

Modelagem Espacial do Desmatamento Amazônico

Ricardo Alexandrino Garcia - UFMG (alexandrinogarcia@gmail.com)

Britaldo Silveira Soares-Filho - UFMG (britaldossf@gmail.com)

Sueli Moro - UFMG (smoro@cedeplar.ufmg.br)

Resumo: O maior desafio em estabelecer uma função de desenvolvimento socioeconômico para um potencial de degradação ambiental, como no caso específico do desflorestamento, consiste em obter medidas de um conjunto de variáveis que deem alguma indicação do comportamento da variável dependente através de um futuro próximo. Desse modo, explorar espacialmente as variáveis que mais explicam o desmatamento amazônico, com o intuito de alcançar um modelo parcimonioso, capaz de lançar uma luz a respeito do comportamento da degradação ambiental dessa região, num futuro próximo, é o que se está objetivando nesse trabalho. Com base na exploração estatística de variáveis, direta ou indiretamente, envolvidas no processo de desmatamento amazônico, este estudo teve por objetivo a elaboração de modelos lineares clássicos e espaciais que estabeleçam relações funcionais entre essas variáveis e a fração desmatada no município, ou seja, percentagem da área original de floresta desmatada. Esses objetivos foram alcançados através das seguintes etapas: exploração estatística de variáveis econômicas e demográficas envolvidas, direta ou indiretamente, no processo de desmatamento amazônico; elaboração de transformações matemáticas nas variáveis selecionadas, de modo a obter o melhor ajuste entre cada uma delas e suas respectivas variáveis dependentes; estimação de modelos lineares clássicos que estabeleceram relações funcionais entre essas variáveis e o desmatamento; aplicação de testes de autocorrelação espacial nas modelagens anteriores; e, por fim, estimação dos modelos espaciais do desmatamento amazônico. Pretende-se ainda que os modelos estimados subsidiem a simulação de cenários futuros capazes de integrar variações socioeconômicas da região e seus impactos sobre o nível de desmatamento.

Palavras-chave: Desmatamento; Amazônia; Modelos espaciais.

Spatial Modeling of Amazonian Deforestation

Abstract: The major challenge in establishing a socioeconomic development function for a potential for environmental degradation, as in the specific case of deforestation, consists of obtaining measurements of a set of variables that gives some indication of the behavior of the dependent variable over the near future. Therefore, spatially exploring the variables that most explain Amazonian deforestation, with the aim of achieving a parsimonious model, capable of shedding light on the behavior of environmental degradation in this region, in the near future, is what this work is aiming for. Based on the statistical exploration of variables, directly or indirectly, involved in the Amazonian deforestation process, this study aimed to develop classical and spatial linear models that establish functional relationships between these variables and the fraction deforested in the municipality, that is, percentage of the original deforested forest area. These objectives were achieved through the following steps: statistical exploration of economic and demographic variables involved, directly or indirectly, in the Amazon deforestation process; elaboration of mathematical transformations in the selected variables, in order to obtain the best adjustment between each one of them and their respective dependent variables; estimation of classical linear models that established functional relationships between these variables and deforestation; application of spatial autocorrelation tests in previous modeling; and, finally, estimation of spatial models of Amazonian deforestation. It is also intended that the estimated models

support the simulation of future scenarios capable of integrating socioeconomic variations in the region and their impacts on the level of deforestation.

Keywords: Deforestation; Amazon; Spatial modeling.

1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O maior desafio em estabelecer uma função de desenvolvimento socioeconômico para um potencial de degradação ambiental, como no caso específico do desflorestamento, consiste em obter medidas de um conjunto de variáveis que deem alguma indicação do comportamento da variável dependente através de um futuro próximo. Com este propósito, estoques de variáveis socioeconômicas, em um tempo t , são relacionados com dados de desflorestamento em um tempo t próximo. Nesse caso, o que se busca é, além de entender o passado, obter indicação da trajetória do fenômeno analisado, ou seja, do desmatamento, em função de conjunturas socioeconômicas. Uma maneira sugerida para isso consiste em considerar o tempo que um estoques de uma determinada conjuntura socioeconômica levam para produzir uma extensão de mudanças e usar esta relação para se calcular a velocidade ou taxa que uma certa região vai necessitar para se ajustar em termos da relação pressão/impacto.

Neste sentido, deve-se sempre buscar relacionar densidades de estoques, calculadas em função, por exemplo, da área do município, com a extensão da degradação ambiental, no caso específico a densidade de áreas desflorestadas. Em termos de degradação ambiental, o desflorestamento ainda se encontra concentrado ao longo do conhecido arco de desflorestamento (Maranhão, este do Pará, Mato Grosso, Rondônia e este do Acre) e ao longo de trechos do Rio Amazonas, há um potencial de espalhamento desse processo adentro do sul e centro do Pará, ao longo da BR-163, a qual está preste a ser asfaltada, por todo o restante do Mato Grosso e boa parte de Rondônia. Desse modo, explorar especialmente as variáveis que mais explicam o desmatamento amazônico, com o intuito de alcançar um modelo parcimonioso, capaz de lançar uma luz a respeito do comportamento da degradação ambiental dessa região, num futuro próximo, é o que se está objetivando nesse trabalho.

Com base na exploração estatística de variáveis que direta ou indiretamente estejam envolvidas no processo de desmatamento amazônico, este estudo tem por objetivo a elaboração de modelos lineares clássicos e espaciais que estabeleçam relações funcionais entre essas variáveis e a fração desmatada no município, ou seja, percentagem da área original de floresta desmatada. Pretende-se ainda que os modelos estimados subsidiem a

simulação de cenários futuros capazes de integrar variações socioeconômicas da região e seus impactos sobre o nível de desmatamento.

Pretende-se alcançar esses objetivos através das seguintes etapas: explorar estatisticamente, variáveis que direta ou indiretamente estejam envolvidas no processo de desmatamento amazônico; efetuar transformações matemáticas nas variáveis selecionadas, de modo a obter o melhor ajuste entre cada uma delas e suas respectivas variáveis dependentes; estimar modelos lineares clássicos que estabeleçam relações funcionais entre essas variáveis e o desmatamento; analisar os resíduos desses modelos, a fim de encontrar possíveis outliers, e estimar novos modelos caso haja necessidade de controle heteroscedástico; verificar a presença de autocorrelação espacial nos modelos lineares ajustados até então, através de testes estatísticos específicos; e ajustar modelos espaciais, caso seja confirmado a presença de autocorrelação espacial.

