

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/328053670>

Mapeamento de padrões de intensidade da degradação florestal: estudo de caso na região de Sinop, Mato Grosso

Article · March 2018

DOI: 10.14393/rbcv70n1-45254

CITATIONS

0

READS

17

4 authors, including:



Vinicius DO PRADO Capanema

National Institute for Space Research, Brazil

1 PUBLICATION 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Taise Farias Pinheiro

National Institute for Space Research, Brazil

22 PUBLICATIONS 41 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Maria Isabel Sobral Escada

National Institute for Space Research, Brazil

85 PUBLICATIONS 591 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



DETER PROJECT [View project](#)



URBISAmazônia [View project](#)



Mapeamento de padrões de intensidade da degradação florestal: estudo de caso na região de Sinop, Mato Grosso.

Mapping of Forest Degradation Intensity Patterns: Case Study in Sinop region, Mato Grosso State

Vinicius do Prado Capanema¹

Taise Farias Pinheiro²

Maria Isabel Sobral Escada³

Sidnei J.S. Sant'Anna⁴

Recebido em agosto de 2017.

Aprovado em abril de 2018.

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para mapear e classificar a partir de imagens OLI/Landsat, a intensidade de degradação florestal de forma semiautomática. A área de estudo é a região de Sinop, no estado do Mato Grosso. A metodologia constou de duas etapas: i) classificação espectral da imagem por meio da técnica de Modelo Linear de Mistura Espectral, para a geração de uma imagem-índice, combinando as frações solo e vegetação. Nessa etapa, a imagem resultante foi fatiada e os elementos indicadores de degradação florestal especificamente decorrentes de exploração madeireira, tais como, presença de pátios de estocagem, ramais de arraste, e cicatrizes de fogo, foram identificados e mapeados; ii) classificação estrutural dos padrões de intensidade de degradação florestal considerado células de 1 km². Técnicas que exploram as métricas de paisagem e de mineração de dados foram empregadas para classificação dos padrões de degradação. O desempenho da classificação, que teve como suporte informações coletadas em campo, apresentou exatidão global e índice Kappa de 96% e 91%, respectivamente. Os resultados mostraram que essa abordagem, por considerar a intensidade da degradação, pode ser replicada em estudos temporais de análise das condições da paisagem florestal, pois a célula, sendo uma unidade fixa no tempo e no espaço, possibilita mensurar a direção e magnitude da estrutura dos elementos associados à degradação e analisar os seus efeitos colaterais espaço temporais. A metodologia proposta possibilitou gerar gradientes espaciais de intensidade de

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Brasil. E-mail: vinicius.capanema@inpe.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. E-mail: taisefarias@hotmail.com

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Brasil. E-mail: isabel.escada@inpe.br

⁴ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Brasil. E-mail: sidnei@dpi.inpe.br

degradação florestal, cujas informações podem subsidiar o planejamento de políticas e de ações de controle e de fiscalização em áreas florestais.

PALAVRAS-CHAVE: Degradação Florestal. Exploração Madeireira. Classificação Espectral. Mineração de dados. Classificação Estrutural.

ABSTRACT

In this paper, we present a methodology to map and classify forest intensity degradation patterns using OLI/Landsat imagery, corresponding to region of Sinop, a municipality in the Mato Grosso Amazon region. The methodologic approach we propose a semiautomatic method to classify patterns of intensity of forest degradation in two steps: i) spectral classification, using Linear Spectral Mixture Model to generate an index image combining vegetation and soil fraction images to map the elements indicators of forest degradation such as small clearings, roads and burning scars; ii) structural classification of the forest intensity degradation patterns, based on a typology of forest degradation patterns proposed by Pinheiro (2015) for 1 km² cells, landscape metrics and data mining techniques. The classification performance, which had field data observation to support validation, presented a global accuracy and Kappa index of 96% and 91%, respectively. The results showed that, due to the gadget and continuous of forest degradation characteristics, the methodology applied in this study demonstrated to be adequate to be applied in temporal series. The approach using cells representing forest degradation patterns allowed to quantify Structural properties of elements associated with forest degradation within its boundaries, delimits a portion of area that can be observed over time. The proposed methodology makes it possible to generate spatial gradients of forest degradation intensity, from which information can be extracted to support the planning of policies and actions to control forest degradation.

KEYWORDS: Forest Degradation. Selective Logging. Spectral Classification. Data Mining. Structural Classification.

* * *

Introdução

A degradação florestal pode ser entendida como um processo que resulta na alteração das condições biofísicas e estruturais originais dos sistemas florestais. Na literatura, contudo, não há um consenso quanto à sua definição que pode assumir, de acordo com o objetivo do estudo, um enfoque mais específico, geral ou operacional (LUND, 2009; PINHEIRO, 2015). No escopo do Sistema de Mapeamento da Degradação Florestal (DEGRAD), que faz parte do Programa de Monitoramento da Floresta Amazônia Brasileira por satélite, desenvolvido pelo INPE (2008), a degradação florestal é definida como o *processo gradual e de longo prazo da perda da cobertura florestal por meio da extração seletiva de madeira*

e/ou da ocorrência de incêndios florestais. Esse conceito se aproxima mais da perspectiva operacional, pois especifica elementos que descrevem a degradação florestal e que são passíveis de serem detectadas com imagens de satélite e técnicas de processamento de imagens. Uma das vantagens do uso do conceito operacional de degradação, que é o utilizado neste trabalho, é que a revisita dos sensores orbitais que geram imagens periódicas de uma mesma área, possibilita ao usuário acompanhar todos os estágios de um determinado fenômeno que, no caso deste estudo, é o processo de degradação florestal.

A degradação florestal na Amazônia brasileira é um processo antigo, que foi intensificado, sobretudo, após as políticas de ocupação do território promovidas pelo governo federal na década de 60 (BECKER, 1982; PANDOLFO, 1994). Este processo foi evidente em regiões em que o povoamento foi associado à abertura de rodovias, como a BR-163 e, e posteriormente, com os assentamentos de colonização, tais como os projetos privados da região de Sinop-MT, que impulsionaram a exploração madeireira, o que fez com que essa região se tornasse um importante pólo madeireiro (STONE & LEFEBVRE, 1998; NEPSTAD et al., 1999).

Em comparação com a extração de madeira, os incêndios florestais são fenômenos ainda mais antigos na Amazônia, de ocorrência anterior às ocupações da década de 60, sobretudo, aqueles de origem natural, predominantemente associados aos períodos de secas severas (NEPSTAD et al., 1999). Os incêndios florestais têm aumentado de frequência e extensão na Amazônia, devido à ação antrópica, particularmente em função de práticas de uso do fogo no manejo agrícola e de pastagens e na derrubada ilegal da floresta (Balch et al. 2011).

A detecção de elementos associados ao fogo florestal e à extração de madeira tem sido realizada com o uso de imagens de sensores óticos orbitais, de resolução espacial moderada, particularmente como os dados do TM/Landsat (Beuchle et al. 2011). Os sensores da série Landsat, por atuarem na região óptica do espectro eletromagnético, apresentam limitações associadas às condições atmosféricas (BRUZZONE e BOVOLO, 2008; COPPIN et al., 2004), o que pode limitar as observações na região da Amazônia, cuja localização favorece a formação de nuvens. Apesar disso, a extensa base de

dados espacial e temporal, que pode ser acessada gratuitamente, e a capacidade desse sensor de detectar elementos indicativos de degradação florestal como os pátios de estocagem, estradas secundárias, trilhas de arraste e cicatrizes de fogo, fazem com que essas imagens Landsat sejam amplamente utilizadas nos estudos da degradação florestal.

A detecção de áreas de floresta degradada pode ser considerada parcial, quando a área mapeada se restringe somente aos elementos indicativos, pois danos colaterais podem ocorrer na escala sub-pixel, dificultando sua detecção com sensores da resolução espacial com a do TM/Landsat, que é de 30 metros. Este aspecto torna a abordagem celular interessante, pois a área de abrangência da célula é maior do que aquela detectada pela extração de madeira e/ou pelo fogo florestal. Deve-se considerar que a detecção do sensor está relacionada não só a sua capacidade radiométrica, mas também a intensidade do evento, como por exemplo, incêndios de baixa intensidade e a degradação oriunda de efeitos de borda em fragmentos florestais. As células possibilitam incluir áreas para onde os danos se estendem. Como esses danos podem ser críticos, é interessante incorporá-los nas análises (ESPÍRITO-SANTO, 2004; PINHEIRO et al, 2016).

