ANÁLISE ESPACIAL DOS FATORES ASSOCIADOS À DEGRADAÇÃO FLORESTAL NO ESTADO DO PARÁ

Afonso Henrique Moraes Oliveira [1], Danilo Avancini Rodrigues[2], Silvana Amaral[3]

[1 2 3] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, av. dos Astronautas, 1.758 - Jardim da Granja, São José dos Campos - SP, 12227-010; [1]afonsoholiveira@gmail.com; [2]danilo.avancini@gmail.com; [3] silvana.amaral@inpe.br.

RESUMO

O processo de degradação florestal no estado do Pará vem ocorrendo de forma acentuada nos últimos anos. O objetivo deste trabalho foi buscar entender como as variáveis envolvidas nesse processo se relacionam no espaço e no tempo. Para tanto, técnicas de regressão espacial e de agrupamento auxiliaram no entendimento da relação entre as variáveis. Os resultados evidenciaram estradas e focos de calor com as maiores relações com a degradação florestal na maioria das áreas, sugerindo estas como as variáveis mais relacionadas com a degradação em todo Pará. A principal contribuição do estudo reside na importância em considerar a heterogeneidade e correlação espacial em modelos de regressão para estudo de degradação florestal.

Palavras-chave *— Heterogeneidade da degradação,* regressão espacial, exploração de madeira.

ABSTRACT

The process of forest degradation in the state of Pará has been occurring in a marked way in recent years. The objective of this work was to explore how the variables involved in this process are spatial-time related, using spatial regression and clustering techniques. The results evidenced roads and hot pixels as the greatest relationship with forest degradation in most areas, suggesting these as the variables most related to degradation in Pará. The main contribution of the study lies in stressing the importance of considering spatial heterogeneity and correlation in regression models for the study of forest degradation.

Key words *— heterogeneity of degradation, spatial regression, selective logging.*

1. INTRODUÇÃO

O modelo de desenvolvimento adotado para Amazônia, historicamente centrado apenas na exploração de recursos naturais, privilegia atividades produtivas que induzem ao desmatamento, e à degradação florestal. Associa-se a degradação florestal principalmente a dois processos: a exploração ilegal de madeira e os incêndios florestais [1], práticas culturais de manejo comuns na Amazônia [2].

Laurence et al., (2004) discutem que a construção e pavimentação de estradas, bem como a melhoria da infraestrutura local, também são fatores determinantes para a degradação florestal. Modelos de regressão, empregados a dados físicos, tais com de degradação, são amplamente empregados com suporte no entendimento da relação de força entre os mais variados fatores, buscando entender como estes podem se relacionar no espaço e no tempo [4].

Considerando que o estado do Pará registrou altas taxas de degradação florestal, atingido recorde de 8.264 km² em 2008, sendo esse valor 32% superior ao desmatamento por corte raso no mesmo ano [5], questiona-se especificamente: Quais são os potenciais fatores determinantes do processo de degradação florestal no estado do Pará? Há variações espaço-temporal destes fatores?

Este trabalho tem por objetivo avaliar as variáveis que estão relacionadas à degradação florestal no estado do Pará. Utilizando dados dos sistemas de monitoramento da degradação florestal (DEGRAD) e exploração seletiva (DETEX), para os anos de 2010 e 2014 [5], modelos de regressão linear e espacial são propostos para identificar os fatores mais fortemente associados ao processo de degradação florestal, considerando diferentes recortes espaciais e temporais para o estado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende o estado do Pará, de vegetação predominantemente florestal - Floresta Ombrófila Densa- com árvores que podem atingir 50m de altura e biomassa média de 281 Mg ha^{-1}[6]. Cerca de 70% da vegetação natural do PA encontra-se legalmente protegida em Terras Indígenas e Unidades de Conservação (Figura 1).

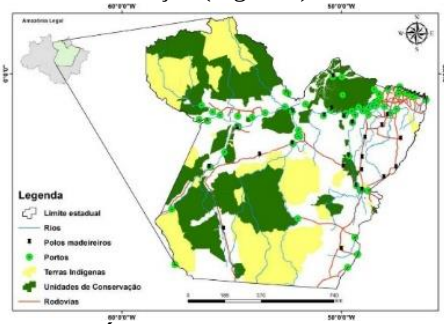


Figura 1. Área de estudo - o estado do Pará.

