. Em (A) composição RGB543; (B) Imagem fração solo e (C) Fração Vegetação. Em (A), (B) e (C) elipse vermelha indica a Floresta de Terra-Firme, setas brancas e azuis indicam áreas de menor cobertura vegetal (Desmate recente) e setas vermelhas indicam pasto. Em (C), seta amarela indica área de transição entre Pasto e Desmate recente. 56

Fig.23- (A), composição RGB543. Setas brancas indicam áreas de roçados antigos; em (B), setas branca indicam áreas de roçado antigo gerado pela classificação por árvore de Decisão; (C), roçado antigo com aproximadamente 1 ano e meio, e “D” pasto sujo aparentando bastante semelhança com as áreas roçado antigo. 57
Fig.24- Diagrama ternário das proporções de cada componente puro utilizado no MLME. 58
Fig.25- Em “A”, grande quantidade de vegetação morta, queimada e com algumas espécies arbóreas permanecendo em pé. Em “B”, fotografia aérea de 10/10/2007 mostrando o padrão de desflorestamento em comunidades tradicionais da Resex do Baixo Juruá..... 59
Fig.26- (A) e (B) Imagem aérea da floresta de igapó no período de seca (10/10/2007). Setas pretas indicam a baixa densidade da cobertura vegetal e o solo exposto logo abaixo do dossel. (C) Floresta de Igapó em destaque na composição RGB543, (D) Imagem fração vegetação e (E) Imagem fração solo. 60
Fig.27- Cobertura do solo na RESEX do Baixo Juruá..... 62
Fig.28- Mapa final da classificação. Reserva Extrativista do Baixo Juruá (AM)..... 63
Fig.29- Modelo da “casa nova” viabilizada pelo Incra e Ibama por meio de crédito habitação. Com. Igarapé do Branco. 65
Fig.30- Características das 3 principais classe de uso do solo nas comunidades da Resex 66
Fig.31- Área total em hectares das modalidades de uso do solo por comunidade. . 67
Fig.32- Comunidade do Botafogo. (a) Área de influência da comunidade (1.400ha) e (b) porcentagem ocupada por cada classe dentro da área de influência 68
Fig.33- Comunidade de Antonina. (a) Fotografia aérea (10/10/2007), (b) Área de influência da comunidade (1.400ha) e (c) porcentagem ocupada por cada classe dentro da área de influência 69
Fig.34- Comunidade Vai-Quem-Quer. (a) Área de influência da comunidade (1.400ha) e (b) porcentagem ocupada por cada classe dentro da área de influência 69
Fig.35- Comunidade Morada Nova. (a) Fotografia aérea (10/10/2007), (b) Área de influência da comunidade (1.400ha) e (c) porcentagem ocupada por cada classe dentro da área de influência. 69
Fig.36- Comunidade de Arati. (a) Fotografia aérea (10/10/2007), (b) Área de influência da comunidade (1.400ha) e (c) porcentagem ocupada por cada classe dentro da área de influência 70
Fig.37- Comunidade Forte das Graças I e II. (a) Fotografia aérea (10/10/2007), (b) Área de influência da comunidade (1.400ha) e (c) porcentagem ocupada por cada classe dentro da área de influência 70
Fig.38- Comunidade de São Francisco e 8 Voltas. (a) Fotografia aérea (10/10/2007), (b) Área de influência da comunidade (1.400ha) e (c) porcentagem ocupada por cada classe dentro da área de influência 70
Fig.39- Comunidade do Escondido. (a) Fotografia aérea (10/10/2007), (b) Área de influência da comunidade (1.400ha) e (c) porcentagem ocupada por cada classe dentro da área de influência 71
Fig.40- Comunidade do Cumarú. (a) Fotografia aérea (10/10/2007), (b) Área de influência da comunidade (1.400ha) e (c) porcentagem ocupada por cada classe dentro da área de influência 71
Fig.41- Comunidade do Igarapé do Branco. (a) Área de influência da comunidade (1.400ha) e (b) porcentagem ocupada por cada classe dentro da área de influência 71

Fig.42- Distribuição dos transectos ao longo a RESEX. 72
Fig.43- Valores médios por hectare dos parâmetros biométricos por comunidade.. 73
Fig.44- Proposta de localização da Unidade de Manejo Florestal na Comunidade Vai-Quem-Quer. (a) Classificação por árvore de decisão, (b) Mapa de declividade (SRTM) e (c) cruzamento dos dois planos de informações anteriores (a+b)..... 74
Fig.45- Proposta de localização da Unidade de Manejo Florestal na Comunidade Cumarú. (a) Classificação por árvore de decisão, (b) Mapa de declividade (SRTM) e (c) cruzamento dos dois planos de informações anteriores (a+b). 74
Fig.46- Área localizada na zona rural da cidade de Juruá/AM detectada na cena Landsat/TM 01/62 de 04/09/2005..... 75
Fig.47- Recorte da cena 01/62 do Landsat/TM de 25/11/2000 indicando, na elipse em branco, a área afetada por distúbio natural blowdown. Para efeito de comparação, a seta preta indica a pista do aeroporto de Juruá/AM..... 77
Fig.48- As setas brancas indicam uma possível trajetória seguida por estes micro-ventos rotatórios e mostram, no final destas trajetórias, as porções mais distantes do centro de impacto. 77
Fig.49- Seqüência de recortes das cenas Landsat/TM5 na composição RGB543. A seqüência nos mostra a área afetada por distúrbio natural, o provável período do acontecimento e a conseqüente recuperação da floresta. 78
Fig.50- Composição colorida RGB543, Landsat/TM da área onde se detectou uma das “manchas”. Pontos brancos mostram os pontos de GPS coletados. 79
Fig.51- Curvas espectrais da Floresta primária de Terra Firme e Floresta Mancha. 80
Fig.52- Imagens fração solo(a) e sombra(b) mostrando a variação dos níveis de cinza na área de estudo. 81
Fig.53- Proporção das componentes nas 3 frações para a Floresta “Mancha” e Floresta primária..... 81
Fig.54- Características da floresta mancha, em (a) dossel baixo e dominado por apenas uma espécie, em (b) espécie com raízes características de áreas alagáveis e (c) serapilheira..... 82
Fig.55- Vista aérea da Floresta Mancha. Elipse vermelha indicando agrupamentos monoespecíficos de *Discocarpus sp.* 83

SUMÁRIO

1. Introdução 1
2. Objetivos: 5
2.1 Geral: 5
2.2. Específicos: 5
3. Revisão de literatura 6
3.1 A Falta de planejamento, o mau uso do solo na Amazônia e suas alternativas ... 6
3.2 Reservas Extrativistas (RESEX) 8
3.3 Caracterização da vegetação 11
3.4 Tipologias florestais 12
3.4.1 Levantamento preliminar como apoio ao Inventário Florestal 13
3.5 Análise estrutural da Floresta 15
3.5.1 Estimativa dos Parâmetros Dendrométricos 15
3.6 Sensoriamento Remoto como ferramenta para o estudo da vegetação 16
3.6.1 Comportamento espectral da vegetação 16
3.6.2 Influência da resolução espacial na classificação 19
3.7 Pré-processamentos 20
3.7.1 Correção geométrica 20
3.7.2 Correção atmosférica e Calibração Radiométrica 21
3.7.3 Modelo linear de mistura espectral 22
3.8 SRTM e o Modelo Digital de Elevação 23
3.9 Técnicas de classificação de imagens 26
3.10 Classificação por Árvore de Decisão 27
4. Material e Métodos 29
4.1 Descrição e Localização da área de estudo 29
4.1.2 Características fisiográficas 29
4.2 Materiais e equipamentos 31
4.2.1 Equipamentos utilizados no levantamento de campo 31
4.2.2 Produtos em formato digital 31
4.2.3 Aplicativos computacionais: 32
4.3 Metodologia 32
4.3.1 Pré-processamento das imagens digitais Landsat-TM5 32
4.3.1.1 Mosaico de imagens 32
4.3.1.2 Correção atmosférica e Calibração Radiométrica 33
4.3.1.3 Correção geométrica 35
4.3.1.4 Modelo linear de mistura espectral 35
4.3.2 Dados do SRTM e a construção do Modelo Digital de Elevação 37
4.3.3 Classificação por Árvore de Decisão 38
4.3.3.1 Avaliação da classificação 39
4.3.4 Inventário Florestal 40
4.3.4.1 Estimativa dos parâmetros da estrutura diamétrica 40
4.3.5 Identificação de áreas com potencial para instalação de unidades de Manejo Florestal 42
5. Resultados e Discussão 43
5.1 Técnicas de pré-processamento de imagens 43
5.1.1 Correção atmosférica 43
5.1.2 Correção geométrica 44
5.1.3 Modelo Linear de Mistura Espectral 44
5.2 Dados SRTM no delineamento das florestas alagadas 45
5.3 Classificação pela técnica de Árvore de Decisão 49

5.4 Análise pelo índice de Jeffries-Matusita e Transformada de divergência 51
5.5 Análise da classificação por Árvore de Decisão 52
5.6 Avaliação da exatidão do mapeamento resultante da técnica de Árvore de Decisão..... 61
5.7 A cobertura da terra na RESEX do Baixo Juruá..... 62
5.8 A cobertura e o uso do solo nas comunidades da Resex do Baixo - Juruá..... 64
5.8.1 Áreas sob influência das comunidades 68
5.9 Identificação de áreas para manejo florestal sustentável na Resex 72
5.10 Detecção e mapeamento de áreas afetadas por distúrbios naturais..... 75
5.11 Detecção de “Manchas” de vegetação e expedição ao campo 79
6. Conclusão..... 84
7. Referências Bibliográficas 85

1. Introdução

Um dos principais desafios da atualidade e para o futuro do Brasil consiste em promover o desenvolvimento regional e a diversificação da matriz produtiva de forma a gerar emprego e renda locais e incorporar modelos de uso sustentável dos recursos naturais.

Na busca de alternativas ao cenário de desmatamento e empobrecimento que ocorre atualmente nas florestas tropicais do mundo, vários trabalhos vêm procurando demonstrar o potencial produtivo dos ecossistemas florestais, buscando comprovar a superioridade ecológica e econômica destes recursos, quando comparado aos sistemas agrícolas ou pecuários (Balick, 1985; Panayotou & Ashton, 1992).

Alguns problemas específicos, como o mau uso do solo e a falta de conhecimentos sobre a biodiversidade e distribuição da vegetação, contribuem com a degradação do ambiente. Neste sentido, a caracterização e o mapeamento da vegetação são ferramentas indispensáveis para orientar o planejamento do uso do solo.

O planejamento de áreas silvestres pode ser considerado como o estudo das alternativas de manejo aplicáveis a uma determinada área. Esse tipo de planejamento difere daquele relacionado ao simples ordenamento do uso da terra para fins econômicos, entre outros, pelo fato dos seus objetivos estarem associados a bens e serviços que tradicionalmente não têm sido levados em conta como objetos de manejo e desenvolvimento e as fontes de informações sobre suas produtividades econômicas e biológicas serem geralmente escassas e subjetivas (Thelen & Dalfelt, 1979).

A Floresta Amazônica é caracterizada pela diversidade de tipologias da vegetação, (Braga, 1979) estimou a área florestal original da bacia amazônica em aproximadamente 3.648.000 $km^{2,}$ sendo que as florestas densas de terra-firme são predominantes e ocupam aproximadamente 3,3 milhões de km^2.

O universo dessa população florestal natural, para cumprir com suas finalidades recreativas, sociais, econômicas e de proteção ao meio ambiente, necessita que suas características sejam conhecidas. Normalmente, o Inventário Florestal é o primeiro passo para lançar a base de pesquisas referentes a recursos naturais e também para tomada de qualquer decisão relacionada ao uso da terra. Atualmente, com a crescente valorização da terra e de sua cobertura vegetal, mais se tornam necessários os Inventários Florestais, os quais permitem descrever a quantidade e a qualidade das espécies florestais ocorrentes e muitas das características do terreno (Higuchi *et al,* 1982).

Aliadas aos Inventários Florestais estão as imagens de satélite, que têm sido utilizadas para avaliar o estágio de crescimento e identificar a composição arbórea de florestas diversas. Várias técnicas de processamento de imagens são utilizadas para a

extração de informações sobre tipos e parâmetros de vegetação, dentre as quais se destacam os índices de vegetação, a classificação de imagens e a decomposição de dados espectrais, como a análise de misturas espectrais. Também, os índices de vegetação obtidos pelo sensoriamento remoto podem ser usados como indicadores biofísicos (Gamon *et al*., 1995). Em florestas tropicais, os índices de vegetação foram associados à diversidade de espécies de árvores e à biomassa florestal (Amaral *et al*., 1997; Sousa & Ponzoni, 1998; Boyd *et al*., 1999; Foody *et al*., 2001; Foody *et al*., 2003).

O desconhecimento das potencialidades naturais de uma região leva à utilização de técnicas inapropriadas de uso do solo, tendo como fim a formação de pastagens e formas de uso do solo altamente degradantes e improdutivas.

Os primeiros naturalistas que viajaram pela Amazônia consideravam que os solos da região eram muito férteis e com grandes aptidões agrícolas, associando a exuberância da floresta com a fertilidade do solo. Mais recentemente, durante o milagre econômico brasileiro, os tomadores de decisões também caíram nessa mesma armadilha e tentaram implantar na Amazônia o “celeiro do mundo”. No entanto, após a derrubada e queima da floresta os cultivos agrícolas não se sustentam por muito tempo. Em outras palavras, após dois ou três anos o solo perde a sua capacidade de manter as culturas e se degrada, levando os agricultores a abandonarem a área e procurarem outras áreas de floresta para derrubar.

A expansão das fronteiras agrícolas para o Norte do Brasil nos anos 70 e 80 caracterizou-se por um ineficaz modelo de ocupação da Amazônia. Os projetos de assentamento mostraram-se inadequados do ponto de vista social e ambiental; a transformação de seringais em áreas de pastagens e plantio foi nociva ao ecossistema e trouxe questionável êxito econômico. Em nome do desenvolvimento regional e da produção de alimentos, já foram desmatados mais de 60 milhões de hectares de florestas primárias e a região continua não sendo auto-suficiente em alimentos e em outros artigos de primeira necessidade; ou seja, a Amazônia não ficou mais rica com a destruição de suas florestas.

