

Estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta primária no Município de Paragominas - Pará, através de dados orbitais

Maria de Nazaré Martins Maciel¹
Patrícia Cunha de Oliveira Bastos¹
Orlando dos Santos Watrin²

¹Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA/ ICIBE
Caixa Postal 917 - 66077-530 - Belém - PA, Brasil
nazare.maciel@ufra.edu.br
pcobastos@bol.com.br

²Embrapa Amazônia Oriental - EMBRAPA/ CPATU
Caixa Postal 48 - 66095-100 - Belém - PA, Brasil
watrin@cpatu.embrapa.br

Abstract. The objective of this work was to analyze structural parameters of a primary tropical forest in the municipality of Paragominas, Pará State, correlating field data to satellite obtained from the ETM+/Landsat-7. Floristic composition and structure of the primary forest were characterized using the biometric variables: tree density, basal area, wood biomass, stem volume and tree species diversity, considering individuals > 10 cm dbh. Considering the integration of the ETM+/Landsat-7 image and the field data, statistical analyses were performed to correlate the degree of linear dependency between biometric and digital variables obtained from the Normalized Difference of Vegetation Index (NDVI) and reflectance of the bands ETM 3, ETM 4 and ETM 5. Stepwise regression analysis was performed to determine from those digital variables that best explain each biometric variable.

Palavras-chave: forest structure, satellite data, Normalized Difference of Vegetation Index, reflectance estrutura da floresta, dados orbitais, Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, reflectância.

1. Introdução

A degradação do espaço, no contexto amazônico, vem sendo motivo de preocupação de pesquisadores, entidades de pesquisa e governos, principalmente pela intensificação do processo de ocupação e exploração de seus recursos naturais verificados nas últimas décadas, sem o devido conhecimento dos ecossistemas da região. Tais preocupações se devem ao fato de que a Amazônia brasileira se destaca por possuir a maior floresta tropical intacta do planeta (Skole et al., 1994), e abriga mais da metade das espécies vegetais do mundo (Moran et al., 1994).

Neste ecossistema, as espécies interagem, formando uma estrutura ecológica dinamicamente complexa, que precisa ser conhecida em detalhe, para permitir a elaboração e aplicação correta dos planos de manejo silvicultural, proporcionando o aproveitamento racional dos recursos florestais (Carvalho, 1982).

Entretanto, devido à sua dimensão, à dificuldade de acesso e à necessidade de análise periódica, o emprego de técnicas convencionais de levantamento da vegetação na região amazônica, muitas vezes, torna-se proibitivo, ou dificultoso. Assim, torna-se necessário o uso do sensoriamento remoto, a partir de sensores orbitais, como ferramenta adequada nas atividades de detecção e avaliação dos recursos naturais desta região (Maciel, 2002).

Neste sentido, tem-se presenciado nas duas últimas décadas um vertiginoso avanço de sistemas computacionais, que propiciaram o desenvolvimento e refinamento de poderosos

conjuntos instrumentais voltados ao mapeamento, análise e representação de fenômenos do mundo real. Esse conjunto de tecnologias, conhecido genericamente como geoprocessamento, compreende, dentre outras coisas, o desenvolvimento e uso de produtos e técnicas de sensoriamento remoto e de sistemas de informações geográficas.

Assim sendo, o presente trabalho tem como objetivo estimar parâmetros estruturais de uma floresta primária em uma área no município de Paragominas, Estado do Pará, relacionando dados biométricos (campo), com dados orbitais obtidos pelas imagens Landsat-7.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na fazenda Rio Capim, pertencente a Cikel Brasil Verde S/A, localizada no município de Paragominas, Estado do Pará, entre as coordenadas geográficas 03^o30' e 03^o45' de latitude Sul e 48^o30' e 48^o45' de longitude Oeste.

O clima da região, onde está inserida a área de estudo segundo a classificação de Köppen, é do tipo “Am” (tropical chuvoso, com chuvas de monção). A área apresenta uma topografia que vai de plana a suavemente ondulada, com altitude média de 20m em relação ao nível do mar. Os principais solos são os Latossolos Amarelos; Argissolos Amarelos; Plintossolos; Gleissolos; e Neossolos (Silva, 1997). Os solos apresentam fertilidade muito baixa, condicionados pela baixa reserva de nutrientes essenciais a diversas culturas, principalmente cálcio, magnésio, potássio, fósforo e nitrogênio, além de alta saturação por alumínio. Segundo IBGE (1992), os seguintes ambientes fitoecológicos são definidos na área de estudo: Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme, Floresta Ombrófila Aberta Mista de Cipó e Palmeira; e Floresta Ombrófila Aluvial.