2.2 Dados e Variáveis

Este trabalho utilizou dados dos sistemas DETEX, que identifica exploração florestal seletiva, e DEGRAD que mapeia a degradação florestal, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A partir de imagens dos satélites

LANDSAT e CBERS, de 30m de resolução, distúrbios florestais, onde não houve supressão completa da cobertura, são identificados por polígonos de área mínima igual a 6,25 ha [5]. Foram compilados os dados DETEX e DEGRAD no PA de 2010 e 2014.

Três aspectos associados à degradação florestal foram avaliados: efeito das áreas protegidas, acesso (ou conectividade) e uso de fogo. Considerando que degradação florestal não deve ocorrer em áreas protegidas, definimos três variáveis independentes: unidades de conservação de uso múltiplo e sustentável (UC_SUST), unidades de conservação de proteção integral (UC_INT) e terras indígenas (TI) [7]. Considerando que o acesso às áreas florestais aumenta a possibilidade de degradação, foram estudadas as variáveis distância de portos, rodovias, estradas, madeireiras e localidades [8]. E ainda, diretamente associada à degradação florestal, a variável presença de fogo foi avaliada a partir dos focos de calor [5]. (Figura 2).

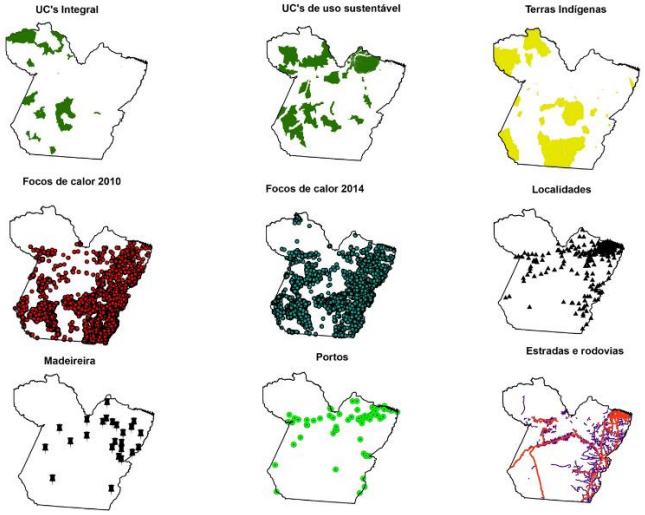


Figura 2. Variáveis independentes associadas à degradação florestal.

A variável resposta - degradação florestal – foi obtida pela soma dos dados DETEX e DEGRAD, para 2010 e 2014 (Figura 3). Todas as variáveis foram integradas em um espaço celular de 5x5 km, resolução que melhor representou as variáveis no espaço. As variáveis independentes foram computadas pela distância à célula e a variável dependente considerou a porcentagem de área degrada por célula.

2.3. Análise estatística exploratória e modelagem

A função K de Ripley avaliou a distribuição espacial dos dados de degradação, investigando a probabilidade de um evento se comportar de forma agregada, aleatória ou regular [9,10]. A função L auxiliou a interpretação da tendência de agregação do fenômeno [10], sendo que valores positivos, (>1), indicam tendência de agregação dos dados, menores que zero, indicam distribuição regular, e zero indica um fenômeno aleatório.

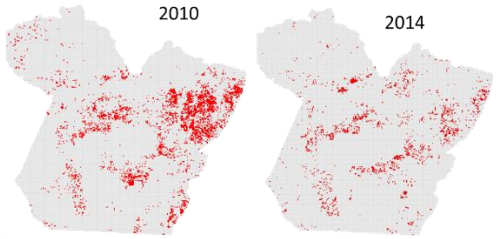


Figura 3. Dados DETEX e DEGRAD - Pará 2010 e 2014.

Após a análise de tendência de agregação dos dados de degradação, aplicou-se a análise de agrupamento utilizando *k-means* [9] que foi realizada para identificar clusters de degradação florestal nos anos de 2010 e 2014 para o PA. Para cada subdivisão do PA obtida na análise de cluster, observou-se a relação entre as variáveis por uma matriz de correlação. Foram eliminadas as variáveis altamente correlacionadas, ou seja, com mais de 80% de correlação.