Apesar das limitações, diversos estudos têm sido realizados com objetivo de detectar e mapear a degradação florestal com dados de sensores de média resolução espacial como, por exemplo, o estudo de Matricardi et al (2010) e o estudo de Shimabukuro et al. (2014), realizados no estado de Mato Grosso. A diferença entre eles se concentra em uma questão operacional. Ao utilizar índices de vegetação, o estudo conduzido por Matricardi et al. (2010) demanda maiores intervenções do usuário, ao passo que o estudo de Shimabukuro et al. (2014) apresenta uma metodologia que requer menos intervenções.

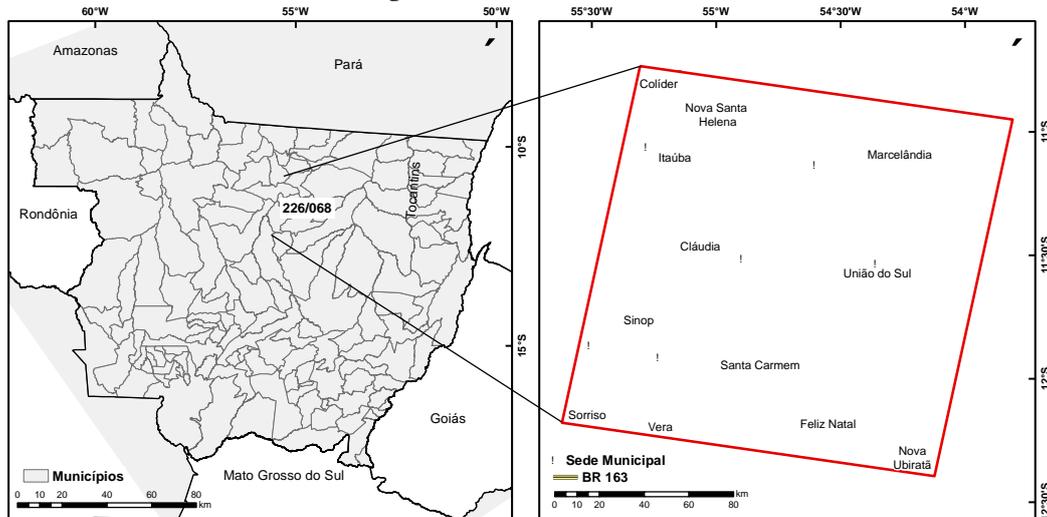
Devido ao caráter gradual e de longo prazo do processo de degradação florestal, é importante que os procedimentos de detecção e mapeamento deste fenômeno tenha acurácia e seja operacionalmente viável. Com isso, o objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia operacional semiautomática para mapeamento da degradação florestal para o ano de 2014, baseada na integração de informações obtidas a partir da técnica de Modelo Linear de Mistura

Espectral (SHIMABUKURO e SMITH, 1991) com técnicas de mineração de dados e métricas de paisagem com imagens do com imagens do TM/ETM+/OLI Landsat. A partir de uma imagem-índice derivada das frações vegetação e solo (obtidas do Modelo Linear de Mistura Espectral), foi realizada uma classificação estrutural de padrões de degradação florestal por meio de representação celular, combinando técnicas de mineração de dados e métricas estruturais da paisagem. Foi obtido assim um mapa em um plano celular, ao qual foi associado um gradiente espacial de intensidade de degradação florestal. Para efeito de comparação, o procedimento foi aplicado em imagens dos anos de 2002 e 2004, possibilitando comparar os resultados com os obtidos por Shimabukuro (2014) e Matricardi et al. (2010), respectivamente. Na elaboração da metodologia, o aspecto operacional e o desempenho da classificação foram priorizados de forma a viabilizar a possibilidade de reprodução desta metodologia para produção de dados de séries temporais longas, uma vez que, para se realizar estudos mais aprofundados da degradação florestal, pode ser necessário utilizar séries temporais longas de 20 a 30 anos, dado o caráter gradual do processo.

2 Área de estudo

A área de estudo corresponde à área da cena 226/068 do sensor TM/Landsat. Esta cena localiza-se na Amazônia Mato-grossense, que segundo o IBGE (2017), apresenta os climas Equatorial e Tropical. O clima Equatorial é úmido com estação seca de duração aproximada de 3 meses, enquanto que o clima Tropical é quente e úmido, com períodos de seca variando de 3 a 4 meses. Os municípios localizados na área de estudo são Cláudia, Colíder, Feliz Natal, Itaúba, Marcelândia, Nova Santa Helena, Santa Carmem, Sinop, Sorriso, Terra Nova do Norte, União do Sul e Vera (Figura 1 – Área de estudo).

Figura 1 – Área de estudo



Fonte: Elaborado pelos autores.

Após sofrer intensa exploração madeireira nos primórdios da colonização, seguida do estabelecimento da pecuária até fins da década de 90, essa região teve como novo ciclo de ocupação a expansão do agronegócio, com desenvolvimento da agricultura de larga escala de grãos, destinada principalmente para a exportação (TEIXEIRA, 2006, RAVACHE, 2013).

3 Materiais e métodos

3.1 Dados

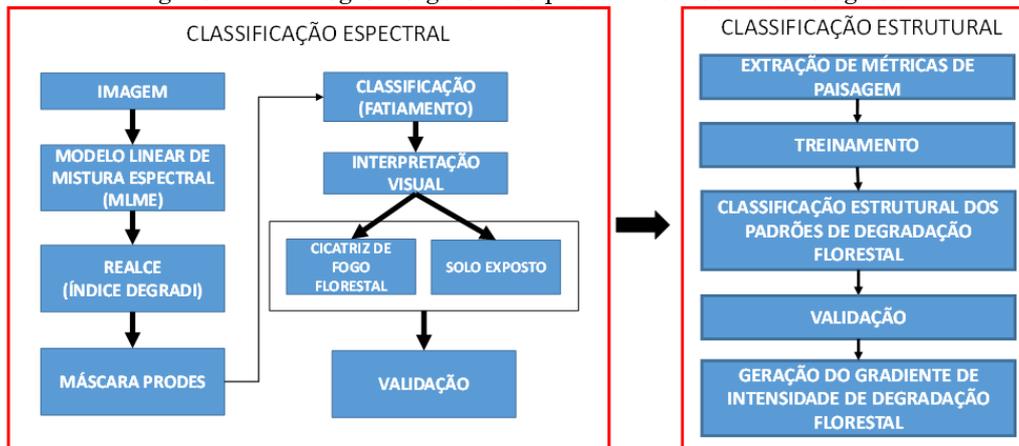
Os dados utilizados neste estudo foram imagens dos sensores OLI/Landsat na data de 20/08/2014, e TM/ETM+/LANDSAT em 09/09/2004 e 10/07/2002, todas obtidas do catálogo de imagens do Serviço Geológico Americano (USGS). A abordagem utilizada para o mapeamento da degradação florestal de 2014 foi estendida também aos anos anteriores de 2004 e 2002 para comparação com os resultados obtidos por Matricardi et al. (2010) e Shimabukuro (2014), respectivamente. Contudo, não foram utilizados na etapa de classificação estrutural, que define o gradiente espacial de degradação florestal. A escolha da

data das imagens levou em consideração a presença de nuvens e o período seco da região, entre junho e setembro, quando ocorrem as queimadas.

