

Comparação dos fatores determinantes do desflorestamento nos estados do Pará, Rondônia e Amazonas

Arnaldo de Queiroz da Silva
Igor da Silva Narvaes
Júlio Bandeira Guerra
Ana Paula Dutra de Aguiar
Corina da Costa Freitas

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
arnaldo@dsr.inpe.br
igor@dsr.inpe.br
guerra@dsr.inpe.br
anapaula@dpi.inpe.br
corina@dpi.inpe.br

Abstract. The process of human occupation in the Brazilian Amazonia has deserved attention of scientists, politicians and of the society in general in the last decades mainly due to the high taxes of deforestation. Several studies have attempted to identify the determining factors of deforestation through the use of empirical methods. In this work, we compare the factors related to the deforestation in the States of Pará, Amazon and Rondônia using a cellular space database that aggregates biophysical and socio-economic potential determining factors, aggregated from different sources. Our goal is to verify the hypothesis that the intra-regional heterogeneity can be captured by the differences in the deforestation socio-economic and environmental determining factors among the three States. Linear regression models are used. The models constructed demonstrate quantitatively the specificity of the deforestation patterns in each state, and the differences in the relative importance of the determining factors, according to local characteristics, and history and stage of occupation of each State.

Palavras-chave: deforestation, Pará, Rondônia, Amazonas, linear regression model, desflorestamento, modelo de regressão linear.

1. Introdução

A bacia do Rio Amazonas concentra cerca de 60% de toda a área de floresta tropical remanescente no mundo, o que a confere importância na manutenção da biodiversidade, das condições climáticas e no armazenamento de carbono (Fernside, 1999). Contudo, é nesta região que ocorrem as maiores taxas de desflorestamento (INPE, 2006). Além disso, outros processos associados ao desflorestamento como, fragmentação de habitat, efeito de borda, queimadas, corte seletivo e mineração ilegal, contribuem para a degradação desta floresta (Laurence *et al.*, 2002).

Até o início década de 1960, a ocupação da Amazônia limitou-se a algumas áreas costeiras e outras ao longo dos rios. Nas décadas de 1970 e 1980 ocorreram as primeiras ocupações mais intensas, o que ocasionou maiores mudanças no território, devido a um esforço do governo militar para povoar a região e integrá-la ao resto do país a partir de uma rede de estradas (Becker, 2005). Também a partir dos anos de 1970 houve um crescimento extraordinário de cidades médias na região Norte, resultado de surtos de desenvolvimento baseados na exploração dos recursos naturais sob a forma de ciclos, como o garimpo e a exploração madeireira. No decorrer de todo o processo de ocupação da região amazônica o desflorestamento demonstrou ter um padrão de dependência espacial acentuado, fato que ocorre ainda hoje. De acordo com Alves (2001), os desflorestamentos tendem a ocorrer próximo a áreas desflorestadas previamente, muitos deles concentrados a um raio de 100 km a

partir de uma estrada principal, de zonas de desenvolvimento criadas na década de 1970 e de centros urbanos mais antigos.

De acordo com Becker (2001), na Amazônia coexistem regiões com diferentes velocidades de mudança, devido a diversidade dos condicionantes biofísicos, sociais, econômicos e políticos, o que confere ao desflorestamento um modo de expansão heterogêneo, dependente de características locais. A maioria das áreas desflorestadas estão concentradas na região sudeste da Amazônia, a área usualmente conhecida como “Arco do Desflorestamento”, ou Arco Densamente Povoados, como proposto por Becker (2005), onde a maioria dos centros urbanos, estradas e cernes das atividades econômicas estão localizadas. Atualmente, porém, a área mais vulnerável é a Amazônia Central. Esta é a área cruzada pelos novos eixos de desenvolvimento, que se estendem do centro do estado do Pará até a região leste do estado do Amazonas, onde a fronteira da nova ocupação está localizada (Becker, 2005). A Amazônia Ocidental é a região mais preservada da influência dos eixos das principais rodovias (Becker, 2005).