2.2 Produtos e equipamentos utilizados

Foram utilizadas imagens de satélite Landsat-7 bandas 3, 4 e 5, sensor ETM+, órbita-ponto 223-063, adquirida em 27/08/2002 e cartas topográficas do DSG (Diretoria de Serviço Geográfico) SA-22-Z-D-V e SA-22-Z-D-II em escala de 1:100.000, objetivando principalmente dar suporte cartográfico às informações obtidas a partir das imagens digitais.

Para as etapas de pré-processamento e processamento dos dados digitais, foi empregado o programa *Environment for Visualizing Images* (ENVI 3.2).

Para o auxílio no deslocamento em campo, bem como na alocação adequada dos pontos de amostragem na imagem georreferenciada, foi utilizado o *Global Positioning System* (GPS), instrumento que fornece a localização por coordenadas geográficas.

Visando o georreferenciamento da imagem, foram coletadas as posições geográficas de pontos de controle, através de GPS, procurando-se coletar pontos de fácil identificação na imagem e que a cobrissem por completo.

2.3 Pré-processamento de imagens

Inicialmente foi feito o georreferenciamento da imagem, e em seguida procedeu-se a conversão dos números digitais (DN) para reflectância através da metodologia proposta por Markham e Barker (1986). A conversão dos DN para reflectância minimiza a variabilidade provocada por diferentes condições de iluminação no comportamento espectral dos alvos e permite medições mais absolutas do alvo (Bentz, 1990).

2.4 Processamento de imagens

A fim de promover a melhor caracterização das formações florestais da área de estudo, foi empregado o índice de vegetação NDVI, que é dado pela seguinte fórmula:

$$NDVI = \left(\frac{IVP - VM}{IVP + VM} \right)$$

onde,

IVP = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo;

VM = reflectância na banda referente ao vermelho;

Neste trabalho, para a obtenção da imagem NDVI, foram empregadas as bandas ETM+ 3 (vermelho) e ETM+ 4 (infravermelho próximo).

2.5. Obtenção dos valores digitais

As unidades de amostra de campo foram sobrepostas às imagens originais e sintéticas, sendo então extraídos os valores digitais correspondentes às mesmas. As unidades amostrais também foram sobrepostas às imagens de reflectância e imagens NDVI, onde, de maneira análoga ao procedimento anterior, foram extraídos os valores digitais médios dos “pixels” correspondentes a cada uma das unidades amostrais de campo de 50 x 50 m.

2.6 Procedimento estatístico

Visando avaliar a capacidade de utilização de imagens de satélite para a caracterização quantitativa da floresta, procurou-se estabelecer a relação entre os dados de campo e os valores extraídos das imagens, empregando os procedimentos estatísticos descritos a seguir.

Inicialmente procedeu-se uma análise de correlação entre as variáveis biométricas e digitais, a fim de determinar o grau de dependência linear entre elas, empregando-se função linear e exponencial.

Os dados de campo foram relacionados às imagens através de modelo de regressão, onde, as variáveis densidade, área basal, biomassa, volume e diversidade foram consideradas variáveis dependentes e os valores digitais extraídos das imagens reflectância, índice de vegetação e proporção correspondentes às unidades amostrais, considerados variáveis independentes.

Visando avaliar a utilização conjunta dos dados oriundos de todas as imagens geradas, foram efetuadas análises de regressão múltipla. Na determinação da variável ou variáveis que melhor expliquem a variação em y, foi empregado o método de regressão *Stepwise* e, posteriormente, procedeu-se à análise de resíduos. As análises foram feitas utilizando-se o pacote estatístico STATISTICA (Statsoft, 2001).