2 - METODOLOGIA

2.1 Regressão Linear

O principal objetivo de uma análise de regressão é estimar a melhor função que descreve a relação entre uma variável dependente e o conjunto de outras variáveis explicativas, tal como expressado na seguinte equação:

Equação 1

$$y = X\beta + \varepsilon$$

onde y é a variável dependente (um vetor de N linhas), X é uma matriz com observações de K co-variáveis (de N linhas e K colunas), β é o vetor dos coeficientes de regressão de K variáveis explicativas, e ε é um termo de erro aleatório.

O método mais comum de se estimar os coeficientes de uma regressão linear é o dos mínimos quadrados ordinários (OLS). Em notação matricial, o vetor β pode ser estimado de acordo com a expressão: $b = (X'X)^{-1}X'y$. Há também a possibilidade de se estimar os coeficientes de uma regressão linear através de outros métodos. Qualquer que seja o método de estimação, há necessidade de se pressupor que os erros possuam distribuição normal, com média igual a zero e variância constante:

Equação 2

$$\varepsilon_i \stackrel{iid}{\sim} N(0, \sigma^2)$$

O método de máxima verossimilhança (ML) não é realmente necessário quando se quer estimar os coeficientes de uma regressão linear “clássica”, pois os valores dos parâmetros gerados seriam muito parecidos com os do OLS. Contudo, quando se quer comparar modelos regressivos clássicos com modelos espaciais, é necessária a análise de medidas que não são calculáveis através do método OLS, tais como os chamados critérios de informação. Os mais comuns são os de Akaike (AIC) e o de Schwartz (SC).

Uma vez que os erros possuem distribuição normal, média igual a zero e variância constante, o método ML utiliza a função densidade de probabilidade dessa distribuição para a estimação do parâmetro σ^2 e dos β da equação de regressão. Em geral, se procura maximizar o logaritmo da função de verossimilhança (L), de tal forma que esta pode ser expressada da seguinte forma, lembrando sempre que $y = X\beta + \epsilon$

Equação 3

$$\ln L = -\frac{n}{2} \ln 2\pi - \frac{n}{2} \ln \sigma^2 - \frac{1}{2\sigma^2} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Os principais fatores que induzem a erros de especificação de modelo de regressão são multicolinearidade, distribuição não-normal dos erros, heteroscedasticidade, dependência espacial (de y ou dos erros).

Não há um teste específico de multicolinearidade, contudo, há alguns diagnósticos que podem indicar um problema em potencial. Um deles é o chamado número de condição e, via de regra, valores do número de condição maiores do que 20 ou 30 podem ser considerados suspeitos (ANSELIN, 1992).

Teste para a distribuição normal dos erros são calculados a partir dos resíduos do modelo de regressão. Em geral esses testes são assintóticos e não são muito consistentes em um número pequeno de observações. O teste de Kiefer e Salmon é um desses, sua estatística possui uma distribuição Qui quadrado com dois graus de liberdade, e uma baixa probabilidade de P indica que os erros não possuem distribuição normal (ANSELIN, 1992).

Heteroscedasticidade é a situação na qual os erros não têm uma variância constante, isso afeta a tanto a especificação do modelo com sua medida de ajuste. O teste de Lagrange, desenvolvido por Breusch&Pagan (BP) e o teste de Koenker&Bassett (KB) são dois desses testes, entretanto, quando os erros não têm distribuição normal o teste KB é mais consistente para pequenas amostras.

A análise de resíduos geralmente é capaz de identificar os casos cujos valores influenciam negativamente a especificação dos modelos, os chamados outliers. A presença de outliers pode prejudicar a modelagem da variável dependente, uma vez que afetam tanto as significâncias dos coeficientes dos modelos lineares como os índices de correlação (R e R^2), estatísticas que indicam o grau de ajuste do modelo. Há vários procedimentos e técnicas, indicados na literatura, para lidar com esse problema (WERKEMA & AGUIAR, 1996). Os mais comuns são: (a) retirar os casos outliers do modelo; (b) introduzir duas variáveis de especificação (dummy) no modelo, uma para os outliers positivos e outra para os negativos. Optou-se pelo segundo este último procedimento.

2.2 Regressão Espacial

A dependência espacial é a situação em que o valor da variável dependente, ou do seu erro, em uma dada localidade, está correlacionada com os valores de outras localidades. Há vários testes para a confirmação do diagnóstico de dependência espacial, alguns deles são: Moran's I (erro); Lagrange Multiplier (erro); Robust LM (erro); Lagrange Multiplier (defasagem); Robust LM (defasagem); Lagrange Multiplier (erro e defasagem) (ANSELIN, 1992).

A equação que descreve o modelo de defasagem espacial (Lagespacial) está representada abaixo:

Equação 4

$$y = \rho Wy + X\beta + \varepsilon$$

onde ρ é o coeficiente espacial auto-regressivo, W é a matriz de pesos espaciais, y é a variável dependente (um vetor de N linhas), X é uma matriz com observações de covariáveis, β é o vetor dos coeficientes de regressão e ε é um termo de erro aleatório.

W pode ser entendida como a representação da forma que um dado fenômeno interage espacialmente. Em uma matriz binária, por exemplo, a unidade i é vizinha da unidade j se a célula a_{ij} da matriz de pesos espaciais apresentar valor 1, quando a matriz é normalizada a soma de cada linha da matriz de pesos é igual a 1. A escolha do tipo de matriz de peso depende da estrutura espacial do fenômeno que se está investigando. Em geral, escolhe-se uma matriz do tipo vizinhança de primeira ordem quando se espera que a estrutura espacial do fenômeno esteja circunscrita a uma determinada localidade e aos seus

vizinhos imediatos. Dadas a heterogeneidade do espaço geográfico amazônico e as especificidades do processo do desmatamento, acredita-se que esse tipo matriz seja a mais adequada.

Dá forma que está representada, a equação de descreve o modelo de Lag espacial atua apenas sobre a variável dependente y , mas uma análise mais acurada mostrará que não é bem assim. A forma expandida dessa equação (Equação 8) mostra que esse modelo atua tanto sobre a variável dependente quanto nos efeitos aleatórios, ou seja, nos resíduos, tal como pode ser percebido na demonstração abaixo (ANSELIN, 2002).