Dada a importância da região Amazônica, e os potenciais impactos negativos do desflorestamento, vários estudos anteriores buscaram entender a dinâmica de uso e ocupação dessa região. Dentre estes estudos, há aqueles que objetivaram identificar as variáveis que mais influenciam o processo de desflorestamento da Amazônia, e quantificar a importância relativa de cada uma delas. No entanto, poucos estudos anteriores analisaram diferenças intra-regionais nos fatores determinantes. Vários modelos econométricos foram desenvolvidos (Andersen e Reis, 1997; Pfaff, 1999; Reis e Guzmán, 1994), utilizando dados no nível municipal para toda a Amazônia, para analisar a importância de fatores de desflorestamento como crédito, pressão populacional, presença de rodovias, fatores biofísicos, etc. Análise espacial explícita de 10 fatores determinantes de desflorestamento foram realizados por Kirby *et al.* (2006) e Laurence *et al.* (2002) usando células regulares como a unidade de análise em duas resoluções espaciais: 50 x 50 km² e 20 x 20 km². Dos estudos anteriores, apenas Perz e Skole (2003) realizaram uma análise comparativa em três partições espaciais (remota, fronteira, consolidada), porém focando especificamente em determinantes sociais do crescimento de vegetação secundária. Aguiar (2006) realizou um estudo comparativo dos fatores determinantes do desflorestamento em três macro-regiões propostas por Becker (2004), buscando quantificar as diferenças intra-regionais no processo de ocupação.

Neste contexto, este trabalho objetivou refinar a análise realizada por Aguiar (2006), construindo modelos de regressão linear múltipla para identificar os fatores determinantes dos padrões de desflorestamento em três Estados da Amazônia brasileira: Amazonas, Pará e Rondônia. Pará e Rondônia possuem parte de seus territórios dentro do arco do desflorestamento e tem seu padrão de ocupação fortemente influenciado pelos projetos de colonização, pólos de desenvolvimento e obras de infra-estrutura das últimas décadas, com áreas desflorestadas convertidas principalmente para pastagens (Aguiar, 2006), enquanto o estado do Amazonas apresenta uma dos menores índices de desflorestamento, o que pode ser explicado pelo perfil de sua matriz econômica, apoiada basicamente na zona franca de Manaus e na ocupação concentrada ao longo da calha de seus rios. Tem-se portanto dois estados com padrão de ocupação semelhantes e um estado com características distintas em relação ao padrão de ocupação.

O objetivo deste trabalho é quantificar as diferenças entre os Estados através de uma análise estatística comparativa. As etapas de desenvolvimento e os resultados alcançados são apresentados a seguir.

2. Materias e métodos

Neste trabalho, utilizou-se informações contidas no banco de dados espaciais da Amazônia, organizado por Aguiar (2006), no qual o espaço amazônico está sistematizado em células de dimensão 25 x 25 km.

Cada célula contém dados relativos ao percentual de área desflorestada, que nesta análise será a variável dependente, além de outras informações potencialmente relacionadas ao desflorestamento, que a priori, são candidatas a variáveis explicativas dentro da abordagem dos modelos de regressão empregado neste trabalho.

A variável dependente corresponde ao “porcentual de área desflorestada em cada célula unitária” e este valor foi obtido a partir do mapa de desflorestamento gerado pelo Programa de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por satélite - PRODES (**Figura 1**), com dados acumulados até 1997 (INPE, 2006).

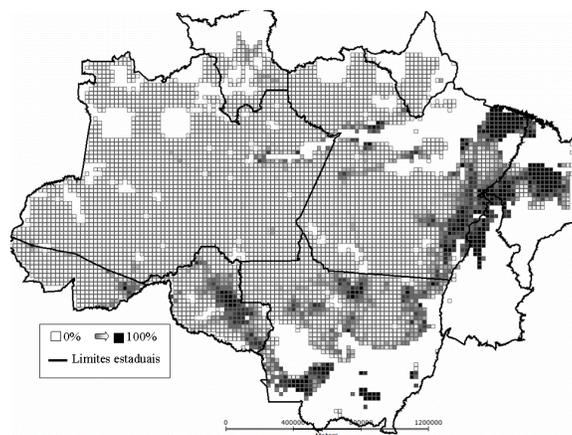


Figura 1 – Padrão espacial de áreas desflorestadas em 1997 em células de 25 x 25 km² (Fonte: Aguiar, 2006).