Vários autores são críticos a este modo de ocupação e atribuem o fracasso deste modelo, entre outros fatores, à adoção de sistemas econômicos não apropriados às condições ecológicas da região tropical devido à baixa fertilidade natural dos solos e clima predominantemente florestal (Fearnside, 1986; Móran & Herrera, 1984, Toledo, 1991). Este tipo de modelo de ocupação predatória está relacionado com a carência de propostas de manejo florestal sustentado devido à falta de informações ecológicas deste ecossistema como um todo, de modo a prever impactos ecológicos no sistema quando submetidos a algum tipo de manejo (Peters, 1996a).

A isso se acrescenta o processo de fragmentação das florestas, com conseqüências sobre a diminuição do tamanho e o isolamento de populações de plantas e animais. De

maneira geral, as florestas passam por um processo gradativo de perda de diversidade biológica e diminuição de suas funções ecológicas (Viana & Tabanez, 1996). Dessa forma, os remanescentes de florestas primárias na Amazônia estão destinados a experimentar um processo de fragmentação e empobrecimento biológico. Isso aumenta a importância das áreas protegidas em Unidades de Conservação e reservas indígenas, que devem ser protegidas e manejadas de maneira apropriada.

Reagindo a essa tendência de ocupação, a mobilização das comunidades extrativistas na segunda metade da década de 80 foi decisiva para a consolidação da proposta do modelo de Reservas Extrativistas como um sistema de utilização da terra que possui o potencial de conciliar a proteção de florestas com as necessidades e direitos dos habitantes tradicionais das florestas tropicais, a fim de melhorar seu padrão de vida. O processo de implantação de RESEX é resultado de um longo histórico de disputas sociais pela propriedade de terras da Amazônia brasileira (Allegretti, 1990). Criadas a partir da década de 90, tais reservas tornaram-se também uma alternativa para o modo de assentamento na Amazônia uma vez que as áreas de propriedade da União são geridas coletivamente pelas comunidades residentes.

As Reservas Extrativistas tem sido uma vitrina para o movimento mundial que busca a devolução do controle de áreas de florestas tropicais pelas comunidades tradicionais. A justificativa deste movimento é que a devolução de terras de florestas tropicais aumentaria as chances de promoção do desenvolvimento sustentável.

Uma questão chave que se segue à implantação de reservas extrativistas tradicionais é o desafio de aumentar a produtividade e obter a sustentabilidade dos sistemas de produção e do manejo dos recursos naturais. A produtividade dos sistemas extrativistas tradicionais é geralmente reduzida e não se prevê um abastecimento para assegurar a produção. As críticas ao conceito de RESEX apontaram este problema e sugeriram que não há forma de escapar desta “armadilha” e que as RESEX estão fadadas ao fracasso (Homma, 1989). Contudo, a produtividade destas reservas é baixa basicamente porque pesquisas no sentido de desenvolver tecnologias que possam melhorar a produtividade através de manejo de recursos naturais pelas comunidades tradicionais da floresta não têm sido realizadas. Além disso, a estrutura comercial dispersa e a falta de garantia da posse da terra não têm incentivado os extrativistas para que estes administrem seus recursos de forma contínua.

A aliança entre as técnicas do sensoriamento remoto e os indicadores biofísicos pode ser valiosa para estudos de diagnose e monitoramento. Corlett (1995) sugere o uso do sensoriamento remoto como uma ferramenta que preencha o abismo entre os estudos local-intensivos e aqueles global-amplos, respondendo às necessidades dos tomadores de decisão e gestores.

O presente trabalho pretendeu caracterizar e mapear a vegetação e o uso do solo da Reserva Extrativista do Baixo – Juruá/AM utilizando técnicas de sensoriamento remoto, inventário florestal e dados de coleta de campo, discriminando as diferentes paisagens da área de estudo, quantificando o seu potencial madeireiro e contribuindo, assim, para o planejamento e o manejo sustentável dos recursos naturais da área.

2. Objetivos:

2.1 Geral:

Caracterização e mapeamento da vegetação e do uso do solo da Reserva Extrativista do Baixo Juruá, Amazonas.

2.2. Específicos:

Classificar e caracterizar os tipos de vegetação e cobertura da terra da RESEX;

Caracterizar e quantificar o uso do solo na Reserva;

Eleger áreas prioritárias para a instalação de unidades de manejo florestal na RESEX.

3. Revisão de literatura

3.1 A Falta de planejamento, o mau uso do solo na Amazônia e suas alternativas

O desenvolvimento da região amazônica foi marcado por três grandes fases, a saber: a exploração das drogas do sertão; o extrativismo vegetal da borracha e da castanha-do-Brasil e as frentes agropecuário-minerais combinadas com a exploração da madeira. Esse desenvolvimento econômico ocorreu de forma desordenada, sem a preocupação com os danos econômicos, sociais e ambientais (Fadell, 1997).

Em 1966, o governo brasileiro buscou uma alternativa com o objetivo de dar um novo impulso ao crescimento da região amazônica, que se encontrava abalada com a decadência da economia extrativa, surgindo a chamada Operação Amazônica. Este projeto de desenvolvimento para a Amazônia alcançou, em princípio, os objetivos econômicos esperados e obteve-se um crescimento muito rápido nessas últimas décadas. Porém, o custo social e ecológico foi imenso e preocupante.

Estudos de benefícios e custos de qualquer atividade envolvendo o aproveitamento dos recursos naturais são imprescindíveis para tomadas de decisão. Em nome do desenvolvimento regional e da produção de alimentos, principalmente, já foram desmatadas (até 2003) mais de 60 milhões de hectares de florestas primárias e a região continua não sendo auto-suficiente em alimentos e em outros artigos de primeira necessidade e nem a quantidade de gases de efeito estufa emitida para a atmosfera pelo uso do solo amazônico justifica a contribuição regional ao PIB nacional.

Os principais usos do solo amazônico são: agropecuária, exploração seletiva de madeira, mineração, produção de energia (hidrelétrica, petróleo e gás natural) e extrativismo.

O desmatamento e a conseqüente fragmentação florestal impactam as interações das árvores com animais (polinizadores, herbívoros, parasitas e dispersores ou predadores). Essas relações são obrigatórias para o sucesso na reprodução e recrutamento de novos indivíduos para a população. As árvores tropicais são clássicos exemplos de indivíduos que se tornam ecologicamente extintos bem antes do desaparecimento do último indivíduo (Bierregard *et al*, 1992). Isso também quer dizer que as ações antrópicas tendem a contribuir para a diminuição da biodiversidade.

O equilíbrio hoje existente depende da atual cobertura vegetal; portanto, como alerta Salati (1985), a transformação de grandes áreas de floresta por outros tipos de cobertura (pastagem, agricultura anual) podem causar modificações climáticas, porque introduzem alterações no balanço hídrico da região.

Segundo Schubart *et al*. (1984), o sistema Solimões-Amazonas é responsável por 15 a 20% de toda a água doce que é lançada nos oceanos. A floresta amazônica também funciona como um regulador dos ciclos hidrológicos da região, minimizando os perigos de erosão e enchentes. É, também, importante na formação de chuvas, pois mais da metade do vapor de água que se condensa e se precipita sob a forma de chuva provém da evapotranspiração da floresta, ou seja, da evaporação da água da chuva interceptada pelas folhas das árvores e da transpiração das árvores e outras plantas submetidas à intensa insolação. Uma quantidade considerável de água mantém-se na região por meio de um mecanismo de reciclagem no qual a floresta desempenha um papel muito importante.

Apesar da significante contribuição dos serviços ambientais da floresta, eles são frequentemente sub-avaliados, principalmente porque não têm preço no mercado tradicional e porque os seus efeitos totais de degradação não são percebidos antes que os benefícios de curto prazo cessem.

Infelizmente, essas riquezas só são percebidas quando são perdidas ou quando se fala dos custos de recuperação de áreas degradadas, de despoluição de rios e igarapés, etc. Geralmente, a população local nem chega a perceber os benefícios efêmeros de alguns projetos de desenvolvimento. No caso do Ouro de Serra Pelada, por exemplo, o que ficou para a população foram provavelmente mais doenças, ruptura das tradições locais, degradação ambiental, etc. Em geral, os grandes projetos de desenvolvimento instalados na Amazônia têm provocado efeitos devastadores nas populações localizadas nas áreas de implantação e de influência dos mesmos.

Ao contrário disso, as florestas podem ser vistas como uma capital natural fornecendo uma rede perpétua de benefícios e serviços, que suporta, fortalece e protege o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida (Panayotou & Asthon, 1992). Isto significa admitir que a floresta contém algo mais do que árvores e o seu potencial representa algo mais do que madeira. Dentro de uma floresta há inúmeros organismos vivos (homens inclusive) que se interagem, que interagem com o ambiente natural e que precisam ser cuidadosamente considerados antes de qualquer intervenção.

A proposta de Desenvolvimento Sustentável, cuja base já estava expressa no Relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento “Nosso futuro comum” de 1987, firmou-se como um novo paradigma de desenvolvimento (Hogan & Vieira, 1992). Respeitando a diversidade cultural e ecológica, busca harmonizar o desenvolvimento econômico com a proteção ambiental, garantindo o atendimento das necessidades do presente sem comprometer as possibilidades das gerações futuras em atender as suas necessidades. Tal premissa rompe com o antagonismo entre preservação e desenvolvimento; a) critica o desenvolvimento insustentável voraz, consumidor de recursos

(D`Olne Campos, 1994) e, b) abala o conceito e as práticas de preservação ambiental fundamentadas no afastamento humano.

A possibilidade de existência de comunidades em unidades de conservação transformou-se em questão corrente do debate ambientalista, ocasionando mudanças nos modelos preservacionistas. Não é possível pensar em uma natureza “selvagem e intocável”, como argumenta Diegues (1996); nem é desejável estabelecer planos de manejo ambiental que ignorem as pessoas e modos de vida tradicionais, cujos conhecimentos acumulados sobre os recursos que manejam podem trazer influências positivas sobre o meio. Daí a importância de iniciativas onde se combine preservação da biodiversidade com modelos de desenvolvimento alternativos, como é o caso das Reservas Extrativistas que a legislação federal considera como unidades de conservação de uso direto, onde se permite o aproveitamento sustentável dos recursos.

Diversas formas de utilização da floresta amazônica já foram propostas. O manejo florestal ao lado dos sistemas agroflorestais e o reflorestamento de pastagens degradadas são considerados importantes formas de utilização e conservação do ecossistema florestal. Ainda há quem o diga que: “o manejo florestal sustentado é o único capaz de levar a uma produção que não resulte na desordem termodinâmica do ecossistema amazônico”.

3.2 Reservas Extrativistas (RESEX)

Ainda que a idéia de área natural protegida no mundo ocidental tenha suas origens na Europa medieval, naquele caso especialmente com o objetivo de proteger a fauna silvestre para exercício de caça pela realeza e aristocracia rural, a concepção do conceito de uma forma mais próxima ao uso atual teve a sua origem com a criação do Yellowstone National Park, em 1872 nos Estados Unidos (Milano, 1994).

Com o passar do tempo e a adequação do conceito básico à diferentes realidades regionais ou locais, bem como os avanços dos conhecimentos científicos, ou ainda em resposta a anseios e demandas variadas da sociedade passaram a serem adotadas várias formulações distintas de áreas protegidas; algumas, inclusive, com objetivos culturais e outras com finalidades sociais. Estabeleceram-se, então, o que se convencionou chamar de categorias de manejo, ou seja, tipos distintos de áreas protegidas, cada uma destinada a atingir um elenco ou conjunto próprio de objetivos (Milano, 1994).

De acordo com o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), Lei n°9.985 de 18 de julho de 2000, as Reservas Extrativistas pertencem ao grupo das Unidades de Conservação de Uso Sustentável e foram implantadas como sistemas de utilização da terra que possuem o potencial de conciliar a proteção de florestas com as necessidades e direitos dos habitantes tradicionais das florestas tropicais, a fim de melhorar seu padrão de vida.

O conceito de Reserva Extrativista (RESEX) surgiu entre os anos 1985 e 1988, a partir dos habitantes da Amazônia, através do Conselho Nacional de Seringueiros, que o propôs como um sistema inovador de direito de propriedade e uso da terra como alternativa de conservação e desenvolvimento sustentável (Allegretti, 1990). Esta proposta foi o resultado de um movimento social de moradores florestais organizados, combinando um regime de manejo e de direitos de propriedade na Amazônia brasileira (Silberling, 1991).

De acordo com o Relatório Brundtland – ("Nosso Futuro Comum"), a Reserva Extrativista enquanto proposta deve ser entendida como: "a regularização de áreas ocupadas por grupos sociais que têm como fonte de sobrevivência produtos nativos da floresta e que realizam exploração econômica sustentável, (...) as reservas extrativistas atendem a fins de conservação ambiental, de regularização fundiária e de desenvolvimento econômico. Devem, portanto, se constituir de um modo socialmente justo, ecologicamente sustentável e economicamente viável de ocupar a Amazônia." (Carta de Curitiba, IEA, 1988)".

O território das RESEX constitui propriedade da União (sob jurisdição do IBAMA), através de um regime de concessão de uso da terra associado a regras de conservação e a mecanismos que asseguram o cumprimento de regras (Almeida, 1994). Em suma, a idéia de RESEX consiste na combinação de um regime de propriedade assentado na atribuição de direitos de uso às coletividades tradicionais, com um regime de gestão baseado na regulamentação dos direitos de uso através de planos de manejo e regulamentos de uso (Almeida, 1994).

De acordo com o Conselho Nacional dos Seringueiros (CNS, 1992 apud Cavalcante 1993, p.25) há uma relação entre as propostas de desenvolvimento sustentado e as RESEX, pois elas "... constituem uma primeira forma institucionalizada, legalizada pelo Estado, de implantação de um novo modelo de desenvolvimento sustentável." Descreve, ainda, que a capacidade de diversificar a produção, assim como a diminuição da dependência do mercado em conseqüência da necessidade de consumo pelas populações extrativistas, por meio da produção nas próprias RESEX de maior número possível de gêneros alimentícios, materiais para construção, etc., constitui um dos pontos principais relacionados ao aspecto econômico da viabilidade das mesmas.