Para verificar a existência de relação entre a variável dependente (degradação florestal) e as variáveis independentes, aplicou-se a regressão linear múltipla [9]. A adequação dos modelos foi analisada pelo valor R^2 (coeficiente de determinação múltipla), critério de informação de Akaike (AIC) e índice Log da Verossimilhança (Log Likelihood) [10]. Os índices permitem a comparação entre modelos espaciais, e o *Log Likelihood* resume a evidência dos dados para parâmetros desconhecidos, quanto menor o valor, melhor o ajuste [10].

A análise do índice de Moran I verificou a dependência espacial dos resíduos. Sendo constatada a dependência espacial, propõe-se o modelo de regressão múltipla *Spatial Lag Model*, incorporando a auto correlação espacial como componente explicativa do modelo [9].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos das funções K e L apresentaram valores superiores a 1 para todas as distâncias analisadas em ambos períodos. Tem-se assim tendência de agregação dos dados, justificando o uso da análise por regiões (Figura 4).

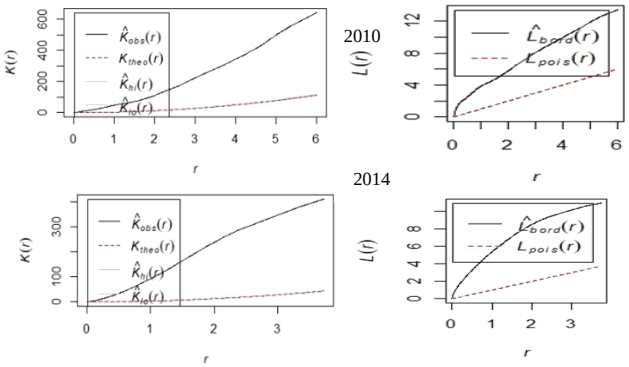


Figura 4. Função K e L - degradação florestal 2010 e 2014.

Três clusters resultaram da análise de agrupamento da degradação florestal em 2010 e 2014 (Figura 5). A diferença

dos grupos entre as duas datas justificou avaliar as relações das considerando diferentes recortes de tempo e espaço.

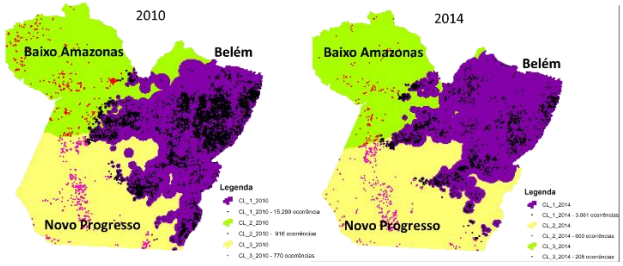


Figura 5. Clusters de degradação florestal 2010 e 2014.

Os clusters foram classificados empiricamente com base na literatura e conhecimento de campo. O cluster 1, que inclui a região da capital do estado, Belém, concentra maior ocorrência de degradação florestal entre períodos. O cluster 2, que inclui o município de Novo Progresso, corresponde a uma região de intensas e recentes mudanças de uso e cobertura, onde as atividades agrícolas têm se estabelecido e crescido a cada ano, bem como a exploração de madeira. A região é citada na literatura como a capital do conflito [11]. O cluster 3, corresponde à região do Baixo Amazonas, é a região mais preservada do PA. Situada distante do arco do desmatamento, seus ecossistemas sofrem pouca pressão das atividades antrópicas.

A análise dos resíduos da regressão múltipla registrou valores do índice de Moran (I) acima de 1, indicando a existência de autocorrelação espacial para os dados de degradação florestal para ambas as datas. Desta forma, seguiu-se para o desenvolvimento do modelo de regressão múltipla *Spatial Lag Model*.

Os maiores valores do coeficiente de determinação (R^2) para a regressão espacial evidenciam a importância de se tratar a autocorrelação espacial (Figura 6). Quanto ao coeficiente beta, considerando o modelo para todo estado, sem regionalização, as variáveis mais representativas foram estradas e focos de calor para 2010, com beta de 0,46 e 0,30 respectivamente. No entanto, em 2014, as variáveis que mais influenciaram o modelo foram localidades e madeireiras, com betas de 0,40 e 0,38 respectivamente. Evidencia-se assim o dinamismo do processo de degradação florestal: variáveis mais relacionadas ao processo se modificam no espaço e no tempo.