Foram utilizadas um total de 4024 células, representando o número total de células válidas (excluindo áreas de nuvens e não floresta). O **Quadro 1** ilustra a heterogeneidade dos três Estados em termos do grau de ocupação, apresentando como indicador o número e porcentagem de células com desflorestamento acima de 10%.

Quadro 1- Quantidades de células válidas para os estados do Pará, Amazonas e Rondônia (Fonte: Aguiar, 2006)

Estado	Número de células	Número de células com mais de 10%	%
Amazonas	2117	102	4,81
Pará	1559	485	31,1
Rondônia	348	186	53,44
Total	4024	777	19,3

As potenciais variáveis explicativas para os padrões macro e intra-regional de deflorestamento na Amazônia, compreendem informações de caráter sócio-econômicos e ambientais oriundas de fontes diversas. Ao todo, perfazem um total de 50 variáveis agrupadas

em sete categorias, melhores descritas em Aguiar (2006). Entretanto, para este trabalho apenas 18 variáveis foram utilizadas como um conjunto inicial de variáveis independentes (X_i) candidatas a explicar o desflorestamento nos estados do Pará, Rondônia e Amazonas, conforme **Quadro 2**.

Quadro 2: Descrição do conjunto de variáveis explicativas.

Categoria	Variável	Descrição	Unidade	Fonte
<i>Acessibilidade a mercados</i>	dist_non_paved_road	Distância Euclidiana até uma rodovia não pavimentada mais próxima.	km	IBGE
	dist_paved_roads	Distância Euclidiana até uma rodovia pavimentada mais próxima	km	IBGE
	dist_large_rivers	Distância Euclidiana até o rio grande mais próximo	km	IBGE
	dist_railroads	Distância Euclidiana até a ferrovia mais próxima	Km	IBGE
	conn_sp*	Conexão até SP (mercado nacional) através de rede viária considerando o tipo de rodovia	km	IBGE
	conn_ne*	Conexão até o Nordeste (mercado nacional) através de rede viária considerando o tipo de rodovia	-	IBGE
	conn_mkt*	Conexão máxima a um dos mercados: SP ou Nordeste considerando o tipo de rodovia	-	IBGE
	conn_ports*	Conexão máxima aos portos da Amazônia considerando o tipo de rodovia	-	IBGE
<i>Atratividade Econômicos</i>	dist_wood	Distância Euclidiana até os pólos de produção de madeira	km	IBAMA
	dist_mineral	Distância Euclidiana até os depósitos de todos os tipos de minerais	km	CPRM
<i>Demográficos</i>				
<i>Tecnológicos</i>				
<i>Estrutura Agrária Política</i>	agr_small	Porcentagem de pequenas propriedades em termos da área dos municípios	% da área da célula	IBGE
	prot_all	Porcentagem de Áreas protegidas (qualquer tipo UC ou TI)	% da área da célula	IBAMA FUNAI
	prot_il	Porcentagem de Terras Indígenas	% da área da célula	
	prot_cu	Porcentagem de Unidades de Conservação	% da área da célula	
<i>Ambientais</i>	soil_fert_B1	Porcentagem de solos de alta e media fertilidade	% da área da célula	IBGE
	soil_fert_B3	Porcentagem de solos de várzea	% da área da célula	IBGE
	clima_precip	Média de precipitação nos três meses subseqüentes mais secos do ano		INMET
	clima_humid	Média de umidade nos três meses subseqüentes mais secos do ano		INMET

Para se estabelecer o relacionamento entre os padrões de deflorestamento e as variáveis explicativas utilizou-se a técnica de análise de regressão múltipla. A formulação matemática para a regressão linear, expressa em formato matricial, é dada por:

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (1)$$

onde, Y é um vetor ($n \times 1$) de dados de observações da variável dependente, X é uma matriz ($n \times k$) de ($k - 1$) variáveis explicativas; β é um vetor ($k \times 1$) de parâmetros (estimados pela regressão linear) e ε é um vetor ($n \times 1$) de erros aleatórios.