Equação 5

$$y = \rho W y + X\beta + \varepsilon$$

Equação 6

$$y - \rho W y = X\beta + \varepsilon$$

Equação 7

$$(I - \rho W)y = X\beta + \varepsilon$$

Equação 8

$$y = (I - \rho W)^{-1} X\beta + (I - \rho W)^{-1} \varepsilon$$

A segunda forma de autocorrelação espacial em um modelo de regressão está relacionada com os termos de erro. Nesse caso, eles são chamados erro espacial (spatial error). Esta dependência espacial pode ser expressa por meios de modelos espaciais para os termos de erro, sejam eles autorregressivos ou médias móveis. Um modelo autorregressivo pode ser descrito como:

Equação 9

$$y = X\beta + \varepsilon$$

$$\varepsilon = \lambda W\varepsilon + \xi$$

onde $W\varepsilon$ é a matriz de defasagem espacial dos termos de erros, λ é o coeficiente de autorregressão e ξ é o termo de erro não-viesado.

Um modelo de médias móveis para os termos de erros pode ser expresso da seguinte forma:

Equação 10

$$\varepsilon = \lambda W\xi + \xi$$

O cálculo de um modelo cuja variável dependente apresenta forte autocorrelação espacial pode ser efetuado de duas formas diferentes. A primeira utiliza variáveis instrumentais, com o emprego do método dos mínimos quadrados ordinários em dois estágios (2SLS). A segunda baseia-se na maximização da função de verossimilhança (ML), sob o pressuposto de distribuição normal. O primeiro, contudo, possui a vantagem de flexibilizar o pressuposto de normalidade da distribuição dos resíduos.

O método 2SLS apesar de flexibilizar o pressuposto de normalidade dos resíduos, apresenta como único parâmetro de indicação de ajuste da modelagem espacial a estatística R², sendo este também o único parâmetro de comparação entre os modelos espaciais, que empregam esse método, e os métodos clássicos.

A modelagem da defasagem espacial efetuada através do método ML apresenta fornece um número maior de parâmetros de comparação entre os modelos espaciais e os modelos clássicos, apesar de estar sujeita a uma série maior de fatores que impliquem em vieses de estimação.

A fim de obter uma maior segurança no ajuste dos modelos de desmatamento dos municípios amazônicos, bem como uma maior comparabilidade entre os resultados das diversas modelagens empregadas nesse estudo, optou-se por aplicar ambos os métodos na estimação dos modelos de defasagem espacial das variáveis dependentes de desmatamento. Como a literatura aponta que o método 2SLS é mais robusto do que o ML, uma vez obtidos bons resultados com o primeiro, haverá uma tendência de se conseguir melhores ajustes com o segundo (ANSELIN, 1992). Os modelos de lag espacial estimados através do método 2SLS serão, portanto, apresentados primeiro.

3 – RESULTADOS

Dada a natureza temporal das variáveis selecionadas, decidiu-se trabalhar com três modelos distintos: O primeiro tem como variável dependente a percentagem de área da floresta original desmatada por município, em 1997; o segundo, a percentagem de área da floresta original desmatada por município, em 2001; e, o terceiro, a diferença entre a percentagem de área da floresta original desmatada de 2001 e 1997, por município.

Apenas 630 dos 792 municípios amazônicos possuem dados sobre os estoques de áreas desmatadas, seja porque não possuem floresta original expressiva, seja porque o Prodes (<http://www.obt.inpe.br/prodes/>) só faz levantamento de florestas equatoriais, deixando de fora os municípios da região do cerrado. No caso específico do modelo de crescimento da área de floresta desmatada entre 1997 e 2001, optou-se por trabalhar somente com aqueles que apresentaram crescimento diferente de zero, o que representou um total de 399 municípios.

3.1 Modelagem das áreas desmatadas na Amazônia até 1997

Variáveis do modelo de percentagem de área desmatada em 1997

O primeiro passo para se modelar a percentagem de área desmatada nos municípios amazônicos foi efetuar a análise exploratória das variáveis disponíveis. A análise exploratória dessas variáveis consistiu na aplicação dos métodos de análise hierárquica de agrupamentos, de análise de componentes principais e de análise de regressão linear (stepwise). A Tabela 1 lista as variáveis que foram exploradas para compor o modelo de 1997.

Tabela 1. Amazônia Brasileira – Variáveis Exploradas para o modelo de percentagem de áreas desmatadas dos Municípios Amazônicos – 1997.

Nº	Variáveis
1	Distância média à rodovia asfaltada
2	Fator de atração urbana
3	Cabeças de Gado por Km ²
4	Cabeças de Gado
5	Valor da Lavoura por Km ²
6	Valor da Lavoura
7	Percentual de Área Plantada
8	Área Plantada
9	Densidade Populacional
10	População Total
11	Densidade Populacional Rural
12	População Rural
13	Índice de Concentração Fundiária

14	Densidade Populacional Rural Ajustada pelo Índice de concentração Fundiária
15	População Rural Ajustada pelo Índice de concentração Fundiária
16	Nível de Urbanização
17	Índice de Concentração Demográfica
18	Índice de Desenvolvimento Social
19	Índice de Desenvolvimento Econômico
20	Índice de Infraestrutura Agrária
21	Índice de Atividade Agropecuário e de Extração Vegetal
22	Índice de Desenvolvimento Socioeconômico
23	Produto Interno Bruto do Setor Primário
24	Produto Interno Bruto do Setor Secundário
25	Produto Interno Bruto do Setor Terciário
26	Produto Interno Bruto Total
27	Área Protegida
28	Percentual de Área Protegida

Fonte: 1 e 2 INPE (2002); 3 e 4, IBGE - PPM, 1997; 5 a 8, IBGE - PAM, 1997; 9 a 12 e 16, IBGE – Contagem de 1996; 13 a 14, IBGE – Censo Agropecuário de 1995/1996 e Contagem de 1996; 17 a 22, Garcia et al, 2004; 23 a 26, Andrade e Serra, 1999; 27, INPE (2002).

Após análise das variáveis relacionadas ao estoque do desmatamento amazônico - traduzido pelo percentual de desmatamento florestal, em 1997 - chegou-se a seis variáveis explicativas. A Tabela 2 descreve o comportamento de alguns dos parâmetros estatísticos dessas variáveis para os municípios amazônicos.

Tabela 2. Amazônia Brasileira – Estatística descritiva que das variáveis que foram selecionadas para o modelo de percentagem de áreas desmatadas dos Municípios Amazônicos – 1997.