3.2 Métodos

A metodologia utilizada neste estudo compreende duas etapas. Na primeira, definida como classificação espectral, foram mapeados os elementos que caracterizam a degradação florestal, como cicatriz de fogo florestal, trilhas de arraste de madeira e pátios de estocagem. A partir desse mapeamento foram gerados os dados de entrada para a segunda etapa, ou seja, a classificação estrutural. Nessa etapa foram identificados e classificados os padrões de degradação florestal de acordo com a tipologia proposta por Pinheiro (2015). O mapeamento de afloramento rochoso também foi realizado (manualmente) para distingui-lo da área afetada pela degradação florestal, já que são classes espectralmente similares em imagens dos sensores TM/ETM+/OLI Landsat e não estão inclusos em sua totalidade na classe *não floresta* produzida pelo PRODES. Essas áreas de afloramento rochoso ora são classificadas como corte raso (quando atingem a área mínima de mapeamento) e ora estão inclusas nas áreas de floresta e quando se deseja mapear a degradação florestal, mesmo em extensões (de áreas) não significativas, são fontes de erro, pois podem ser confundidas com elementos indicativos de exploração seletiva de madeira, como os pátios de estocagem, por exemplo. Um fluxograma metodológico, com as principais etapas seguidas neste trabalho é apresentado na Figura 2

Figura 2 – Fluxograma geral dos procedimentos metodológicos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3 Classificação espectral

Nesta etapa, foram realizados os procedimentos para distinguir as classes de mapeamento, que são: *floresta*, e *floresta degradada*, esta última, dividida em duas categorias: solo exposto, referente aos pátios de estocagem de madeira, trilhas de arraste de madeira e clareiras formadas com a derrubada das árvores (*exploração seletiva*); e cicatriz de fogo florestal (*floresta queimada*). As áreas de corte raso foram excluídas da análise utilizando a máscara de desmatamento do PRODES.

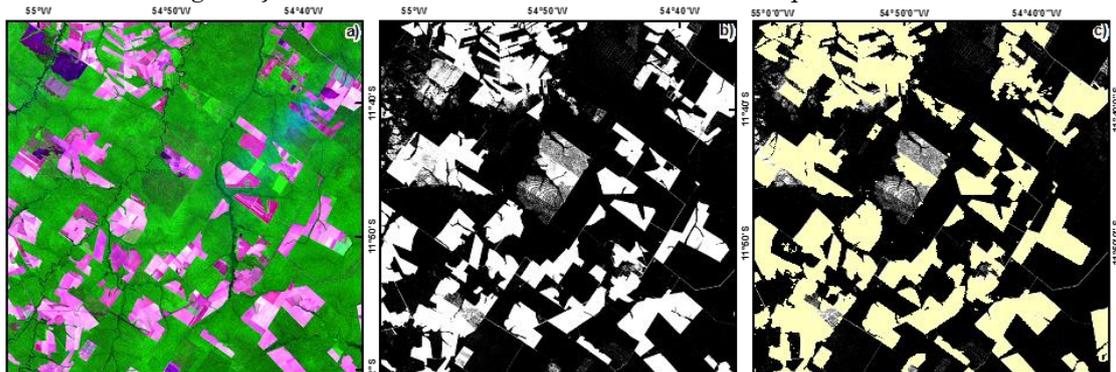
Para o mapeamento, foi aplicado à imagem o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), que decompõe as bandas originais em imagens fração solo, vegetação e água/sombra, cujo objetivo é estimar a proporção dos componentes presentes em cada pixel baseado nas assinaturas espectrais de pixels puros (SHIMABUKURO; SMITH, 1991). Para realçar os elementos indicadores de degradação florestal, foi gerada uma imagem derivada de um índice, denominado DEGRADI, que destaca as classes e feições de interesse relacionadas à degradação florestal. Este índice é o mesmo utilizado no projeto DEGRAD e baseia-se no pressuposto de que o alto contraste espectral entre as imagens fração solo e vegetação possibilita destacar e facilitar a detecção dos principais descritores da extração seletiva de madeira e do fogo florestal. Esse índice é apresentado na Equação 1:

$$DEGRADI = G*(IS / IV)+Off \quad (1)$$

onde *DEGRADI* é o Índice Espectral de Degradação Florestal; *G* é o ganho (fator multiplicativo, geralmente utilizado para realçar diferenças espectrais entre as imagens); *IS* é a imagem fração solo; *IV* é a imagem fração vegetação e; o *Off* é o offset (fator aditivo, geralmente empregado para realçar similaridades entre bandas ou imagens diferentes). Os valores de ganho e offset foram aplicados de forma empírica e interativa para cada imagem para ressaltar as feições de interesse (PINHEIRO et al. 2016).

Após obtenção das imagens índice DEGRADI, foi utilizado o dado de desmatamento do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES) que serviu como uma máscara, com objetivo de subtrair as áreas desmatadas, áreas de não floresta, hidrografia e demais classes em que não ocorre degradação florestal. Com a obtenção da máscara de desmatamento, foi possível excluir da análise as áreas relativas à classe *corte*, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Etapas da obtenção dos polígonos de *floresta degradada*. Em a) composição RGB (bandas 6, 5 e 4) da imagem OLI/Landsat (20/08/2014); em b) a imagem índice DEGRADI; em c) a máscara de desmatamento do PRODES sobreposta à imagem índice DEGRADI, realçando as áreas de degradação florestal em níveis de cinza mais claro do que as áreas de floresta



Fonte: Elaborado pelos autores.

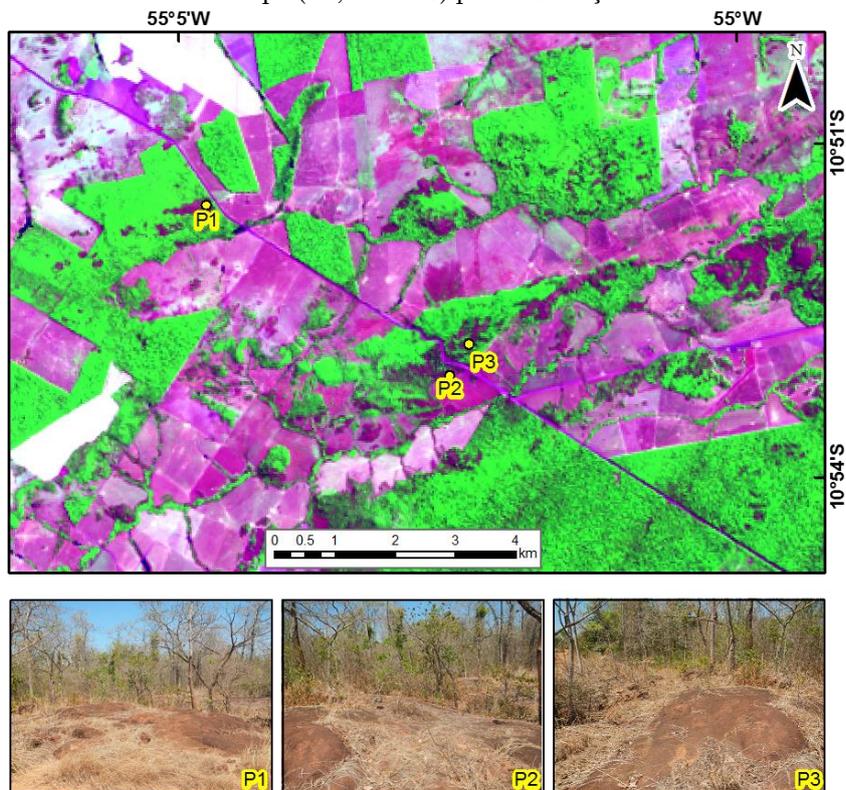
Em seguida, foi realizado o fatiamento nas imagens índice DEGRADI para separar as classes *floresta* e *floresta degradada* (composta pelas subcategorias *cicatriz de fogo florestal* e *solo exposto*). Para realizar esse fatiamento, primeiramente é identificado o intervalo de nível de cinza correspondente ao alvo de interesse. Esses limiares foram estabelecidos empiricamente, para cada ano do

mapeamento, observando na própria imagem os valores característicos de cada uma das classes.

