

Causas e Efeitos dos Desmatamentos na Amazônia: Uma análise a partir de dados orbitais, cartográficos e censitários

Nilson Clementino Ferreira¹
Laerte Guimarães Ferreira Jr.¹
Alfredo Huete²
Fausto Miziara¹
Manuel Eduardo Ferreira¹

¹ Universidade Federal de Goiás
Programa de Doutorado em Ciências Ambientais
Campus Samambaia, CEP: 74001-970 – Goiânia-GO, Brasil
ncferreira@uol.com.br, laerte@iesa.ufg.br, fausto@fchf.ufg.br, manuel@iesa.ufg.br

³ Department of Soil, Water, and Environmental Science
University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA
E-mail: ahuete@ag.arizona.edu

Abstract. The Amazon region plays an instrumental role for the regional and global climatic balance. However, abundant natural resources, and in particular, the availability of land for agriculture and cattle ranching, have motivated, since the early 1970's, many occupation initiatives and a severe clear cutting of extensive forested areas. The first goal of this study was to understand the role of the agrarian structure in the conversion of forest into pasture and agriculture fields. Linear regression results indicate that up to 80% of the deforestation can be well explained by the variation in land concentration. In fact, strong spatial correlations were found between deforestation hotspots and land appropriation and land concentration. On the other hand, the second goal was to assess, by remote sensing means, the impacts of forest fragmentation on the Amazon landscape. Landscape disturbance, obtained for an area of approximately 3.5 million Km² through simple spatial metrics (i.e. number of fragments, mean fragment area, and border size) and principal component transformation were then compared to the MODIS NDVI (normalized difference vegetation index) and EVI (enhanced vegetation index) seasonal responses. As expected, higher disturbance values prevail in the southern border of the Amazon, near the intensively converted deforestation arc.

Palavras-chave: remote sensing, deforestation, spatial analysis, sensoriamento remoto, desmatamento, análise espacial

1. Introdução

Devido a sua dimensão territorial, grande sistema fluvial e extensa cobertura vegetal, a região Amazônica tem grande influência global no ciclo do carbono, balanço de energia e equilíbrio climático Potter et al. (2001); Costa e Foley (2000); Houghton et al. (2000); Williams (1997). Por outro lado, rápidas alterações na cobertura da terra, impulsionadas por projetos governamentais para ocupação da terra e incremento de atividades econômicas, tem afetado os ecossistemas da Amazônia, desde o início da década de 70 do século passado Skole et al., (1994). Mesmo após um grande conjunto de iniciativas e adoções de políticas ambientais relacionadas na conservação dos recursos naturais e da biodiversidade nos anos 90, não ocorre diminuição na taxa de conversão da floresta que anualmente tem sido em média de dois milhões de hectares por ano INPE (2000).

Os desmatamentos que ocorrem na Amazônia vêm sendo mapeados desde 1978 com a utilização de sensoriamento remoto Skole & Tucker (1993), por outro lado, têm sido realizadas importantes iniciativas na tentativa de se levantar as causas e possíveis tendências Pfaff (1999); Alves et al. (2003), mas o relacionamento entre o desmatamento e a estrutura fundiária continua sem grandes explicações.

Outro aspecto de extrema importância sobre o desmatamento na Amazônia é a intensa fragmentação de habitats, que ao lado de alterações em sua diversidade e composição biológica, é também responsável por consideráveis mudanças em processos ecológicos, tais como ciclos de nutrientes e polinização Lovejoy et al. (1986); Laurence & Bierregaard (1997). É importante observar, que os fragmentos de florestas favorecem a mortalidade de árvores e danos aos dosséis, aparentemente causados por mudanças micro-climáticas e aumento na turbulência de ventos em suas bordas Laurence et al. (1997).

Devem-se considerar também os impactos induzidos pela ação humana devido ao acesso facilitado a esses fragmentos de florestas, tais como cortes seletivos, aumento na ocorrência de incêndios, intensa utilização de insumos e defensivos agrícolas nas proximidades das bordas dos fragmentos, caça e introdução de espécies exóticas.

