

## Degradação Florestal na Amazônia: Geração de um Indicador Espacial de Suscetibilidade à Degradação Florestal

Vinicius do Prado Capanema<sup>1</sup>  
Maria Isabel Sobral Escada<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
vinicius.capanema@inpe.br  
isabel@dpi.inpe.br

**Abstract.** Forest degradation and deforestation are responsible for the decrease in the area of pristine forests in Amazon. The remote sensing and GIS tools use facilitate the study and the understanding of these striking phenomena in the forest. Thus, this study aimed to generate a susceptibility spatial index of forest degradation using a grid of 1km<sup>2</sup>, considering variables generated from data of deforestation, fire, road network, sustainable forestry management plans, indigenous lands and density edges. Two different methods were tested for variable integration: simple and weighted average. The influence of landscape metrics in the susceptibility index generation was tested. The method that obtained the best result was the simple average. Through this method, a new susceptibility spatial index of forest degradation was generated using 2014 year data. The results showed that the most susceptible areas are close to the largest density hotspots and road network. The results also showed the great influence of edge landscape metric in the forest degradation susceptibility index when comparing with the index generated without this variable.

**Palavras-chave:** forest degradation, landscape metrics, remote sensing, susceptibility.

### 1. Introdução

A degradação florestal decorre de um processo de perda das características originais da vegetação primária, que ocorre ao longo dos anos, e é influenciado diretamente ou indiretamente por vários fatores como o desmatamento, a exploração seletiva de madeira, a ocorrência de eventos de secas severas e de ventos de grande intensidade, entre outros. Alguns desses fatores, quando persistentes, podem resultar em perda da resiliência da floresta (BRANDO et al., 2014).

De acordo com Balch et al. (2011), fatores como o desmatamento e as formas de utilização da terra, que muitas vezes envolve o uso do fogo, no entorno das áreas de floresta, podem acelerar o processo de degradação florestal, levando ao aumento da mortalidade de árvores e ao empobrecimento dos sistemas florestais. Brando et al., (2014) destacam, por exemplo, que os incêndios florestais em anos de secas severas intensificam a degradação florestal, evidenciando uma interação positiva entre esses fatores.

Na Amazônia brasileira, o desmatamento e a degradação florestal representam uma séria ameaça para a manutenção do clima e dos ecossistemas (IPCC, 2007). A exploração seletiva de madeira aumenta a quantidade de matéria orgânica e de material combustível, conseqüentemente, tornando a floresta mais suscetível a incêndios florestais (Matricardi et al., 2010).

Com relação ao desmatamento, um dos processos que pode influenciar na degradação é a fragmentação da paisagem. As bordas dos fragmentos florestais fazem limite com diferentes classes de cobertura da terra, criando ambientes diferenciados, mais secos e com maior radiação solar incidente, podendo causar diferentes impactos na floresta e maiores taxas de distúrbios (LAURENCE et al., 1998). Áreas desmatadas, bem como as estradas podem promover o maior acesso às áreas de floresta para a exploração da madeira, causando danos à floresta.

A análise dos impactos de fatores como o desmatamento, a fragmentação florestal, os eventos de exploração madeireira e de incêndio florestal nos processos de degradação é de grande importância para uma melhor compreensão desse fenômeno. A degradação florestal apresenta características espaciais e temporais relevantes, assim, é importante o uso de Sistemas de Informações Geográficas e de dados extraídos de imagens de satélite para medir atributos

relacionados com o tamanho, forma e as bordas das áreas degradadas e das áreas desmatadas. (PINHEIRO e ESCADA, 2013).