Contudo, a viabilidade das RESEX não está demonstrada. Muitas críticas, ecológicas, econômicas e sociais são feitas (Almeida, 1992, 1994). Argumenta-se, do ponto de vista econômico, que as economias extrativistas são inerentemente ineficientes (Homma, 1989), pois esse tipo de economia, numa perspectiva histórica, está associado à instabilidade e forte concorrência por outros meios de produção como expansão de plantações e desenvolvimento de produtos sintéticos, devido ao uso de tecnologias atrasadas por parte de uma população especializada num único produto. Além disso,

devido à dispersão desses recursos e da população que os extrai, estas estariam sujeitas a relações de comercialização exploratórias (aviamento) em que, devido à existência de uma longa cadeia de intermediários, os termos de troca são desfavoráveis (Anderson, 1990).

Os críticos do atraso técnico do extrativismo frequentemente acreditam que os moradores da floresta são especialistas na extração de um único produto. Pelo contrário, os chamados “extrativistas” podem exibir uma notável variedade de atividades, inclusive a extração comercial com práticas de manejo refinadas, mas também práticas de caça, pesca, agricultura, coleta e artesanato (Almeida, 1992). Esse sistema utiliza ao máximo a heterogeneidade ecológica dos ecossistemas de terra firme e de várzea por meio de um zoneamento horizontal das atividades e um refinado conhecimento etnoecológico (Almeida, 1992).

As críticas contra a viabilidade econômica do extrativismo não levam em conta o desempenho econômico de outros usos da terra na Amazônia e se esquecem das recentes mudanças sociais que podem melhorar a eficiência das economias baseadas em produtos florestais não-madeireiros. No caso da pecuária extensiva, os retornos são baixos ou negativos por hectare e só se sustentam através de subsídios. Os projetos de assentamento agrícola também resultam em retornos baixos e são altos os índices de desistência. Além disso, uma análise meramente econômica dos investimentos e retornos econômicos não leva em conta os custos sociais e ambientais de usos não-sustentáveis da terra (Anderson, 1990).

Para Fadell (1997), o desenvolvimento sustentável nas RESEX não se dá apenas pela regularização fundiária; não basta demarcar as áreas de preservação e distribuir as famílias nas colocações. Essa população depende dos recursos naturais e vem de um extrativismo tradicional, que, para tornar a reserva sustentável, precisam do apoio governamental na questão do escoamento da produção, educação, saúde que são requisitos básicos para a sobrevivência dos mesmos na área. Além de projetos que busquem a melhoria de vida dos mesmos, como proposto pelo modelo de desenvolvimento sustentável, as RESEX não podem e nem devem ser vistas apenas como áreas particulares de desenvolvimento.

As florestas tropicais apresentam uma gama de serviços e matérias primas, os quais, aproveitados de forma equilibrada, podem traduzir-se na melhoria das condições sociais das populações, no fornecimento de um banco genético com interesse para a agricultura, medicina e farmacologia.

As RESEX têm sido uma vitrina para o movimento mundial pela devolução do controle de terra de áreas de florestas tropicais para as comunidades tradicionais. A justificativa deste movimento é que a devolução de terras de florestas tropicais aumentaria as chances de promoção do desenvolvimento sustentável. Os vários posicionamentos com

relação às RESEX como uma atividade econômica sustentável mostram que todos, de uma forma ou de outra, se preocupam não apenas com o meio ambiente, mas, principalmente com o homem, que, por sua vez, precisa utilizar os recursos naturais.

3.3 Caracterização da vegetação

Conhecer e compreender o sistema amazônico faz parte de um processo de aprendizagem para o bom gerenciamento e uso dos recursos naturais.

As grandes formações vegetais na Amazônia podem ser agrupadas em savanas, florestas de terra-firme e florestas inundáveis, cada uma com suas respectivas subdivisões (Pires & Prance, 1985). Contudo, os limites até então definidos para distinguir as transições entre várias formações vegetais são relativamente subjetivos e arbitrários, sendo que as classificações baseadas nestes limites são utilizadas mais por conveniência do que pela existência rigorosa de comportamentos bem definidos. Ademais, estas classificações evoluíram de análises descritivas da vegetação, normalmente baseadas em conhecimentos botânico sobre ocorrência de poucas espécies marcantes, e também na descrição de aspectos estruturais, fisiográficos e climáticos. Este esquema classificatório foi, até o momento, muito pouco influenciado pela mensuração física direta das características fisionômicas das comunidades vegetais (Hill & Foody, 1994).

Uma das razões para a ausência de um método objetivo para classificar e mapear formações de vegetação na Amazônia é a própria complexidade encontrada nas associações de espécies. Citando uma dezena de levantamentos e estudos da vegetação conduzidos na Amazônia nos últimos vinte e cinco anos, Tuomisto *et al* (1994) concluem que mesmo os tipos de vegetação mais dissimilares estão ligados entre si por tipos intermediários de vegetação, nenhum dos quais podem ser representativos para toda a Amazônia. Como, nestas florestas, os agrupamentos de árvores de uma mesma espécie são bastante raros, pode-se afirmar que cada copa no dossel é diferente de qualquer uma de suas circundantes. Esse fato gera uma composição extremamente heterogênea, variável e aleatória do dossel, dificultando a definição e caracterização de tipologias em várias escalas de abordagem e, consequentemente, também dificultando a identificação de suas diferenciações em termos de agrupamentos.

Os fatores climáticos e edáficos que limitam o estabelecimento e a distribuição de árvores nas condições extremas não são distribuídos aleatoriamente. O efeito destes fatores sobre a distribuição de algumas fisionomias é marcante e identificável (Paradella *et al*. 1994, Tuomisto *et al*. 1994, 1995), sendo que as limitações abióticas estão mais associadas a fatores edáficos como a variação na distribuição de solos, topografia e regimes hídricos (Nobre, 1989). Portanto, mapear a vegetação significa abstrair as informações com base nos critérios considerados mais pertinentes (Küchler, 1973).

3.4 Tipologias florestais

Segundo (Duck & Black, 1954), a delimitação da flora hileiana pode ser feita pelos limites de ocorrência de certas taxas florestais, como os gêneros *Hevea* e *Theobroma* e a castanha do Pará (*Bertholletia excelsa*). A mais notável espécie madeireira da Amazônia, o mogno (*Swietenia macrophylla*), ocorre margeando a hiléia.

Essa região possui a maior extensão de floresta tropical do mundo, reconhecida na literatura científica como um conjunto vegetal de características bem definidas, que se estende dos Andes até o Oceano Atlântico como um verdadeiro mosaico de ecossistemas. Tem sido dividida em várias províncias, com base em diferenças da flora arbórea e outros critérios biogeográficos e deve a sua existência, principalmente, ao ecossistema amazônico caracterizado pela presença da extensa bacia hidrográfica do Rio Amazonas (Uribe, 1993).

As inúmeras fisionomias da floresta amazônica devem-se aos diversos tipos de substratos sob as mesmas, bem como as variações no regime de chuvas. Assim têm-se as florestas de terra-firme, as florestas de igapó e as florestas de várzea, cada uma dessas com certas espécies de árvores próprias. Cerca de 85% da região amazônica compreende áreas de terra-firme, ou seja, áreas não sujeitas a inundações. Cerca de 13% é ocupado pelos rios. As várzeas compreendem apenas 2% da região (O'Brien & O'Brien, 1995).

Segundo Rizzini (1997), a floresta de terra-firme é a floresta pluvial de grande porte localizada em planaltos pouco elevados (60-200 m), planos, ondulados ou recortados por cursos de água, não sujeitos a inundações, cujo substrato é areia mais ou menos argilosa, amarelada ou avermelhada, podendo, em vários pontos, ser argiloso (diabásico) e fértil.

Há uma evidente correlação entre tipos florestais e bacias hidrográficas, levando a indicação que a divisão florística da hiléia amazônica é associada aos rios, solos e topografia.

A classificação prática que é usada regionalmente é baseada primariamente no relevo, sendo conhecidos dois principais tipos de floresta: Terra-firme e Florestas inundáveis (várzea e igapó). De acordo com a classificação de Holdridge e as observações climatológicas do IBGE, duas formas de vida podem ser encontradas na Amazônia: floresta tropical úmida com biotemperatura média anual superior a 24°C e precipitação média anual entre 2000 e 4000 mm, e floresta tropical semi-úmida com biotemperatura média anual superior a 24°C e precipitação entre 1000 e 2000 mm.

Contudo, os limites até então definidos para distinguir as transições entre as várias formações vegetais são subjetivos e arbitrários; ademais, essas classificações evoluíram de análises descritivas da vegetação, baseadas em conhecimento botânico sobre a ocorrência de poucas espécies marcantes e também na descrição de aspectos estruturais, fisiográficos e climáticos (Nobre *et al*., 1998).

3.4.1 Levantamento preliminar como apoio ao Inventário Florestal

A definição de estratégias efetivas de conservação e uso sustentável da biodiversidade pressupõe uma avaliação abrangente do *status* dos ecossistemas, em nível da paisagem. Esse tipo de avaliação implica na disponibilidade de informações ecológicas básicas, tais como levantamentos sobre a distribuição da flora e da fauna de uma determinada unidade geográfica, que produzam informações confiáveis e de modo eficiente sobre hábitats, ecossistemas ou espécies ameaçadas, em escala local e regional.

Levantamentos preliminares de cobertura/uso da terra são fundamentais para a realização de inventários sobre flora e fauna de regiões desconhecidas e podem ser obtidos a partir da interpretação de imagens aéreas e/ou orbitais e ainda pela integração de cartas e dados sobre o ambiente físico utilizando técnicas de geoprocessamento e sistemas de informações geográficas.

Segundo Husch *et al*. (1971) e Loetsch *et al*. (1973), o método de amostragem para encontrar os objetivos do Inventário Florestal é determinado pelo tipo de unidade de amostragem, seu tamanho e forma, o número a ser empregado e a distribuição sobre a área florestal, seguidos pelos procedimentos para medições e análise dos dados resultantes. A maximização da relação entre esforço/tempo e custo de amostragem, bem como a confiabilidade dos resultados são os principais pré-requisitos para avaliação da biodiversidade. O compromisso com tais pré-requisitos para avaliação de ecossistemas florestais varia de acordo com os objetivos do trabalho e o tipo de ambiente (Sobrevilla & Bath, 1992). A possibilidade de integração de dados preliminares e de informações sobre o ambiente físico por meio de geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), é produto indispensável e pré-requisito para o planejamento de avaliações mais aprofundadas de ecossistemas florestais.

Como um primeiro produto deste projeto, foi elaborado um mapa fitogeográfico com apoio da classificação feita pelo projeto RADAMBRASIL para visualizar as diferentes tipologias da Reserva Extrativista do Baixo Juruá e dar base para a alocação das unidades amostrais, maximizando o esforço de amostragem (Figura 1).

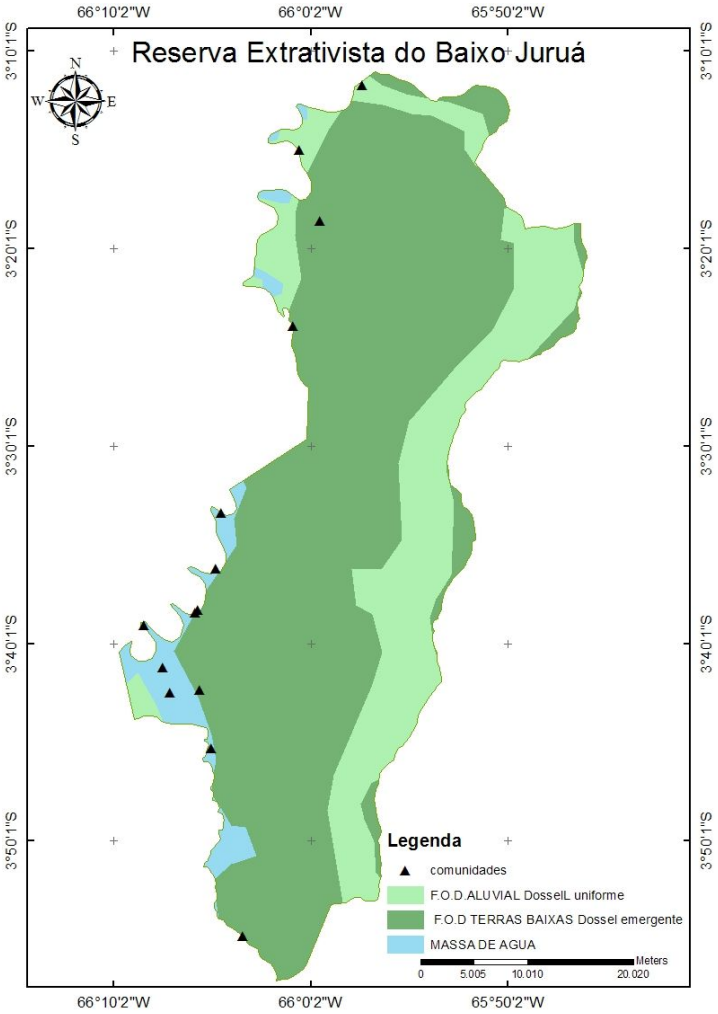

Fig.1- Mapa de vegetação com a classificação feita pelo Projeto RADAMBRASIL.

Para cumprir com suas finalidades recreativas, sociais, econômicas e de proteção ao meio ambiente, o universo da população florestal natural necessita que suas características sejam conhecidas (IBGE). Normalmente, o Inventário Florestal é o primeiro passo para lançar a base de pesquisas referentes a recursos naturais e também para tomada de qualquer decisão relacionada ao uso da terra (Higuchi *et al.*, 1982).

Naturalmente, o objetivo de qualquer inventário Florestal é obter o máximo de informações de uma floresta com a máxima de precisão e um mínimo custo. Freese (1967) sugere ainda que o objetivo do planejador de um levantamento florestal deveria ser de tomar observações suficientes para obter a precisão desejada, nem mais e nem menos, e ainda, o número de observações necessárias depende da precisão desejada e da variabilidade inerente da população que está sendo amostrada.

3.5 Análise estrutural da Floresta

A vegetação pode ser avaliada tanto pela sua fisionomia, quanto pela estrutura que apresenta. A fisionomia refere-se à aparência da vegetação: altura, cor, exuberância, e ao tamanho e forma de suas folhas. A estrutura de uma comunidade requer o conhecimento de suas espécies, já que se baseia no grau de ocorrência mútua de uma espécie com a outra. (O'Brien & O'Brien, 1995). A análise da estrutura da floresta irá contemplar uma abordagem criteriosa de parâmetros dendrométricos.