Estatística Descritiva	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Índice Correlação
Percentual de área desmatada da floresta original por Km ³ em 1997	46,76	34,57	0,07	100	1,00000
Distância média à rodovia asfaltada	61,6	98,9	0,7	702	-0,54535
Cabeças de Gado Bovino por Km ² em 1997	22,3	27,1	0	241	0,54572

Índice de Governança em 1996/2000	0,35	0,4	0	1	-0,00372
Densidade Populacional em 1996	20,2	95,7	0,1	1782	0,09158
Percentual de área municipal plantada em 1997 (%)	3,32	4,9	0	50	0,35272
Valor da Lavoura por Km ² em 1997 (Mil Reais)	1,8	3,1	0	24	0,30645

Ajuste matemático das variáveis do modelo

Antes que se partisse para a modelagem clássica, optou-se por trabalhar matematicamente essas variáveis, com o intuito de se buscar o melhor ajuste entre elas e as variáveis dependentes. Para tanto, foi utilizado o pacote LAB Fit Ajuste de Curvas (SILVA & SILVA, 2003). O procedimento consistiu em encontrar a melhor função não linear, de dois parâmetros, capaz de produzir o melhor ajuste das variáveis independentes às variáveis dependentes. Ou seja, encontrar o melhor procedimento matemático de suavização das variáveis independentes. A tabela 3 resume as informações dos ajustes efetuados para cada variável independente dos três modelos propostos.

Tabela 3. Ajuste matemático das variáveis independentes - 1997.

Ajuste Matemático	Nome da Função	Expressão Algébrica	Parâmetros		Novo	Índice
			A	B	Índice Correlação	Correlação Anterior
Área desmatada da floresta original por Km ² em 1997 (%)	Potência	$Y = A \cdot B^{**}X$	0,869	0,982	0,750	-0,545
Distância média à rodovia asfaltada	Modificada					
Cabeças de Gado Bovino por Km ² em 1997	Log Modificada	$Y = A \cdot \ln(X+B)$	0,188	1,142	0,675	0,546
Índice de Governança em 1996/2000	Linear	-	-	-	-0,004	-0,004
Densidade Populacional em 1996	Inverso da Hipérbole	$Y = X/(A+B \cdot X)$	4,524	1,109	0,690	0,092
Percentual de área municipal plantada em 1997 (%)	Inverso da Hipérbole	$Y = X/(A+B \cdot X)$	0,011	1,231	0,675	0,353
Valor da Lavoura por Km ² em 1997 (Mil Reais)	Inverso da Hipérbole	$Y = X/(A+B \cdot X)$	0,424	1,341	0,541	0,306

Uma vez corrigidos os valores das variáveis independentes em função da relação não linear observadas entre elas e suas respectivas variáveis dependentes, verificou-se significativa melhora nos índices de correlação linear em praticamente todas as que sofreram ajustes matemáticos, tal como pode ser observado na Tabela 3. Essa melhora se deve aos efeitos suavizadores que as transformações matemáticas produziram nos dados originais.

Efetuada a seleção das variáveis independentes e as correções matemáticas dos seus valores, seguiu-se os ajustes dos modelos de desmatamento.

Modelo “OLS” do percentual de área desmatada

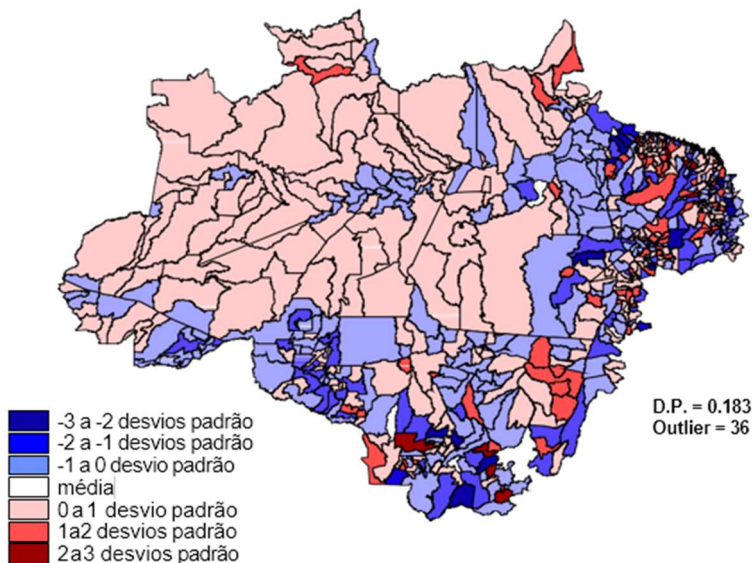
A próxima tabela (TAB. 4) traz as informações a respeito da modelagem linear obtida com base nas sete variáveis selecionadas para explicar a fração da área de floresta original desmatada do município até 1997. O modelo mostrou-se bem identificado, com um índice de correlação linear entre os resultados preditos (\hat{y}) e os valores observados da densidade de desmatamento (y) da ordem de 0.84, o que sugere que o modelo está explicando, aproximadamente 72% da variância total do erro aleatório $\square\square$

Tabela 4. Resultados do MODELO OLS de percentagem de áreas desmatadas -1997.

Estatística de regressão					
<u>R múltiplo</u>	<u>R-Quadrado</u>	<u>R-quadrado ajustado</u>	<u>Observações</u>		
0.845	0.7144	0.7117	630		
Modelo Clássico (OLS)	Erro Coeficientes	padrão	Coef. padron.	Estatística t	Significância (Valor-P)
Constante	-0,097	0,022		-4,342	0,000
Distância média à rodovia asfaltada	0,325	0,046	0,261	7,091	0,000
Cabeças de Gado Bovino por Km2 em 1997	0,464	0,044	0,320	10,439	0,000
Índice de Governança em 1996/2000	-0,089	0,020	-0,098	-4,460	0,000
Densidade Populacional em 1996	0,411	0,048	0,303	8,521	0,000
Percentual de área municipal plantada em 1997 (%)	0,533	0,096	0,362	5,533	0,000
Valor da Lavoura por Km2 em 1997 (Mil Reais)	-0,486	0,099	-0,278	-4,911	0,000

A análise dos resíduos revela, entretanto, que 6% dos 630 municípios apresentaram resíduos superiores a dois desvios padrão, sendo caracterizados como outliers - resíduos discrepantes, com valores superiores a dois desvios padrão. A distribuição espacial dos resíduos gerados por esse modelo pode ser observada no Mapa 1. Uma rápida análise visual desse Mapa sugere forte presença de correlação espacial, tal como poderá ser confirmada mais adiante.

Mapa 1. Amazônia Brasileira – Distribuição espacial dos resíduos – Modelo ols: 1997.



Fonte: IBGE: Malha digital dos municípios brasileiros - 2000 e elaboração própria.