Este trabalho consistiu em desenvolver um indicador espacial de suscetibilidade a degradação florestal para o ano de 2001, representado por uma grade celular, utilizando dados de desmatamento, focos de calor, Terras Indígenas e estradas. Foram testadas duas operações para a integração das variáveis que compõe o indicador: média simples e média ponderada, esta última com auxílio da técnica AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Os mapas oriundos dessas operações foram comparados com um mapa de referência, também do ano de 2001, elaborado por Pinheiro (2015), para verificar a aderência a este dado referência. Determinado o melhor método, um novo mapa foi gerado com dados do ano de 2014 para análise das áreas suscetíveis à degradação florestal. O estudo buscou ainda testar a influência das bordas das florestas criadas por processos de fragmentação florestal, na geração de mapas de suscetibilidade à degradação florestal, por meio do uso de uma métrica de paisagem conhecida como densidade de borda.

## 2. Área de estudo

A área de estudo engloba a órbita/ponto 226/068 do TM/Landsat. Esta órbita/ponto localiza-se na Amazônia Mato-Grossense. Segundo dados do IBGE, o clima da região é o Equatorial e o Tropical. O clima tropical é definido como quente e úmido com períodos de seca variando de três a quatro meses. O clima equatorial é úmido com uma estação seca que dura mais ou menos 3 meses (geralmente de junho a setembro). As temperaturas médias são sempre superiores a 18° C em todos os meses.

Os principais municípios inseridos na região estudada são os municípios de Cláudia, Colíder, Feliz Natal, Itaúba, Marcelândia, Nova Santa Helena, Nova Ubitatã, Paranatinga, Santa Carmem, Sinop, Sorriso, Terra Nova do Norte, União do Sul e Vera. O surgimento da maior parte desses municípios se deu após os anos 70, durante o período de construção da BR 163 que ligaria Cuiabá-MT a Santarém-PR (FERREIRA, 2013). Possuem como atividade econômica principal a agricultura e como atividades secundárias, a pecuária e a exploração madeireira.

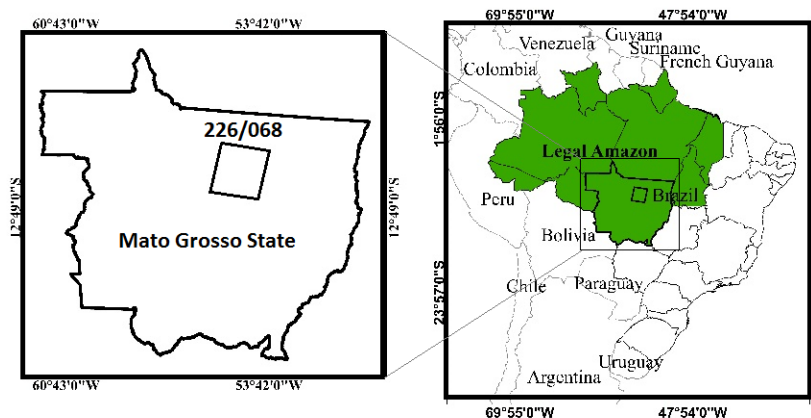


Figura 2.1: área de estudo.

## 3. Materiais e método.

### 3.1. Procedimentos metodológicos

Nesta seção são descritos os procedimentos empregados neste estudo. A metodologia compreendeu três grandes etapas: 1) etapa de obtenção e preparação das variáveis; 2) etapa de geração dos mapas de suscetibilidade e, por fim; 3) etapa de avaliação da aderência do mapa de suscetibilidade com o mapa de referência e a análise da importância das bordas dos fragmentos florestais no índice de suscetibilidade à degradação florestal. Na Figura 3.2 é apresentado o fluxograma geral da metodologia empregada na realização deste estudo. As etapas apresentadas são detalhadas a seguir.