	Estado do Pará			
Reg.	**Linear-2010**	**Linear-2014**	**Espacial-2010**	**Espacial-2014**
R²	0,27	0,21	0,81	0,85
AKAIKE	1203200	1181700	904811	898630
Log Verossi	-601589	-590839	-452394	-449303
Variáveis	**Beta 2010**		**Beta 2014**	
Estradas	0,46		-	
Focos	0,30		-	
Localidades	-		0,40	
Madeireiras	-		0,38	

Figura 6. Regressão espacial entre degradação florestal e fatores associados para o estado do Pará.

Para o cluster1-Belém, a regressão linear teve melhor ajuste (R^2=0,31) em 2010 do que o obtido sem a regionalização (todo estado). No entanto em 2014, o R^2 foi inferior (0,16) apontando a necessidade de estudos mais específicos. Assim como para o PA, estradas e focos também foram as variáveis de maior influência no modelo, ou seja, as mais associadas à degradação florestal. Inesperado foi o valor do coeficiente beta significante para a variável UC_INT, o que alerta para ausência de políticas de controle de desmatamento e queimadas nas UCs. O modelo de regressão espacial apresentou ajustes muito superiores ao multivariado, com R^2 de 0,75 e 0,80 para 2010 e 2014 respectivamente. A diminuição dos valores de AIC e *Log Likelihood* indicaram melhor ajuste do modelo para 2014 (Figura 7).

	Cluster 1 - Belém			
Reg	**Linear-2010**	**Linear-2014**	**Espacial-2010**	**Espacial-2014**
R²	0,31	0,16	0,75	0,80
AKAIKE	423679	411271	357172	338188
Log Verossi	-211829	-205624	-178574	-169082
Variáveis	**Beta 2010**		**Beta 2014**	
Estradas	0,43		0,20	
Focos	0,39		0,21	
UC_INT	0,39		0,22	

Figura 7. Regressão espacial entre degradação florestal e fatores associados para o cluster 1 – Belém.

No cluster2- Novo Progresso, os valores de R^2, AIC e *Log Likelihood* foram de modo geral melhores que os obtidos para o cluester1. A regressão espacial foi bastante similar em ambas regiões, no entanto a regressão linear foi superior para o Cluster2, apontando um melhor poder das variáveis para ajuste do modelo. Os coeficientes Beta indicam focos de calor como variável importante para as duas datas, ressaltando a importância do o uso do fogo para a degradação das florestas (Figura 8).

	Cluster 2 - Novo Progresso			
Reg	**Linear-2010**	**Linear-2014**	**Espacial-2010**	**Espacial-2014**
R²	0,51	0,31	0,80	0,75
AKAIKE	384535	437474	289341	330553
Log Verossi	-192257	-218726	-144658	-165265
Variáveis	**Beta 2010**		**Beta 2014**	
Focos	0,36		0,44	
Madeireira	0,31		-	
Rodovias	-		0,36	
UC_SUST	-		0,23	

Figura 8. Regressão espacial entre degradação florestal e fatores associados para o cluster 2 – Novo Progresso.

Em 2010, a variável "madeireira" contribuiu significativamente para o modelo no Cluster2. O que se explica pelo fato da exploração de recursos florestais, sobretudo madeira, ser importante atividade econômica na região. No entanto, em 2014 esta variável não se mostrou significativa, o que pode estar relacionado à intensificação da fiscalização pelos órgãos ambientais na região, diminuindo o número de polos madeireiros nos últimos anos, e consequentemente a degradação florestal [9].

A variável UC_SUST apresentou valor beta significativo em 2014, o que também foi inesperado. A presença de áreas protegidas não deveria estar relacionada com o processo de degradação. Porém, nesta região tem-se a Floresta Nacional do Jamanxim, alvo frequente de grileiros e posseiros [11],

sendo a UC de uso sustentável com maior área desmatada em 2014 no Pará, registrando 49,23 km² de áreas de floresta convertida em corte raso [5].

No cluster3 - baixo Amazonas, a regressão múltipla teve ajustes superiores que os observados para o estado do PA. Os valores de AIC e *Log Likelihood* indicam bons ajustes para todos os modelos, apesar dos valores de R^2 para a regressão espacial terem sido ligeiramente inferiores que das demais regiões. Os ajustes da regressão espacial também foram elevados nos dois períodos, indicando o poder do modelo em explicar as variáveis relacionadas com a degradação florestal.