3.5.1 Estimativa dos Parâmetros Dendrométricos

A estrutura diamétrica ou distribuição diamétrica refere-se à distribuição do número total de árvores ou densidade total *(DT*) do povoamento florestal por hectare (*N/ha.*) e por classe de diâmetro a altura do peito (*DAP*). A estrutura diamétrica da espécie é a distribuição do número de árvores por hectare ou densidade absoluta (*DA*í) da i-ésima espécie por classe de *dap*. Para analisar a distribuição diamétrica, as árvores com *dap* igual ou maior que o nível de inclusão são agrupadas em classes de *dap*, com uma determinada amplitude. Em geral, adota-se amplitude de 5,0 cm se referirem a uma floresta secundária em estágio inicial ou médio de regeneração e amplitude de 10,0 cm, se referirem-se a uma floresta em estágio secundário avançado de regeneração ou em estágio primário (clímax). As distribuições diamétricas do povoamento também podem ser estimadas por grupo de espécies.

Os estudos relacionados com a estrutura diamétrica de floresta multiâneas ou inequiâneas datam de 1898, na França, quando De Liocourt conceituou a distribuição do número de árvores por hectare (n/há), por classe de diâmetro (Meyer *et al.,* 1961). De Liocourt mostrou que a razão entre n/há em classes diamétricas sucessivas segue uma série geométrica decrescente. Esta razão foi denominada de Lei de De Liocourt.

Mais tarde, em 1933, Meyer criou o termo floresta multiânea balanceada. Floresta balanceada é aquela onde o número de árvores em classes diamétricas sucessivas decresce numa progressão geométrica constante, isto é, a razão *q* ou Quociente de De Liocourt é constante. Como exemplo de floresta balanceada, pode-se citar as florestas virgens e as bem manejadas, em que o número de árvores por hectare e por classe de diâmetro segue uma distribuição da forma de um *J-invertido.*

Outro parâmetro que pode ser levado em consideração refere-se à distribuição da área basal total da floresta, por hectare (m^2/ha) e por classe de diâmetro. Tal como o número de árvore, também pode ser estimada a área basal por hectare, por espécie, por classe de *dap* e por grupo de espécie. Da mesma forma que o número de árvores e a área basal, o volume também pode ser estimado por hectare, por espécie, por classe de *dap* e por grupo de espécie. A distribuição volumétrica da floresta refere-se à distribuição dos

volumes total e do fuste, com e sem casca e volume da copa de um povoamento florestal, por hectare (m^3/ha).

3.6 Sensoriamento Remoto como ferramenta para o estudo da vegetação

Aliadas aos inventários florestais e considerando o aumento da complexidade dos trabalhos de localização, mapeamento, caracterização e monitoramento da superfície terrestre, estão as imagens de satélites. Essas imagens são as principais responsáveis pelos avanços das formas de interpretação e manipulação das informações da superfície da terra e contribuem para garantir a soberania sobre os limites territoriais, o conhecimento, a utilização e a preservação de recursos naturais.

Os avanços das últimas décadas, nas áreas do sensoriamento remoto e do geoprocessamento, lançaram no mercado uma enorme variedade de meios e aplicativos para a execução destas tarefas. A correta integração dos produtos das diversas plataformas orbitais disponíveis e dos aplicativos existentes é fator diretamente relacionado à qualidade dos resultados obtidos.

O surgimento das imagens de satélite possibilitou, além da criação de um nível de percepção mais global, complementar as fotografias aéreas e os levantamentos de campo, com a obtenção de informações radiométricas digitais de grandes extensões da superfície terrestre. As interpretações dos produtos de sensores remotos, realizadas principalmente de forma analógica, onde a experiência e o conhecimento do autor são fatores determinantes sobre a qualidade do resultado final, passaram a apresentar a possibilidade da execução de tratamentos digitais, menos pessoais, subjetivos e mais padronizados.

3.6.1 Comportamento espectral da vegetação

Grande parte das aplicações do sensoriamento remoto em vegetação depende do conhecimento das propriedades espectrais, de folhas individuais e do dossel, a partir de dados radiométricos (Campbell, 1996). Essas propriedades espectrais podem ser melhor compreendidas analisando-se o comportamento espectral das folhas. Slater (1980) define o comportamento espectral de um objeto como um conjunto de medidas de radiância de um objeto, efetuadas sob condições conhecidas ou controladas, onde cada medida corresponde ao valor médio em diferentes intervalos de comprimento de onda eletromagnética.

O espectro da reflectância de folhas verdes sadias é tipicamente caracterizado por baixos valores no comprimento de onda na região do visível (0,40 - 0,70 μm), conforme pode ser observado na figura 2. Isto demonstra que grande parte da energia radiante nesta faixa espectral é absorvida pela folha e deve-se principalmente à presença de pigmentos fotossintéticos foliares, tais como a clorofila (a e b), carotenóides e xantofilas (Thomas e Gausman, 1977). Um pico na reflectância do visível é geralmente observado na faixa

espectral do verde (0,5 a 0,60 μm), enquanto que valores mais baixos ocorrem nas faixas do azul (0,4 a 0,5 μm) e do vermelho (0,6 a 0,7 μm), devido à alta absorção da radiação eletromagnética pelas clorofilas, para realização das atividades fotossintéticas nessas regiões.

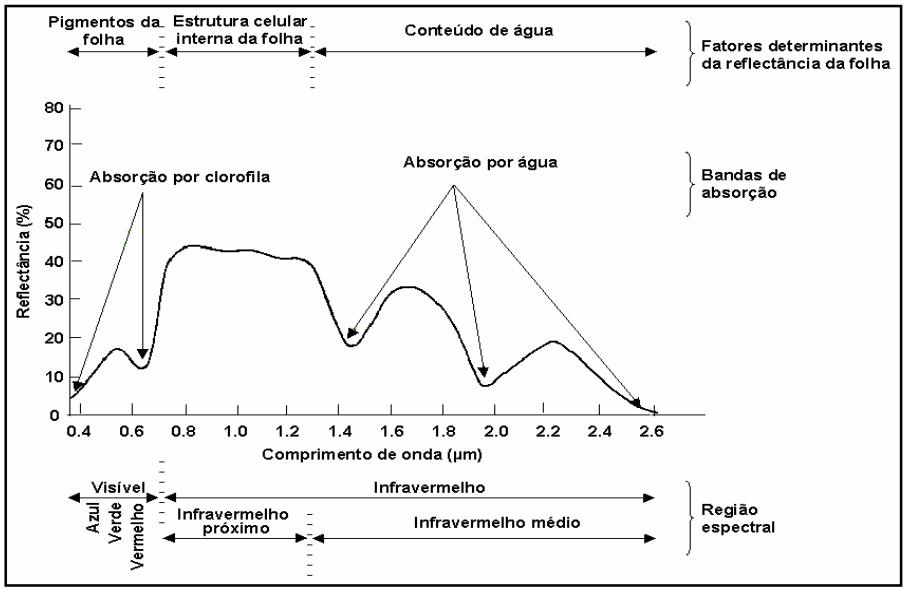

Fig.2- Curva espectral representando a reflectância típica de uma folha verde e sadia. FONTE: adaptada de Hoffer (1978, p.232).

Na região espectral do infravermelho próximo (0,7 μm a 1,3 μm), a folha absorve pouca radiação, apresentando valores altos de reflectância. A região do infravermelho próximo é caracterizada pela alta reflectância e pela baixa absorção causadas pela ausência de substâncias que absorvem a radiação neste comprimento de onda e também decorrentes do espalhamento interno causado pela estrutura interna da folha, ou seja, pelo arranjo do mesófilo (Gates *et al*., 1965).

Nesta faixa espectral, a reflectância da folha é controlada não pelo pigmento da planta, mas pela estrutura do tecido mesófilo esponjoso. A cutícula e a epiderme são quase completamente transparentes à radiação infravermelha; assim, muito pouca radiação infravermelha é refletida da parte externa da folha. A radiação que passa através da epiderme é fortemente espalhada pelo tecido mesófilo e pelas cavidades internas da folha. Muito pouco dessa energia infravermelha é absorvida internamente, a maioria (até 90%) é refletida ou transmitida (Campbell, 1996). Alguns estudos sugerem que o parênquima paliçádico pode também ser importante na reflectância do infravermelho (Gausman, 1974). Assim, a estrutura interna da folha é responsável pelos valores altos de reflectância na faixa espectral do infravermelho próximo. Este comportamento espectral na região do Infravermelho próximo tem grande utilidade em estudos para discriminação de espécies vegetais que não poderiam ser distinguidas no espectro do visível (Sabins, 1978; Chuvieco, 1996).

A partir da faixa espectral do infravermelho médio (1,3 μm a 2,8 μm), o conteúdo de água presente no tecido foliar é que influenciará as bandas de absorção características da folha. Assim, de acordo com Bohlman et al. (1998), quanto maior o conteúdo de água, menor é a reflectância apresentada pela folha, pois essa faixa espectral está associada a uma banda de absorção de água.

Goel (1988) descreveu os principais aspectos da interação da radiação eletromagnética solar com um dossel sendo que esta interação dependente do fluxo radiante solar e das propriedades espectrais dos elementos do dossel. O fluxo solar incidente sobre um dossel pode ser de forma direta (a radiação que não é absorvida nem espalhada pela atmosfera) ou difusa, que é espalhada pela atmosfera de acordo com o comprimento de onda (maior no visível do que no infravermelho próximo). A direção de cada fluxo é caracterizada pelos ângulos zenital e azimutal solares, no caso do fluxo direto e pela distribuição angular no difuso.

Quando esta radiação eletromagnética incide sobre um dossel, seja de forma direta ou difusa, está sujeita aos processos de espalhamento (transmissão e reflexão da energia) e a absorção da energia incidente. Esses dois processos estão associados com as características do fluxo incidente (comprimento de onda, ângulo de incidência) e com a estrutura do dossel, que está diretamente relacionada com o tipo, grau e desenvolvimento da vegetação.

Asrar (1989) descreve os principais fatores que afetam a resposta espectral de um dossel em relação a sua arquitetura, dentre eles: (1) a distribuição espacial da vegetação; (2) o índice de área foliar *(IAF)*; (3) distribuição angular das folhas *(DAF)* e (4) distribuição dos elementos da vegetação.

Desta forma, o aumento do *IAF* implica em um maior espalhamento do fluxo, ocasionando a diminuição da reflectância no visível e no infravermelho médio e um aumento no infravermelho próximo (Asner, 2001). Além disso, uma maior variação da distribuição dos elementos da vegetação (dosséis com diversas camadas) acarreta uma diminuição de todas as reflectâncias, ocasionando assim um maior sombreamento. Da mesma forma, pequenas alterações na DAF podem resultar em grandes alterações tanto na composição espectral, quanto na magnitude da reflectância espectral de um dossel (Knipling, 1970; Colwell, 1974).

Desta forma, a caracterização espectral da vegetação requer uma ferramenta capaz de registrar a reflectância da cobertura vegetal em todo o espectro óptico. O sensor Thematic Mapper (TM), a bordo do satélite Landsat 5, possui 6 bandas ópticas (azul, verde, vermelho, infravermelho próximo e duas no infravermelho médio; 0,45-2,35 µm), de resolução espacial de 30 metros, outra banda no infravermelho termal 10,4-12,5 µm, com 60 metros de resolução (NASA, 2001), e uma terceira banda pancromática (0,52-0,90 µm) com 15 metros de resolução (Tabela 1). A separabilidade do espectro eletromagnético em

diversas bandas permite que o sensor registre a radiância do alvo de acordo com seu comprimento de onda, desenvolvendo assinaturas espectrais, e assim possibilitando uma melhor discriminação dos elementos da superfície terrestre.

Tab.1- Faixas Espectrais de cada Banda do Sensor TM do LANDSAT 5

	Thematic Mapper						
λ (µm)	B1 (azul)	B2 (verde)	B3 (vermelho)	B4 (IFV próximo)	B5 (IFV médio)	B6 (Termal)	B7 (IFV médio)
Inicial Final	0,45-0,52	0,52-0,60	0,63-0,69	0,76-0,90	1,55-1,75	10,42-12,50	2,08-2,35
Resolução	30	30	30	30	30	120	30

3.6.2 Influência da resolução espacial na classificação

Um aspecto a ser ressaltado em relação às informações espaciais no sensoriamento remoto é a escala. Desta maneira, a seleção de uma imagem, com resolução espacial apropriada para um estudo, deve examinar as características que a cena contém, especialmente o padrão de mudança da cena em função de mudanças na escala e na resolução (Cao e Lam, 1997). Assim, a escala deve ser um indicador de que tipo de sensor é mais adequado.

A resolução espacial de uma imagem também tem efeitos relacionados à acurácia da classificação de imagens. Markham e Townshend (1981), citados por Cao e Lam (1997), indicaram que a acurácia da classificação é afetada por dois fatores. O primeiro fator é a influência da quantidade de pixels de "borda" no resultado da classificação. À medida que a resolução espacial se torna mais fina, a proporção de pixels presentes no limite dos objetos na cena decresce. Os pixels de borda têm uma mistura de elementos, e a redução do número de pixels mistos diminui a confusão no processo de classificação, resultando em uma classificação de maior acurácia. O segundo fator é que resoluções mais finas aumentam a variação espectral dos tipos de cobertura terrestres. Portanto, variações dentro de uma classe de cobertura diminuem a separabilidade espectral de classes, resultando em uma classificação de acurácia mais baixa. Assim, o efeito resultante de uma resolução espacial mais fina está associado ao resultado dessas duas combinações de fatores opostos, que variam em importância em função do tamanho relativo do objeto a ser observado.

Um exemplo prático da influência da resolução espacial na classificação pode ser observado em Ponzoni et al. (2001). Estes autores compararam diferentes resoluções espaciais (60, 100, 120, 200 e 250 m), para quantificar áreas desflorestadas na Amazônia simulando imagens do TM Landsat 5. As análises foram obtidas a partir da geração de mapas temáticos, considerando tanto a interpretação visual como a classificação mista (digital seguida pela interpretação visual na tela do monitor). Os resultados demonstraram

que resoluções até 200 m foram adequadas para o monitoramento do desflorestamento (floresta vs. não floresta) considerando-se a interpretação visual. Porém, resoluções acima de 100 m, não foram capazes de distinguir temas pouco diferenciados espectralmente, tal como a distinção entre vegetação secundária em fase inicial e avançada de sucessão, demonstrando que a resolução espacial pode ter grande influência na quantificação de áreas desflorestadas.