A separação das subcategorias *cicatriz de fogo florestal* e *solo exposto* que compõe a classe *floresta degradada* ocorreu por meio de interpretação visual. Além dessas classes, foram identificadas nas imagens feições dúbias que apresentavam padrões espectrais semelhantes às áreas de corte raso, mas que não estavam incluídas nem na máscara de desmatamento nem na máscara de não floresta do PRODES. Essas áreas foram classificadas por meio de interpretação visual, e originaram uma nova classe, denominada neste estudo como *não floresta 1*. São feições que, por se assemelharem espectralmente com áreas de solo exposto, podem ser confundidas com *corte raso* (desmatamento) ou com solo exposto da classe *floresta degradada* e por isso foram mapeadas e excluídas da análise. Como resultado desta etapa, foi obtida uma imagem temática classificada com as classes *floresta*, *cicatriz de fogo florestal* e *solo exposto*.

A mesma metodologia, anteriormente descrita, foi aplicada para os anos de 2002, 2004 e 2014. A validação da classificação espectral do ano de 2002 e 2004 foi realizada com dados das Autorizações de Exploração Florestal (AUTEFs) emitidos pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Mato Grosso (SEMA-MT), que especifica os limites da exploração florestal do Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS). A avaliação do mapeamento de 2014 utilizou, além dos dados das AUTEFs, dados coletados em campo. Os pontos de visita, como podem ser vistos na Figura 4, foram selecionados levando-se em consideração a facilidade de acesso e o tamanho das feições na imagem. Áreas muito pequenas não foram visitadas.

Figura 4 – Áreas de afloramento rochoso em composição colorida RGB 654 OLI/Landsat em 2014, e pontos visitados em campo (P1, P2 e P3) para validação da classe de não floresta 1.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na avaliação de campo foi constatado que as áreas dúbias se tratavam de áreas de afloramento rochoso que foram posteriormente classificadas como áreas de *não floresta 1*. Apesar de serem espectralmente semelhantes ao corte raso e solo exposto, o afloramento rochoso possui textura, cor e forma sutilmente diferentes, mas importante na sua identificação. Essas áreas são relativamente fáceis de serem identificadas visualmente nas imagens OLI/Landsat quando inseridas em áreas florestais, devido ao contraste com a floresta (Figura 4).

Para avaliação da classificação espectral, foi selecionado um total de 340 pontos, 90 para o ano de 2002; 90 para o ano de 2004 e; 160 para o ano de 2014. Esses pontos incluíram os dados das AUTEFS (como coordenadas geográficas da área autorizada e volume autorizado) e os dados coletados na visita de campo, como por exemplo, tamanho e distribuição espacial dos pátios de estocagem e largura das estradas primárias e secundárias. Após a avaliação da classificação espectral, apenas os polígonos classificados para o ano de 2014, das classes *cicatriz*

de fogo florestal e solo exposto, foram utilizados como dados de entrada para a classificação estrutural, que será descrita na seção seguinte. Os polígonos das demais classes (*corte raso, não floresta e floresta intacta*) não foram utilizados na etapa de classificação estrutural. Conforme já mencionado anteriormente, os dados de 2002 e de 2004 foram utilizados para realizar uma análise comparativa com os resultados obtidos por Shimabukuro (2014) e Matricardi (2010).

3.4 Classificação estrutural

O objetivo dessa fase é produzir um mapa com os padrões espaciais de degradação florestal, para gerar no plano celular um gradiente de intensidade de degradação florestal. Células são polígonos vetoriais associados a atributos não espaciais calculados a partir de dados vetoriais e/ou matriciais capazes de homogeneizar e integrar informações provenientes de diferentes fontes na mesma base de dados espaço temporal.

A escolha de células para representar padrões de degradação florestal é que esta abordagem possui como vantagem a capacidade de captar os danos colaterais que o fogo e a exploração florestal causam nas áreas no entorno de onde ocorrem. O mapeamento apenas das feições produzidas pelo fogo e pela exploração madeireira, tais como os pátios, trilhas e as cicatrizes de queimada, subestima a área florestal degradada, pois quando há, por exemplo a queda de uma árvore, é aberta uma clareira na floresta, causando alterações locais importantes que não podem ser observadas via sensoriamento remoto, dadas as limitações do sistema-sensor. O dano causado nas áreas adjacentes não é capturado no mapeamento exclusivo dessas feições, portanto não é possível mapeá-los apenas observando uma imagem de satélite. Outra vantagem interessante do uso de células é a possibilidade de fixar uma área no tempo e no espaço que pode ser observada e monitorada em análises multitemporais.

Neste estudo, a classificação estrutural de padrões de degradação florestal foi baseada na tipologia de padrões de degradação florestal proposta por Pinheiro (2015). Com base nesta tipologia, foram definidas classes de intensidade de

degradação florestal (IDF) que foram escalonadas para valores numéricos que variam entre zero e um, em que o valor 0 indica floresta intacta e o valor 1 indica corte raso. Valores intermediários indicam a intensidade de degradação florestal. A tipologia de Pinheiro (2015) está descrita na Tabela 1.

Tabela 1 – Tipologia de padrões de degradação florestal (DF) proposta por Pinheiro (2015): Em vermelho são representados os elementos indicativos de degradação florestal por fogo ou por exploração madeireira. Em verde é representada a cobertura florestal, sob influência dos eventos de fogo e exploração seletiva.

Padrão espacial*	Classe IDF	Descrição do padrão espacial do elemento indicativo de DF	Descrição da classe	Gradiente de IDF
	LFD1 – Degradação florestal por extração de madeira de baixa intensidade	Manchas de solo exposto pequenas e isoladas	Início de operações de exploração madeireiras. Pátios de estocagem de madeira são dispersos sistematicamente na paisagem.	0,2
	LFD2 – degradação florestal por extração de madeira de baixa intensidade: extração convencional	Manchas de solo exposto agrupadas maiores que o padrão LFD1	Espécies de valor comercial podem ser extraídas e comercializadas. Fogo florestal pode estar associado e em geral este padrão culmina no corte raso da floresta.	0,3
	MDF1- Degradação florestal por extração de madeira de intensidade moderada	Manchas de solo exposto de densidade moderada e tamanho médio	Operação de extração de madeira em andamento. Primeiras árvores foram derrubadas.	0,4
	MFD3 – Degradação florestal por extração de madeira de intensidade moderada	Pequenas e médias manchas de solo exposto de formato circular, pontual e linear	Associado com padrões de LFD1 e MFD1. Estradas são criadas para acessar as espécies de interesse. Configurações das estradas e pátios indicam planejamento da atividade de extração.	0,5
	MDF2- Degradação florestal por extração de madeira de intensidade moderada: extração convencional.	Manchas de solo exposto agrupadas de tamanho médio (maiores que o padrão LFD2)	Espécies de valor comercial podem ser extraídas e comercializadas, fogo florestal pode estar associado. Em geral este padrão culmina no corte raso da floresta.	0,6
	HDF1 – Degradação florestal por extração florestal de intensidade alta.	Manchas grandes de solo exposto.	Fim das operações de extração de madeira. Esse padrão representa o momento em que o desbaste de todas as árvores de interesse comercial foi realizado.	0,7
	HFD2 – Degradação florestal por fogo florestal.	Faixas de solo exposto causado por fogo intercalado com floresta não queimada e tomam a maior parte da unidade mínima de mapeamento.	Padrão de fogo florestal. Espécies de valor comercial poder ser extraídas antes do fogo. Em geral, este padrão culmina com o corte raso da floresta.	0,9

Fonte: adaptado de Pinheiro (2015). *A unidade mínima de mapeamento utilizado para a identificação dos padrões de degradação é a célula de 1 km². **O padrão espacial descrito refere-se ao elemento indicativo de degradação florestal (pátios de estocagem, estradas e trilhas de arraste e solo exposto decorrente de fogo florestal).