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização espectral da floresta primária

A **Figura 1** mostra os valores médios, máximos e mínimos de reflectância nas bandas ETM+ 3, 4 e 5, referentes as 36 unidades amostrais inventariadas. De uma forma geral, observa-se, para o conjunto de imagens, um comportamento espectral típico de coberturas vegetais, com respostas baixas na região do visível (banda ETM+ 3), apresentando um valor de reflectância médio de

0,1708, aumentando no infravermelho próximo (banda ETM+ 4), com reflectância média de 0,5578, e tornando a diminuir na banda do infravermelho médio (banda ETM+ 5), com reflectância média de 0,2011.

Foi observada uma grande amplitude de valores de reflectância dentro das unidades amostrais, especialmente na banda ETM+ 4, com valores variando entre 0,3237 e 0,7968 (**Tabela 1**). Isso é devido, potencialmente, à heterogeneidade florística e estrutural existente entre as unidades de amostra. Segundo Kumar (1972), apesar dos níveis de reflectância no infravermelho próximo serem altos para a vegetação, de um modo geral, há variações destas respostas, de espécie para espécie, pois a reflectância espectral das folhas nesta região é o resultado da interação da radiação incidente com a estrutura interna das folhas. Além disso, as variações na reflectância de um dossel dependerão também da quantidade de folhas dentro do mesmo, de suas orientações espaciais e de sua arquitetura.

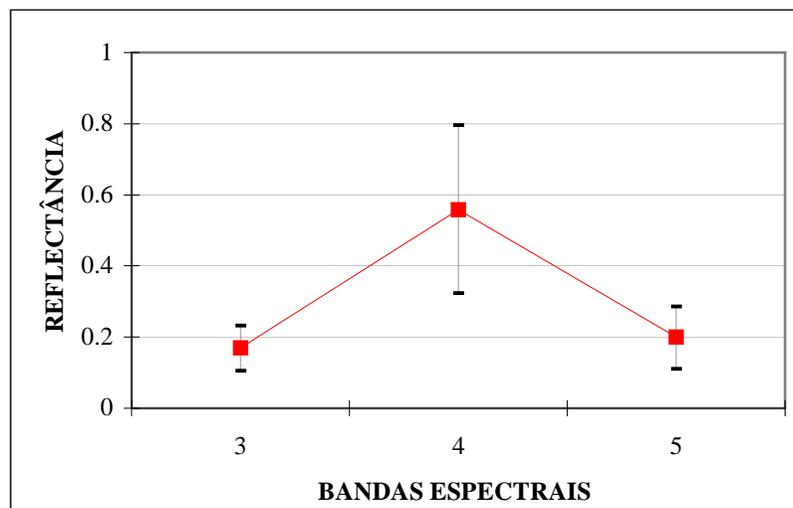


Figura 1- Distribuição dos valores médios, máximos e mínimos de reflectância nas bandas ETM+ 3, 4 e 5 referentes às 36 unidades amostrais em uma floresta primária, em Paragominas - Pará.

Na análise dos dados oriundos da imagem NDVI (**Tabela 1**), observou-se um valor médio de 0,37 referente às unidades de amostra. Verificou-se que os maiores valores de NDVI foram encontrados nas unidades amostrais 10, 22 e 9 (**Tabela 1**), sendo estas caracterizadas pelos mais baixos valores de biomassa, volume e área basal. Observou-se também que os mais baixos valores de NDVI encontram-se nas unidades amostrais 6, 15 e 19, que apresentam altos valores de biomassa, volume e área basal. Bernardes (1998) e Maciel (2002) também observaram que em áreas florestais há um decréscimo no valor de índice de vegetação, com o aumento da biomassa, volume e área basal.

Araújo (1999) encontrou, para floresta secundária, um valor de índice de vegetação de 0,47 e verificou que a partir de um determinado estágio de crescimento, esse valor tende a diminuir, chegando a um valor médio para floresta madura (primária) de 0,36, mais baixo que o da floresta em construção (secundária), apesar da maior biomassa. Os resultados encontrados devem-se a grande proporção de sombra na floresta primária, e também à sua menor capacidade

fotosintética, ocasionando menor resposta espectral dessa vegetação primária em relação às áreas em sucessão secundária.

Tabela 1 - Distribuição dos valores de reflectância nas bandas 3, 4 e 5 do sensor ETM+, e valores de NDVI, das 36 unidades amostrais levantadas em uma floresta primária, no município de Paragominas - Pará.

