

ESTIMATIVA DO VOLUME DE MADEIRA EM MÚLTIPLO ESTÁGIO
UTILIZANDO UM SISTEMA DE AMOSTRAGEM COM
PROBABILIDADE VARIÁVEL

P. Hernandez Filho, D. C. Liang Lee, Y. E. Shimabukuro, O.
R. de Assis, J. S. de Medeiros

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e
Tecnológico - CNPq
C.P. 515 - 12200 - São José dos Campos - SP - Brasil

RESUMO

Através de convênio, o Instituto de Pesquisas Espaciais (CNPq/INPE) e o Instituto de Desenvolvimento Florestal (I.B.D.F.) desenvolveram um trabalho no Estado do Mato Grosso do Sul com a finalidade de estimar o volume de madeira através de um sistema de amostragem, em múltiplo estágio (imagens orbitais, fotografias aéreas e dados de campo), com probabilidade variável. No primeiro estágio foram utilizadas imagens fotográficas dos canais 5 e 7 do satélite Landsat, de maio de 1981, onde, por processos de interpretação visual, foram mapeadas classes de reflorestamentos em função de seu gênero e idade em cada propriedade rural. Para avaliar as Unidades Primárias de Amostragem (UPAs), foi ajustada uma grade (1,0 x 1,0 cm) nas imagens fotográficas do satélite Landsat, na escala 1:250.000. Com base na probabilidade proporcional à área (ha) por classe em cada unidade da grade, foram selecionadas as UPAs para recobrimento aerofotográfico. No segundo estágio, utilizando fotografias aéreas infravermelhas coloridas, de julho de 1983, na escala 1:20.000, foi ajustada uma grade (2,5 x 2,5 cm) que permitiu selecionar as Unidades Secundárias de Amostragem (USAs) pelo mesmo procedimento empregado no primeiro estágio. Foi ampliada quatro vezes, o que permitiu a seleção das Unidades Terciárias de Amostragem pelo mesmo procedimento utilizado nos estágios anteriores. No campo foram obtidos dados dendrométricos em cada UTA que possibilitaram a estimativa do volume total de madeira das áreas reflorestadas no Estado do Mato Grosso do Sul.

ABSTRACT

This study was carried out in agreement with the Institute for Space Research (CNPq/INPE) and the Brazilian Institute of Forestry Development (IBDF) to evaluate a multistage sampling technique, with probability

proportional to size, of forest volume inventory using remote sensing data. Landsat imagery channel 5 and 7, of May 1981 of the study area was used in the first stage for visual classification of reforested areas. The classes were defined based on genus and age of forest plantation. A grid (1,0 x 1,0 cm) was fixed on the image, at the scale of 1:250.000. Based on Probability Proportional to Size (PPS) were selected the Primary Sampling Units (PSU's). CIR aerial photographs were obtained in July, 1983, at the scale of 1:20.000 in each PSU's selected. In the second stage a grid (2,5 x 2,5 cm) was fixed on the aerial photographs. Based on PPS were selected the Second Sampling Units (SSU's). In each SSU's selected was fixed a grid (0,5 x 0,5 cm). Based on PPS were selected the Tertiary Sampling Units (TSU's). In the third stage (ground level), the timber volume was obtained in each TSU's. The total timber volume was expanded for the Mato Grosso do Sul state through a statistical procedure taking into account all the three stages.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a madeira vem sendo utilizada de forma mais intensa como fonte energética no Brasil, em face da substituição dos derivados de petróleo e do consumo de carvão vegetal pelas siderúrgicas e pelas indústrias de papel e celulose, de cimento, de olarias, etc.

O Brasil tem uma área reflorestada com cerca de 4,5 milhões de hectares plantados com Eucaliptus que, só em álcool etílico, poderia formar 16 bilhões e 650 milhões de litros, suficientes para atender todo percentual de mistura à gasolina.

Vários métodos convencionais de inventário florestal usando amostragem sistemática ou aleatória no campo têm sido aplicados, frequentemente, na avaliação volumétrica da madeira dos reflorestamentos. Entretanto, estes métodos não têm considerado a homogeneidade "stand" do plantio, face à dificuldade de obtenção desta informação a baixo custo e em pouco tempo. Os trabalhos de Hernandez Filho et alii (1980), Shimabukuro et alii (1981), e Hernandez Filho et alii (1981) demonstraram a eficiência das imagens do satélite Landsat na avaliação do "stand" e idade das áreas reflorestadas no Estado de Mato Grosso do Sul.