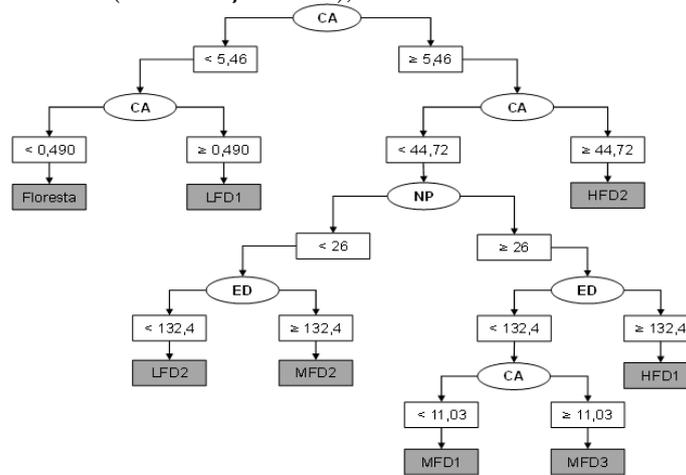
Esta tipologia baseia-se em células de 1 x 1 km, cuja resolução espacial foi determinada empiricamente por Pinheiro (2015), levando em consideração a área mínima dos pátios de estocagem de madeira e a distância entre eles (400 metros). A definição da dimensão das células também considerou a metodologia proposta por Sabogal et al. (2000), que pondera o tamanho típico das unidades de manejo florestal. É importante destacar que a partir do dado do sensor utilizado (Landsat5/TM) não se pode visualizar o dano colateral presente por exemplo nas adjacências de um pátio de estocagem. Porém, ao se utilizar a abordagem celular na classificação do padrão estrutural dos elementos indicadores de degradação florestal, esse dano colateral é incorporado à célula e indiretamente contabilizado, uma vez que a resolução espacial celular utilizada é de 1 km², bem superior a unidade mínima mapeada na etapa de classificação espectral, que é o pixel de 30m².

Associado a abordagem celular, foi utilizado um sistema para a mineração de dados Geographic Data Mining Analyst (GeoDMA), desenvolvido por Körting et al. (2008), para extrair das imagens temáticas, espectralmente classificadas, métricas de paisagem. As métricas de paisagem são medidas quantitativas de estrutura e composição que permitem, dentro de um contexto de avaliação e classificação, descrever os componentes da paisagem através de atributos numéricos (CARRÃO, 2002). Neste estudo, métricas de tamanho, área, forma, número e densidade de borda de manchas de solo exposto ofereceram indicativos do estágio da degradação florestal, podendo indicar o nível de intensidade de degradação florestal, ou seja, valores mais altos para cada um desses atributos indicam maiores interferências na floresta e conseqüentemente maior degradação florestal. Esses atributos foram calculados e armazenados em um banco de dados celular e representam os atributos espaciais da classe *floresta degradada*.

Antes da classificação, um conjunto de amostras de células para treinamento foi selecionado para cada padrão de intensidade de degradação representado na tipologia. A partir das amostras, foi gerada automaticamente uma árvore de decisão com o algoritmo C4.5 (QUINLAN, 1993). A árvore de decisão é obtida por meio de uma medida de entropia, baseada na teoria da informação em que as métricas de paisagem que melhor separam as classes, deram origem aos nós

principais, seguidos pelas métricas com menor capacidade de separabilidade de classes. A árvore de decisão e os limiares utilizados na classificação foram os mesmos propostos por Pinheiro (2015) e são apresentados na Figura 6. As métricas selecionadas foram área, número e densidade de borda das manchas.

Fig. 5 – Árvore de decisão empregada na classificação estrutural de padrões de degradação florestal em Sinop, Mato Grosso. Os padrões de degradação foram baseados nas métricas de paisagem, que são: CA (*Class Area*) área da classe em hectares; ED (*Edge Density*), densidade de borda (razão entre o somatório de todas as bordas da classe pela área total em hectares); NP (*Number of Patches*), número de manchas.



Fonte: Pinheiro (2015).

Após a classificação dos padrões de degradação, a máscara do PRODES com polígonos de *desmatamento* e a máscara com polígonos de *não floresta* foram incorporadas ao plano celular. Considerou-se como *corte raso* e *não floresta* todas as células que apresentaram ao menos 15% de área desmatada e afloramento rochoso, respectivamente, o que representou uma área mínima de 15 ha. Em células com áreas inferiores a esse limiar, foram mantidas as classes de cobertura da terra predominantes (i.e., *floresta* ou *padrões de degradação florestal*), conforme o resultado da classificação. Em seguida, as classes de padrões foram hierarquizadas e permitiram gerar um gradiente espacial de intensidade de degradação florestal, como pode ser observado na Tabela 2 (para observar a estrutura espacial, ver Tabela 1). Determinou-se que a classe *floresta* receberia o valor 0 e *corte raso* o valor 1.

Tabela 2 – Associação entre os padrões e a intensidade de degradação florestal.

Padrão de IDF	Índice de IDF
LFD1	0,2
LFD2	0,3
MFD1	0,4
MFD3	0,5
MFD2	0,6
HFD1	0,7
HFD2	0,9

Fonte: Pinheiro (2015).

A avaliação da classificação estrutural ocorreu conforme metodologia proposta por Pinheiro (2015). Foram selecionadas aleatoriamente 64 amostras (aproximadamente 3% do total das células classificadas) que foram classificadas por um fotointérprete independente. As amostras originaram o dado de referência, que foi posteriormente utilizado para a construção de uma matriz de confusão possibilitando estimar a exatidão total e os erros de comissão, omissão e índice Kappa (CONGALTON; GREEN, 1999; HUDSON; RAMM, 1987).

4 Resultados

4.1 Classificação espectral para os anos 2002 e 2004

A classificação espectral para os anos de 2002 e 2004 ocorreu para efeitos de comparação com os trabalhos de Shimabukuro et al. (2014) e Matricardi et al. (2010), respectivamente. A avaliação da classificação para o ano de 2002 apresentou exatidão global e índice Kappa de 0,96 e 0,95. O erro de comissão foi estimado em 3% e foi associado predominantemente a erros referentes à confusão entre as classes *solo exposto* e *floresta*. A confusão entre essas duas classes pode estar associada com a resolução espacial do sensor utilizado e as dimensões dos elementos indicativos de degradação florestal, sobretudo àqueles associados com a exploração seletiva, particularmente as de baixo impacto. Essas feições são evidentes em campo, mas em imagens de 30 metros de resolução espacial, podem ser confundidas com a floresta, devido ao denso dossel florestal que recobre essas áreas, limitando sua detecção.

Esses resultados mostram-se semelhantes aos encontrados no mapeamento de *solo exposto* e *cicatriz de fogo florestal* realizado por Shimabukuro et al. (2014),

cujos valores do Kappa e exatidão global foram de 0,72 e 0,79, respectivamente. Neste contexto, o ganho metodológico apresentado pelo presente estudo pode ser atribuído às etapas de realce (índice DEGRADI) e fatiamento, o que pode ter favorecido a detecção dos elementos indicadores de degradação florestal (pátios de estocagem, trilhas de arraste, estradas secundárias e cicatriz de fogo florestal), levando a melhores resultados da classificação.

Para o ano de 2004, os valores de Kappa e exatidão global foram de 0,90 e 0,96, respectivamente. Esses resultados se mostraram semelhantes aos obtidos no estudo de Matricardi et al. (2010) que encontraram índice Kappa de 0,91 e exatidão global de 0,96. Apesar dos índices estimados serem similares, considerou-se que o método proposto neste estudo é mais operacional por exigir menor intervenção do usuário, sendo, conseqüentemente, menos dependente do intérprete e mais simples de ser aplicado em séries temporais.