As informações referentes a modelagem do desmatamento dos municípios amazônicos, com a introdução das variáveis de identificação dos outlier (controle heteroscedástico) estão descritas na Tabela 5. A adição de variáveis indicadoras de outliers sempre melhora, quando se trata de modelos lineares, os parâmetros de ajuste R e R². Foi considerável, entretanto, a elevação do valor de R², que passou de 0,72 (TAB. 4) para 0,82 (TAB. 5). Além disso, houve melhora nos níveis de significância dos coeficientes de todas as outras variáveis do modelo.

Tabela 5. Resultados do modelo OLS com controle de outliers: 1997.

Estatística de regressão					
<u>R múltiplo</u>	<u>R-Quadrado</u>	<u>R-quadrado ajustado</u>	<u>Observações</u>		
0,902	0,8144	0,812	630		
Modelo Clássico (OLS)					
	Coeficientes	Erro padrão	Coef. padron.	Estatística T	Significância (Valor-P)
Constante	-0,090	0,018		-4,973	0,000
Distância média à rodovia asfaltada	0,333	0,037	0,267	8,886	0,000
Cabeças de Gado Bovino por Km2 em 1997	0,407	0,036	0,281	11,162	0,000
Índice de Governança em 1996/2000	-0,077	0,016	-0,084	-4,747	0,000
Densidade Populacional em 1996	0,458	0,039	0,337	11,727	0,000
Percentual de área municipal plantada em 1997 (%)	0,686	0,078	0,466	8,759	0,000
Valor da Lavoura por Km2 em 1997 (Mil Reais)	-0,639	0,080	-0,366	-7,962	0,000
Out layer (+)	0,410	0,044	1,185	9,257	0,000
Out layer (-)	-0,492	0,032	-1,423	-15,318	0,000

Modelo de Defasagem Espacial – 2SLS

O quadro a seguir resume os resultados dos testes que foram aplicados ao modelo de regressão linear da percentagem de área original de floresta desmatada até 1997 para os 630 municípios amazônicos. Os resultados sugerem a possibilidade de ambos os efeitos estarem presentes, ou seja, dependência espacial do percentual de área de floresta original desmatada e dependência espacial dos resíduos do modelo. Nesse caso, optou-se pelo modelo de defasagem espacial (Lag), devidos aos efeitos de externalidades comentados na seção metodológica.

Quadro 1. Resultados dos testes de dependência espacial do modelo OLS com controle de outliers: 1997.

Teste	MI/DF	VALUE	PROB
Moran's I (error)	0.367194	15.421626	0.0000
Lagrange Multiplier (error)	1	220.46015	0.0000
Robust LM (error)	1	38.179857	0.0000
Kelejian-Robinson (error)	10	291.99265	0.0000
Lagrange Multiplier (lag)	1	259.29463	0.0000
Robust LM (lag)	1	77.014338	0.0000
Lagrange Multiplier (SARMA)	2	297.47449	0.0000

A Tabela 6 mostra as informações referentes ao modelo tipo lag espacial do desmatamento dos municípios amazônicos, em 1997, ajustado através do método 2SLS. O modelo mostrou-se bem identificado e com um elevado índice de correlação linear, da ordem de 0,92, o que sugere que o modelo está explicando, aproximadamente 86% da variância total do erro aleatório □□ A comparação desses resultados com os da modelagem clássica desse modelo revela que houve elevação do valor de R², ou seja, passou de 0,82 (TAB. 4) para 0,85 (TAB. 5). O modelo espacial também apresentou melhora nos níveis de significância dos coeficientes de todas as outras variáveis do modelo. O auto nível de significância do coeficiente de correlação espacial (□) sugere a confirmação de autocorrelação da variável dependente.

Tabela 6. Resultados do modelo de defasagem espacial (2SLS): 1997.

Estatística de regressão

R múltiplo R-Quadrado R-quadrado ajustado Observações

0,922	0,851	-	630
-------	-------	---	-----

Modelo Espacial (Lag Espacial - 2SLS)	Erro		Coef.	z	Significância (Valor-P)
	Coefficientes	padrão			
Constante	-0,093	0,014	0,029	-6,438	0,000
Índice de Proximidade de Rodovias em 2001	0,155	0,034	0,124	4,572	0,000
Cabeças de Gado Bovino por Km2 em 1997	0,305	0,031	0,211	9,975	0,000
Índice de Governança em 1996/2000	-0,060	0,013	-0,066	-4,650	0,000
Densidade Populacional em 1996	0,314	0,034	0,232	9,291	0,000
Percentual de área municipal plantada em 1997 (%)	0,346	0,070	0,235	4,962	0,000
Valor da Lavoura por Km2 em 1997 (Mil Reais)	-0,309	0,071	-0,177	-4,360	0,000
Out layer (+)	0,287	0,037	0,831	7,740	0,000
Out layer (-)	-0,321	0,030	-0,929	-10,738	0,000
Lag Espacial	0,438	0,039	0,438	11,203	0,000

Modelo de Defasagem Espacial – Máxima Verossimilhança

As informações referentes ao modelo tipo lag espacial do desmatamento municipal amazônico, em 1997, ajustado através do método ML, estão presentes na Tabela 19. O modelo mostrou-se bem identificado e com um elevado índice de correlação linear, da ordem de 0,93, o que sugere que o modelo está explicando, aproximadamente 87% da variância total do erro aleatório □□□□□ comparação desses resultados com os da modelagem 2SLS desse mesmo modelo revela que houve elevação do valor de R2, ou seja, passou de 0,85 (TAB. 6) para 0,87 (TAB. 7). O auto nível de significância do coeficiente de correlação espacial (□) também sugere a confirmação de autocorrelação da variável dependente.

Tabela 7. Resultados do modelo de defasagem - Máxima Verossimilhança: 1997.

Estatística de regressão

Log. Max. R-Quadrado AIC Observações

439,475	0,8694	-858,9510	630
---------	--------	-----------	-----

Modelo Espacial (Lag Espacial - Maximum Likelihood)	Erro		Coef.	z	Significância (Valor-P)
	Coefficientes	padrão			
Constante	-0,094	0,014	0,029	-6,684	0,000
Distância média à rodovia asfaltada	0,115	0,031	0,092	3,679	0,000
Cabeças de Gado Bovino por Km2 em 1997	0,282	0,029	0,195	9,571	0,000
Índice de Governança em 1996/2000	-0,057	0,013	-0,062	-4,514	0,000
Densidade Populacional em 1996	0,282	0,032	0,208	8,836	0,000
Percentual de área municipal plantada em 1997 (%)	0,269	0,066	0,183	4,100	0,000
Valor da Lavoura por Km2 em 1997 (Mil Reais)	-0,234	0,067	-0,134	-3,501	0,000
Out layer (+)	0,260	0,035	0,751	7,415	0,000
Out layer (-)	-0,283	0,027	-0,818	-10,625	0,000
Lag Espacial	0,537	0,029	0,537	18,560	0,000

3.2 Variáveis do modelo de percentagem de área desmatada em 2001

Variáveis do modelo de percentagem de área desmatada em 2001

A Tabela 8 lista as variáveis que foram exploradas para compor o modelo de 2001. Para o ano de 2001, foi possível explorar uma gama maior de variáveis, pois foi possível incorporar os dados do Censo Demográfico de 2000. O número de variáveis selecionadas foi, entretanto, quase o mesmo do modelo anterior, ou seja, sete variáveis.