Devido a todas essas perturbações potenciais, a possibilidade de remotamente avaliar as condições dos fragmentos de floresta é certamente de grande importância para a preservação da eficiência dos ecossistemas. Alguns estudos sugerem uma forte correlação entre estruturas de florestas e índices de vegetação óticos Gamon et al. (1995); Oliveira-Filho & Fonte (2000); Freitas et al. (2005).

Neste contexto, assumindo que a apropriação de terra impulsiona o desflorestamento, o primeiro objetivo deste trabalho foi avaliar, em uma base de dados de grande escala contendo variáveis sociais, econômicas e de desmatamentos obtida por mapeamento a partir de imagens de sensoriamento remoto, o relacionamento entre a estrutura fundiária e o desmatamento ao longo dos anos. Um segundo objetivo está centrado na hipótese de que o sinal de sensoriamento remoto óptico é afetado pela fragmentação das florestas. Esta hipótese é investigada verificando os índices de vegetação do produto MODIS (MOD13Q1) junto aos distúrbios da paisagem mapeados a partir de métricas simples de paisagem.

2. Materiais e Métodos

Este trabalho foi elaborado em duas etapas, na primeira verificou-se o nível de relacionamento entre a concentração de terras com a quantidade de desmatamentos ocorridos em 221 municípios da Amazônia Legal, como se pode observar na figura 1a. Foram utilizadas duas variáveis do censo agropecuário de 1995, agregados por município, sendo elas, o número de produtores proprietários de terra e a quantidade de terras em hectares apropriadas. Através da divisão entre a segunda variável e a primeira, obteve-se o mapa de concentração de terras. Em seguida, foi realizado o cruzamento topológico entre os desmatamentos ocorridos na Amazônia e mapeados pelo PRODES¹ e pelos sistemas DETER² e SIAD³, para o ano de 2005, com os limites dos 221 municípios da área de estudo. Após o cruzamento topológico, as áreas de todos os desmatamentos foram agregadas por município.

Após a preparação inicial da base de dados, deu-se início ao dos chamados hot spots de desmatamentos, para cada ano anteriormente citado, e da concentração de terras, utilizando-se a medida local de associação espacial Getis-Ord Getis e Ord (1992), que identifica clusters de altos e baixos valores, indicando a presença significativa de clusters espaciais locais. Getis-Ord pode ser descrita como a razão entre o somatório dos valores na

¹ Projeto de Monitoramento de Desmatamentos, elaborado pelo INPE, baseado em imagens Landsat TM, ETM+ e CBERS-CCD.

² Sistema de Detecção de Desmatamentos em Tempo Real elaborado pelo INPE, baseado no produto MOD09, processados utilizando-se modelo de mistura espectral

³ Sistema Integrado de Alerta de Desmatamentos elaborado pela UFG/LAPIG, baseado no produto MOD13Q1, processados utilizando-se índices de vegetação.

vizinhança de uma área e o somatório de todos os valores da amostra, como pode ser observado na equação 2.

$$Gi = \frac{\sum_j w_{ij}(d)x_j}{\sum_j x_j} \quad [1]$$

onde $w_{ij}(d)$ são os elementos da matriz de contiguidade para a distância d .