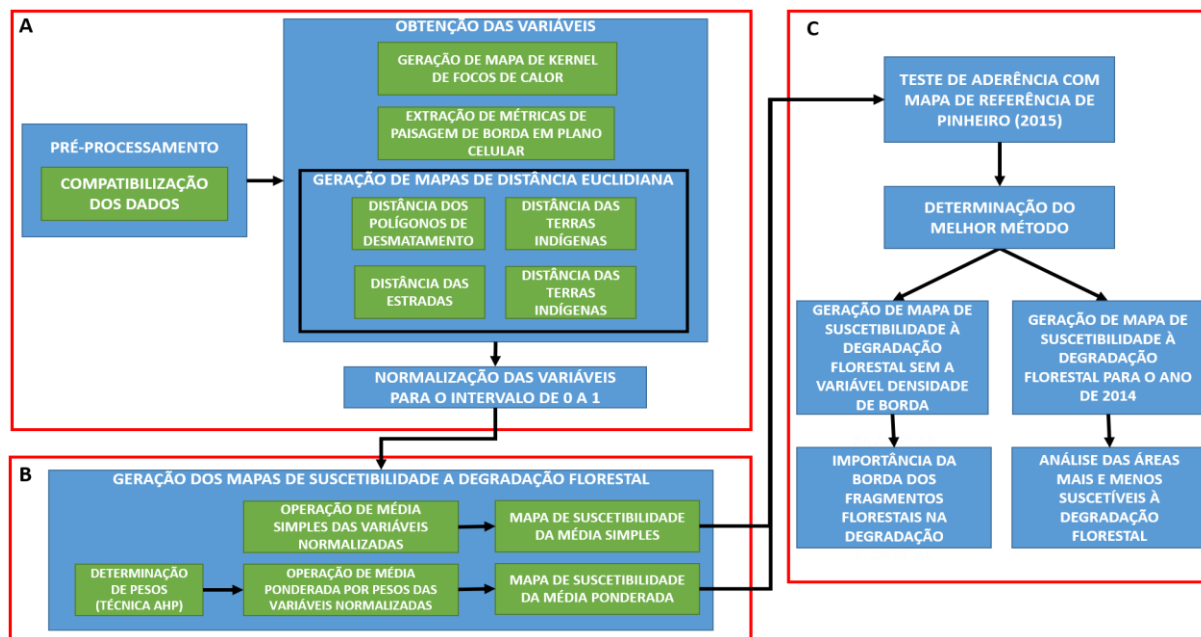


Figura 3.2. Fluxograma geral dos procedimentos metodológicos.

### 3.2. Dados Utilizados:

Os dados utilizados neste trabalho estão relacionados na Tabela 1. Nesta Tabela também são relacionadas as variáveis e são apresentadas as premissas relativas a cada uma delas na construção do indicador espacial de suscetibilidade.

Tabela 1: descrição das variáveis, dados e fonte.

Dado	Fonte	Variável	Premissa
Focos de calor de no período de 1999, 2000 e 2001 e 2012, 2013 e 2014.	Portal de queimadas do INPE – 1999 a 2001 e de 2011 a 2014.	Mapa de densidade de Kernel	Células com maior densidade de focos de calor são mais suscetíveis à degradação florestal
Desmatamento (acumulado até 2001 e acumulados até 2014)	Prodes – 2001 e 2014	Distância de polígonos de desmatamento	Células com menor distância dos polígonos de desmatamento são mais suscetíveis a degradação florestal.
		Densidade de borda	Células com maior densidade são mais suscetíveis a degradação florestal
Malha viária de 2001 e 2014	Secretaria de Estado de Infraestrutura de Mato Grosso - SINFRA	Distância de estradas	Células com menor distância das estradas são mais suscetíveis a degradação florestal.
Planos de manejo florestal sustentável – PMFS – até o ano de 2001 e 2014	Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Mato Grosso – SEMA	Distância de planos de manejo florestal sustentável (PMFS)	Células com menor distância dos polígonos de PMFS são mais suscetíveis a degradação florestal.
Terra indígena existente no ano de 2001 e 2014	Portal do IBGE	Distância de Terras Indígenas (TI)	Células com maior distância dos polígonos de TI são mais suscetíveis a degradação florestal

Antes do processamento, foi feita a compatibilização dos dados de forma que todos tivessem na mesma projeção e Datum e, em seguida, foram recortados para a região de interesse.