3.7 Pré-processamentos

Os dados recebidos pelo imageamento de sensores orbitais na forma bruta, geralmente apresentam falhas e distorções. Estas distorções podem ser de origem radiométrica, resultante de uma resposta não linear dos detectores e de efeitos de interferência atmosférica (espalhamento e absorção), e/ou geométrica, relacionadas às distorções espaciais causadas pela variação das condições de aquisição dos dados orbitais. A correção de distorções e a remoção de falhas (ruídos) presentes nos dados é chamada de pré-processamento, isto porque, as operações são realizadas antes que os dados sejam utilizados para algum propósito.

3.7.1 Correção geométrica

A transformação de uma imagem de satélite para que ela possua as mesmas propriedades de escala e projeção de um mapa é definida como correção geométrica ou registro (Mather, 1999). Imagens geradas por sensores remotos estão sujeitas a uma série de distorções geométricas e variação de resolução espacial, não possuindo precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos, superfície ou fenômenos nelas representados (Crósta, 1999). As principais fontes destas distorções geométricas são erros internos, causados por distorções referentes ao sensor, e erros externos, condicionados aos efeitos da plataforma e das condições de imageamento. Essas distorções geométricas não permitem que sejam realizadas, na ausência de correção, medidas precisas referentes ao posicionamento de alvos (Sassagawa, 1999).

O georreferenciamento de uma imagem pode ser realizado através de duas maneiras. A primeira é definida como modelo de geometria orbital e é realizada através do conhecimento exato dos parâmetros geométricos da órbita do satélite e outras variáveis. Outro método é através da definição de pontos de controle no terreno, que devem ser reconhecidos tanto no mapa como na imagem que se quer registrar, ou então pode-se usar ao invés de um mapa outra imagem que já esteja corrigida (Crosta, 1999).

As etapas de um processo de correção geométrica podem incluir (a) a determinação de uma relação entre o sistema de coordenadas de um mapa e a imagem (ou registro imagem-imagem, caso possua uma imagem já corrigida), (b) o estabelecimento de um

conjunto de pontos que definem o centro dos pixels na imagem corrigida, considerados como um *grid* retangular definem a propriedade cartográfica desejada na imagem que se pretende registrar e (c) cálculo dos valores de intensidade dos pixels na imagem corrigida, por interpolação das intensidades dos pixels na imagem original (Crosta, 1999; Mather, 1999).

3.7.2 Correção atmosférica e Calibração Radiométrica

Como mencionado anteriormente, as partículas e os gases presentes na atmosfera interferem na radiação eletromagnética através de processos de absorção, reflexão e espalhamento, atenuando seus efeitos quando atingem a superfície terrestre. A correção atmosférica consiste em remover esses efeitos a fim de se obter os dados reais de reflectância dos alvos na superfície terrestre. A correção atmosférica pode contribuir significativamente para a exatidão da classificação (Pax-Lenney *et al.*, 2001; Song *et al.*, 2001).

As imagens, ao serem captadas pelo sensor, são gravadas em números digitais (DN), que, antes de serem processadas, precisam ser convertidas para uma unidade física, a fim de se expressar o "comportamento espectral" teórico dos principais alvos terrestres. Geralmente, essa transformação é efetuada para reflectância (ρ) (Espírito-Santo, 2003). Os resultados obtidos com números digitais podem ser incorretos e/ou imprecisos, pois os valores em DN não representam quantitativamente os valores físicos reais dos alvos na superfície terrestre (Robinove, 1982).

Os níveis digitais são relacionados por um modelo linear (calibração) com base na intensidade da energia radiante refletida. Entretanto, não são diretamente comparáveis entre diferentes satélites devido às diferenças na calibração dos sensores (Robinove, 1982).

Os valores físicos derivados dos números digitais são a radiância (mW cm^{-2} sr^{-1}) e a reflectância (valor adimensional, isto é, um número entre 0 e 1). A radiância é definida como o fluxo radiante (mW) por unidade de ângulo sólido (esferroradiano – sr^{-1}), que deixa uma superfície numa dada direção, por unidade de área (cm^{-2}) perpendicular àquela direção; e a reflectância é a razão entre o brilho (radiância) refletido de um objeto e o brilho incidente sobre aquele objeto (Mather, 1999).

A transformação de DN para valores de reflectância é especialmente importante em estudos sobre a vegetação que utilizam, por exemplo, os índices de vegetação, calculadas através de uma razão entre bandas (Shimabukuro, 1995).

3.7.3 Modelo linear de mistura espectral

Um Modelo de Mistura Espectral (MLME) tem a finalidade de identificar a proporção do padrão de resposta espectral de diferentes alvos que compõem um elemento de cena. Isto porque a radiância medida pelo sensor em um ponto é dada pela integração das respostas de cada um dos componentes de um elemento de cena (pixel), uma vez que, em geral, a resolução espacial de um sensor permite a inclusão de mais de um tipo de objeto dentro de um pixel.

Em geral, a resolução espacial de um sensor permite que um pixel inclua mais de um tipo de cobertura do terreno na cena. A radiância registrada pelo sensor será a soma das radiâncias de todos os materiais dentro do seu campo de visada instantânea (IFOV "Instantaneous Field of View"), resultando em um fenômeno chamado de mistura espectral (Shimabukuro e Smith, 1991; Foody *et al*., 1997).

Desta forma, a radiância observada em um determinado ponto é dada pela mistura das respostas espectrais de cada um dos componentes da cena, como, por exemplo, solo + sombra + vegetação. Essa mistura de radiâncias pode afetar a análise de dados de sensoriamento remoto, pois as feições de interesse podem ser mascaradas e a comparação de assinaturas espectrais de classes de cobertura da superfície terrestre fica ainda mais difícil.

Este problema pode ser resolvido através de técnicas que tentam modelar a relação existente entre os tipos de componentes (conseqüentemente suas proporções) encontrados em uma cena e as respectivas respostas espectrais registradas pelo sensor (Adams *et al*., 1995; Shimabukuro e Smith, 1991; Hall *et al*., 1995; Shimabukuro , 1995).

O MLME é uma destas técnicas, que, através da extração dessas informações, visa o realce das feições de interesse da imagem. Este modelo sugere que a resposta espectral de cada *pixel* seja uma combinação linear das respostas espectrais de cada componente existente na mistura (solo, sombra, vegetação, água, rochas), a qual pode ser representada por uma relação linear. Desta forma, os valores de radiância dos objetos são calculados de acordo com a proporção em que aparecem dentro de cada pixel, possuindo então um valor digital, que contém a informação sobre esta proporção e a resposta espectral de cada componente (Shimabukuro e Smith, 1991; Adams *et al*., 1995; Roberts et al., 1998; Aguiar *et al*., 1999).

Diversos trabalhos indicam os componentes vegetação, solo e sombra como constituintes básicos de cenas florestadas (Shimabukuro *et al*., 1997, Aguiar *et al*, 1999); outros incluem ainda um quarto componente, como a madeira (Nascimento, 1997) ou material vegetal não-fotossintético (Adams *et al*., 1995; Roberts *et al*., 1998;)

Cochrane e Souza Jr (1998) demonstraram o potencial do modelo linear de mistura espectral para detectar áreas impactadas pelo fogo na Amazônia, sendo possível identificar

através da componente vegetação não fotossintética, áreas recentemente queimadas e antigas queimadas (período maior que 1 ano).

Souza Jr e Barreto (2000) utilizaram a fração solo para identificar e estimar áreas de corte seletivo em Paragominas, demonstrando uma valiosa metodologia para monitorar e analisar o corte seletivo na Amazônia.

Thales (2001) utilizou a fração sombra para mapear e caracterizar áreas com dominância de babaçu, sendo observado que, com o aumento da densidade do babaçu, os valores de número digital e reflectância aparente diminuíam no infravermelho próximo e a proporção do componente sombra aumentava.

A utilização de imagens fração derivadas da aplicação do MLME vem apresentando bons resultados para estudos de detecção de características de cobertura do solo e mudança do uso do solo, inclusive na determinação de classes de vegetação (Affonso *et al.*, 2005; Freitas e Cruz, 2005; Vasconcelos e Novo, 2004; Verona e Shimabukuro, 2005).

3.8 SRTM e o Modelo Digital de Elevação

O projeto SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) advém de cooperação entre a NASA e a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), do DOD (Departamento de Defesa) dos Estados Unidos e das agências espaciais da Alemanha e da Itália. A missão usou o mesmo instrumento utilizado em 1994 no programa *Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar* (SIR-C/X-SAR), a bordo do ônibus espacial *Endeavour*.

A identificação de formas de terreno é tradicionalmente feita por julgamentos em termos qualitativos, que são baseados nas descrições obtidas na fase de interpretação. Métodos paramétricos também são possíveis e de grande interesse, pois fornecem uma base mais objetiva e uniforme para a identificação de sistemas terrestres. Estes requerem a medição e o mapeamento de variáveis do relevo como altitude, declividade, curvaturas vertical e horizontal, orientação de vertentes etc., que são combinados para identificar *elementos de terreno* e que são, por sua vez, combinados em *padrões de terreno*. A adoção dos métodos tradicionais de levantamento é justificada pela demora e pelo custo dos métodos paramétricos. No entanto, alternativas como imageamento orbital e geoprocessamento podem reduzir substancialmente estes custos, senão com a mesma qualidade dos métodos tradicionais, ao menos com um grau aceitável de concordância com aqueles (Dent & Young, 1981).

Dent & Young (1981) apresentaram uma descrição geral do trabalho de levantamento de sistemas terrestres, em que fundamentam e delimitam a importância direta do mapeamento de variáveis topográficas. Como em mapeamentos pedológicos, as atividades do levantamento de sistemas terrestres começam pela interpretação (via aerofotografias, imageamento orbital e análise do relevo) das formas de terreno e da

vegetação, mapeadas independentemente, em que se procuram as feições características de cada sistema terrestre. Uma grande proporção de feições de ambos os aspectos recaem sobre as formas de terreno, mais do que por razões práticas. É desejável que os sistemas terrestres estejam definidos o quanto for possível em termos de tipos de terreno, para que se atenda a uma base uniforme para o mapeamento. Em áreas planas, planícies costeiras e aluviais, a vegetação deve ser utilizada.

Muitos estudos dão respaldo a esta alternativa com pesquisas voltadas à relação entre variáveis topográficas e atributos da paisagem de maneira sistêmica, como a caracterização de solos, clima ou vegetação. Assumindo o desenvolvimento de solos como resposta à distribuição dos processos hidrológicos e erosivos e da temperatura do solo, Moore et al. (1993) relacionaram atributos pedológicos a variáveis topográficas, verificando que a situação topográfica explicou, em parte expressiva, a variação de importantes propriedades do solo. Brubaker et al. (1993) fizeram inferências semelhantes baseados na posição das observações sobre a superfície de vertentes. Briggs & Shishira (1985) observaram uma considerável redução na variabilidade dos atributos de solo dentro de cada unidade homogênea de relevo. Tais efeitos edáficos, associados a efeitos climáticos, além da ação direta do relevo sobre a vegetação, têm dado suporte, por exemplo, ao estudo de efeitos topográficos para o mapeamento de tipos florestais (Florinsky & Kuryakova, 1996). Esses autores consideraram, como ação direta da topografia, o transporte e o acúmulo de material orgânico, incluindo sementes e outras estruturas de propagação e recomendam o uso de modelos digitais e mapas de variáveis topográficas para levantamento, mapeamento e compreensão dos aspectos dinâmicos da vegetação.

Os estudos aplicados à caracterização da paisagem com variáveis morfológicas têm sido favorecidos com o desenvolvimento de métodos automáticos de extração de variáveis topográficas. Muitos trabalhos abordam os aspectos ligados à erosão em estimativas diretas (Ranieri et al., 1998; Molnár & Julien, 1998) e desenvolvimento de métodos automáticos de medição das variáveis (Desmet & Govers, 1996; Remortel et al., 2001; Kinnel, 2001; Mizukoshi & Aniya, 2002; Valeriano & Garcia, 2000; Valeriano 2002a; Valeriano, 2003a; e Valeriano 2003b). Como exemplos de extração digital de informações da topografia, análises de redes fluviais (Turcotte et al., 2001), partição de microbacias hidrográficas (Band, 1986) e a identificação de unidades de relevo (Miliaresis & Argialas, 1999; Meijerink, 1988; Giles & Franklin, 1998) vêm sendo desenvolvidas em ambiente computacional, amenizando a demanda de trabalho manual e a subjetividade dessas atividades.

Outra utilização dos dados topográficos fundamenta-se nos seus efeitos sobre a aquisição de dados remotos por sistemas sensores. Estes dados são fortemente modificados pelo relevo, sobretudo na faixa do visível e do infravermelho próximo (Justice et al., 1981). A redução do efeito topográfico sobre imagens multispectrais resulta numa

redução dos erros de classificação espectral de imagens, tanto maior quanto mais acidentado for o terreno (Fahsi et al., 2000). Em imageamento por RADAR, a correção topográfica dos dados mostrou aumentar ligeiramente o desempenho dos processos de classificação, porém resultou em grande aumento da exatidão da estimativa de variáveis biofísicas (Franklin et al., 1995).

Um ponto chave para a viabilidade técnica dos modelos digitais de elevação (MDE) é sua preparação. Há trabalhos de pesquisa voltados exclusivamente à preparação e à avaliação de MDE por diversos métodos, a partir de dados igualmente diversos (Valeriano, 2002b; Valeriano et al., 2002; Reiss, 2002; Özdamar et al., 1999; Li, 1992, por exemplo).

Dado um conjunto de pontos de elevação conhecida, a inserção da topografia em SIG ocorre através de da interpolação destes para um plano de informação. Este processo conta com a série de recursos diferentes, respondendo cada interpolador por uma série de vantagens e desvantagens. Muitos trabalhos foram feitos para verificar o desempenho destes interpoladores com base na comparação das cotas altimétricas entre as metodologias e com os dados conhecidos, como ainda é feito, por exemplo, para testar MDE obtidos por sensoriamento remoto, como da própria SRTM (Koch et al., 2002).