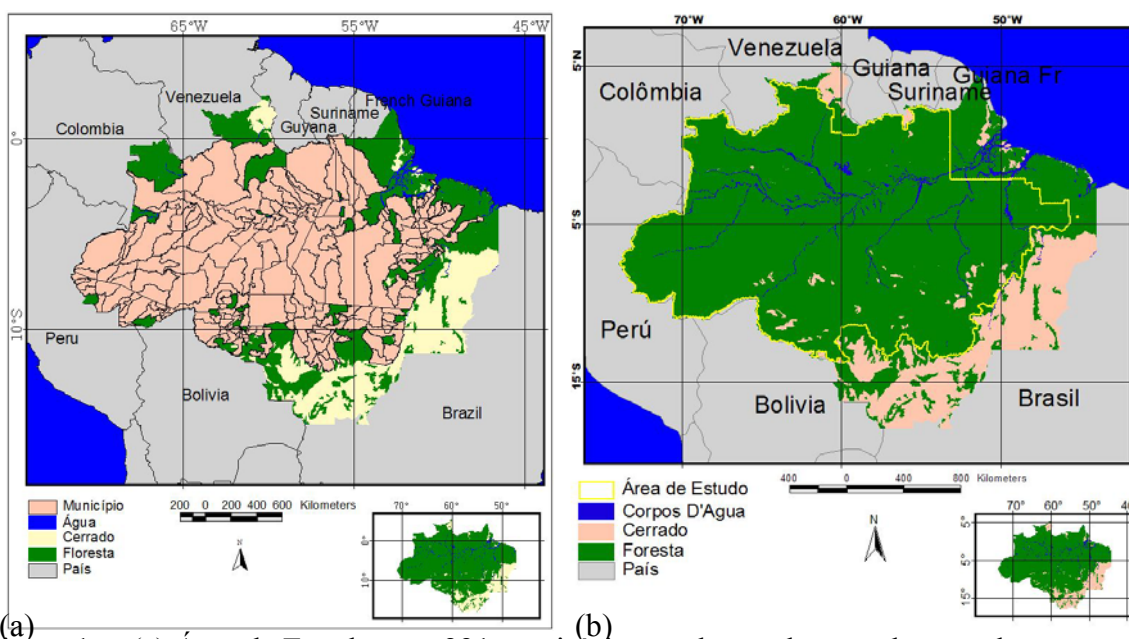


Figura 1 – (a) Área de Estudo com 221 municípios, onde são desmatados anualmente cerca de 16.800 km²; (b) Área de Estudo, aproximadamente 3,5 milhões km² para avaliação dos impactos dos desmatamentos sobre os fragmentos de remanescentes florestais

Após a elaboração dos mapas de hotspots dos desmatamentos e da concentração de terras, os valores dos índices de Getis-Ord, foram utilizados em modelos de regressões lineares, entre a concentração de terras e os desmatamentos ocorridos a cada ano, para se obter desta forma o nível de relacionamento entre essas variáveis, finalizando esta fase do estudo.

A avaliação dos efeitos dos desmatamentos sobre os fragmentos de florestas remanescentes, foi realizada em uma área de estudo de 3,5 milhões que quilômetros quadrados, conforme se pode observar na figura 1b. A área de estudo é composta por 332 municípios da Amazônia Legal. Outra característica importante é que atualmente 10,44% desta área já estão convertidas em agricultura e/ou pecuária.

Primeiramente, foi elaborada uma rede de unidades amostrais regulares, formada por hexágonos com área de 10.000 hectares.

Foram utilizados produtos MOD13Q1, de duas épocas distintas, maio/junho e setembro, além dos dados produzidos pelo projeto PRODES de 1997 a 2004. Os produtos MOD13Q1, foram processados, para eliminar todos os pixels que não fossem de áreas cobertas por florestas. Os hexágonos com menos de 60 pixels de florestas foram eliminados, restando 28.242 hexágonos.

A partir dos índices de vegetação de maio/junho, época mais úmida, e setembro época mais seca, foi produzida uma imagem de contraste sazonal para o índice de vegetação EVI e para o NDVI, utilizando-se a equação [2]:

$$CS(IV) = \frac{IV(\text{Maio, Junho}) - IV(\text{Setembro})}{IV(\text{Maio, Junho})} \times 100 \quad [2]$$

Sendo que:

CS(IV) é o contraste sazonal dos índices de vegetação EVI e NDVI;

IV (Maio,Junho) são os índices de vegetação (EVI, NDVI) para o período maio/junho e

IV (setembro) são os índices de vegetação (EVI, NDVI) para o período de setembro.

Para cada hexágono, foram calculadas métricas de índices de vegetação e também para os contrastes sazonais, tais como valor médio, desvio-padrão e valor máximo.

Em relação aos dados de mapeamento de desmatamentos, esses foram integrados e topologicamente cruzados com a rede de hexágonos para formar um mapa de remanescentes de florestas, em seguida foram calculadas métricas simples de paisagem (área média, quantidade de fragmentos e quantidade de bordas de florestas) para cada hexágonos. Após esta etapa foi realizada uma análise por componentes principais e adotada a primeira componente como sendo o mapa de distúrbio da paisagem.