#### 3.2.1. Processamento dos dados:

Nesta etapa foram gerados mapas de distância euclidiana dos dados de desmatamento, malha viária, planos de manejo e Terras Indígenas, representados por grades MNT (Modelo Numérico de Terreno), com resolução espacial de 1000x1000 metros. Para os dados de focos de calor, realizou-se a operação de densidade de Kernel e obteve-se um mapa de densidade de focos de calor.

A variável densidade de borda também foi obtida com o dado de desmatamento do PRODES, no entanto, para tal, extraiu-se a métrica de densidade de bordas utilizando como ferramenta o *Geographic Data Mining Analyst (GeoDMA)*, desenvolvido por Korting et al. (2008). Gerou-se,

então, um mapa de células de mesma resolução dos mapas de distância (1000x1000 metros), no qual cada célula recebeu um valor relativo a densidade de bordas dos polígonos de desmatamento presentes em cada célula, esse dado foi posteriormente transformado em um MNT e para que pudesse ser integrado as outras variáveis

Em seguida, realizou-se a normalização das variáveis para que ficassem entre 0 e 1, para que fosse possível efetivar as operações posteriores. O método de normalização utilizado foi a transformação linear. Todos os dados utilizados são referentes ao ano de 2001 e de 2014.

### 3.2.2. Geração dos mapas de suscetibilidades à degradação florestal.

Foram testados dois métodos para elaboração dos mapas de suscetibilidade representados por MNT: a média simples e a média ponderada por pesos. A álgebra de mapas utilizando média simples consistiu em somar os valores das seis variáveis e dividir o resultado por 6. A operação de média ponderada contou com a atribuição de pesos específicos para cada variável de acordo com sua influência e contribuição para a degradação florestal. Esses pesos foram determinados tendo como base o conhecimento do especialista e o emprego da técnica de auxílio a tomada de decisão, a AHP (*Analytic Hierarchy Process*), que consiste na comparação pareada das variáveis baseada na construção de uma lógica hierárquica prévia (SAATY, 1980). A hierarquização lógica encontra-se descrita na Tabela 2.

Tabela 2: Hierarquização das variáveis.

Variável	Importância	Justificativa
Mapa de densidade de Kernel dos focos de calor	9	Incêndios florestais são responsáveis pelas mais altas intensidades de degradação florestal
Distância euclidiana dos polígonos de desmatamento	8	Áreas desmatadas podem apresentar forte influência na degradação florestal por meio do efeito de borda, tipo de cobertura da terra que justifique o emprego do fogo como forma de manejo e o tipo de borda do fragmento.
Densidade de borda	7	Áreas com maior densidade de borda apresentam maior influência sobre o sistema florestal através dos efeitos de borda.
Distância euclidiana das estradas	6	Estradas são as vias de acesso para acesso e escoamento de madeira.
Distância euclidiana dos polígonos de PMFS	5	Indicam exploração seletiva sustentáveis, seguindo regras definidas e regulamentadas na legislação.
Distância euclidiana dos polígonos de Terra Indígena	4	A proximidade da Terra Indígena teoricamente influencia negativamente na degradação florestal, visto que esta é uma região protegida por lei.

Após a geração do indicador, realizou-se uma tabulação cruzada entre os mapas de suscetibilidade a degradação florestal com o mapa de referência do ano de 2001, produzido por Pinheiro (2015), para verificar a aderência do cenário produzido à realidade. Este teste serviu para determinar qual método obteve melhor aderência. Posteriormente, a variável “densidade de borda” foi avaliada bem como sua influência na geração do indicador de suscetibilidade à degradação florestal.

## 4. Resultados e discussões

Após a aplicação da técnica AHP obtiveram-se os pesos que foram utilizados na operação de média ponderada. Os pesos obtidos estão descritos na tabela 3.

Tabela 3: pesos obtidos através da técnica de auxílio a tomada de decisão AHP.