Tabela 8. Amazônia Brasileira – Variáveis Exploradas para o modelo de percentagem de áreas desmatadas dos Municípios Amazônicos – 2001.

N	Variáveis
1	Distância média à rodovia asfaltada
2	Densidade da Malha Urbana
3	Cabeças de Gado por Km ²
4	Valor da lavoura por Km ²
5	Percentual de Área Plantada
6	Densidade Populacional
7	Densidade da População Rural
8	Densidade da População Rural Ajustada pelo Índice de concentração Fundiária
9	Taxa Líquida de Migração (1995/2000)
10	Saldo Migratório (1995/2000)
11	Saldo Migratório por Km ²
12	Volume Migratório
13	Volume Migratório por Km ²
14	Percentual da População Natural do Município
15	População Ocupada no Setor Agropecuário
16	População Ocupada
17	População Total
18	Percentual de Emprego do Setor Agropecuário
19	População Ocupada no Setor Agropecuário
20	População Ocupada no Setor Agropecuário por Km ²
21	Percentual dos Rendimentos do Setor Agropecuário
22	Rendimentos do Setor Agropecuário
23	Rendimento per capita do Setor Agropecuário por Km ²
24	Área Protegida
25	Percentual de Área Protegida
26	Índice de Concentração Demográfica
27	Índice de Governança
28	Índice de Desenvolvimento Econômico
29	Índice de Infraestrutura Agrária
30	Índice de Atividade Agropecuário e de Extração Vegetal
31	Índice de Desenvolvimento Socioeconômico

Fonte: 1 e 2, INPE (2002); 3, IBGE - PPM, 2001; 4 e 5, IBGE - PAM, 2001; 8, IBGE – Censo Agropecuário de 1995/1996 e Censo Demográfico de 2000; 6, 7 e 9 a 23, IBGE – Censo Demográfico de 2000; 24 a 25, INPE (2002); 26 a 31, Garcia et al, 2004.

A comparação dos dados das Tabelas 2 e 9 revela que houve aumento considerável da área desmatada da floresta amazônica entre os anos de 1997 e 2001. Em 1997, o

desmatamento médio por Km² era de 46,7% (TAB. 2) e sobe para 49.3, em 2001. O que indica uma taxa anual de crescimento de 1,32% do desmatamento médio municipal.

Tabela 9. Amazônia Brasileira – Estatística descritiva das Variáveis Seleccionadas para o modelo de percentagem de áreas desmatadas dos Municípios Amazônicos – 2001.

Estatística Descritiva	Desvio		Índice		
	Média	Padrão	Mínimo	Máximo	Correlação
Percentual de área desmatada da floresta original por Km ² em 2001	49,27	34,88	0,09	100	1,00000
Distância média à rodovia asfaltada	61,6	98,9	0,7	702	-0,55332
Cabeças de Gado por Km ²	27,5	32,0	0	287	0,54822
Densidade da População Rural	7,1	27,2	0,05	625	0,10571
Rendimento per capita do Setor Agropecuário por Km ²	0,15	0,2	0,0	2	0,43272
Taxa líquida de migração 1995/2000	0,04	0,2	-0,4	1,4	-0,19890
Índice de Governança	0,35	0,4	0	1	0,00517
Percentual de área municipal plantada em 2000 (%)	3,82	6,2	0,00	74	0,28015

Ajuste matemático das variáveis

Optou-se também por trabalhar matematicamente essas variáveis, com o intuito de se buscar o melhor ajuste entre elas e as variáveis dependentes. A tabela 10 resume as informações dos ajustes efetuados para cada variável independente dos três modelos propostos.

Tabela 10. Ajuste matemático das variáveis independentes - 2001.

Ajuste Matemático	Nome da Função	Expressão Algébrica	Parâmetros		Novo Índice Correlação	Índice Correlação Anterior
			A	B		
Área desmatada da floresta original por Km² em 2001						
Distância média à rodovia asfaltada	Potência Modificada	$Y = A*B^{**}X$	0,869	0,982	0,746	-0,553
Cabeças de Gado por Km ²	Log Modificada	$Y = A*Ln(X+B)$	0,184	1,215	0,676	0,548
Densidade da População Rural	Inverso da Hipérbole	$Y = X/(A+B*X)$	1,708	1,194	0,636	0,106
Rendimento per capita do Setor Agropecuário por Km ²	Inverso da Hipérbole	$Y = X/(A+B*X)$	0,067	1,078	0,736	0,433
Taxa líquida de migração 1995/2000	Exponencial	$Y = A*EXP(B*X)$	0,504	-	0,205	-0,199
Índice de Governança	Linear	-	-	-	0,005	0,005
Percentual de área municipal plantada em 1997 (%)	Inverso da Hipérbole	$Y = X/(A+B*X)$	0,010	1,217	0,563	0,280

Modelo “OLS” do percentual de área desmatada

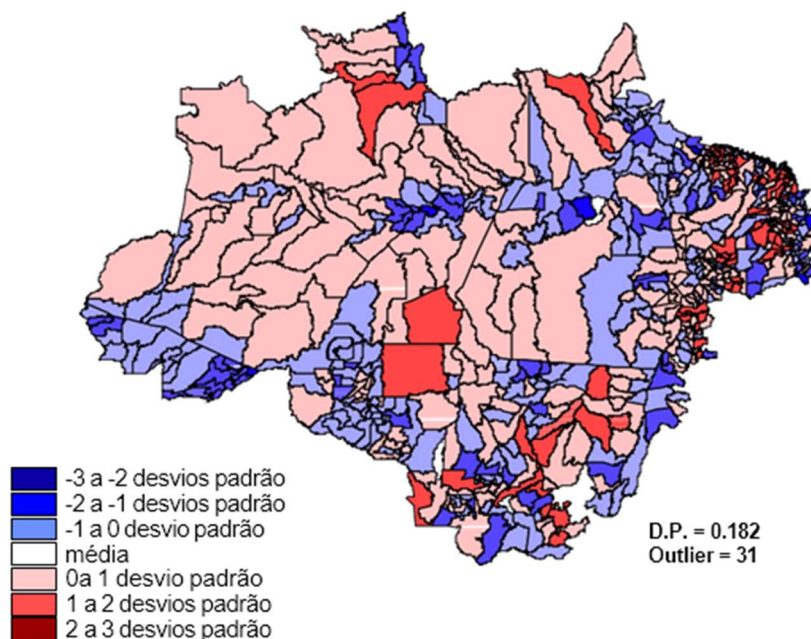
Na modelagem linear do nível do desmatamento dos municípios amazônicos por quilometro quadrado em 2000 foi empregada a mesma estratégia utilizada na modelagem anterior. Nesse sentido, a Tabela 11 traz as informações sobre as variáveis selecionadas para o modelo de desmatamento em 2000. Este também mostrou-se bem identificado, sendo capaz de prever, aproximadamente 73% da variância total do erro aleatório □ □