Este trabalho mostra uma metodologia para avaliação do volume de madeira de áreas reflorestadas no Estado do Mato Grosso do Sul, utilizando um sistema de amostragem em múltiplos estágios (imagens orbitais, fotografias aéreas e dados de campo) com probabilidade variável. Este método de inventário florestal tem a finalidade de gerar informações regionais, visando principalmente levantar dados para um planejamento nacional de locação de recursos e fornecer subsídios para orientar o estabelecimento de uma política de um país.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde ao Estado do Mato Grosso do Sul, situado na Região Centro-Oeste do Brasil (Figura 1). As áreas reflorestadas es

tão localizadas no Distrito Florestal deste Estado, distribuídas ao longo do eixo Campo Grande - Três Lagoas (BR-262 e Estrada de Ferro Noroeste do Brasil) e nos municípios de Campo Grande, Ribas do Rio Pardo, Águas Clara, Três Lagoas, Sidrolândia, Brasilândia, Caarapó, Nova Andradina e Aparecida do Taboado. Cerca de 80 empresas reflorestam a região com os gêneros Pinus e Eucalyptus.

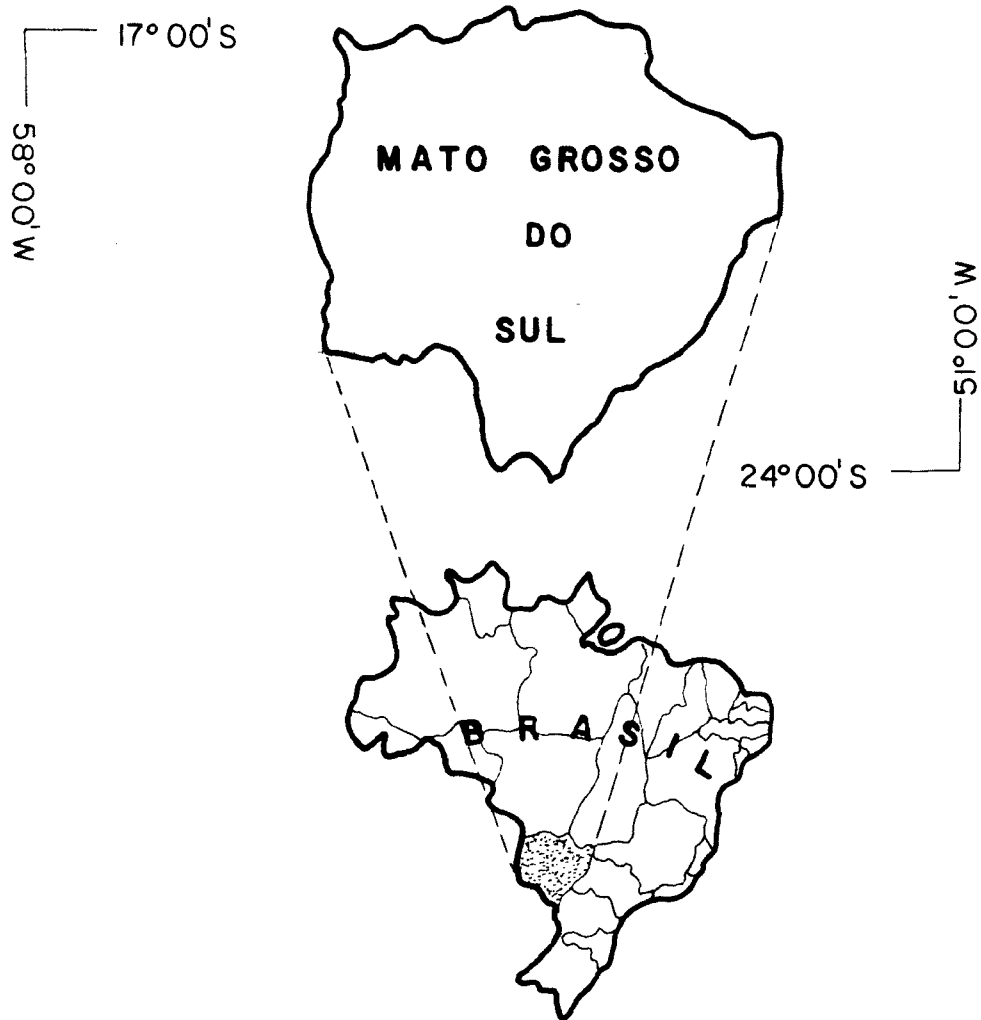


Fig. 1 - Localização da área de estudo

As órbitas/pontos do satélite Landsat que abrangem as áreas de ocorrência de reflorestamento, segundo o mapa índice de cobertura do Landsat 4 e 5, são: 223/74 e 75 e 224/74 e 75 (Figura 2).