Variável	Peso
Densidade de Kernel de focos de calor	0,355
Distância de desmatamento	0,207
Distancia de estradas	0,203
PMFS Distancia de PMFSs	0,024
Terra Indígena Distancia de TIs	0,031
Densidade de borda	0,180

A razão de consistência (CR) dos pesos gerados foi de 0,048, que indica que os dados estão logicamente relacionados. Após a aplicação das operações de média simples e média ponderada com pesos obtidos na AHP, obtiveram-se então dois mapas de suscetibilidade para o ano de 2001. Em seguida, realizou-se um teste de aderência desses mapas com o mapa de Pinheiro (2015) para verificar qual método obteve maior aderência. Na Figura 4.3 são apresentados os mapas de suscetibilidade à degradação florestal, provenientes das operações de média simples e média ponderada.

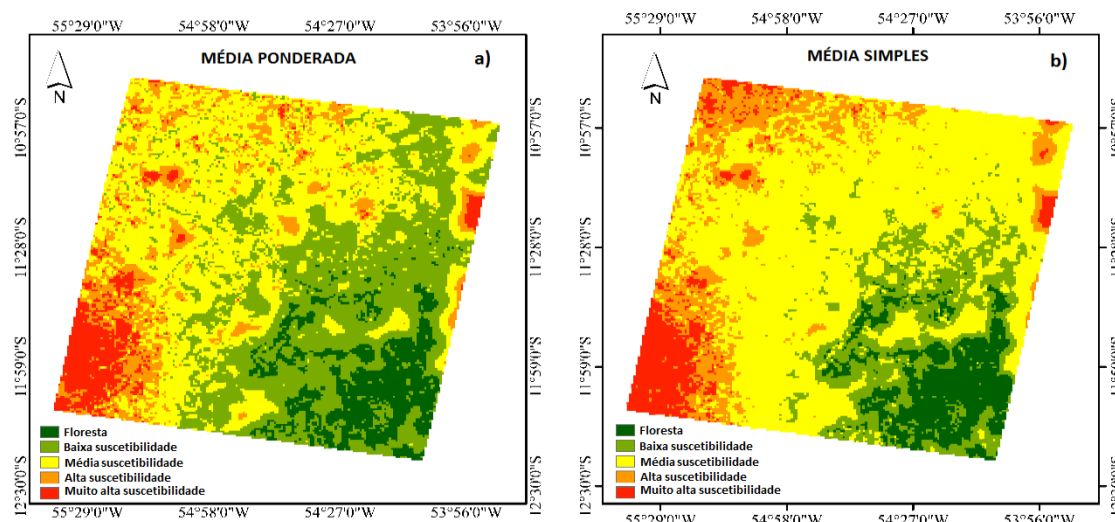


Figura 4.3: Mapas de suscetibilidade à degradação florestal. Em a) é apresentado o resultado da operação de média ponderada e em b), o resultado da média simples.

O teste de aderência realizado entre os mapas de suscetibilidade a degradação florestal e o mapa de referência de Pinheiro (2015), revelou ligeira superioridade do método de média simples em relação ao de média ponderada, como podem ser observado nas Tabelas 3 e 4. Apesar do mapa de média ponderada ter apresentando aderência ao mapa de referência, superior da classe “alta suscetibilidade”, níveis consideráveis de confusão desta classe ocorreram com classes como floresta e baixa degradação, contrariando o esperado.

Como o que se busca neste estudo é a obtenção de um mapa de suscetibilidade à degradação, considerou-se que as classes floresta e baixa suscetibilidade apresentam pouca diferença entre si no âmbito da modificação da vegetação natural.

Tabela 3: Tabulação cruzada entre o mapa de suscetibilidade dos dados do ano de 2001 gerado pela operação de média simples e o mapa de referência de Pinheiro (2015), em número de pixels.