Tabela 11. Resultados do modelo OLS de percentagem de áreas desmatadas - 2001.

Estatística de regressão					
	R múltiplo	R-Quadrado	R-quadrado ajustado	Observações	
	0,850	0,7217	0,7186	630	
Modelo Clássico (OLS)	Coefficiente	Erro padrão	Coef. padron.	Estatística	Significância
				t	(Valor-P)
Constante	-0,439	0,054		-8,081	0,000
Distância média à rodovia asfaltada	0,337	0,046	0,268	7,328	0,000
Cabeças de Gado por Km2	0,426	0,045	0,291	9,370	0,000
Densidade da População Rural	0,218	0,052	0,143	4,227	0,000
Rendimento per capita do Setor Agropecuário por Km2	0,293	0,053	0,205	5,535	0,000
Taxa líquida de migração 1995/2000	0,533	0,110	0,109	4,865	0,000
Índice de Governança	-0,076	0,020	-0,083	-3,756	0,000
Percentual de área municipal plantada em 2000 (%)	0,139	0,049	0,093	2,839	0,005

A análise dos resíduos desse modelo também indica a presença de outliers, porém em grau ligeiramente menor, cerca de 5%. A distribuição espacial dos resíduos gerados por esse modelo pode ser observada no Mapa 2 que, como já era previsto, também sugere forte presença de correlação espacial. Interessante notar que tanto os resíduos do modelo de 1997 quanto o de 2000 apresentaram desvios padrão muito semelhantes (0,182), apesar da diminuição do estoque de floresta na região.

Mapa 2. Amazônia Brasileira – Distribuição espacial dos resíduos – Modelo ols: 2001.



Fonte: IBGE: Malha digital dos municípios brasileiros - 2000 e elaboração própria.

A Tabela 12 mostra as informações referente a modelagem do desmatamento dos municípios amazônicos, em 2000, com a introdução das variáveis de identificação dos outlier. Tal como na modelagem anterior, foi considerável o aumento do valor de R², que passou de 0,73 (TAB. 12) para 0,81 (TAB. 13), e melhora sensível nos níveis de significância dos coeficientes de todas as outras variáveis do modelo.

Tabela 12. Resultados do modelo OLS com controle de outliers: 2001.

Estatística de regressão					
<u>R múltiplo</u>	<u>R-Quadrado</u>	<u>R-quadrado ajustado</u>	<u>Observações</u>		
0,897	0,8052	0,8023	630		
Modelo Clássico (OLS)	Coefficientes	Erro padrão	Coef. padron.	Estatística t	Significância (Valor-P)
Constante	-0,475	0,046		-10,413	0,000
Distância média à rodovia asfaltada	0,373	0,039	0,296	9,600	0,000
Cabeças de Gado por Km ²	0,389	0,039	0,266	10,061	0,000
Densidade da População Rural	0,220	0,043	0,144	5,067	0,000
Rendimento per capita do Setor Agropecuário por Km ²	0,315	0,045	0,221	7,085	0,000
Taxa líquida de migração 1995/2000	0,599	0,092	0,123	6,516	0,000
Índice de Governança	-0,082	0,017	-0,089	-4,838	0,000
Percentual de área municipal plantada em 2000 (%)	0,153	0,041	0,102	3,723	0,000
Out layer (+)	0,377	0,034	1,082	-14,497	0,000
Out layer (-)	-0,488	0,056	-1,400	6,762	0,000

Modelo de Defasagem Espacial – 2SLS

O quadro a seguir resume os resultados dos testes que foram aplicados ao modelo de regressão linear da percentagem de área original de floresta desmatada até 2001 para os 630 municípios amazônicos. Os resultados sugerem também a possibilidade de ambos os efeitos estarem presentes, ou seja, dependência espacial do percentual de área de floresta original desmatada e dependência espacial dos resíduos do modelo. Nesse caso, optou-se também pelo modelo de defasagem espacial (Lag).

Quadro 2. Resultados dos testes de dependência espacial do modelo OLS com controle de outliers: 2001.

Teste	MI/DF	VALUE	PROB
Moran's I (error)	0.340638	14.326308	0.0000
Lagrange Multiplier (error)	1	189.72479	0.0000
Robust LM (error)	1	16.306554	0.0001
Lagrange Multiplier (lag)	1	293.17972	0.0000
Robust LM (lag)	1	119.76149	0.0000
Lagrange Multiplier (SARMA)	2	309.48627	0.0000

A próxima tabela (TAB. 13) mostra informações referentes a modelagem tipo lag espacial do desmatamento municipal amazônico, em 2001, ajustado através do método 2SLS. O modelo também se mostrou bem identificado e com um elevado índice de correlação linear, da ordem de 0,93, o que sugere que o modelo está explicando, aproximadamente 87% da variância total do erro aleatório. A comparação desses resultados com os da modelagem clássica desse modelo revela que houve elevação do valor de R², ou seja, passou de 0,81 (TAB. 13) para 0,86 (TAB. 17). O alto nível de significância do coeficiente de correlação espacial (ρ) também sugere a confirmação de autocorrelação da variável dependente.

Tabela 13. Resultados do modelo OLS com controle de outliers: 2001.