Para cada um dos estados estudados, construiu-se um modelo de regressão linear, com exceção ao Pará, para o qual obteve-se dois modelos. Estes modelos permitiram identificar quais parâmetros são importantes para o entendimento do padrão de deflorestamento nos estados, assim como estabelecer a significância relativa das variáveis explicativas.

Na etapa de análise exploratória dos dados, observou-se que algumas variáveis não apresentavam relação linear com a variável dependente (deflorestamento – luc_def), o que exigiu a aplicação de transformações de variáveis. Dentre as possibilidades de transformação testadas, a raiz quadrada, aplicada tanto à variável dependente quanto a algumas variáveis explicativas, foi a que apresentou melhores resultados.

Outro procedimento adotado foi excluir do mesmo modelo variáveis com correlação acima de 0,50. No processo de redução de variáveis aplicou-se os critérios de *best subset* baseado nos valores de R², CP e R_{ajustado} (Neter et al., 1996).

3. Resultados e discussões

A relação entre a variável dependente e as variáveis explicativas é estabelecida pelo valor obtido para os coeficientes dos modelos de regressão. A **Tabela 1** mostra esses valores normalizados (coeficientes Betas), organizados em ordem decrescente para cada um dos modelos obtidos, além de apresentar os valores-P, com nível de confiança de 95%, e os valores dos coeficientes de determinação (R²). Para o estado do Pará, em função do critério de não se permitir variáveis com mais 0,50 de correlação no mesmo modelo, obteve-se dois modelos de regressão. Os valores de R² indicam que o melhores ajustes foram obtidos para os modelos de Rondônia e Pará enquanto o modelo do Amazonas mostrou um ajuste inferior. Estes resultados eram esperados considerando as diferenças no padrão de ocupação do território desses estados.

Tabela 1 – Parâmetros dos modelos de regressão para os estados do Amazonas, Rondônia e Pará

RONDÔNIA		AMAZONAS		PARÁ (A)		PARÁ (B)	
	β		β		β		β
	valor-P		valor-P		valor-P		valor-P
Prot_allI	-0,3303	Conn_ports	0,389317	Dist_paved	-0,4664	Conn_ne	0,4404
	0,000		0,000		0,000		0,000
Dist_railroads	-0,2643	Dist_paved	-0,191001	Dist_no_paved	-0,2471	Clima_prec	-0,2677
	0,000		0,000		0,000		0,000
Dist_paved	-0,2553	Solos_férteis_várzea	0,176075	Solos_férteis_Terra_firme	0,1468	Conn_ports	0,2515
	0,000		0,000		0,000		0,000
Solos_férteis_Terra_firme	0,2307	Dist_large_rivers	-0,164760	Conn_ports	0,1488	Dist_wood_extr_poles	-0,2376
	0,000		0,000	0,3613	0,000		0,000
Dist_wood_extr_poles	-0,1872	Conn_sp_inv_p	-0,127162	Prot_allI	-0,1320	Prot_allI	-0,1680
	0,000		0,000	-0,1259	0,000		0,000
Dist_no_paved	-0,1610	Dist_no_paved	-0,094330	Clima_prec	-0,1204	Solos_férteis_Terra_firme	0,1023
	0,000		0,000	-0,0447	0,000		0,000
Prot ti	-0,1467	Prot_allI	-0,071795	Dist_min_dep	-0,0950	Agr_area_small	0,0994
	0,000		0,000		0,000		0,000
Dist_min_dep	-0,1048	Agr_area_small	-0,039103	Prot_cu	-0,0785	Dist_min_dep	-0,0849
	0,000		0,044		0,000		0,000
Solos_ferteis_várzea	0,0934			Solos_férteis_várzea	0,0555	Solos_férteis_várzea	0,0551
	0,000				0,000		0,000
Agr_area_small	0,0748						
	0,014						
R ²	0,8269	R ²	0,3846	R ²	0,7392	R ²	0,7476

Outra forma de visualizar estes resultados é mostrada no gráfico da **Figura 2**. As barras acima da linha de base indicam relação positiva com o desflorestamento, enquanto que o oposto indica relacionamento negativo. A dimensão das barras por sua vez representa a significância dos variáveis explicativas com a variável dependente.