UNIDADES DE AMOSTRA	REFLECTÂNCIA			NDVI
	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	
1	0,1568	0,5760	0,2578	0,2931
2	0,2071	0,5935	0,1943	0,4261
3	0,1819	0,6412	0,2540	0,3230
4	0,2323	0,5967	0,2136	0,3804
5	0,1991	0,6269	0,2867	0,2732
6	0,1335	0,3237	0,1655	0,2162
7	0,1602	0,5378	0,1655	0,4305
8	0,1739	0,5545	0,1943	0,3980
9	0,1876	0,6659	0,1751	0,5004
10	0,1659	0,5101	0,1105	0,6319
11	0,1568	0,5330	0,1943	0,3734
12	0,1320	0,4367	0,1270	0,4689
13	0,2312	0,6863	0,2226	0,4168
14	0,1634	0,4693	0,2328	0,2814
15	0,1140	0,5091	0,2424	0,2570
16	0,1728	0,5656	0,1655	0,4584
17	0,1056	0,4309	0,1799	0,3036
18	0,1510	0,4813	0,1751	0,3755
19	0,1714	0,4528	0,2059	0,2679
20	0,1905	0,5998	0,1799	0,4559
21	0,1850	0,7009	0,2328	0,3842
22	0,1953	0,7113	0,1847	0,5063
23	0,1659	0,4661	0,1655	0,3884
24	0,1634	0,6264	0,2072	0,4118
25	0,1659	0,5349	0,1828	0,3946
26	0,1697	0,5083	0,1943	0,3347
27	0,1240	0,4743	0,1886	0,3386
28	0,2304	0,6142	0,2040	0,4050
29	0,1653	0,5945	0,2650	0,2841
30	0,1650	0,5569	0,2290	0,2881
31	0,1888	0,5569	0,2521	0,2794
32	0,2105	0,7968	0,2723	0,3967
33	0,1396	0,5342	0,1366	0,4977
34	0,1703	0,5394	0,1843	0,3989
35	0,1590	0,4821	0,1751	0,3700
36	0,1648	0,5927	0,2232	0,3609
\bar{x}	0,1708	0,5578	0,2011	0,3770
s	0,02998	0,09219	0,04065	0,08627

3.3 Análise estatística

Inicialmente são apresentados os resultados obtidos pela análise de correlação entre as variáveis independentes (variáveis digitais) e as variáveis dependentes (variáveis biométricas) obtidas com o emprego de função linear. Em seguida são apresentados os resultados oriundos da análise de

regressão com os modelos que melhor explicam a dependência entre as variáveis.

3.3.1 Análise de correlação entre variáveis

A matriz de correlação, relacionando as variáveis independentes (variáveis digitais) com as variáveis dependentes (variáveis biométricas), através de função linear (**Tabela 2**), possibilitou a determinação do grau de dependência linear entre essas variáveis.

Tabela 2 – Coeficientes de correlação entre variáveis biométricas e digitais obtidos através de função linear, para uma área de floresta primária em Paragominas - Pará.

	DEN	AB	Vol	Bio	Div	REF 3	REF 4	REF 5	NDVI
DEN	1								
AB	-0,1044198	1							
Vol	-0,1281203	0,99929	1						
Bio	-0,2073827	0,992987	0,995795	1					
Div	0,4033085	0,019172	0,013386	-0,0165	1				
REF 3	-0,1410716	-0,30249	-0,29999	-0,29367	-0,19781	1			
REF4	-0,1752329	-0,41598	-0,4164	-0,40821	-0,25257	0,702643	1		
REF 5	-0,2269978	0,534057	0,52865	0,530874	-0,24397	0,319087	0,477347	1	
NDVI	0,1109171	-0,95909	-0,95578	-0,95169	0,06575	0,239308	0,310593	-0,66022	1

DEN – densidade (n° ind/ ha); AB - área basal (m² / ha); BIO – biomassa (ton / ha); VOL – volume (m³ / ha); div – diversidade; REF3 – reflectância na banda ETM+ 3; REF4 – reflectância na banda ETM+ 4; REF5 – reflectância na banda ETM+ 5; NDVI – índice de vegetação por diferença normalizada.