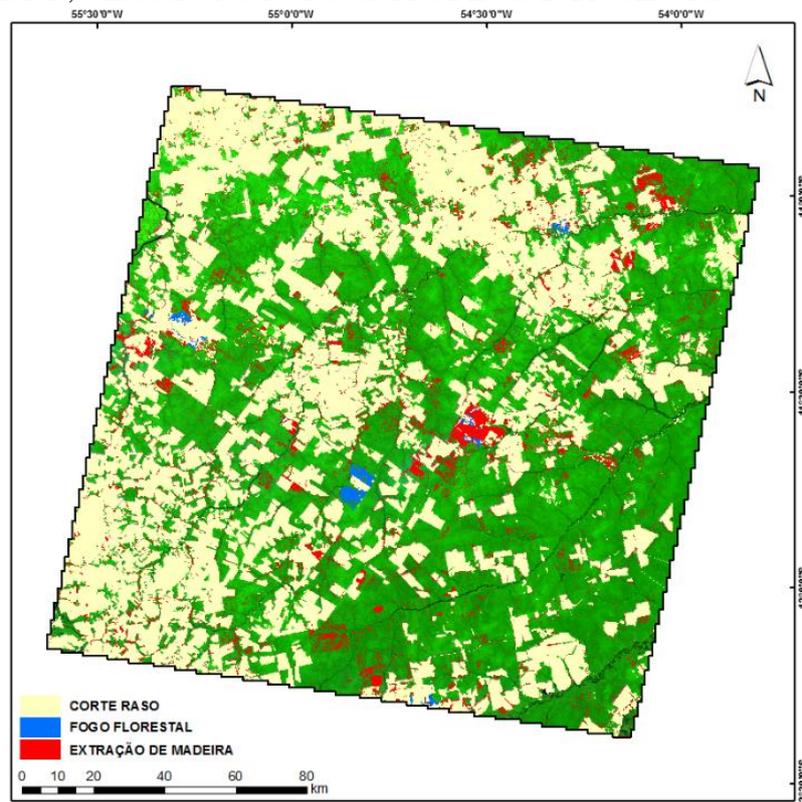
O estudo de Matricardi et al. (2010) utilizou índices de vegetação para mapear a degradação florestal que requerem etapas importantes de pré-processamento das imagens, tais como correção atmosférica. Demonstrou-se neste estudo que, com um método mais simples e operacional, podem-se obter resultados semelhantes àqueles obtidos com métodos mais complexos que requerem etapas de pré-processamento.

Métodos que utilizam maior número de técnicas manuais, como o apresentado por Matricardi et al. (2010), e aqueles completamente automatizados, como o apresentado por Shimabukuro et al. (2014), podem eventualmente apresentar problemas quanto a qualidade da classificação. Além disso, fatores como a variação do ângulo de elevação solar no momento da captura da imagem e a complexidade da resposta radiométrica oriunda da extração de madeira podem limitar a detecção da degradação florestal causada por exploração seletiva (GRAÇA et al., 2015). A metodologia de classificação espectral semiautomática empregada neste trabalho, contudo, utilizou o modelo linear de mistura espectral associado à técnica de realce, unindo, assim, o método automático com etapas manuais, apresentando bons resultados de classificação, com poucas intervenções manuais.

4.2 Classificação espectral e estrutural para o ano de 2014

As áreas de corte raso são relativamente mais fáceis de serem identificadas visualmente em composições coloridas do OLI/Landsat (bandas 6,5 e 4 em RGB) do que áreas de degradação florestal. A classificação espectral do ano de 2014 permitiu identificar as áreas de degradação florestal anual fruto de extração de madeira e de cicatriz de fogo florestal. Esses eventos possivelmente ocorreram há cerca de menos de um ano a contar da data de aquisição da imagem, pois são possíveis de serem visualizadas na imagem do ano 2014, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Resultado da classificação espectral sobre a imagem OLI/Landsat de 2014: em vermelho, as áreas de extração madeireira recente; em azul, as áreas de cicatriz de fogo florestal recente, em amarelo, a máscara de corte raso do PRODES de 2014 e em verde a cobertura florestal.



Fonte: elaborado pelos autores

A análise da Figura 7 demonstra que as áreas de fogo florestal ocorreram preferencialmente em áreas adjacentes às áreas desmatadas. Isto sugere que o desmatamento pode agir como um importante facilitador da degradação florestal por fogo florestal, principalmente se essas áreas desmatadas estiverem associadas a

determinadas classes de uso do solo, como a pastagem e a agricultura, que utilizam o fogo como prática de manejo para eliminação de resíduos agrícolas e limpeza do pasto (NEPSTAD et al. 1999; SÁ et al., 2007; VASCONCELOS et al, 2013).

É possível notar ainda que a área de *extração de madeira* é maior do que a de *cicatriz de fogo florestal*, ocupando aproximadamente 1.155 km² e 39 km², respectivamente. Isso se deve, em parte, ao fato de que as áreas de floresta degradada com extração de madeira são acometidas por ocorrências sucessivas de exploração de madeira (associada ou não ao fogo florestal) ao longo dos anos, enquanto as áreas de cicatriz de fogo representam áreas de ocorrência de fogo florestal detectadas próximo da data de aquisição da imagem.

A avaliação da classificação espectral demonstrou bom desempenho da classificação, apresentando exatidão global e índice Kappa de 0,96 e 0,91, respectivamente (Tabela 3). O erro de comissão (pixels são classificados em determinada classe sem realmente pertencer a ela) foi estimado em 17,5%. Esse erro foi associado predominantemente à confusão entre as classes solo exposto da floresta explorada e floresta (íntacta) e pode estar relacionado aos elementos indicadores de exploração seletiva de baixo impacto, que, devido a resolução espacial do Landsat, podem não ser evidentes.

Especificamente, esses erros ocorreram principalmente nas áreas de manejo florestal sustentável, que utilizam práticas que reduzem danos à floresta. Isso significa dizer que os elementos indicativos de degradação florestal (estradas, trilhas de arraste e pátios de estocagem), na resolução espacial do OLI/Landsat, podem não ser totalmente evidentes, quando a intensidade de corte da exploração é de baixa intensidade (baixa volumetria extraída por hectare). Resultados semelhantes foram encontrados em estudos anteriores, como o de Matricardi et al. (2007).

Contudo, mesmo em áreas manejadas, estradas, trilhas de arraste e as esplanadas (pátios de estocagem de madeira), podem ser observadas, principalmente se a exploração for de alta intensidade, e constituem elementos importantes para a detecção de atividades de exploração florestal, conforme destacado nos estudos de Pinheiro et al. (2016), Matricardi et al. (2005) e Monteiro et al. (2003).

Tabela 3 – Avaliação da classificação espectral do ano de 2014.

Classificação (fatiamento)	Referência (dados de campo)				Coeficiente e Kappa Global	Exatidão Global
	Solo exposto	Floresta	Cicatriz de Fogo Florestal	Total		
Solo exposto (Floresta explorada)	118	0	0	118	0,91	0,96
Floresta	7	33	0	40		
Cicatriz de Fogo Florestal	0	0	15	15		
Total	125	33	15	173		
Erro de Omissão (%)	5,6	0	0			
Erro de Comissão (%)	0	17,5	0			
Coeficiente Kappa	1	1	1			

Fonte: elaborado pelos autores.

A avaliação da classificação estrutural de padrões de degradação florestal, por sua vez, apresentou exatidão global e índice Kappa de 0,83 e 0,80, respectivamente. Na Tabela 4 são apresentados os resultados da avaliação da classificação estrutural.

Tabela 4 – Matriz de confusão da classificação estrutural dos padrões de degradação florestal.

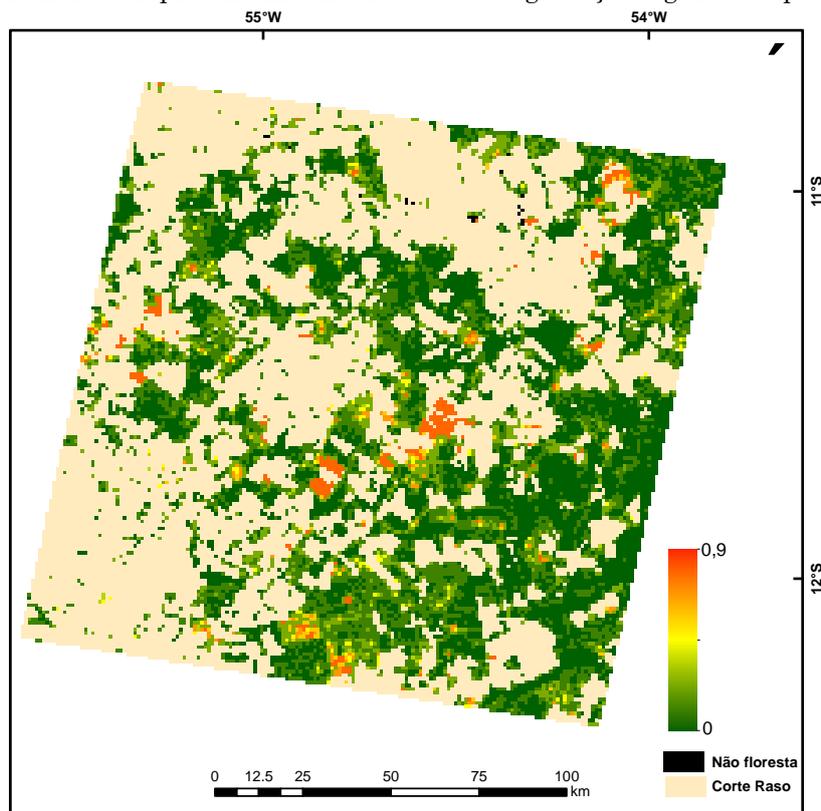
Classificação	Referência									Comissão (%)
	MFD1	MFD2	MFD3	LFD2	LFD1	HDF2	HFD1	FLORESTA	TOTAL	
MFD1	7	0	1	0	0	0	0	0	8	13
MFD2	0	6	0	1	0	3	1	0	11	45
MFD3	0	0	7	0	0	0	0	0	7	0
LFD2	0	0	0	7	0	0	0	0	7	0
LFD1	0	0	0	0	8	0	0	2	10	20
HDF2	0	2	0	0	0	5	0	0	7	29
HFD1	1	0	0	0	0	0	7	0	8	13
FLORESTA	0	0	0	0	0	0	0	6	6	0
TOTAL	8	8	8	8	8	8	8	8	64	
Omissão (%)	13	25	13	13	0	38	13	25		
Índice Kappa	0,80									
Exatidão Global	0,83									