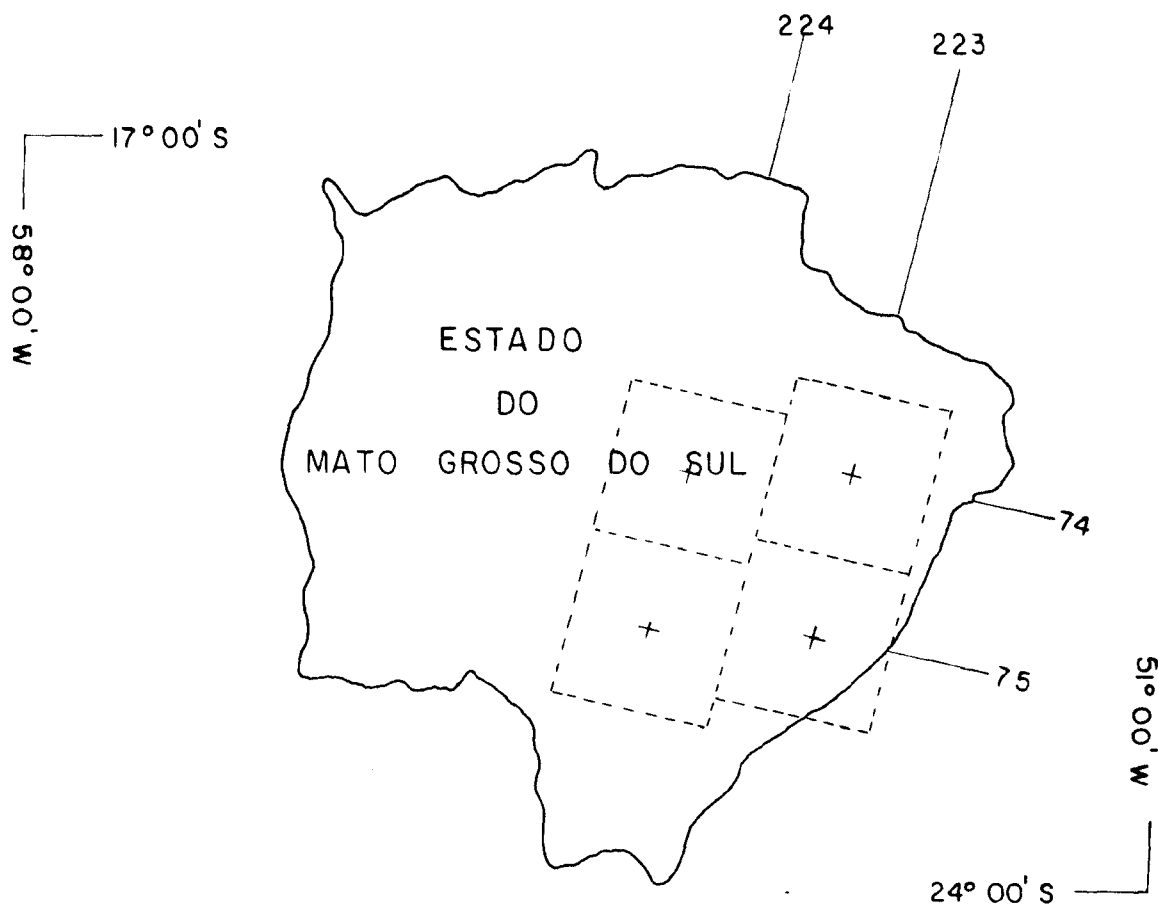


Fig. 2 - Imagens Landsat que cobrem a área de estudo

3. MATERIAL E MÉTODOS

O inventário de volume de madeira em múltiplo estágio utiliza simultaneamente as imagens orbitais, fotografias aéreas e dados de campo. Esta técnica, demonstrada por Langley (1975), como um método confiável de obtenção de estimadores de volume de madeira é baseada na integração do sistema de inventário em múltiplo estágio e na amostragem com probabilidade variável.

3.1 - IMAGEM LANDSAT

Foram utilizadas as imagens fotográficas do satélite Landsat 2 e 4 (L2 e L4), dos canais 5 e 7 na escala 1:250.000, conforme é mostrado na Tabela 1.

TABELA 1

IMAGENS FOTOGRÁFICAS UTILIZADAS NO ESTUDO

| NÚMERO DE IDENTIFICAÇÃO | ÓRBITA/PONTO | SÉRIE DO SATÉLITE | DATA DA AQUISIÇÃO |
|-------------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| 281128-124153 | 239/74 | L2 | 08/05/81 |
| 281128-124218 | 239/75 | L2 | 09/05/81 |
| 281129-124737 | 240/74 | L2 | 09/05/81 |
| 281129-124802 | 240/75 | L2 | 09/05/81 |
| 281094-125350 | 241/74 | L2 | 04/04/81 |
| 483214-125748 | 223/74 | L4 | 02/09/83 |