		Referência						
		Floresta	Baixa Degradação	Média Degradação	Alta Degradação	Corte raso	Total de pixels	% da interseção
MAPA DE SUSCETIBILIDADE	Floresta	2518	0	0	0	0	2518	100.0
	Baixa Suscetibilidade	4238	3612	887	5	0	8742	41.3
	Média Suscetibilidade	45	1068	4325	4373	1141	10952	39.5
	Alta Suscetibilidade	0	2	149	631	2551	3333	18.9
	Muito alta suscetibilidade	0	0	0	12	1605	1617	99.3



Tabela 4: Tabulação cruzada entre o mapa de suscetibilidade dos dados do ano de 2001 gerado pela operação de média ponderada e o mapa de referência de Pinheiro (2015), em número de pixels.

		Referência						
		Floresta	Baixa Degradação	Média Degradação	Alta Degradação	Corte raso	Total de pixels	% da interseção
MAPA DE SUSCETIBILIDADE	Floresta	2570	0	0	0	0	2570	100.0
	Baixa Suscetibilidade	3115	893	25	0	0	4033	22.1
	Média Suscetibilidade	1106	3556	4593	4069	1785	15109	30.4
	Alta Suscetibilidade	10	229	659	822	1983	3703	22.2
	Muito alta suscetibilidade	0	4	84	130	1529	1747	87.5

Definido o método mais efetivo para geração do mapa de suscetibilidade à degradação florestal, gerou-se outro mapa com as mesmas variáveis, porém, com dados correspondentes ao ano de 2014. A figura 4.4 mostra o mapa de suscetibilidade a degradação florestal para o ano de 2014.

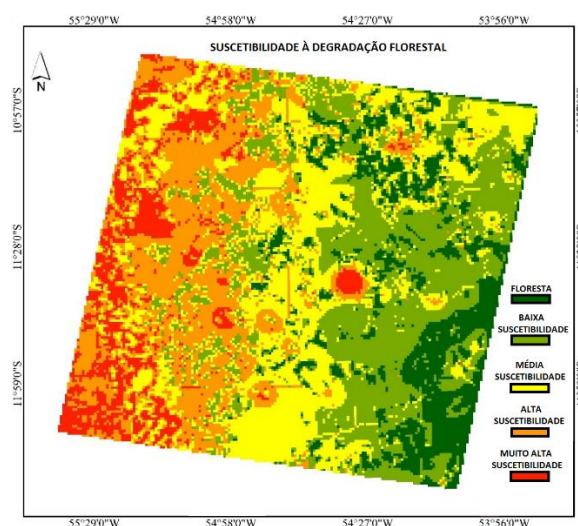


Figura 4.4: Mapa de suscetibilidade a degradação florestal para o ano de 2014 obtido pela operação de média simples

É notória a maior suscetibilidade à degradação florestal na parte oeste da órbita/ponto, especialmente na porção sudoeste. Este fator pode ser explicado pela maior densidade de focos de calor e da malha viária. De acordo com Brando et al. (2014), a ocorrência de incêndios florestais resulta em alta mortalidade de árvores e intensa degradação florestal, especialmente se, no ano de ocorrência desses incêndios, ocorrerem secas severas, já que há forte interação entre esses dois fatores.

É também nesta área que se concentra o maior núcleo urbano da região, o que poderia justificar a maior presença de estradas. Matricard et al. (2010) destacam que a malha viária pode gerar uma maior suscetibilidade a degradação florestal uma vez que, com o aumento das estradas, o acesso às regiões de interesse é maior e facilita a degradação por exploração seletiva.

Outro parâmetro analisado foi a influência da borda dos fragmentos florestais estudados, representados neste estudo pela variável densidade de bordas, na geração dos mapas de suscetibilidade a degradação florestal. Tal influência foi testada gerando-se um novo mapa de suscetibilidade sem a variável densidade de borda com a operação de média simples, que obteve melhor resultado no teste de aderência ao mapa de referência. Na Figura 4.5 é apresentada a comparação de dois mapas de suscetibilidade à degradação florestal com e sem a métrica de densidade de bordas.