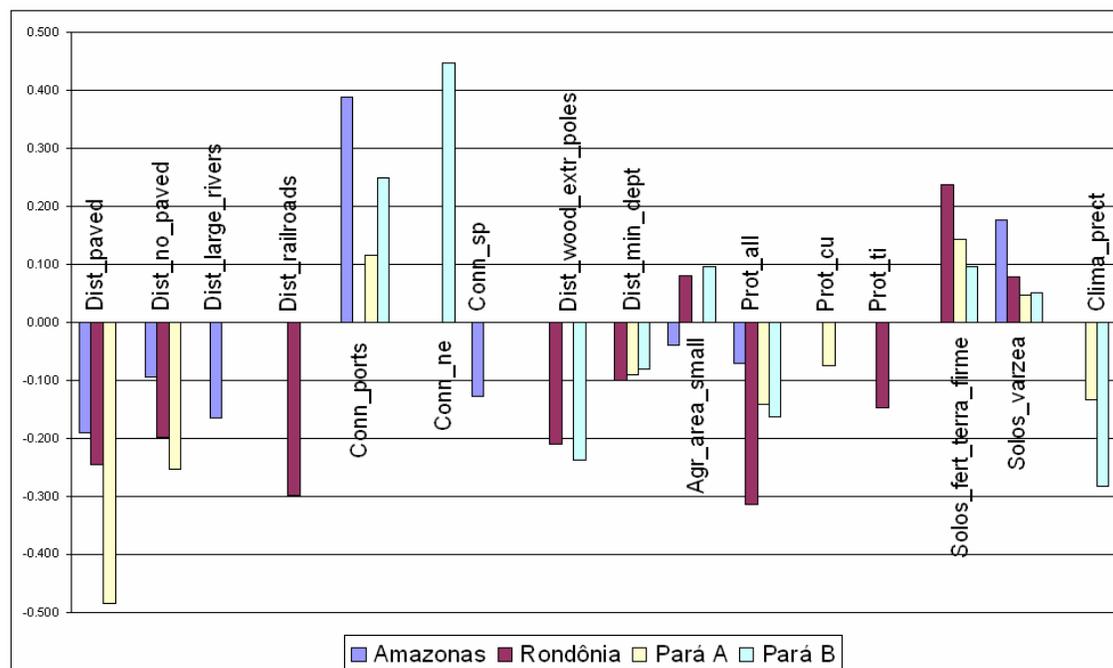


Figura 2: Significância das variáveis explicativas em relação à variável dependente.

Entre as variáveis relacionadas a acessibilidade aos mercados foram definidas considerando a distância euclidiana do centro das células às rodovias, rios, ferrovias e às conexões a portos e mercados nacionais. Quanto mais distante estiverem as células aos eixos de escoamento, mais negativa será a relação da variável com o desflorestamento (menor o desflorestamento). Pelos resultados, observa-se que as variáveis relacionadas à infraestrutura rodoviária têm forte influência nos modelos, destacadamente as rodovias pavimentadas. A relação das estradas com o deflorestamento mostra que esta variável tem forte controle no padrão de deflorestamento da região, principalmente para o Pará e Rondônia. Para o Amazonas, é a distância aos grandes rios que exerce maior influência no deflorestamento, ainda que as estradas tenham importância principalmente na região sul onde novas fronteiras de ocupação estão se implantando. Uma curiosidade do modelo de Rondônia é a presença da variável relacionada à distância a ferrovia, uma vez que este estado não possui atualmente transporte ferroviário regular em atividade. Uma possível explicação é que esta variável explicativa esteja refletindo a influência da distância aos mercados consumidores no sul do país.