Em virtude das pequenas diferenças de exatidão encontradas entre as elevações estimadas por um método ou outro, Kubik & Botman (1976) consideraram que outros critérios, como facilidade e velocidade computacional, deveriam nortear a escolha do método. Östman (1987), por sua vez, sugere que a qualidade dos MDE seja avaliada com base em atributos derivados, como declividade e curvatura, a exemplo do que fez Giles & Franklin (1996), que compararam resultados de declividade para testar MDE. Outros lidam com a extração de informações sob variadas condições de preparo do MDE (Thompson et al., 2001; Valeriano, 2003c), para o dimensionamento de demandas técnicas aplicadas em pré-processamento, necessárias a uma utilização adequada.

O sobrevôo da SRTM ocorreu no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, durante o qual foram percorridas 16 órbitas por dia, num total de 176 órbitas. O sobrevôo foi concluído com a coleta de 12TB de dados, que vêm sendo processados para a formação de MDE.

O processamento dos dados coletados visou à formação de um MDE mundial, elaborado continente por continente, iniciado com a América do Norte.

A cobertura foi feita em 80% da área terrestre do planeta, entre latitudes 60° N e 56°S. Nesta área, foram realizadas de uma a quatro passagens, de acordo com a figura 3. Um conjunto menor de dados foi coletado sobre água para calibração.

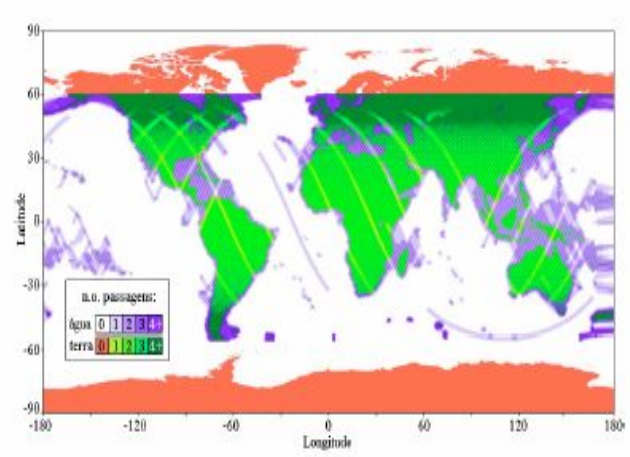

Fig.3- Área de cobertura do sobrevôo da SRTM

3.9 Técnicas de classificação de imagens

A classificação de objetos ou fenômenos é feita pela escolha das características que os descrevem para diferenciá-los entre si. Os métodos de classificação dividem-se basicamente em duas categorias: a classificação supervisionada e a não-supervisionada. Nesta segunda, não há qualquer conhecimento prévio do classificador sobre os atributos das classes pertinentes à cena, enquanto que na classificação supervisionada, o classificador orienta sua busca de classes a partir de amostras de treinamento feitas anteriormente com as classes de interesse da cena (Crosta, 1999).

O princípio da classificação supervisionada é baseado no uso de algoritmos para se determinar os pixels que representam valores de reflexão característicos para uma determinada classe. A classificação supervisionada é a mais utilizada na análise quantitativa dos dados de sensoriamento remoto.

Nas classificações digitais tradicionais, onde um conjunto de amostras é utilizado para caracterizar cada classe temática a ser mapeada, os pixels (elementos básicos constituintes da imagem) são comparados um a um às amostras fornecidas decidindo a qual classe temática eles pertencem. Estas classificações são conhecidas por classificação pixel a pixel e desconsideram, portanto, o contexto de inserção dos pixels e a textura da imagem.

Os problemas da classificação automática advêm, em larga escala, da dificuldade de inserir, nos classificadores, regras de decisão que incluam os critérios que a mente do foto-intérprete utiliza, como o contexto e a forma das feições. Portanto, ao basear-se exclusivamente na intensidade da radiação, expressa pelos níveis de cinza (NC), a maioria das técnicas classificatórias não alcançam níveis de acurácia satisfatórios para muitas aplicações. A fraca separabilidade espectral entre classes de interesse está na origem dos erros de classificação.

A necessidade de se criar métodos digitais de classificação de imagens, reduzindo a subjetividade do intérprete humano e ao mesmo tempo considerando algumas

características do meio, e não exclusivamente o valor espectral do pixel, levou ao desenvolvimento de novas técnicas e aplicativos.

3.10 Classificação por Árvore de Decisão

Amplamente utilizadas em algoritmos de classificação, as árvores de decisão são representações simples do conhecimento e um meio eficiente de construir classificadores que predizem classes baseadas nos valores de atributos de um conjunto de dados.

As árvores de decisão consistem de nodos que representam os atributos; de arcos, provenientes destes nodos e que recebem os valores possíveis para estes atributos; e de nodos folha, que representam as diferentes classes de um conjunto de treinamento (Ingargiola,1996). Classificação, neste caso, é a construção de uma estrutura de árvore (Figura 4), que pode ser usada para classificar corretamente todos os objetos do conjunto de dados de entrada (Brazdil, 1999).

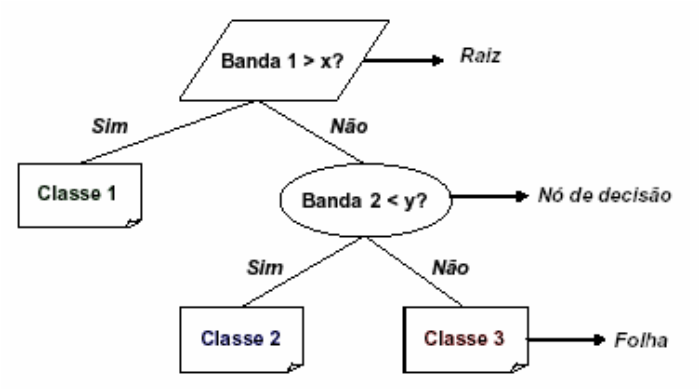

Fig.4- Exemplo da entrada de dados do classificador por Árvore de decisão.

Muitos são os algoritmos de classificação que constroem árvores de decisão. Não há uma forma de determinar qual é o melhor algoritmo; um pode ter melhor desempenho em determinada situação e outro pode ser mais eficiente em outros tipos de situações.

Após a construção de uma árvore de decisão, é importante avaliá-la. Esta avaliação é realizada através da utilização de dados que não tenham sido usados no treinamento. Esta estratégia permite estimar como a árvore generaliza os dados e se adapta às novas situações, podendo, também, se estimar a proporção de erros e acertos ocorridos na construção da árvore (Brazdil, 1999).

A partir de uma árvore de decisão, é possível derivar regras. As regras são escritas considerando o trajeto do nodo raiz até uma folha da árvore. Estes dois métodos são geralmente utilizados em conjunto. Devido ao fato de as árvores de decisão tenderem a crescer muito, de acordo com alguma aplicações, elas são muitas vezes substituídas pelas regras. Isto acontece em virtude das regras poderem ser facilmente modularizadas. Uma

regra pode ser compreendida sem que haja a necessidade de se referenciar outras regras (Ingargiola, 1996).

Uma árvore de decisão tem a função de particionar recursivamente um conjunto de treinamento, até que cada subconjunto obtido deste particionamento contenha casos de uma única classe. Para atingir esta meta, a técnica de árvores de decisão examina e compara a distribuição de classes durante a construção da árvore. O resultado obtido, após a construção de uma árvore de decisão, são dados organizados de maneira compacta, que são usados para classificar novos casos (Holsheimer & Siebes, 1994; Bradzil, 1999).

A árvore de decisão não assume nenhum modelo estatístico a priori, sendo a divisão do espaço de atributos feita de acordo com as amostras provenientes do treinamento. Assim, no espaço RGB, as classes são separadas por planos que as delimitam.

4. Material e Métodos

4.1 Descrição e Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada no centro-oeste do estado do Amazonas, nos municípios de Juruá e Uarini/AM (Figura 5). Com uma área aproximada de 188.000 ha, a Reserva Extrativista do Baixo - Juruá limita-se ao Leste com o Rio Juruá e a Oeste com o Rio Uarini.

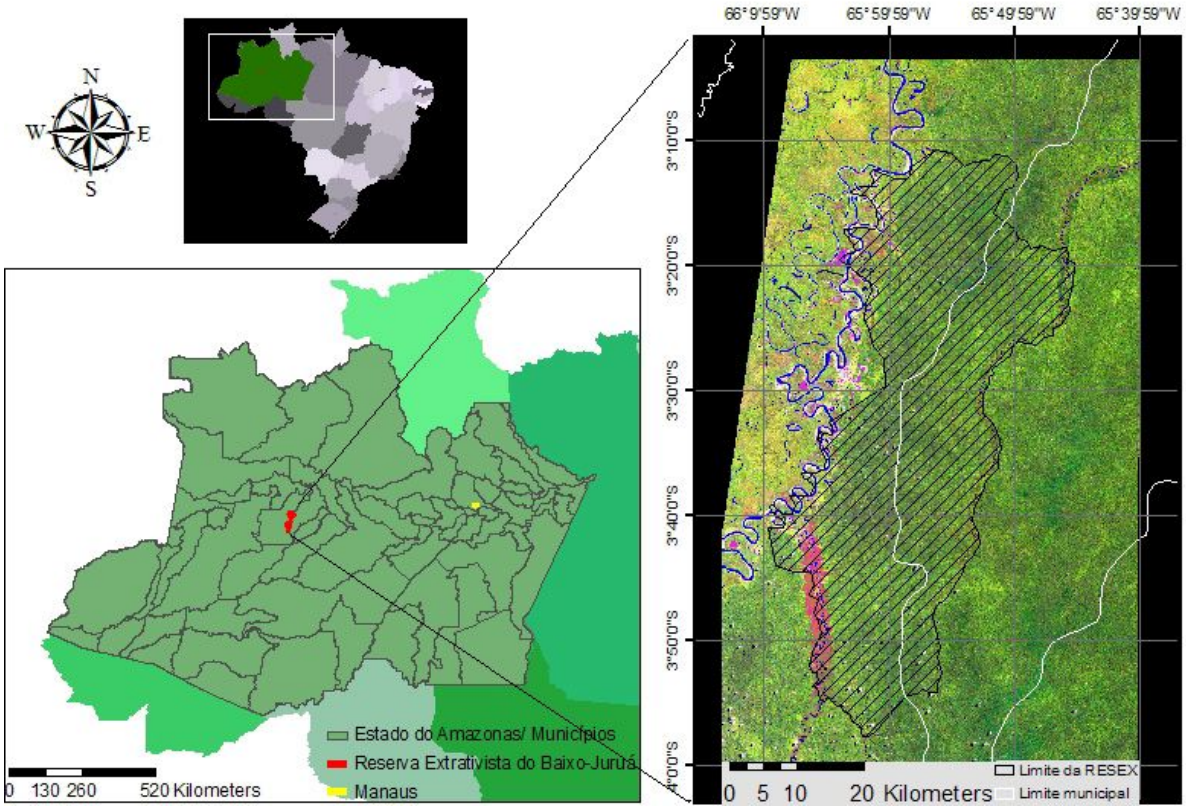

Fig.5- Localização da área de estudo. Reserva Extrativista do Baixo Juruá/AM.

4.1.2 Características fisiográficas

A área de estudo pertence à unidade geomorfológica do Planalto Rebaixado da Amazônia Ocidental com Domínio Morfoclimático em Planalto Dissecado e Superfície Pediplanada, com diferentes índices de dissecação variando entre de 750 a 12.750 metros. Composto por interflúvios tabulares e relevos de topo aplainado, separados por vales de fundo plano e intensidade de aprofundamento da drenagem muito fraca.

Apresenta, também, segundo PROJETO RADAMBRASIL, uma Planície fluvial (Apf) com área aplainada, resultante de acumulação fluvial, periódica ou permanentemente alagada, que pode apresentar, geralmente, diques marginais, canais anastomosados e lagos.

A geologia é composta pela Formação Solimões, com depósitos recentes e atuais de planícies fluviais com predomínio de seixos. Quanto ao aspecto pedológico, há ocorrência de solos hidromórficos gleyzados eutróficos, Podozólico vermelho-amarelo álico e Latossolo vermelho-amarelo álico.

O clima é pertencente ao grupo tropical chuvoso, com precipitação pluviométrica anual média de 2.500 mm. O período chuvoso inicia-se em Novembro, atingindo os maiores índices entre os meses de Janeiro e Abril. A temperatura média do ar gira em torno de 24°C, com pequena amplitude térmica. A umidade relativa do ar permanece geralmente acima de 90%.

Esta região caracteriza-se pela floresta tropical densa, da sub-região aluvial da Amazônia, com terraços baixos e planos, sendo muito freqüente a presença da seringueira (*Hevea sp.*), louro (*Ocotea sp.*), virola (*Virola surinamensis*) e samaumeira (*Bombax globosum*). A vegetação das margens do Rio Juruá sofre o efeito das cheias, registrando a ocorrência do capim canarana (*Canarana ereta*), consumido pela capivara (*Hidrochoeris*).

A Resex é composta por 11 comunidades e aproximadamente 750 habitantes. Os principais meios de sobrevivência são o roçado, o cultivo de pequenas áreas de milho e espécies frutíferas e a criação de animais de pequeno porte.

Com aproximadamente 7.500 habitantes, a sede do município de Juruá está situada entre o Rio Juruá (a Leste) e o limite da Reserva Extrativista (a Oeste). Além da atividade madeireira de subsistência, a região também possui algumas atividades agrícolas com o predomínio de pequenas pastagens e enquadra-se no modelo típico de desenvolvimento do interior do Estado do Amazonas. A Figura 6 mostra a sede do município de Juruá e a sua zona rural.

Fig.6- Na figura da esquerda: Vista aérea da sede do município de Juruá/AM. Na figura da direita: Pastagem na área rural da cidade.

4.2 Materiais e equipamentos

A seguir, serão descritos os materiais utilizados no desenvolvimento deste estudo, tais como, imagens de satélite, cartas e equipamentos utilizados no levantamento de campo.

4.2.1 Equipamentos utilizados no levantamento de campo

Foram utilizados uma bússola e um equipamento de GPS (Sistema de Posicionamento Global) de navegação, com precisão de 15 metros, para aquisição das coordenadas geográficas dos pontos de interesse. Fotografias em nível do solo para caracterização da área de estudo foram obtidas utilizando uma câmera da marca SONY 7.2 megapixel.

4.2.2 Produtos em formato digital

Para realização deste estudo, foram utilizadas imagens do sensor *TM LANDSAT 5* correspondentes às bandas 1,2,3,4,5 e 7, órbita ponto 01/62 e 01/63 referentes ao ano de 2005 para a região de Juruá–AM (Tabela 2). Posteriormente, como complemento ao trabalho, foram utilizadas as imagens do ano de 1997 e 2000 da órbita ponto 01/62.