Sobre o mapa de distúrbio da paisagem, foi traçado um perfil indo do extremo norte do Estado de Roraima, até o sudoeste do Estado de Rondônia, passando por áreas de baixos e altos distúrbios da paisagem, em seguida foi produzido um gráfico contendo a perfilagem do distúrbio da paisagem, juntamente com a perfilagem dos valores médios do contraste sazonal de EVI e NDVI. Na etapa seguinte, foram tomadas as rodovias BR174, PA150, BR230, BR163 e BR364, foram selecionados os hexágonos localizados a até 30 km dessas rodovias, tomados os valores médio do contraste sazonal de NDVI e EVI, juntamente com o distúrbio da paisagem, sendo possível realizar análises de regressão.

A avaliação da resposta do contraste sazonal de índices de vegetação EVI e NDVI, em relação ao distúrbio da paisagem, para toda a área de estudo (28.242 hexágonos) foi elaborada utilizando-se regressão geograficamente ponderada (GWR) Fotheringham et al. (1997); Druck et al. (2004), na qual as variáveis dependente e independente (contraste sazonal de índices de vegetação e distúrbio da paisagem, respectivamente) são localmente ajustadas. A regressão geograficamente ponderada é resolvida pela equação a seguir:

$$\beta(s) = (X^T W(s) X)^{-1} (X^T W(s) Y) \quad [3]$$

sendo que:

$$W_{ij}(s, \tau) = \frac{1}{2\pi\tau} \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{2\tau^2}\right) \text{ é a matriz peso das observações} \quad [4]$$

X – matriz das derivadas parciais do modelo de regressão em relação aos seus parâmetros,

Y – vetor das observações da variável dependente e

β - vetor dos coeficientes do modelo de regressão.

3. Resultados e discussões

Uma característica significativa da estrutura fundiária da Amazônia brasileira é o tamanho de suas propriedades rurais. De acordo com o censo agropecuário de 1995, a concentração de terras nos estados da Amazônia é cerca de 255% maior que nos outros 18 estados do Brasil.

A dependência entre concentração de terras e desmatamentos é confirmada pela análise de hotspots. Os mapas de hotspots dos desmatamentos ocorridos, bem como a concentração de terras, são mostrados na figura 2, enquanto que a correlação entre desmatamentos e concentração de terras utilizando a regressão dos respectivos índices de agregação, é mostrada na tabela 1 e indicam uma forte correlação entre concentração de terras e desmatamentos,. A região de hotspots, é composta por 42 municípios, sendo que anualmente aproximadamente 48% da área desmatada da Amazônia Legal, ocorrem nesses municípios.

Os desmatamentos alteram drasticamente a paisagem, desta forma, foi realizado o mapeamento do distúrbio da paisagem, como é possível observar na figura 3, a partir da análise por componentes principais de três métricas de remanescente florestais (número de

fragmentos de florestas, tamanho médio dos fragmentos, e comprimento das bordas das florestas remanescentes). A maior parte da Amazônia apresentou baixo distúrbio, com maiores distúrbios na porção sul, ao longo do arco do desmatamento (Nepstad et. Al, 1994).