Fonte: elaborado pelos autores

Os erros indicados pela matriz de confusão foram associados principalmente às classes MFD2 e HFD2, que representam intensidades de degradação florestal moderada e alta, respectivamente. Em um gradiente de intensidade, estas classes estão próximas, pois apresentam padrões semelhantes, sendo esta a provável explicação para a sobreposição das classes

e erros na classificação. O resultado da classificação estrutural consistiu em um gradiente espacial de intensidade de degradação florestal, estabelecido pela hierarquização dos padrões da tipologia de degradação florestal, que pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Espacialização das áreas de floresta (representada pelo valor 0), corte raso, áreas de não floresta e do gradiente de intensidade de degradação florestal gerado para o ano de 2014. Os valores numéricos representam a intensidade da degradação segundo a tipologia gerada.



Fonte: elaborado pelos autores.

Observa-se na Figura 7 o gradiente de intensidade de degradação e as classes de *corte raso*, *floresta* e *não floresta*. A classe *corte raso* ocupa principalmente a parte oeste e norte da cena enquanto a classe *floresta* (valor 0) está localizada principalmente nas porções sudeste e nordeste e apresenta pequenas áreas na região central da cena. O gradiente de degradação florestal se distribui principalmente na porção leste e central da cena. A classe de *não floresta* aparece predominantemente na porção norte.

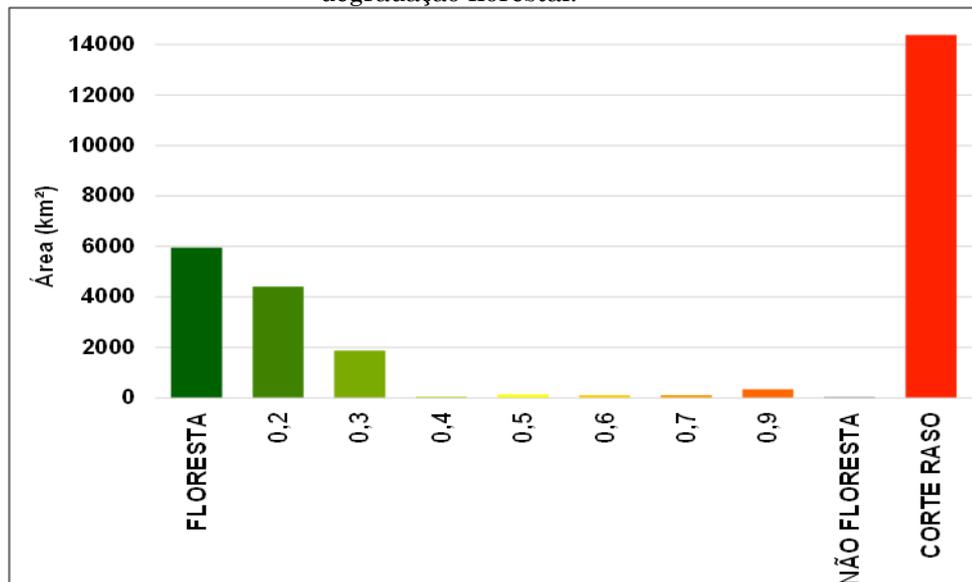
Ainda de acordo com a Figura 7, é possível notar que a classe *corte raso* cobre maior parte da área da cena. A Figura 8 expressa quantitativamente a área

ocupada por esta classe, que é de aproximadamente 14.500 km², representando 52,5% da cena, tendo como remanescente 5.950 km² (27,7%) de área de floresta.

As maiores áreas de degradação florestal foram as que apresentaram níveis mais baixos (0,2 e 0,3), com aproximadamente 4.400 e 1.800 km² (Figura 9). Isso pode indicar processos de extração seletiva de madeira de baixa intensidade realizada em áreas de plano de manejo (por meio de PMFS).

Os níveis intermediários e altos ocorreram em menor proporção, quando comparados aos menos intensos, pois as áreas de degradação florestal quando atingem níveis mais altos, tendem a ser rapidamente convertidas para corte raso. Dentre esses níveis, há destaque para a classe 0,9 (que representa cicatriz de fogo, conforme sumarizado na Tabela 2), que apresentou maior proporção de área degradada, aproximadamente 340 km² (Figura 8).

Fig. 8 - Área das classes floresta, não floresta, corte raso e de intensidade de degradação florestal.



Fonte: elaborado pelos autores.

Dados do INPE (2017) apontam que nos últimos 10 anos, o maior número de focos de calor ocorreu no ano de 2014, com 13.830 focos, o que pode justificar a ocorrência de uma maior proporção dos níveis mais altos de degradação florestal por fogo florestal. Embora tenha ocorrido um grande número de focos de calor nesse ano, a origem dos focos se dá, em geral, em áreas desmatadas que podem se propaga pela vizinhança em áreas de floresta (NEPSTAD et al., 1999; GASCON

et al., 2000; COCHRANE e LAURANCE, 2002). Essas áreas apresentam alta intensidade de degradação florestal e representam áreas com alta propensão à conversão para corte raso nos anos que se sucedem (PINHEIRO, 2015).

5 Conclusões

A metodologia empregada neste estudo se mostrou adequada para mapear e classificar a degradação florestal utilizando imagens de média resolução espacial (TM/ETM+/OLI Landsat). A utilização de imagens de sensores com resolução espacial moderada pode apresentar vantagens em relação às imagens de resolução espacial fina, pois pixels maiores podem capturar o contexto em que os elementos indicadores de degradação florestal estão inseridos. Além disso, as imagens de média resolução geralmente abrangem uma área mais ampla, apresentam menor volume de dados e com isso, um menor custo computacional é requerido no processamento. No caso da série Landsat, há ainda a vantagem da disponibilidade de uma série temporal longa, de mais de 30 anos, período de tempo adequado para analisar um ciclo completo de exploração madeireira e a dinâmica de cobertura da terra após detecção da degradação florestal inicial.

O uso de método semiautomático, baseado em técnicas de realce (índice DEGRADI) em imagens de média resolução, associadas ao MLME, possibilitou extrair os elementos indicativos de degradação florestal com exatidão similar ou superior aos estudos que utilizam métodos totalmente automáticos, mais complexos ou muito dependentes do intérprete. Esse resultado corrobora com os estudos de Shimabukuro et al. (2009, 2012 e 2014) que demonstraram a eficácia do uso de técnicas semiautomáticas no mapeamento dos elementos da degradação florestal.

Assim, a metodologia de classificação espectral proposta demonstrou resultados similares (índice Kappa e exatidão global) na separação das categorias de floresta explorada e floresta queimada, quando comparado com estudos de Shimabukuro et al. (2014) e Matricardi et al. (2010)), com a vantagem de ser mais operacional.