As imagens foram fornecidas pela Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de Cachoeira Paulista, em formato GeoTiff. Estas foram adquiridas com nível de correção 1G, isto é, com correções geométrica e radiométrica. A correção geométrica é feita a partir de um modelo fotogramétrico e reamostragem pelo interpolador do vizinho mais próximo, em projeção/datum UTM/SAD-69. A correção radiométrica tem por finalidade igualar as diferenças das sensibilidades radiométricas entre os 16 detectores de cada banda espectral dos sensor TM (Thematic Mapper).

Também foram utilizadas imagens do projeto SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) de cooperação entre a NASA e a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), do DOD (Departamento de Defesa) dos Estados Unidos e das agências espaciais da Alemanha e da Itália. A missão usou o mesmo instrumento utilizado em 1994 no programa *Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar* (SIR-C/X-SAR), a bordo do ônibus espacial *Endeavour* (Tabela 3).

Tab.2- Características da imagem LANDSAT-TM utilizada

Data de aquisição	Cena Órbita/Ponto	Tipo de Sensor	Elevação solar	Resolução espacial	Resolução radiométrica
04/09/2005	001/62	TM	59,12	30 metros	8 bits
04/09/2005	001/63	TM	59,12	30 metros	8 bits

Tab.3- Características da imagem SRTM utilizada.

Ano de aquisição	Cena	Sensor	Resolução espacial	Altitude de vôo
11 a 22/02/2000	S04-W067	SRTM	90 metros	233 Km
11 a 22/02/2000	S04-W066	SRTM	90 metros	233 Km

4.2.3 Aplicativos computacionais:

* SPRING 3.6.03 (Câmara *et al.*, 1996);

* Environment for Visualizing Images - ENVI 4.2 (Sulsoft, 2002) e,

***** ARCGIS 9 (Esri).

4.3 Metodologia

O estudo foi dividido em 4 etapas consecutivas distintas:

1. Pré-processamento das imagens Landsat-TM5;
2. Pré-processamento das imagens SRTM;
3. Classificação e avaliação da técnica digital "Decision Tree" e
4. Processamento dos dados do Inventário Florestal.

4.3.1 Pré-processamento das imagens digitais Landsat-TM5

Os procedimentos utilizados no pré-processamento das imagens consistiram em:

1. Registro e Mosaico das cenas 1/62 e 1/63 do sensor TM-5, *Landsat*;
2. Correção atmosférica[1] e Calibração radiométrica;
4. Correção geométrica dos dados digitais e,
5. Geração das Imagens Fração.

4.3.1.1 Mosaico de imagens

Observando-se a necessidade de se utilizar mais de uma cena do sensor TM-5 para poder cobrir toda a área deste estudo, as duas imagens foram ajustadas a partir de um registro "imagem-imagem", que teve como objetivo ajustar geometricamente as linhas e colunas das cenas (1/62 e 1/63). Este é considerado o primeiro passo para se mosaicar imagens não-georreferenciadas.

O registro foi realizado selecionando-se dez pontos de controle comuns às duas imagens (na região de sobreposição entre as cenas) de locais de referência notória, tais como pista de pouso, cruzamento de ramais de terra e cursos de água. A partir do momento em que os pontos de controle foram definidos, o método de reamostragem "Vizinho mais

[1] O termo mais adequado seria atenuação, uma vez que os modelos utilizados na correção atmosférica são incapazes de aferir quantitativamente o ajuste do modelo, tal como a estimativa do erro médio quadrático *(RMSE- root mean squares error*) em um registro geométrico.

próximo” (*Nearest Neighbor*) foi aplicado utilizando um polinômio do 1º grau para a transformação de coordenadas.

4.3.1.2 Correção atmosférica e Calibração Radiométrica

A correção atmosférica foi realizada utilizando o método desenvolvido por Chavez (1996), baseado na subtração do pixel escuro. Este método, também é denominado de COST, é uma reformulação do método proposto pelo próprio Chavez (1988). Tal reformulação foi necessária, pois a primeira versão do método apresentava falha nas bandas onde existe predominância de absorção, no caso a TM4 (infravermelho próximo). Segundo esse método, em toda e qualquer cena e em qualquer banda espectral, existem pixels que deveriam assumir o valor “0”, uma vez que estes poderiam não receber radiação incidente.

A correção atmosférica foi realizada na imagem mosaico TM Landsat 5 referente ao ano de 2005 para as primeiras quatro bandas espectrais (do visível ao infravermelho próximo), que são notoriamente as que mais sofrem interferência atmosférica (Slater, 1980). Para isto, foi desenvolvido um algoritmo em linguagem computacional **LEGAL** (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) (Câmara *et al*. 1995) baseado no método descrito por Skirvin (2002)[2]. Este algoritmo combina o método COST para correção atmosférica com a calibração radiométrica, reduzindo o consumo de tempo nas etapas do processamento.

O primeiro passo deste método foi calcular a radiância mínima do alvo ($L_{i,\ min}$) para cada banda espectral do sensor, a partir da equação descrita a seguir:

(1) $L_{i,\ min} = LMIN_i + Qdark * (LMAX_i - LMIN_i) / Qcalmax$

onde,

Qdark = o valor digital (DN) mínimo encontrado em uma cena sob efeito da interferência atmosférica;

Qcalmax = valor máximo de quantização do pixel em DN, igual a 255,

$LMIN_i$ e ***LMAX***, são os valores de radiância correspondentes aos valores DN=0 e DN=255, respectivamente, sendo os valores de calibração revisados do sensor TM5 fornecidos em Chander e Markham (2003, pág.4).

O Qdark (valor digital mínimo ou pixel escuro) foi determinado para as quatro bandas iniciais do TM Landsat 5 (TM1, TM2, TM3 e TM4), pela análise do histograma de acordo com Milton (2002), adotando o modelo de espalhamento relativo de Rayleigh para condições atmosféricas “muito limpa”, decaimento à quarta potência. Em seguida, para cada banda a

[2] Disponível no *site* http://www2.erdas.com/supportsite/downloads/models/user_models/

ser corrigida, foi computada a radiância do pixel escuro (efeito da bruma), supondo-se uma radiância de fundo igual a 1% de reflectância do pixel escuro (Chavez, 1996; Moran et al., 1992), ou seja:

$$(2)\ L_{i,\ 1\%} = 0{,}01 * ESUN_i * \cos^2 q / (\pi * d^2)$$

onde,

$ESUN_i$ = irradiância solar exoatmosférica, obtidas de Chander e Markham (2003, pág. 5) para cada banda espectral, "q" é o ângulo zenital solar, e "d" a distância Terra-Sol em unidade astronômicas.

Computando-se a radiância corrigida de bruma ($L_{i,\ haze}$) para cada banda:

$$(3)\ L_{i,\ haze} = LMIN_i - L_{i,\ 1\%}.$$

Por fim, para se obter a reflectância de superfície (ρ_s), derivada das correções radiométrica e atmosférica, foi utilizada a formulação de acordo com Chavez (1996), expressa por:

$$(4)\ \rho_S = \pi * d^2 * (L_{i,\ sat} - L_{i,\ haze}) / ESUN_i * \cos^2 q$$

onde a radiância bruta recebida pelo sensor $Lsat_i$ é dada por:

$$(5)\ L_{i,\ sat} = LMIN_i + ND\ (im_i) * (LMAX_i - LMIN_i) / Qcalmax$$

sendo, $ND(im_i)$ o número digital de um dado pixel para uma dada banda espectral.

A equação 4 foi modificada para calcular a reflectância aparente (sem correção) das bandas do infravermelho médio (TM5 e TM7), desconsiderando os fatores de correção para os efeitos atmosféricos, já que, nesta região do espectro, a atmosfera é praticamente transparente (Slater, 1980), resultando na seguinte expressão:

$$(6)\ \rho\lambda = \pi * d^2 * Li,_{sat} / ESUN_i * \cos q$$

Neste procedimento, a imagem teve seus valores em ND convertidos para valores de reflectância aparente de acordo com a equação 6, utilizando-se os parâmetros de calibração (Tabela 4) publicados por Chander e Markham (2003) para o sensor TM5 e também tendo os efeitos atmosféricos atenuados conforme descrito anteriormente.

Tab.4- Valores de radiância Lmax e Lmin (W / m^2.sr. µm) e irradiância solar (E_{solar}) (W / m^2.µm) utilizados na conversão de número digital para reflectância aparente.

	TM Landsat -5					
	De 01/03/1994 a 05/05/ 2003			**Depois de 5/05/ 2003**		
Bandas	**LMIN**	**LMAX**	**E_{solar}**	**LMIN**	**LMAX**	**E_{solar}**
1	-1,52	152,1	1957	-1,52	193	1957
2	-2,84	296,81	1826	-2,84	365	1826
3	-1,17	204,3	1554	-1,17	264	1554
4	-1,51	206,2	1036	-1,51	221	1036
5	-0,37	27,19	215	-0,37	30,2	215
7	-0,15	14,38	80,67	-0,15	18,5	80,67

4.3.1.3 Correção geométrica

A “Imagem Mosaico” foi corrigida geometricamente com o auxílio do software ENVI 4.2 (Sulsoft), co-registrando esta com as imagens do Geocover (Nasa, 2000). Para isto, utilizaram-se 10 pontos de controle correspondentes às suas coordenadas geográficas, utilizando como base o Mosaico Geocover da NASA, já georreferenciado.

Foi adotada, para a “Imagem Mosaico”, a projeção geográfica UTM, por ser a mais indicada para calcular distâncias em áreas relativamente pequenas (nível local), e datum WGS-84, para representar a forma elipsóide da Terra (ITC, 2004).

Um modelo polinomial de primeiro grau, com reamostragem dos níveis de cinza pelo interpolador do vizinho mais próximo e a avaliação da confiabilidade do processo foi baseada no erro (RMS) das posições dos pontos controle.

4.3.1.4 Modelo linear de mistura espectral

A Imagem Mosaico do TM-5 foi processada pelo *software* ENVI 4.0, usando um modelo linear de mistura espectral para a obtenção das imagens fração solo, vegetação e sombra. O modelo linear de mistura espectral (MLME) visa estimar a proporção dos componentes solo, vegetação e sombra para cada pixel, a partir da resposta espectral nas diversas bandas do TM, gerando as imagens fração correspondentes.

Para a geração das imagens fração, foram utilizadas as 6 bandas da Imagem Mosaico do satélite *LANDSAT-TM5*, formando um sistema de equações lineares, resolvido pelo método dos Mínimos Quadrados. Esse modelo é expresso por um modelo matemático de mistura espectral, conforme a equação abaixo, com restrição de solução (soma das frações igual a 1).

$$r_i = \sum_{j=1}^{n} \rho_{ij} f_j + e_i$$

onde,

r_i reflectância de um dado pixel na banda espectral i de n-bandas espectrais;

n número de componentes de mistura;

f_j fração de cada componente puro j dentro do pixel;

ρ_{ij} reflectância do componente puro j na banda espectral i;

Uma das maneiras de selecionar os componentes puros do Modelo Linear de Mistura Espectral foi feito na própria imagem. Os pixels candidatos, com maior probabilidade a serem considerados puros, foram obtidos usando um algoritmo de Índice de Pureza de Pixel – PPI (Boardman et al. 1995), implementado no ENVI. Logo após este procedimento, foi construído um gráfico contrapondo valores de reflectância na região do visível e do infravermelho próximo, em um espaço bidimensional, conforme figura 7**.**

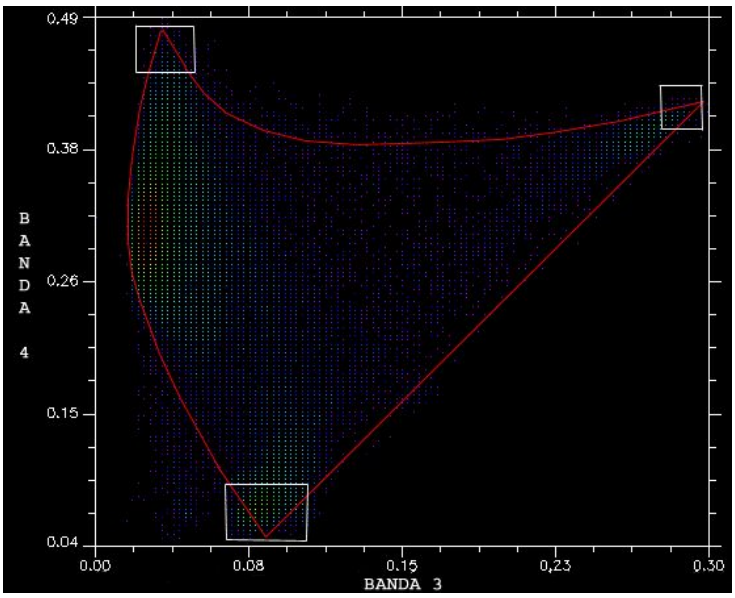

Fig.7- Espaço bidimensional compreendendo as Bandas 3 e 4 do sensor TM5Landsat. O triângulo vermelho corresponde a área da distribuição de pontos e os retângulos brancos indicam a provável localização dos pixels puros.

Observando o gráfico da figura 7, verifica-se que a distribuição da reflectância no espaço bidimensional segue um padrão. Este padrão dependente das propriedades espectrais dos elementos mais freqüentemente encontrados em uma cena, que, em se tratando de recursos naturais, seriam a água, o solo e a vegetação.

Considerando que cada um desses elementos da cena ocorre em proporções diferenciadas dentro de um mesmo pixel, aqueles pixels que contém as proporções mais "puras" de um desses elementos se localizarão nos extremos dessa distribuição de pontos, a qual freqüentemente assume a forma de um triângulo. Assim, no vértice inferior direito estariam aqueles pixels representativos dos solos expostos, e que apresentam valores "médios" de Reflectância nas duas faixas espectrais. Na porção inferior esquerda estariam localizados os pixels representativos dos corpos de água e das regiões sombreadas. E, por fim, no vértice superior estariam os pixels com as maiores proporções de cobertura vegetal, apresentando altos valores de reflectância na região do infravermelho próximo e baixos na região do visível.

Desta maneira, foram encontrados os pixels com as proporções mais puras de solo, sombra e vegetação. Esses pixels foram inspecionados quanto à forma da curva espectral e contexto de campo para a obtenção do conjunto final de componentes puros. A imagem erro (RMS) gerada pelo modelo também foi um dos indicadores para avaliar a seleção dos pixels puros.