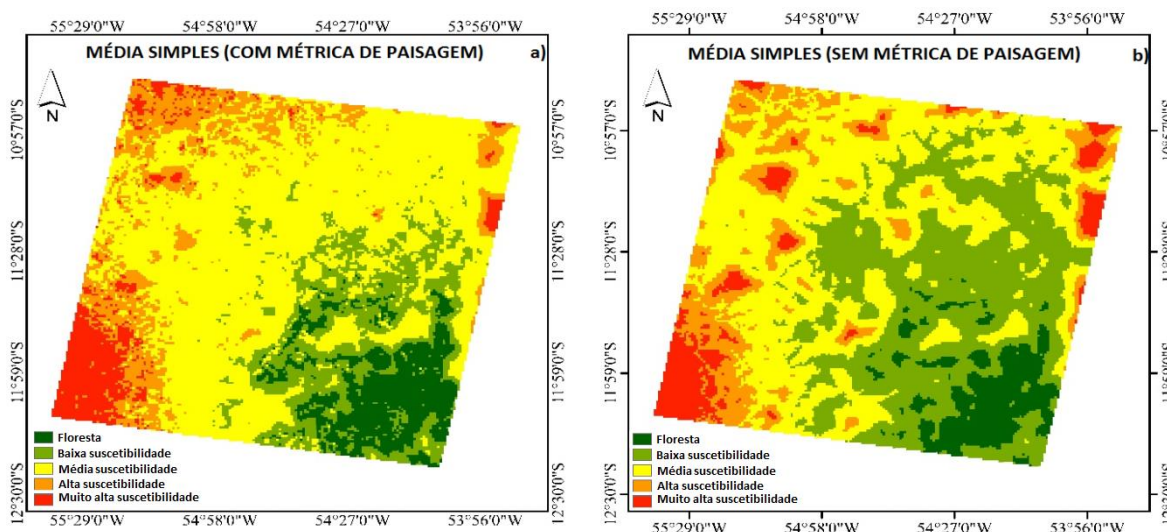


Figura 4.5: Comparação entre os mapas de suscetibilidade à degradação florestal utilizando a operação de média simples. São apresentados em a) o mapa com a variável densidade de borda e em b) o mapa sem a variável densidade de borda.

Fica evidente que os mapas de degradação demonstraram significativa sensibilidade a variável densidade de bordas. No mapa com a variável densidade de bordas observa-se que a classe de média suscetibilidade apresentou área maior do que o mapa gerado sem esse atributo. Um novo teste de aderência foi realizado entre o mapa de degradação gerado sem a variável densidade de borda e o mapa de referência de Pinheiro (2015), esses resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Teste de aderência entre o mapa de suscetibilidade gerado pela operação de média simples sem a variável “densidade de borda” e o mapa de referência de Pinheiro (2015), em número de pixels.

		Referência						
		Floresta	Baixa Degradação	Média Degradação	Alta Degradação	Corte raso	Total de pixels	% da interseção
MAPA DE SUSCETIBILIDADE	Floresta	2001	102	1	0	0	2104	95.1
	Baixa Suscetibilidade	4800	2158	1915	861	85	9819	22.0
	Média Suscetibilidade	0	2422	3445	2536	1812	10215	33.7
	Alta Suscetibilidade	198	232	357	1202	1667	3656	32.9
	Muito alta suscetibilidade	0	0	0	68	1300	1368	95.0

O resultado do teste apresentado na Tabela 5 mostra aderência inferior quando comparado ao resultado apresentado na Tabela 3. Isso demonstra que a variável densidade de borda é um importante fator a ser considerado quando se deseja estudar a degradação florestal.

Os impactos do efeito de borda são maiores em fragmentos irregulares, pois estes apresentam maior quantidade de borda e, conseqüentemente, são mais afetados por elas. Em outras palavras, a densidade de borda pode influenciar na degradação florestal, aumentando a área de floresta sob esse efeito, interferindo nos fluxos bióticos e abióticos (FARINA, 1998), mostrando ser um fator de fundamental importância no estudo de suscetibilidade à degradação florestal.