Através da função linear, observam-se altas correlações negativas (inferiores a - 0,7) entre as variáveis biométricas AB, BIO e VOL e a variável digital NDVI, conforme pode-se verificar em destaque na **Tabela 2**. Esses resultados eram esperados uma vez que, anteriormente, já se evidenciou que as unidades amostrais com altos valores para essas variáveis biométricas, apresentavam também baixos valores de NDVI, como é o caso das unidades amostrais 6, 15 e 19 (**Tabela 3**). Por outro lado, os menores valores de área basal, biomassa e volume foram verificados nas unidades amostrais 10, 22 e 9, que apresentaram altos valores de NDVI.

Os resultados alcançados neste trabalho ratificam os evidenciados por outros autores para floresta primária na Amazônia. Bernardes (1998) encontrou correlações altas e negativas do índice de vegetação SAVI com biomassa (-0,82), bem como com área basal (-0,73). Araújo (1999), estudando a variável biomassa, também verificou alta correlação negativa desta com o índice de vegetação SAVI (-0,88). Maciel (2002), observou altas correlações negativas do índice de vegetação com biomassa (-0,83), área basal (-0,73) e volume (-0,85).

As variáveis biométricas densidade (DEN) e diversidade (DIV) não apresentaram fortes correlações com nenhuma variável digital estudada, mostrando a independência das mesmas. A análise da matriz de correlação mostrou ainda a alta correlação entre algumas das variáveis independentes, o que é devidamente esperado, dado o aspecto de redundância das informações, o mesmo acontecendo entre algumas variáveis dependentes.

3.3.2 Análise de regressão

Visando relacionar os dados de campo com a utilização conjunta dos dados oriundos das imagens geradas, efetuaram-se análises de regressão múltipla pelo método *Stepwise*, podendo-se assim,

determinar a variável ou variáveis independentes que melhor explicassem a variação de cada variável dependente. Ressaltam-se que, as variáveis densidade, área basal, biomassa, volume e diversidade foram consideradas variáveis dependentes e os valores digitais de reflectância e o índice de vegetação, correspondentes às unidades amostrais, foram considerados variáveis independentes.

Na **Tabela 3** são apresentados os resultados obtidos pela regressão *stepwise* para as variáveis dependentes de biomassa (BIO), volume (VOL) e área basal (AB), onde observando-se bons ajustes para as mesmas.

Tabela 3- Parâmetros dos Modelos de Regressão aplicados para as variáveis Biomassa (BIO), Volume (VOL) e Área Basal (AB) de uma floresta primária, no município de Paragominas-Pará.

VARIÁVEL DEPENDENTE	MODELO DE REGRESSÃO	R ² ajustado	F	S _{xy}
Biomassa (BIO)	1057,3239 - 1306,89.NDVI - 411,06.REF3	0,91	189,82**	58,30
Volume (VOL)	191,212 - 186,935.NDVI - 24,893.REF4	0,93	238,48**	12,59
Área basal (AB)	47,8029 - 46,7338.NDVI - 6,2234.REF4	0,93	238,48**	1,29

** Valor Altamente Significativo a 99% de Probabilidade.

Para a variável biomassa (BIO), o modelo ajustado foi capaz de explicar 91% da variação existente ($R^2 = 0,91$). Usando regressão linear simples, Araújo (1999) constatou que os dados de biomassa em uma floresta primária foram melhor explicados através do índice de vegetação SAVI, com $R^2 = 0,78$ e $F = 61,4$. Entretanto, estes valores foram inferiores aos encontrados neste trabalho, quando se ajustou um modelo de regressão múltipla (com duas variáveis), onde a regressão *stepwise* mostrou que o índice de vegetação NDVI foi o que melhor explicou a variação da biomassa observada. A introdução do atributo espectral reflectância da banda ETM+3 (REF3) pôde adicionar mais informações ao modelo, pois conforme apresentado no Anexo 1, seu coeficiente é significativo, estatisticamente.

Para a variável volume (VOL), o modelo ajustado foi capaz de explicar 93% ($R^2 = 0,93$) da variação existente, através das variáveis digitais NDVI e REF4, conforme apresentado na **Tabela 3**. No tocante, para a variável área basal (AB) obteve-se um bom ajuste ($R^2 = 0,93$) através das variáveis NDVI e REF4.