4.3.2 Dados do SRTM e a construção do Modelo Digital de Elevação.

O Projeto SRTM faz parte de um programa que visa examinar a superfície terrestre, oceanos, atmosfera, gelo e a vida como um sistema integrado e representa a primeira experiência de interferometria a bordo de uma nave espacial.

No período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, a bordo do *Space Shuttle Endeavour* (Figura 3), numa altitude de vôo de 233 km e uma inclinação de 57º, um conjunto composto por duas antenas coletou 14 Terabytes de dados que permitiram a avaliação do perfil de altitude para criação de modelo digital tri-dimensional da Terra entre as latitudes 60ºN e 58ºS.

As imagens utilizadas neste trabalho foram adquiridas gratuitamente da rede mundial de computadores diretamente do endereço http://srtm.usgs.gov/data/obtainingdata.html do USGS (*United States Geological Survey*) disponíveis sob a resolução de aproximadamente 90 m na forma de grade de Modelos Numéricos do Terreno. As etapas de pré-processamento para utilização dos dados SRTM foram:

1. Registro e Mosaico das cenas SRTM_S04-W067 e SRTM_S04-W66;

2. Remoção de falhas do Mosaico SRTM (resolução 90 metros);

3. Geração e avaliação de um novo SRTM de resolução 30 metros e,

4. Extração das variáveis de interesse.

Após o Registro e a criação do Mosaico, a imagem foi utilizada na resolução de 90 metros como Modelo digital de elevação (MDE). A imagem da região foi convertida em grid e em seguida ela foi reclassificada para correção dos valores negativos gerados na conversão

de 16 bits para 32 bits. Após a correção, o MDE foi interpolado para melhorar sua resolução e deixá-lo nas mesmas dimensões das imagens Landsat/TM5, com resolução aproximada de 30 metros.

A krigagem simples foi utilizada na interpolação de 90 para 30 m conforme metodologia proposta por Valeriano *et al.,* (2006). Com os dados topográficos (altimétricos) da coleção SRTM refinados com tratamento geoestatístico (Valeriano, 2006), foi gerado um arquivo matricial de declividade derivado do MDE. Segundo o mesmo autor, o cálculo da declividade requer alta resolução do Modelo Digital de elevação, podendo ser interpolado através de krigagem. Este processo foi executado através da ferramenta “Slope” do programa ARCGIS 9.0.

As variáveis altimétricas e de declividade foram extraídas do MDE e utilizadas em uma fase posterior na classificação por Árvore de decisão. Todos os procedimentos utilizados na geração do MDE foram realizados no programa ArcGis 9.0.

4.3.3 Classificação por Árvore de Decisão

O processo de classificação foi implementado por meio de uma série de regras que determinaram o caminho a ser seguido, começando da raiz e finalizando em um nó terminal, o qual representou a classe do objeto ao qual se pretendeu classificar. A raiz e os nós interiores, referidos coletivamente como nós não terminais, estabelecem os estágios de decisão. A cada nó não terminal, uma decisão tem que ser tomada acerca do caminho a se seguir para o próximo nó (Tso & Mather, 2001).

Cada decisão separou pixels pertencentes a um arranjo de imagens, dentro de duas classes baseadas numa determinada expressão. Para cada nova classe, foi possível subdividi-la em mais duas classes, ou seja, podendo definir tantas classes quanto foram necessárias para gerar a classificação. As variáveis utilizadas na classificação por Árvore de Decisão foram:

1. Informações originárias da coleta de campo,
2. bandas 1 a 5 e 7 do sensor TM5, Landsat,
3. imagens Fração Solo, Sombra e Vegetação resultantes do MLME e,
4. dados de altitude gerados pelo MDE das imagens do SRTM.

Assim, as informações dos sensores remoto extraídas por meio das diferentes metodologias foram utilizadas em conjunto para caracterizar e mapear a cobertura e uso do solo na Reserva, como pode ser observado no fluxograma da figura 8.

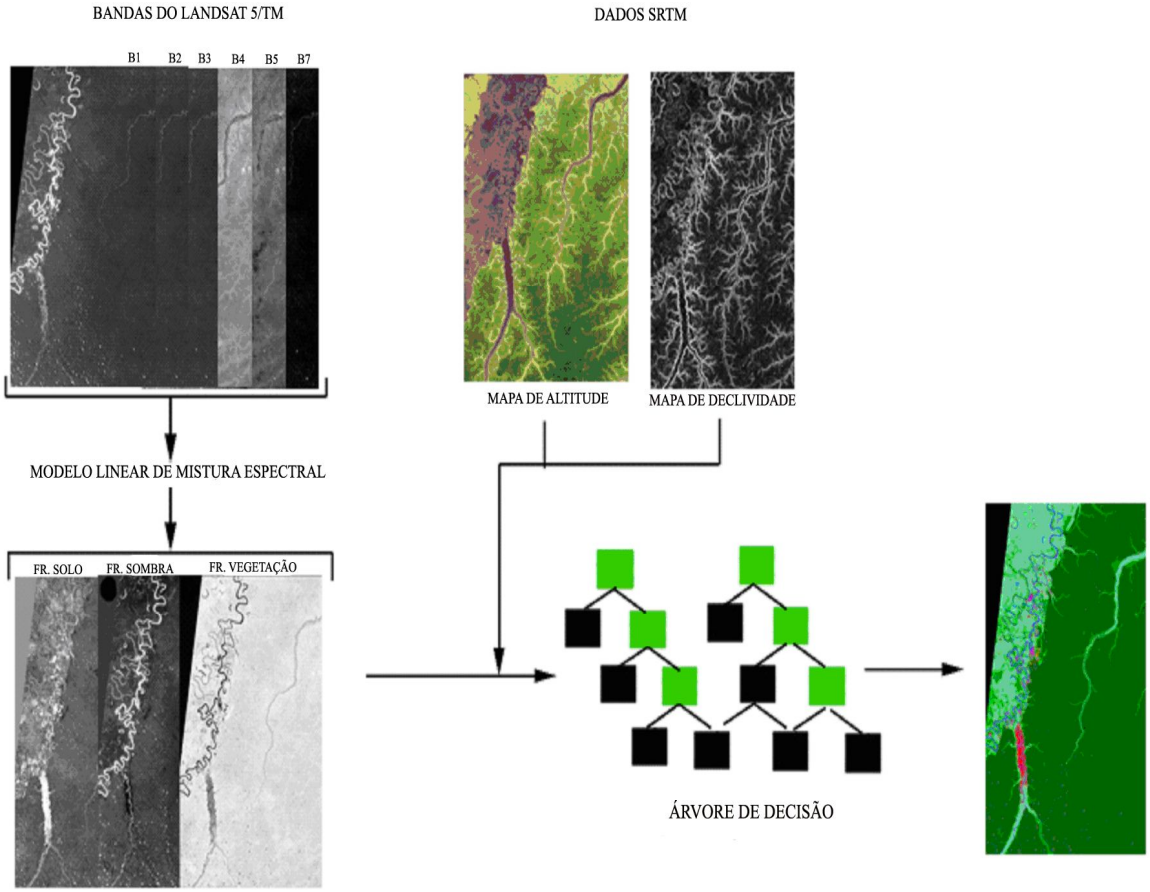

Fig.8- Fluxograma da metodologia aplicada na classificação temática.

4.3.3.1 Avaliação da classificação

Para verificar a acurácia da classificação, foi gerada uma matriz de confusão ou de Erros, comparando os dados de referência ("verdade") de campo com os da classificação.

Os erros de classificação foram denominados de "Erros de inclusão (*commission*)" quando foram incluídos pixels em uma classe que na verdade, pertenciam a outra, e denominados "Erros de omissão (*omition*)" quando foram omitidos pixels da classe correta, atribuindo-os a outra classe. Assim, tem-se o tipo de erro específico de cada classe e o percentual do total de pixels classificados corretamente, ou seja, a exatidão global ("*accuracy*") da classificação.

Outro indicador de exatidão derivado da matriz de confusão, que auxiliou na avaliação do classificador foi o coeficiente Kappa (K) (Colganton & Green, 1999; Tso & Mather, 2001). Uma das vantagens alegadas ao uso desse coeficiente é de que ele incorpora a informação dos pixels mal classificados e não apenas dos pixels classificados corretamente. Portanto, o Kappa é sensível não só à perda de acurácia global como um todo, mas também às variações dos erros de omissão e de inclusão.

4.3.4 Inventário Florestal

Os dados utilizados neste trabalho fazem parte do banco de dados para a implantação do Plano de Manejo da RESEX do Baixo Juruá e foram coletados a partir de um inventário florestal realizado no mês de fevereiro de 2006 pela equipe de inventário Florestal do Laboratório de Manejo Florestal do INPA.

Foram instalados 13 transectos (Figura 9) localizados em floresta de Terra- Firme e distribuídos sistematicamente de Norte a Sul da reserva. Os transectos são formados de 6 subunidades amostrais com 0,25 ha ou 2500m² (20 X 125 m) cada, sendo que entre as subunidades amostrais foram deixados espaços de 200 metros em que não é inventariado nenhum indivíduo. No total, foram inventariados 22,5 ha ou 225.000 m^2 , considerando todos os indivíduos arbóreos com DAP > 10 cm.

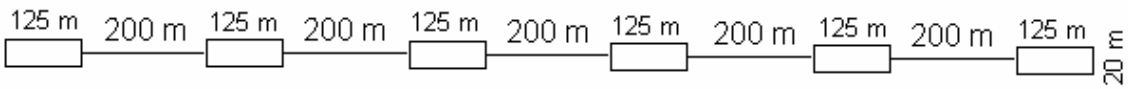

Fig.9- Esquema da instalação no campo de um transecto composto de 6 sub-unidades.

O posicionamento das unidades amostrais foi adaptado de Higuchi *et al.* (1982), no qual as unidades amostrais distribuem-se na forma de cruz (figura 10).

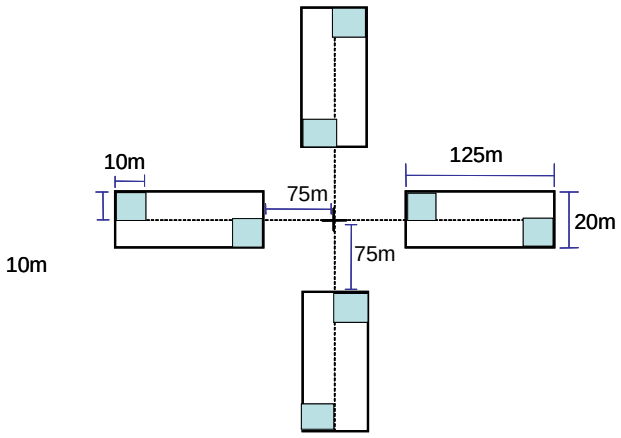

Fig.10- Modelo de unidade amostral composta por 4 sub-amostras. Higuchi et al (1982).

4.3.4.1 Estimativa dos parâmetros da estrutura diamétrica

Os parâmetros dendrométricos que serão estimados são: área basal (m^2/ha), volume comercial com casca (m^3/ha) e biomassa fresca acima do nível do solo (t/ha). As estimativas destes parâmetros são feitas em função dos indivíduos por hectare e por classe diamétrica.

Estimativa de área transversal (m²/ha)

$g = (\pi \cdot DAP^2) / 40000$

Onde:

g = área transversal em m^2; e

DAP = diâmetro à altura do peito em cm.

Estimativa da Área Basal (G/m²/ha)

$AB = \Sigma g$

Estimativas do volume comercial com casca (m³/ha)

A estimativa do volume comercial bruto de árvore em pé com casca para todos os indivíduos com DAP $\geq$ 20 cm foi obtida através da equação desenvolvida por Higuchi *et al*. (1997), da seguinte maneira:

$$\ln V = -7.335 + 2.121 \cdot \ln DAP \quad [R^2 = 0{,}95 \text{ e } S_{yx} = 0{,}27]$$

Onde:

ln = logaritmo natural;

V = volume comercial com casca em m^3; e

DAP = diâmetro à altura do peito em cm.

Estimativa de estoque de biomassa fresca (t/ha)

A biomassa fresca acima do nível do solo foi estimada com auxílio de modelos bioestatísticos desenvolvidos por Higuchi *et al.* (1997):

$$\ln P = -1{,}754 + 2{,}665 \cdot \ln DAP \quad [R^2_a = 0{,}92 \text{ e } S_{yx} = 43] \quad (5 \leq DAP < 20 \text{ cm})$$

$$\ln P = -0{,}151 + 2{,}170 \cdot \ln DAP \quad [R^2_a = 0{,}90 \text{ e } S_{yx} = 2035] \quad (DAP \geq 20 \text{ cm}),$$ onde:

ln = *logaritmo natural;*

P = *peso fresco da fitomassa acima do nível do solo em kg; e*

DAP = *diâmetro à altura do peito em cm;*

Estimativa de estoque de carbono da vegetação (t/ha)

Determinando-se que a quantidade de carbono presente em um organismo arbóreo corresponde a aproximadamente 50% do valor da sua biomassa seca e que neste indivíduo, arbóreo em pé, o teor de água corresponde a 40% do seu peso, pode-se inferir que, dos 60% restantes, a metade corresponde ao elemento carbono em todas as suas formas moleculares.

4.3.5 Identificação de áreas com potencial para instalação de unidades de Manejo Florestal

Com o propósito de eleger áreas propícias para a instalação de duas unidades de manejo florestal na Reserva Extrativista do Baixo Juruá, o cruzamento dos diferentes planos de informações extraídos até aqui pelos mais diferentes métodos de caracterização da área foram analisados.

Esta análise conjunta e a eleição de uma área ao Norte e outra ao Sul da RESEX foram feitas pela sobreposição dos produtos da classificação pelo método de Árvore de Decisão, do Modelo Digital de Elevação (MDE) e das variáveis biométricas. Com isso, pretendeu-se encontrar duas áreas com características ideais para a implantação destas unidades de manejo. Uma área ideal seria aquela que atendesse aos requisitos de alta biomassa florestal, maior homogeneidade topográfica, poucos interflúvios e, o mais importante, a proximidade das comunidades extrativistas, localizadas ao Norte e ao Sul da RESEX, para que estas possam vir a participar ativamente do processo de implantação dessas áreas.