Ainda em relação à acessibilidade aos mercados, cada célula possui indicadores de conectividade inversamente proporcionais ao caminho mais curto entre centróide da célula e os mercados nacionais e portos, utilizando a rede rodoviária (Aguiar, 2006). Quanto maior o valor do indicador, maior o grau de conectividade, e quanto maior a conectividade, no geral, maior o desflorestamento. A variável conexão a portos é a que possui maior importância relativa para o modelo do estado do Amazonas destacando o padrão de ocupação diferenciado deste estado que ainda se mostra muito dependente do transporte hidroviário. Esta variável

também aparece nos modelos do Pará, mostrando que em algumas regiões o transporte de toras pelos rios ainda é uma prática comum. Sobre os mercados, observa-se que a conexão ao nordeste é importante para o estado do Pará.

Sobre os fatores de atratividade econômica, esta categoria inclui duas variáveis: distância a pólos madeireiros e distância a depósitos minerais. A distância a pólos madeireiros é medida como a distância euclidiana de cada célula até o pólo de madeireiro mais próximo. A distância mínima de cada célula a depósitos minerais foi medida da mesma forma (Aguiar, 2006). Estas duas variáveis aparecem nos modelos do Pará e Rondônia ressaltando a importância do extrativismo vegetal e mineral na matriz produtiva desses estados. São duas atividades econômicas fortemente relacionadas com a história de ocupação da Amazônia e que nos modelos aparecem com média influência no padrão de deflorestamento para estes estados.

A agricultura em pequenas propriedades demonstrou ter influência positiva no processo de deflorestamento para os estados de Rondônia e Pará, mas contribuindo pouco para o processo. Já para o estado do Amazonas essa variável tem relação inversa com o deflorestamento, o que pode ser explicado pelo fato de predominar neste estado o modo de vida das populações tradicionais cujo padrão de ocupação em pequenas áreas de produção agrícola, está baseado na agricultura de subsistência, na pesca e no extrativismo vegetal, e que no contexto da análise, este modelo de ocupação não contribui para o aumento dos índices de deflorestamento.

De uma forma geral, as áreas de proteção tem influência importante na contenção do deflorestamento para os três estados. Para o modelo de Rondônia, esta variável é a mais importante dado ao fato de que este estado está entre os que mais contribuem para o avanço da taxa de deflorestamento na Amazônia, possuindo 29,2% de seu território devastado (Ferreira *et al.*, 2005). Estudos realizados por Aaron *et al.* (2001) e Ferreira *et al.* (2005) comprovam a eficácia das áreas de proteção na detenção do avanço do deflorestamento. Tais constatações comprovam a hipótese de que o deflorestamento em Rondônia seja preferencialmente concentrado na região central do Estado, onde as áreas protegidas servem de barreira ao avanço do deflorestamento de forma contínua para outras regiões. Isso demonstra a importância da criação e manutenção de áreas protegidas em áreas sob forte pressão de ocupação. O mesmo efeito tem as unidades de conservação para o estado do Pará.

Quanto aos solos, os modelos revelam que os solos férteis de terra firme são significantes para os estados do Pará e Rondônia enquanto os de várzea, apesar de estarem presentes nos modelos dos três estados, é destacadamente importante para o estado do Amazonas, fortalecendo as diferenças entre estes estados. A fertilidade dos solos em terra firme é uma variável relevante para Rondônia que teve sua ocupação estimulada para o uso de recursos naturais oriundos de regiões férteis. O modelo de colonização do estado seguiu um padrão de ordenamento baseado nos modelos e assentamento rural do INCRA cuja expressão geométrica são estruturas em formato de “espinha de peixe” de fácil identificação nas imagens de satélite. A ocupação foi direcionada para as regiões de fertilidade maior, daí a significância dessa variável para Rondônia.

A variável relacionada à precipitação pluviométrica aparece apenas nos modelos do Pará e sua relação com o deflorestamento é negativa, mostrando que a maior parte da ocupação ocorreu em áreas de menor pluviosidade.