| 483269-130405 | 224/74 | L4 | 26/09/83 |
| 483269-130429 | 224/75 | L4 | 26/09/83 |

3.2 - FOTOGRAFIAS AÉREAS

Foram utilizadas as fotografias aéreas infravermelhas coloridas (filme Kodak Aerochrome nº 2443), na forma de transparências, na escala de 1:20.000, correspondentes a segmentos amostrais, obtidas em julho de 1983 pela aeronave Bandeirantes pertencente ao CNPq/INPE.

3.3 - DADOS AUXILIARES

Foram utilizados os resultados de mapeamento das propriedades rurais que contêm as áreas reflorestadas no Estado de Mato Grosso do Sul (Hernandez Filho et alii, 1982), representados na base cartográfica de 1:100.000, (D.S.G., 1973), bem como os mapas de localização dos projetos de reflorestamento (divisão talhonar) pertencentes às empresas reflorestadoras.

3.4 - AMOSTRAGEM MÚLTIPLO ESTÁGIO

No sistema de amostragem utilizado com probabilidade variável de ocorrência de um evento em três estágios (Figura 3), as unidades amostrais foram selecionadas com base na probabilidade proporcional à grandeza. Neste estudo as grandezas consideradas foram as estimativas da área no primeiro estágio e da densidade de copa no segundo e terceiro estágio.