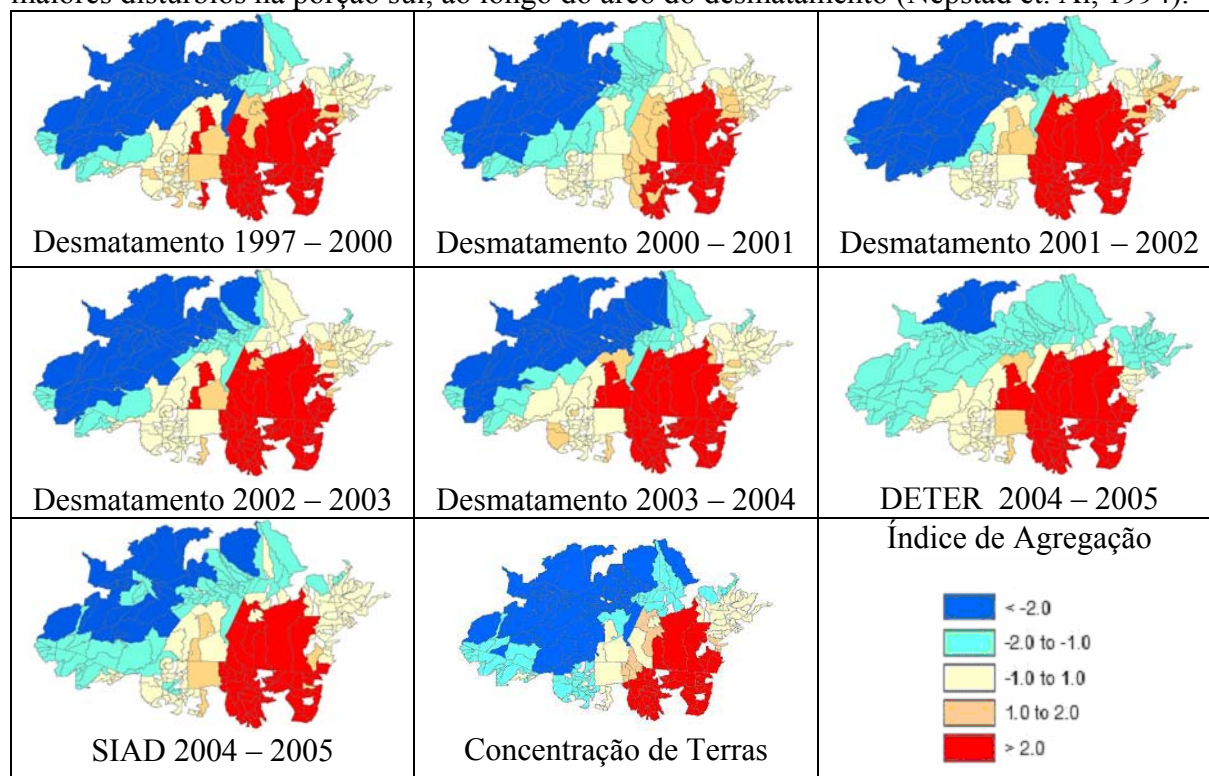


Figura 2 – Mapas de hotspots de desmatamentos, onde os municípios com valores maiores que 2 (em vermelho) são classificados como hotspots, e os com valores menores que -2 são classificados como coldspots

Tabela 1 – Resultados da regressão linear entre os índices de agregação de concentração de terras (x) e desmatamentos (y)

Período	Modelo ($y = ax + b$)	r^2
1997 – 2000	$y = 0.7724x + 0.3835$	0.7188
2000 – 2001	$y = 0.6989x + 0.16$	0.7874
2001 – 2002	$y = 0.9826x + 0.3792$	0.8572
2002 – 2003	$y = 0.7095x + 0.248$	0.8029
2003 – 2004	$y = 0.7454x + 0.2903$	0.7341
2004-2005 DETER	$y = 0.6509x + 0.2372$	0.6753
2004-2005 SIAD	$y = 0.8024x + 0.2422$	0.7591

O distúrbio da paisagem aumenta no sentido norte-sul, por isso, foi realizada uma perfilagem de índices de vegetação (NDVI e EVI), juntamente com o distúrbio da paisagem, conforme é possível observar na figura 4a. Enquanto os valores médios do contraste sazonal de NDVI têm comportamento semelhante ao distúrbio da paisagem, os valores médios do contraste sazonal de EVI apresentam um comportamento mais independente, pois em áreas de baixo distúrbio de paisagem, o EVI é mais sensível a clorofila e a estrutura do dossel, sendo altamente influenciado pela sazonalidade e variações estruturais. Por outro lado, o NDVI é mais tende a se suscetível à saturação. Em regiões de alto distúrbio da paisagem, os fragmentos estão mais sujeitos as diferenças sazonais devido a influência do solo, sendo que o EVI é projetado para acomodar essas variações.