4. Considerações finais

Os modelos gerados demonstraram especificidade no padrão de deflorestamento para os três estados analisados, evidenciando o caráter heterogêneo de fatores influentes no deflorestamento.

Os modelos específicos apresentaram melhor ajuste para os estados de Rondônia e Pará, que possuem padrões fortemente apoiados no uso dos recursos florestais e ocupação agrícola do solo, enquanto que no estado do Amazonas a matriz econômica é fortemente apoiada na Zona Franca de Manaus. As maiores diferenças foram: a importância das áreas protegidas como barreira à ocupação em Rondônia; a importância da variável conexão ao nordeste e a portos no Pará; e a importância da distância a rios no Amazonas.

Como sugestão para continuidade deste trabalho, recomenda-se a utilização de métodos que considerem a dependência espacial das variáveis, dado o padrão altamente concentrado do desflorestamento em determinadas regiões.

5. Referências Bibliográficas

- Aaron, G. B.; Raymond, E. G.; Richard, E. R.; Fonseca, G. A. B. Effectiveness of Parks in Protecting Tropical Biodiversity. **Science**, v. 291, p. 125-127, jan. 2001.
- Aguiar, A. P. D. **Modelagem de mudança do uso da terra na amazônia: explorando a heterogeneidade intra-regional**. Tese de doutorado, INPE, p.173, 2006.
- Alves, D. S. O Processo de desmatamento na Amazônia. **Parcerias Estratégicas**. v. 12, p. 259-275, 2001.
- Andersen, L.; Reis, E., 1997, Deforestation, development, and government policy in the Brazilian Amazon: an econometric analysis (IPEA Report 76-1997), Rio de Janeiro, IPEA.
- Becker, B. K. Geopolítica na Amazônia. *Estudos Avançados* 19 (53), 2005. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/tutorials/dynamical_modelling/references.html. Acesso em: 20 agosto 2006.
- Becker, B. **Amazônia: geopolítica na virada do III milênio**. Rio de Janeiro: Garamond., 2004, 172 pp
- Becker, B. Revisão das políticas de ocupação da Amazônia: é possível identificar modelos para projetar cenários?. **Parcerias Estratégicas**. v. 12, p. 135-159, 2001.
- Fernside, M. P. Biodiversity as an environmental service in Brazil's Amazon forests: risks, value and conservation. **Environmental Conservation**. v. 26, p. 305-321, 1999.
- Ferreira, L. V.; Venticinque, E.; Almeida, S. O desflorestamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. **Estudos Avançados**, n. 19, v. 53, p. 157-166, 2005.
- INPE. Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite. São José dos Campos, Brazil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>. Acesso em: 10 de Outubro de 2006.
- Kirby, K. R.; Laurance, W. F.; Albernaz, A. K.; Schroth, G.; Fearnside, P. M.; Bergen, S.; Venticinque, E. M.; Costa, C. D. The future of deforestation in the Brazilian Amazon. **Futures**, 2006, no prelo.
- Laurence, W. F.; Albernaz, A. K. M.; Schroth, G.; Fearnside, P. M.; Bergen, S.; Venticinque, E. M.; Costa, C. Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. **Journal of Biogeography**, v. 29, p. 737-748, 2002.
- Neter, J. , Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J., Wasserman, W. **Applied Linear Statistical Models**. McGraw-Hill, Fourth Edit. 1996. 1408 p.
- Pfaff, A. What drives deforestation in the Brazilian Amazon? Evidence from Satellite and Socio-economic data. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 37, p. 26-43, 1999.
- Perz, S. G.; Skole, D. L. Social determinants of secondary forests in the Brazilian Amazon. **Social Science Research**, v. 32, p. 25-60, 2003.
- Reis, E.; Guzmán, R. An econometric model of Amazon Deforestation. In: BROWN, K.; PEARCE, D., eds., **The causes of tropical deforestation, the economic and statistical analysis of factors giving rise to the loss of tropical forests**: London, University College London Press, p. 172-191, 1994.