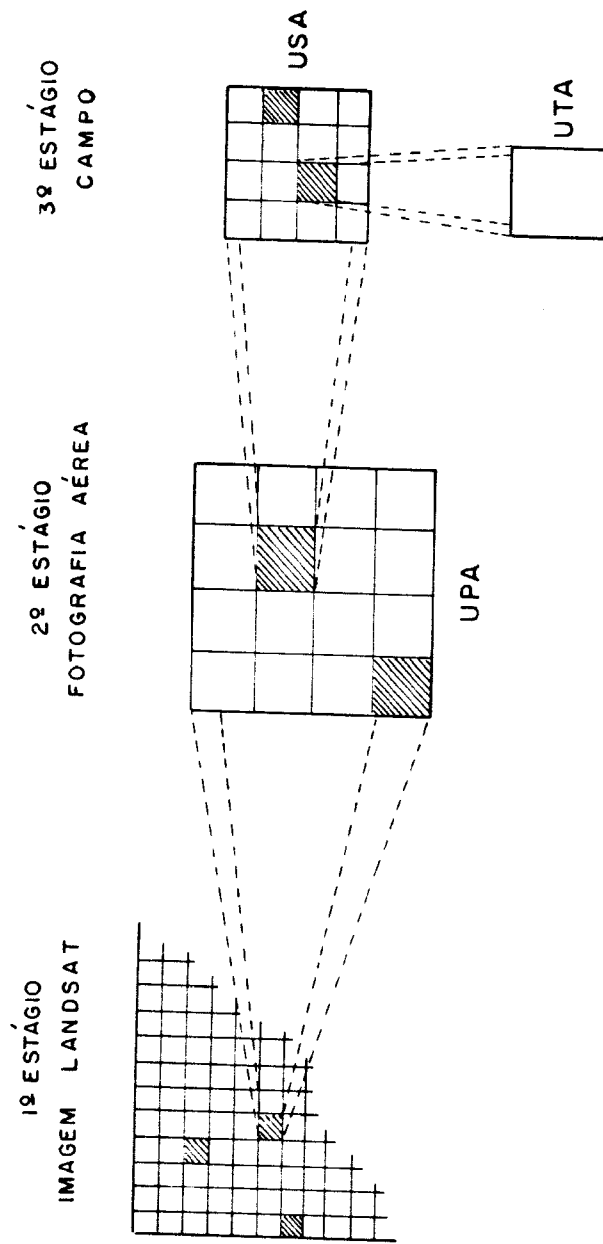


Fig. 3 - Esquema do sistema de amostragem em múltiplo estágio para inventário florestal.

A fórmula geral para um estimador de volume de madeira para os três estágios, proposta por Langley (1975), é:

$$V_t = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{P_i n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{P_{ij} t_{ij}} \sum_{k=1}^{t_{ij}} \frac{V_{ijk}}{P_{ijk}}, \quad (1)$$

onde,

- V_t = é o volume total estimado de madeira da população;
- V_{ijk} = é o volume medido nas unidades selecionadas para o terceiro estágio;
- P_i = é a probabilidade de seleção de i-ésima unidade do primeiro estágio;
- P_{ij} = é a probabilidade de seleção de j-ésima unidade do segundo estágio, dada a i-ésima unidade selecionada no primeiro estágio;
- P_{ijk} = é a probabilidade de seleção de k-ésima unidade do terceiro estágio, dadas as i-ésima e j-ésima unidades selecionadas no primeiro e segundo estágios, respectivamente;
- m, n_i, t_{ij} = são os números de amostras no primeiro, segundo e terceiro estágios, respectivamente.

Para calcular as probabilidades dos três estágios, utilizam-se as seguintes fórmulas:

Para o primeiro estágio

$$P_i = x_i / \sum_{i=1}^M x_i, \quad (2)$$

onde:

- M = número total de UPAs,
- x_i = variável auxiliar.

Para o segundo estágio

$$P_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^{N_i} x_{ij}, \quad (3)$$

onde:

- N_i = número total de USAs,
- X_{ij} = variável auxiliar.

Para o terceiro estágio

$$P_{ijk} = x_{ijk} / \sum_{i=1}^{T_{ij}} x_{ijk}, \quad (4)$$

onde:

T_{ij} = número total de UTAs,

x_{ijk} = variável auxiliar

O estimador de variância do método pode ser obtido dos estimadores do primeiro estágio (Langley, 1975) usando a seguinte equação:

$$\text{Var}(V_t) = \frac{1}{m(m-1)} \left[\sum_{i=1}^m \frac{V_i^2}{P_i^2} - m V_t^2 \right], \quad (5)$$

onde:

V_i = é o volume estimado de madeira na i -ésima unidade do primeiro estágio, e os outros termos foram definidos anteriormente.

As unidades amostrais do primeiro, segundo e terceiro estágios são denominadas Unidade Primária de Amostragem (UPA), Unidade Secundária de Amostragem (USA) e Unidade Terciária de Amostragem (UTA), respectivamente.