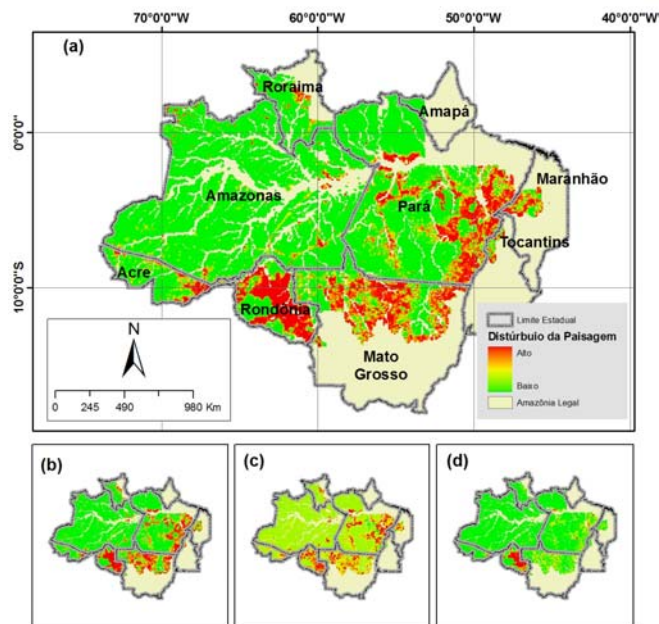


Figura 3 – Mapa do distúrbio da paisagem (primeira componente principal), (b), (c) e (d) detalham cada métrica de paisagem utilizada (tamanho médio de fragmentos, tamanho das bordas e número de fragmentos de remanescentes de florestas respectivamente)

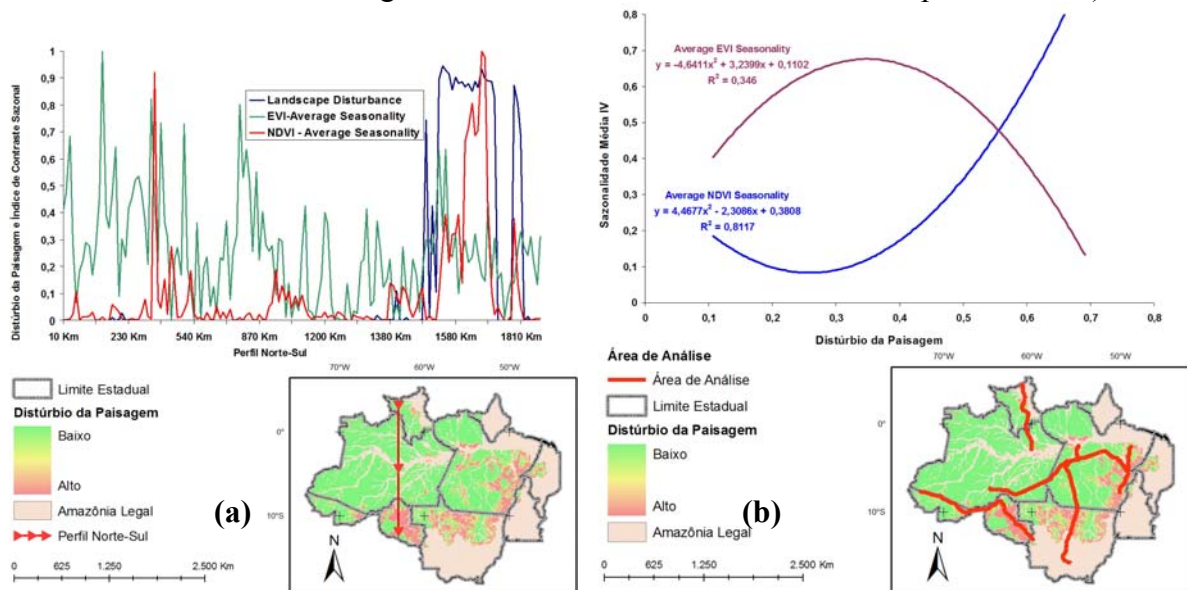


Figura 4 – (a) Perfis norte-sul da média sazonal dos índices de vegetação (EVI e NDVI) e o distúrbio da paisagem

A aparente forte correlação entre a variação sazonal do NDVI e o distúrbio da paisagem é corroborada pelos resultados das análises de regressões mostrados na figura 4b. Essas regressões foram baseadas em uma vizinhança de 30 km ao redor de cinco rodovias, e apresentam comportamentos opostos entre EVI e NDVI, sendo que o NDVI apresentou uma forte correlação de 0,81, o EVI apresentou correlação fraca de 0,35. Assim, o aumento do distúrbio da paisagem, aumenta a variação na resposta sazonal de NDVI.