Cluster 3- Baixo Amazonas				
Reg	Linear-2010	Linear-2014	Espacial-2010	Espacial-2014
R^2	0,57	0,30	0,65	0,69
AKAIKE	347027	309665	263175	238140
Log Verossi	-173502	-154821	-131575	-119058
Variáveis	Beta 2010		Beta 2014	
Estradas	0,47		-	
Focos	0,26		0,43	
Portos	-		0,38	
TI	0,26		-	

Figura 12. Regressão espacial entre degradação florestal e fatores associados para o cluster 3 – Baixo Amazonas.

Em 2010, os maiores valores de beta corresponderam às variáveis estradas e focos de calor. Estando na área de influência da BR-163, essa contribuição era esperada. Focos de calor foram ainda mais importantes na região em 2014, sendo a variável mais relacionada com a degradação nesse período. Como nesta região há a confluência dos Rios Tapajós e Amazonas, importantes rios navegáveis, de quantidade considerável de Portos, essa variável se amostrou significativamente relacionada com a degradação floresta para o modelo em 2014. A contribuição da variável TI em 2010 alerta para a eventual possibilidade de exploração ilegal de madeira nestas áreas.

5. CONCLUSÕES

Os resultados das modelagens multivariadas e espaciais evidenciam que a importância das variáveis testadas depende da regionalização e período de análise. Estradas e focos de calor apresentaram as maiores e mais frequentes relações com a degradação florestal em todas as regiões do estado do Pará. Áreas protegidas (UCs e TIs) apresentaram relações inesperadas com a degradação e precisam ser melhor avaliadas. Variáveis de outra natureza, relacionadas à socioeconomia por exemplo, poderiam ser incluídas no modelo para ampliar o estudo dos fatores relacionados ao processo de degradação florestal.

A principal contribuição deste artigo reside na importância de se considerar a heterogeneidade e correlação espacial em modelos de regressão para estudo de degradação florestal. Como o processo de degradação florestal no Pará mostrou-se espaço-temporalmente heterogêneo, políticas de conservação florestal, controle de desmatamento, e embate à extração ilegal de madeira devem ser realizados em escala local, considerando os diferentes fatores e processos associados à degradação florestal.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradem ao suporte do Projeto MSA-BNDES e a CAPES.

7. REFERÊNCIAS

[1] BARROS, A. C.; UHL, C. Logging along the Amazon river and estuary: patterns, problems and potential. **Forest Ecology and Management**, v. 77, n. 1/3, p. 87 - 105, 1995.

[2] NEPSTAD, D. C.; VERÍSSIMO, A.; ALENCAR, A; NOBRE, C.; LIMA, E.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; POTTER, C.; MOUTINHO, P.; MENDOZA, E.; COCHRANE, M.; BROOKS, V. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire**. Nature**, v. 398, p.505-508, 1999 a.

[3] LAURENCE, W.F; ALBERNAZ, A.K.M.; FEARNSIDE, P.M; VASCONCELOS, H.L; FERREIRA, L.V. Deforestation Amazonia. **Science**, Washington, n. 304, p. 1109-1111, 2004.

[4] AGUIAR, A. P. D.; CÂMARA, G.; ESCADA, M. I. S. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonian: Exploring intra-regional heterogeneity. **Ecological modelling**, v. 209, p. 169-188, 2007.

[5] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites: Sistemas PRODES, DETER, DEGRAD e QUEIMADAS 2007-2008. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

[6] VIEIRA, S. et al. Forest structure and carbon dynamics in Amazonian tropical rain forests. Oecologia, [s.l.], v. 140, n. 3, p.468-479, 17 jun. 2004. **Springer Science + Business Media**.

[7] INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Dados Gerais das Unidades de Conservação. Brasília, 2016.

[8] IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2010) Bases cartográficas. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas. IFCH/Unicamp. Campinas, IFCH. 2012.

[9] MELLO, M. P.; PETERNELLI, L. A. Conhecendo o R: uma visão mais que Estatística. Viçosa, MG: Editora **UFV**, 2013. 222 p. ISBN 9788572694957.

[10]CÂMARA, G.; CARVALHO, M. S.; CRUZ, O. G.; CORREA, V.Análiseespacial de áreas.In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. (Orgs.). Análise espacial de dados geográficos. 1. ed**. Brasília**: EMBRAPA, 2004.

[10] PRINTES, R. C. Adeus Amazônia: Conflitos agrários e socioambientais por trás do desmatamento no sudoeste do Pará. 1. ed. Curitiba: **Prismas**, 2017. v. 1. 137p.