3.5 - PRIMEIRO ESTÁGIO

Os resultados de classificação das áreas reflorestadas em cada propriedade rural, apresentados na base cartográfica 1:100.000 (Hernandez Filho et alii, 1982), foram atualizados com base nas imagens fotográficas dos canais 5 e 7 do satélite Landsat 2 do ano de 1981. Posteriormente, estes resultados foram atualizados nas imagens do Landsat 4, do ano de 1983, e complementados com informações de escritório e de campo. Através da interpretação visual, foram classificadas as áreas reflorestadas levando em consideração seu gênero e idade. Uma grade de 1,0 x 1,0 cm (2,5 x 2,5 km) foi ajustada sobre a imagem definido as Unidades Primárias de Amostras (UPAs). Conforme o sistema de amostragem "Probability Proportional to Size" (PPS) proposto por Langley (1975), foram estimadas as áreas (x_i) em cada UPA e determinada a sua soma acumulada ($\sum x_i$). As áreas reflorestadas foram agrupadas em segmentos cujo tamanho foi 2,5 x 12,5 km, com o objetivo de aerofotografá-los após a seleção aleatória por PPS; o número de UPAs selecionadas foi de 2,5% do total.

3.6 - SEGUNDO ESTÁGIO

Cada segmento definido no primeiro estágio foi aerofotografado na escala de 1:20.000, com filme 2443 IR, e o produto utilizado foi apresentado na forma de transparências positivas. Cada UPA foi demarcada nas transparências das fotografias aéreas e dividida em 25 Unidades Secundárias de Amostragem (USAs), correspondentes ao tamanho de 2,5 x 2,5 cm (0,5 x 0,5 km). Com o auxílio de uma grade de pontos em cada USA, foram estimadas as densidades de copa (x_{ij}) e determinado o valor da soma acumulada ($\sum x_{ij}$). As USAs foram selecionadas de forma aleatória por PPS.

3.7 - TERCEIRO ESTÁGIO

Cada USA selecionada foi dividida em 25 Unidades Terciárias de Amostragem (UTAs), com o tamanho de 0,5 x 0,5 cm (100 x 100 m). Após as UTAs terem sido ampliadas 4 vezes, procedeu-se às estimativas de densidade de copa

(x_{ijk}) utilizando uma grade de pontos e determinando o valor de sua soma acumulada ($\sum x_{ijk}$). Pelo método PPS foram selecionadas as UTAs, onde foram feitas as medidas de campo. A média do volume por hectare foi estimado com o método de Amostragem em Linha Vertical do "Strand" (Husch et alii, 1971 e Loetsch et alii, 1973), utilizando a seguinte fórmula:

$$V = \sum_{j=1}^N \frac{1}{10} \cdot d_j^2 \cdot F, \quad (6)$$

onde:

V = o volume médio estimado em m³/ha,

d_j = diâmetro à altura do peito em cm,

F = fator de forma,

N = número de árvores escolhidas para medir o dap.

O volume de madeira de cada UTA foi calculado e o volume total de madeira de classe foi determinado através da Equação 1, que leva em consideração os três estágios de amostragem.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No primeiro estágio, as áreas reflorestadas foram interpretadas e classificadas visualmente em função do gênero e da idade, em cada propriedade rural, conforme pode ser visto na Tabela 2.

TABELA 2

CLASSES DO PRIMEIRO ESTÁGIO

| CLASSE | FAIXA DE IDADE (ANOS) |
|--------------|-----------------------|
| Eucalyptus-A | 0-3 |
| Eucalyptus-1 | 3-5 |
| Eucalyptus-2 | 5-7 |
| Eucalyptus-3 | > 7 |
| Pinus - A | 0-3 |
| Pinus - 1 | 3-5 |
| Pinus - 2 | 5-7 |
| Pinus - 3 | > 7 |

Para as classes Eucalyptus-A e Pinus-A foram realizadas estimativas de área em hectares porque, via de regra, não se realiza inventário do volume de madeira para os reflorestamentos com menos de 3 anos de idade. A Tabela 3 mostra o número de UPAs e os segmentos amostrais do primeiro estágio.

Foram amostradas 35 UPAs (2,5%) do total de 1426, o que representa um número razoável para um inventário florestal regional.