Finalmente, a resposta sazonal do NDVI em relação ao distúrbio da paisagem foi investigada, considerando seu contexto espacial, em escalas local e regional, via regressão geograficamente ponderada (GWR). As variações no distúrbio da paisagem explicaram 62%

das variações encontradas nos valores sazonais de NDVI. Da mesma forma, um padrão de distribuição similar pode ser observado entre os valores sazonais de NDVI previstos e observados, conforme pode ser observado na figura 5.

Para a maior parte da área de estudo, os coeficientes da regressão geograficamente referenciada são significativamente maiores que zero, sugerindo que o distúrbio da paisagem apresenta alto relacionamento com a resposta sazonal do NDVI. Os menores valores de probabilidade estão distribuídos predominantemente ao longo do arco do desmatamento. Por outro lado, os altos valores de probabilidade, relacionados a coeficientes não significativamente diferentes de zero, são principalmente encontrados em áreas de alta densidade demográfica, onde contribuições de pixels espúrios, ainda contaminados por água, nuvens, sombras, aerossóis, etc., estão presentes e influenciando a regressão geograficamente ponderada.

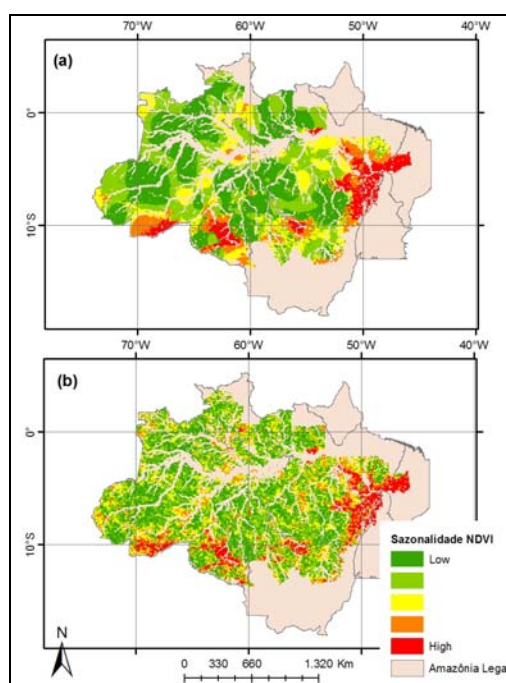


Figura 5 - (a) valores de sazonalidade de NDVI calculado por GWR e (b) respostas de sazonalidade de NDVI obtidos por observações de produtos MOD13Q1

5. Conclusões

O desmatamento na floresta amazônica está fortemente correlacionado com a concentração de terras, sendo que praticamente a metade dos desmatamentos que mapeados anualmente, se concentram nos 42 municípios do hotspot da concentração de terras.

Portanto, regiões com situação agrária dominada por grande propriedade são mais favoráveis ao desmatamento. A concentração de terras está também fortemente correlacionada com conflitos rurais Martins (1996). De acordo com a comissão pastoral da terra, no ano de 2004, 118 conflitos e disputas, incluindo 26 crimes de pistolagem envolvendo 13.398 famílias de ocupantes de terras ocorreram na área de estudo CPT (2004). Desta forma, é de extrema importância o mapeamento e controle fundiário da região de hotspot da concentração de terras.

Por outro lado, em regiões com grande ocorrência de desmatamentos, o contraste sazonal de NDVI é influenciado pelo distúrbio que a paisagem exerce nos fragmentos florestais. Os resultados ainda são preliminares e não completamente conclusivos, para indicar a possibilidade de qualitativa e quantitativamente avaliar na escala da paisagem e baseada em

métricas simples, os impactos dos desmatamentos sobre os remanescentes florestais. Como foi demonstrado, esses impactos, expressos em termos de fragmentação da paisagem, contribuem com as respostas do contraste sazonal do NDVI.