Estatística de regressão

R múltiplo R-Quadrado R-quadrado ajustado Observações

0,930	0,8646	-	630
-------	--------	---	-----

Modelo Espacial (Lag Espacial - 2SLS)	Coefficiente	Erro padrão	Coef. padron.	z value	Significância (Valor-P)
Constante	-0,339	0,036		-9,433	0,000
Índice de Proximidade de Rodovias em 2001	0,126	0,034	0,100	3,733	0,000
Cabeças de Gado por Km2	0,245	0,031	0,168	7,893	0,000
Densidade da População Rural	0,147	0,033	0,097	4,392	0,000
Rendimento per capita do Setor Agropecuário por Km2	0,222	0,035	0,155	6,422	0,000
Taxa líquida de migração 1995/2000	0,414	0,071	0,085	5,812	0,000
Índice de Governança	-0,057	0,013	-0,062	-4,361	0,000
Percentual de área municipal plantada em 2000 (%)	0,074	0,032	0,049	2,305	0,021
Out layer (+)	0,268	0,043	0,767	6,192	0,000
Out layer (-)	-0,296	0,029	-0,848	10,335	0,000
Lag Espacial	0,525	0,034	0,525	15,312	0,000

Modelo de Defasagem Espacial – Máxima Verossimilhança

A Tabela 14 mostra as informações referentes ao modelo tipo lag espacial do desmatamento dos municípios amazônicos, em 2001, ajustado através do método ML. O modelo mostrou-se bem identificado e com o maior índice de correlação linear, da ordem de 0,93, o que sugere que o modelo está explicando, aproximadamente 87% da variância total do erro aleatório. A comparação desses resultados com os da modelagem 2SLS desse modelo revela que houve uma pequena elevação do valor de R², ou seja, passou de 0,86 (TAB. 13) para 0,87 (TAB. 14).

Tabela 14. Resultados do modelo de defasagem espacial - Máxima Verossimilhança: 2001.

Estatística de regressão

Log. Max. R-Quadrado AIC Observações

437,612	0,8716	-853,2230	630
---------	--------	-----------	-----

Modelo Espacial (Lag Espacial - Maximum Likelihood)	Coefficiente	Erro padrão	Coef. padron.	z value	Significância (Valor-P)
Constante	-0,332	0,035		-9,494	0,000
Distância média à rodovia asfaltada	0,114	0,032	0,091	3,591	0,000
Cabeças de Gado por Km2	0,238	0,031	0,163	7,688	0,000
Densidade da População Rural	0,144	0,033	0,094	4,308	0,000
Rendimento per capita do Setor Agropecuário por Km2	0,217	0,034	0,152	6,448	0,000

Taxaliquidademigração 1995/2000	0,405	0,070	0,083	5,820	0,000
Índice de Governança	-0,056	0,013	-0,061	-4,353	0,000
Percentual de área municipal plantada em 2000(%)	0,070	0,031	0,047	2,238	0,025
Outlayer(+)	0,262	0,042	0,752	6,193	0,000
Outlayer(-)	-0,287	0,026	-0,822	10,875	0,000
Lag Espacial	0,550	0,027	0,550	20,067	0,000

4 - COMENTÁRIOS FINAIS

Tal como já mencionado, esse trabalho teve por objetivo a elaboração de modelos lineares clássicos e espaciais que estabeleçam relações funcionais entre essas variáveis e o desmatamento amazônico entre 1997 e 2001, com base na exploração estatística de variáveis que direta ou indiretamente estejam envolvidas no processo de desmatamento amazônico.

Apesar de os modelos lineares clássicos, após o controle dos outliers, apresentarem elevados índices de ajuste e de alto grau de significância dos parâmetros estimados, os testes acusaram forte presença de autocorrelação espacial das variáveis dependentes e que indicava para uma modelagem do tipo defasagem espacial. Os dados da próxima Tabela resumem as informações sobre o ajuste obtido para cada um dos modelos estimados nesse estudo.

Tabela 15. Resumo dos modelos de desmatamento dos municípios amazônicos: Estoque – 1997 e estoque – 2001.

Modelo	Controle		
	Heteroscedástico	R	R² Log-likelihood
Desmatamento por Km2 da floresta original em 1997 (%)			
Linear (Máxima Verossimilhança)	não	0.8470.717	173.80
Linear (Máxima Verossimilhança)	sim	0.9040.817	311.32
Espacial (2SLS)	sim	0.9230.852	
Espacial (Máxima Verossimilhança)	sim	0.9340.872	445.81
Desmatamento por Km2 da floresta original em 2001			
Linear (Máxima Verossimilhança)	não	0.8520.727	178.61
Linear (Máxima Verossimilhança)	sim	0.8990.809	291.06
Espacial (2SLS)	sim	0.9300.864	
Espacial (Máxima Verossimilhança)	sim	0.9340.872	440.06

Grosso modo, com base nas informações da Tabela 22, pode-se afirmar que os objetivos iniciais desse relatório foram alcançados uma vez que houve claramente uma progressão das estatísticas indicadoras do grau de ajuste dos modelos estimados,

culminando na modelagem da defasagem espacial das variáveis de desmatamento através do método da Máxima Verossimilhança.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSELIN, L. *SpaceStat TUTORIAL*. Urbana-Champaign, University of Illinois, 1992.
- ANSELIN, L. *Spatial Externalities, Spatial Multipliers and Spatial Econometrics*. Urbana-Champaign, University of Illinois, 2002.
- GARCIA, Ricardo Alexandrino; SOARES FILHO, Britaldo Silveira; SAWYER, Diana Oya. Dimensões sócio-econômicas e movimentos populacionais: uma regionalização da Amazônia brasileira. In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, XIV, 2004, Caxambú. **Anais do XIV ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS. 2004.**
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) **Censo Agropecuário de 1995/1996.** (CD-ROM). Rio de Janeiro, Br: IBGE. 1996.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) **Censo Demográfico de 2000.** (CD-ROM). Rio de Janeiro, Br: IBGE. 2000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) **Contagem de 1996.** (CD-ROM). Rio de Janeiro, Br: IBGE. 1996.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Banco Municipal de Informações.** 2a. Ed. Rio de Janeiro, IBGE, 1998. (Disponível em CD-ROM).
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Perfil dos Municípios Brasileiros.** Rio de Janeiro, IBGE, 1999. (Disponível em CD-ROM).
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Agrícola Municipal.** Rio de Janeiro, IBGE, 2001. (Disponível em CD-ROM).
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Pecuária Municipal.** Rio de Janeiro, IBGE, 2001. (Disponível em CD-ROM).
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) (2002) **Monitoring of Brazilian Amazonian Forest by Satellite** 2000
<<http://www.grid.inpe.br/papers.html>> (June 2002).
- SILVA, Wilton P. e SILVA, Cleide M. D. P. S. LAB Fit Ajuste de Curvas (Regressão não-Linear e Tratamento de Dados) v. 7.2.14, 2003-2004. Disponível em: <http://www.angelfire.com/rnb/labfit/index_p.htm>.