TABELA 3
NÚMERO DE UPAs E SEGMENTOS AMOSTRAIS
DO PRIMEIRO ESTÁGIO

| CLASSE | NÚMERO DE UPAs | NÚMERO DE UPAs SELECIONADAS | NÚMERO DE SEGMENTOS AMOSTRAIS |
|--------------|----------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Eucalyptus-1 | 402 | 10 | 7 |
| Eucalyptus-2 | 458 | 11 | 8 |
| Eucalyptus-3 | 402 | 8 | 6 |
| Pinus - 1 | 103 | 2 | 1 |
| Pinus - 2 | 38 | 2 | 1 |
| Pinus - 3 | 23 | 2 | 1 |
| TOTAL | 1.426 | 35 | 24 |

Verifica-se que em alguns segmentos foram selecionadas mais de uma UPA, com a finalidade de minimizar os deslocamentos durante o trabalho de campo.

Em cada UPA foram selecionadas 2 USAs para as classes de Eucalyptus e Pinus possibilitando uma população de 70 USAs. Em cada USA foram selecionadas 3 e 2 UTAs para as classes com Eucalyptus e Pinus, respectivamente, o que permitiu a seleção de 198 UTAs avaliadas no campo.

O volume total estimado e o erro de amostragem por classe é mostrado na Tabela 4.

O erro padrão das classes foi estimado e as classes de Eucalyptus apresentaram erro de amostragem em torno de 10%, o que é um resultado razoável para o inventário florestal regional. As classes Pinus apresentaram um erro de amostragem mais alto, isto implicaria a avaliação de mais unidades amostrais para que a estimativa do volume apresentasse resultados semelhantes aos das classes de Eucalyptus.

O volume médio por classe é apresentado na Tabela 5.

TABELA 4

VOLUME TOTAL ESTIMADO E ERRO PADRÃO
E DE AMOSTRAGEM DAS CLASSES

| CLASSE | VOLUME TOTAL (m ³) | ERRO PADRÃO (*) (m ³) | ERRO DE AMOSTRAGEM(%) |
|--------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| Eucalyptus-1 | 8.371.833,80 | + 1.001.303,10 | 11,96 |
| Eucalyptus-2 | 11.525.722,00 | + 1.277.339,70 | 11,08 |
| Eucalyptus-3 | 8.561.627,30 | + 705.465,90 | 8,24 |
| Pinus - 1 | 548.180,00 | + 188.093,50 | 34,31 |
| Pinus - 2 | 940.382,00 | + 291.231,50 | 30,97 |
| Pinus - 3 | 434.205,00 | + 88.461,20 | 20,37 |

* variação de um desvio padrão para a estimativa do volume.

TABELA 5

VOLUME MÉDIO (Ha) DAS CLASSES

| CLASSE | ÁREA (ha) | VOLUME MÉDIO (m ³ /ha) |
|--------------|--------------|--------------------------------------|
| Eucalyptus-1 | 110.737,50 | 75,60 |
| Eucalyptus-2 | 117.256,25 | 98,30 |
| Eucalyptus-3 | 112.687,50 | 75,98 |
| Pinus 1 | 21.231,25 | 25,82 |
| Pinus 2 | 8.506,50 | 110,55 |
| Pinus 3 | 3.918,75 | 110,80 |

Verifica-se que a classe Eucalyptus-1 apresenta um maior volume médio do que a classe Pinus-1, o que vem a confirmar as informações de que na área de estudo existe um maior desenvolvimento dos reflorestamentos com o gênero Eucalyptus spp em sua fase mais jovem. As classes Pinus 2 e Pinus 3 apresentam um maior rendimento por hectare em relação às classes Eucalyptus

tus-2 e Eucalyptus-3, não só pelo fato de os reflorestamentos mais adultos com o gênero *Pinus* spp apresentarem maior adaptabilidade à região, como também pela maior susceptibilidade dos reflorestamentos com o gênero *Eucalyptus* ao ataque de formigas.

O total de áreas reflorestadas em hectares é apresentado na Tabela 6.

TABELA 6
TOTAL DE ÁREAS REFLORESTADAS EM
HECTARES NA ÁREA DE ESTUDO

| CLASSE | ÁREA EM HA (HECTARES) | |
|-------------------|--------------------------|-------------------------------|
| | ESTIMADA NAS UPAs (1) | ESTIMADA NO MAPEAMENTO (2) |
| Eucalyptus - A | 92.821,25 | 14.475,00 |
| Eucalyptus(1+2+3) | 223.534,50 | 340.680,75 |
| Pinus - A | 18.350,00 | 33.656,50 |
| Pinus (1+2+3) | 28.025,00 | 53.006,50 |
| TOTAL | 362.740,75 | 408.162,25 |

(1) A estimativa da área (ha) das classes desconsiderou as áreas reflorestadas alteradas por vários fatores, tais como geada, fogo, formiga, etc.