## 5. Conclusões

A análise dos métodos empregados na geração de indicadores de suscetibilidade a degradação florestal revelou que indicador de suscetibilidade gerado a partir da média simples apresentou ligeira superioridade em relação ao indicador de média ponderada, quando comparados com o dado de referência. Nota-se, ainda, que o mapa de média ponderada mostrou distribuição espacial mais uniforme entre as classes de degradação, especialmente no que diz respeito às classes floresta e baixa suscetibilidade. Isso demonstra que este operador foi menos restritivo do que o de média simples. O mapa de 2014, gerado a partir do método que obteve maior aderência à referência, evidenciou maior suscetibilidade na região oeste da área de estudo, onde se concentra a maior densidade de focos de calor da malha viária.

Quanto à influência da borda dos fragmentos florestais, representada pela variável densidade de bordas, conclui-se que este é um importante fator que deve ser levado em consideração quando se deseja estudar degradação florestal. O mapa que contém esta variável apresentou maior aderência ao mapa de referência. É importante ressaltar que outras métricas de paisagem podem ser testadas para representar a fragmentação florestal podendo melhorar o indicador de suscetibilidade a degradação florestal.

## 6. Referências bibliográficas

Balch, J. K., Nepstad, D. C., Curran, L. M., Brando, P., Portela, O., Guilherme, P., de Carvalho Jr., O. (2011). **Size, species, and fire behavior predict tree and liana mortality from experimental burns in the Brazilian Amazon.** *Forest Ecology and Management*, 261(1), 68–77. doi:10.1016/j.foreco.2010.09.029

Brando, P.M., Balch, J.K., Nepstad, D.C., Morton, D.C., Putz, F.E., Coe, M.T., Silvério, D., Macedo, M.N., Davidson, E.A., Nóbrega, C.C., Alencar, A., Soares-filho, B.S., Monteiro, P., Silverio, D.V., Nobrega, C., 2014. **Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions.** *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 6347–6352. 2014.

Farina, A. **Principles and methods in landscape ecology.** London: Chapman & Hall Ltd, 1998.

Ferreira, J. C. V.; **História do Município de Lucas do Rio Verde.** Disponível em <<http://www.mtseusmunicipios.com.br/NG/conteudo.php?sid=168&cid=484>> Acesso em 24 de junho de 2015.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) **Geociências, Produtos.** Disponível em <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default\\_prod.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm)>. Acesso em 24 de junho de 2015.

Instituto nacional de pesquisas espaciais - INPE. **Projeto Prodes: Programa de Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por satélite.** 2015. Disponível em <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>. Acesso 25 de junho de 2015

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): **The Physical Science Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press – 2007.

Korting, T.; Fonseca, L.; Escada, M.I.; Silva, F.; Silva, M. **GeoDMA - A Novel System for Spatial Data Mining.** In: IEEE International Conference on Data Mining Workshops, 2008. Anais..., USA: IEEE Computer Society Washington. Artigos, p. 975-978. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4734031>>. Acesso em Acesso 25 de junho de 2015.

Laurance, W. F. et al. **Effects of Forest Fragmentation on Recruitment Patterns in Amazonian Tree Communities.** *Conservation Biology*, [s.l.], v. 12, n. 2, p.460-464, 26 abr. 1998. Wiley-Blackwell. DOI: 10.1111/j.1523-1739.1998.97175.x.

Matricardi, E. A. T., Skole, D. L., Pedlowski, M. S., Chomentowski, W., Fernandes, L. C. **Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery, Remote Sensing of Environment,** 2010.

Pinheiro, T. F. **Padrões e Trajetórias de Degradação Florestal em Fronteiras Madeireiras da Amazônia,** Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Pinheiro, T. F., Escada, M. I. S., **Detecção e Classificação de padrões da Degradação Florestal na Amazônia por meio de banco de dados celular,** Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

Saaty, T. L. **The Analytic Hierarchy Process.** New York: McGraw-Hill International, 1980.