4. Referências

- Alves, D. S., Escada, M. I. S., Pereira J. L. G., Linhares, C. A. (2003). Land use intensification and abandonment in Rondonia. *International Journal of Remote Sensing*, v. 24: 899-903.
- Costa, M. H. & Foley, J. A. (2000). Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentration on the climate of Amazonia. *Journal of Climate*, 13: 18-34.
- CPT, (2005). *Conflitos no campo Brasil 2004*. (pp. 40-69). Goiânia-GO Brazil: Editora América Ltda.
- Druck, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.M. (eds) "Análise Espacial de Dados Geográficos". Brasília, EMBRAPA, 2004 (ISBN: 85-7383-260-6).
- Fotheringham, A.S., Charlton, M. & Brunson, C., (1997); Measuring spatial variations in relationships with geographically weighted regression, in Fischer, M.M. & Getis, A. (eds), 1997, pp 60-82.
- Freitas, S.R., Mello, M.C.S., Cruz, C.B.M. (2005). Relationships Between Forest Structure and Vegetation Indices in Atlantic Rainforest. *Forest Ecology and Management*. 218: 353-362.
- Gamon, J. A., C. B. Field, M. L. Goulden, K. L. Griffin, A. E. Hartley, G. Joel, J. Penuelas, R. Valentini. (1995). Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications* 5:28-41.
- Getis, A. Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*. 24, (3):189-206.
- Houghton R. et al. (2000). Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon, *Nature*, 403: 301-304.
- INPE (2000). Deforestation estimates in the Brazilian Amazon, 1998 – 1999. Unpublished Report. National Institute for Space Research (INPE), São José dos Campos, Brazil (in Portuguese).
- Laurance, W. F. & Bierregaard-Jr, R. O. (eds).. (1997). *Tropical Forest Remnants: ecology, management and conservation of fragmented communities*. Chicago: Chicago University Press. 616p.
- Laurance, W. F., Laurance, S. G.; Ferreira, L. V.; Rankin de Merona, J. M.; Gascon C. & Lovejoy, T. E. (1997). Biomass collapse in Amazonian forest fragments. *Science* 278: 1117-1118.
- Lovejoy, T. E.; Bierregaard-Jr., R. O.; Rylands, A. B.; Malcon, J. R.; Quintela, C. E.; Harpe, L. H.; Brown, JR.; K. S.; Powell, A. H.; Powell, G. V. N.; Schubart, H. O. R. & Hays, M. B. (1986). Edge and other effects of isolation on Amazon forest fragments. In: Soulé, M. E. (ed.) *Conservation Biology: The science of scarcity and diversity*. Sinauer Associates. Sunderland. Pp. 257-285.
- Nepstad, D.C., De Carvalho, C.R., Davidson E.A., Jipp P.H., Lefebvre P.A., Negreiros G.H., Da Silva E.D., Stone T.A., Trumbore S.E., Vieira A S. (1994). The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*. 372:666–669.
- Oliveira-Filho, A., Fontes, M.A.L. (2000). Patterns of floristic differentiation among Atlantic forests in southeastern Brazil, and the influence of climate. *Biotropica*. 32:793-810.
- Pfaff, A. S. P. (1999). What drives deforestation in the Brazilian Amazon? Evidence from satellite and socioeconomic data. – *Journal of Environmental Economics and Management*, 37(1):26-43.
- Potter, C. S., Davidson, E., Nepstad, D., Carvalho, C. R. (2001). Ecosystem modeling and the dynamic effects of deforestation on trace gas fluxes in Amazon tropical forests. *Forest Ecology and Management* 152: 97–117.
- Skole, D. L., Chomentowski, W. H., Salas, W. A., & Nobre, A. D. (1994). Physical and human dimensions of deforestation in Amazônia. *Bioscience*, 44(5), 314– 322.
- Skole, D., Tucker, C. (1993). Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: Satellite data from 1978 to 1988. *Science*, 260, 1905– 1910.
- Williams, M. R., Melack, J. M. (1997). Solute export from forested and partially deforested catchments in the central Amazon. *Biogeochemistry* 38: 67–102