(2) A estimativa da área (ha) das classes não levou em consideração os fatores considerados acima.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base na utilização simultânea de dados do Landsat, de fotografias aéreas infravermelhas coloridas (1:20.000) e de dados de campo, foi possível estimar o volume de madeira das áreas reflorestadas de Mato Grosso do Sul, através do emprego de um sistema de amostragem com probabilidade de variável de ocorrência de eventos, conforme a proposição de Langley (1975).

No primeiro estágio (imagens Landsat) os reflorestamentos foram classificados em classes Eucalyptus-1 (3 - 5 anos), Eucalyptus-2 (5 - 7 anos), Eucalyptus-3 (> 7 anos), Pinus-1 (3 anos), Pinus-2 (5 - 7 anos), Pinus-3 (> 7 anos).

No segundo estágio (fotografias aéreas) foi possível estimar a densidade de copa das árvores, pois elas apresentam uma boa relação com o volume de madeira dos reflorestamentos.

No terceiro estágio (campo) o modelo para estimar o volume de madeira de reflorestamento apresentou-se bastante eficiente e rápido na obtenção das medidas dendrométricas.

O volume total e médio das classes foram Eucalyptus-1 (8.371.833,80 m³ e 75,60 m³/ha), Eucalyptus-2 (11.525.722,00 m³ e 98,30 m³/ha), Eucalyptus-3 (8.561.627,30 m³ e 75,98 m³/ha), Pinus-1 (548.180,00 m³ e 25,82 m³/ha), Pinus-2 (940.382 m³ e 110,55 m³/ha), Pinus-3 (434.205,00 m³ e 110,80 m³/ha).

Os resultados alcançados são bastantes animadores; porém, se a estratificação fosse em intervalos de um ano de idade apresentaria, com segurança, uma menor variância e erro de amostragem no sistema de inventário do volume de madeira.

A utilização de fotos aéreas com escala maior (1:10.000) nos segmentos amostrais é recomendada, em virtude da possibilidade de estimar o número de árvores por unidade amostral e, assim, estabelecer uma relação maior com os dados do volume de madeira.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DIRETORIA DO SERVIÇO GEOGRÁFICO (D.S.G.) *Carta do Brasil - escala 1:100.000*. Rio de Janeiro, 1973.

HERNANDEZ FILHO, P.; SHIMABUKURO, Y.E.; MEDEIROS, J.S.; SANTANA, C.C.; ALVES, E.C.M. *Relatório das atividades do Projeto IBDF/INPE (sub-projeto Reflorestamento) durante o ano de 1979*. São José dos Campos, INPE, Jan. 1980 (INPE-1664-RPE/104).

HERNANDEZ FILHO, P.; SHIMABUKURO, Y.E.; MEDEIROS, J.S.; ASSIS, O.R. DE. *Relatório das atividades do projeto IBDF/INPE (sub-projeto reflorestamento) durante o ano de 1981*. São José dos Campos, INPE, jun. 1982. (INPE-2434-RTR/104).

HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEERS, T.W.. *Forest mensuration*. 2 ed. New York, John Wiley, 1971.

LANGLEY, P.G. *Multistage variable probability sampling: theory and use in estimating timber resources from space and aircraft photography*. Berkely, CA. Ph. D. Dissertation, University of California, 1975.

LOETSCH, F.; Zöher, F.; HALLER, K.E. *Forest inventory*. München BLV Verlagsgesellschaft mbh, 1973. V."

SHIMABUKURO, Y.E.; HERNANDEZ FILHO, P.; MEDEIROS, J.S.; ASSIS, O.R. DE. *Relatório das atividades do Projeto IBDF/INPE (sub-projeto Reflorestamento) durante o ano de 1980*. São José dos Campos, INPE, Jul. 1981, (INPE-2187-RTR/001).