Para as variáveis dependentes densidade (DEN) e diversidade (DIV) não foi possível ajustar nenhum modelo de regressão, pois nenhuma variável digital estudada foi capaz de explicar a variação da densidade e diversidade observada em campo. Este comportamento era de se esperar, já que todas as variáveis digitais testadas apresentaram baixas correlações com estas variáveis biométricas de interesse neste trabalho.

4. Conclusões

- O índice de vegetação NDVI mostrou-se como bom discriminador, caracterizando bem a heterogeneidade da floresta primária em termos de biomassa, volume e área basal;
- Existe alta correlação negativa entre área basal, biomassa e volume e os valores de NDVI. As variáveis densidade e diversidade de espécies não apresentam forte correlação com nenhuma variável digital estudada, portanto através das variáveis digitais utilizadas não é possível estabelecer estimativas de densidade e diversidade através de modelos de

- regressão com o emprego de imagens do satélite ETM+/LANDSAT- 7;
- A estimativa de parâmetros biométricos, com emprego de imagens do satélite ETM+/LANDSAT- 7 associadas a dados de campo, apresenta-se satisfatória, mostrando que os valores obtidos a partir da análise das imagens orbitais propiciam a caracterização da floresta primária em termos de biomassa, volume e área basal;
 - A utilização da análise integrada de dados de campo e de dados orbitais, pode facilitar, sobretudo, uma análise de possíveis mudanças estruturais que porventura aconteçam nos processos de exploração e conservação de áreas de floresta primária;
 - O presente estudo reforça ainda mais o emprego das técnicas de sensoriamento remoto, principalmente em nível orbital, considerando que, atualmente, encontram-se em disponibilidade sensores com melhores resoluções espacial e espectral, que tornam possíveis avaliações qualitativa e quantitativa mais detalhadas da floresta amazônica.

5. Referências bibliográficas

- Araújo, L.S. **Análise da cobertura vegetal e de biomassa em áreas de contato floresta/savana a partir de dados TM/LANDSAT e JERS-1**. São José dos Campos. 129p. (INPE-7253-TDI/696). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) , Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.
- Bentz, C.R. **Avaliação da transformação radiométrica dos dados TM/Landsat-5 em reflectâncias**. São José dos Campos. 172 p. (INPE-5210-TDL/431). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1990.
- Bernardes, S. **Índices de vegetação e valores de proporção na caracterização de floresta tropical primária e estádios sucessionais na área de influência da Floresta Nacional do Tapajós - Estado do Pará**. São José dos Campos. 97 p. (INPE-6890-TDI/651). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.
- Carvalho, A. E. F. B. de. **Estrutura fitossociológica e pós-estratificação multidimensional de uma área na Flona do Tapajós - Pará**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, Belém. 173p. 1999.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatístico. Manuais técnicos em Geociências / **Manual Técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro. n. 1, 1992.
- Kumar, R. **Radiation from plants-reflection and emission: a review**. Lafayette, Purdue University, 1972. 88p.
- Maciel, M. de N. M. **Estimativa de Parâmetros Estruturais de uma Floresta Primária na Amazônia Oriental através de Dados Orbitais**. Curitiba, 2002. (Tese de Doutorado – Universidade Federal do Paraná, 2002).
- Markham, B.L.; Barker. J.L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. **EOSAT Landsat Technical Notes**. n. 1, 8 p., Ago. 1986.
- Moran, E. F.; Brondizio, E.; Mause, P.; Wu, Y. Integrating Amazonian Vegetation, Land-use, and satellite data. **BioScience**, v. 44, n.5, p.329-38. 1994.
- Silva, R. das C. **Contrinuição de levantamento de solo a caracterização dos sistemas naturais e ambientais na região de Paragominas – Estado do Pará**: Belém; Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, 1997. 107 p. (Dissertação de mestrado em Agronomia) – FCAP, 1997.
- Skole, D. L.; Chomentowskj, W. H.; Salas, W. A.; Nobre, A. D. Physical and human dimensions of deforestation in Amazonia. **BioScience**, v. 44, n. 5, p. 314-322, May,1994.
- Statsoft. Statistica. <<http://www.statsoft.com.br/statisti.htm>>. Mar. 2001.