A metodologia de classificação estrutural, a partir da tipologia de padrões de Pinheiro (2015), possibilitou a classificação dos padrões de degradação florestal e a obtenção de um gradiente de intensidade de degradação florestal, dos quais podem ser realizadas análises do padrão de intensidade de degradação e de suas trajetórias. Com base nestes resultados, o comportamento temporal e espacial das áreas submetidas à degradação florestal pode ser compreendido e modelado.

Por fim, a metodologia apresentada demonstra grande potencial para detecção, mapeamento e avaliação da degradação florestal com procedimentos simplificados, que podem ser aplicados em séries temporais longas, adequadas ao estudo da degradação florestal. Os resultados obtidos neste trabalho são de grande importância para subsidiar trabalhos relacionados com a estimativa de emissão de carbono, bem como, para orientar políticas de controle e fiscalização da degradação florestal.

Referências

- BALCH, J. K., et al. Size, species, and fire behavior predict tree and liana mortality from experimental burns in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v 261, 2011. pp. 68–77.
- BECKER, B. K., **Geopolítica da Amazônia**: a nova fronteira de recursos. Editora Zahar. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1982. pp 53-121.
- BEUCHLE, R. et al. A satellite data set for tropical forest area change assessment. **International Journal of Remote Sensing**. N° 32, 2011. pp 7009-7031.
- BRUZZONE, L.; BOVOLO, F. Unsupervised change detection in multi-temporal SAR images. In: C.H, C. (Ed.). **Image processing for remote sensing**. Londres: Taylor and Francis, 2008. p. 380.
- CARRÃO, H. Os efeitos da escala na caracterização da paisagem: modelação e avaliação das transformações na representação da ocupação de solo. Trabalho Fim de Curso, Universidade de Évora, Évora, 2002.
- CHAVEZ, J. P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**. New York, v.24, 1988. pp. 459-479.

- COCHRANE, M., LAURANCE, W. F. Fire as a large-scale edge effect in Amazonia forests. **Journal of Tropical Ecology**, v. 18, 2002 pp. 311-325.
- COPPIN, P. R., BAUER, M. E. The potential contribution of pixel-based canopy change information to stand-based forest management in the northern U.S. **Journal of Environmental Management**. v. 44, 1995. pp. 69–82.
- GASCON, C., et. al Receding forest edges and vanishing reserves. **Science**, v. 288 2000, pp. 1356-1358.
- GRAÇA et al., 2015. Multi-temporal analysis of radiometric changes in satellite images of forest edges to infer selective-logging areas in the Amazon forest. **Acta Amazonica**, v. 45, 2015. pp. 35-44.
- HUDSON, W.d.; RAMM, C. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, [s.l.], v. 53, n. 4, 1987. pp.421-422.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Geociências, Produtos**. Site: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm>. Acessado em fevereiro de 2017.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Geociências. Site: <[http:// http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm](http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm) >. Acessado em junho 2017.
- 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, 2008. Site: <http://www.obt.inpe.br/prodes/Relatorio_Prodes2008.pdf>. Acessado em junho de 2017.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Programa de Queimadas. Banco de dados de queimadas. Site: < <https://prodwww-queimadas.dgi.inpe.br/bdqueimadas>> . Acessado em julho de 2017.
- JOHNS, J. S., et al. Logging damage during planned and unplanned logging operations in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 89, n. 1-3, 1996. pp.59-77.

- KÖRTING, T. S. et al. GeoDMA: A Novel System for Spatial Data Mining. In: **International Conference on Data Mining Workshops**, 2008, Pisa. Proceedings... . pp. 975 - 978.
- LUND, H. G. What is a degraded forest? Gainesville: Forest Information Services, 2009, p. 42. White paper prepared for FAO. Site: <http://home.comcast.net/~gyde/2009forest_degrade.doc>. Acessado em março de 2017.
- MATRICARDI, E. A. T., et al. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, [s.l.], v. 114, n. 5, 2010. pp. 1117-1129.
- MATRICARDI, E. A. T., et al. Monitoring Selective Logging in Tropical Evergreen Forests Using Landsat: Multitemporal Regional Analyses in Mato Grosso, Brazil. **Earth Interactions**, v. 9, n. 24, 2005. pp.1-24.
- MATRICARDI, E. A. T., et al. Multitemporal assessment of selective logging in the Brazilian Amazon using Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, [s.l.], v. 28, n. 1, 2007. pp.63-82.
- MONTEIRO, A. L. et al. Detection of logging in Amazonian transition forests using spectral mixture models. **International Journal of Remote Sensing**, [s.l.], v. 24, n. 1, 2003. pp.151-159.
- NEPSTAD, D. MOREIRA, A. G. ALENCAR, A. A. A Floresta em Chamas: origens, impactos e prevenção do fogo na Amazônia. 2ª ed. Brasília: Ipam, 1999. 202 p.
- NEPSTAD, D., et al. A Floresta em Chamas: origens, impactos e prevenção do fogo na Amazônia. 2. ed. Brasília: Ipam, 1999. 202 p.
- PANDOLFO, C. Amazônia Brasileira: ocupação, Desenvolvimento e Perspectivas Atuais e Futuras. Editora CEJUP, 1994. pp. 15-35.
- PINHEIRO, T. F. et al. Forest degradation associated with logging frontier expansion in the Amazon: The BR-163 region in southwestern Pará, Brazil. **Earth Interactions**, v. 20, paper n. 17, 2016.
- PINHEIRO, T. F. **Padrões e Trajetórias de Degradação Florestal em Fronteiras Madeiras da Amazônia**, Tese de Doutorado do Curso de Ciências da Terra (CST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, 2015.
- QUINLAN, J. R. C4.5: programs for machine learning. Sydney: Morgan Kaufmann Publishers, 1993. 299p.

- RAVACHE, L. R. Migração e Modernização em Cidades Médias da Amazônia Legal: Áreas de Abrangência da BR 163. Tese de Doutorado. USP, São Paulo, 2013.
- SÁ, T. D. A. et al. Queimar ou não queimar?: De como produzir na Amazônia sem queimar. *Revista USP*, [s.l.], v. 0, n. 72, 2007. pp.90-97.
- SABOGAL, C. et al. Diretrizes Técnicas para a Exploração de Impacto Reduzido em Operações Florestais de Terra Firme na Amazônia Brasileira. Belém: Cifor, 2000, p. 24.
- SHIMABUKURO, Y. E. et al. Assessment of forest degradation in Brazilian Amazon due to selective logging and fires using time series of fraction images derived from Landsat ETM+ images. **Remote Sense Letters**, v. 5, n. 9, 2014. pp. 773-782.
- SHIMABUKURO, Y. E., et al. Fraction Images Derived from Terra MODIS Data for Mapping Burnt Areas in Brazilian Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, 2009. pp. 1537–1546.
- SHIMABUKURO, Y. E., et al. The Brazilian Amazon Monitoring Program: PRODES and DETER Projects. In **Global Forest Monitoring from Earth Observation**, edited by F. Achard, and M. C. Hansen, 2012. pp. 153–169.
- SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing**, [s.l.], v. 29, n. 1, 1991. pp.16-20.
- STONE, T. A., & LEFEBVRE, P. Using multi-temporal satellite data to evaluate selective logging in Para, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 13, 1998. pp. 2517–2526.
- TEIXEIRA, L. **A Colonização No Norte De Mato Grosso: O Exemplo Da Gleba Celeste**. Dissertação de Mestrado. Unesp, Presidente Prudente, 2006.
- UHL, C., & VIEIRA, I. C. G. Ecological impacts of selective logging in the Brazilian Amazon: a case study from the Paragominas region of the state of Pará. **Biotropica**, v.21, n. 2, 1989. pp. 98–106.
- UHL, C., et al. Natural resource management in the Brazilian Amazon. **BioScience**, v. 47, n. 3, 1997. pp. 160–168.
- VASCONCELOS, S. S. et al. Forest fires in southwestern Brazilian Amazonia: Estimates of area and potential carbon emissions. *Forest Ecology and Management*, [s.l.], v. 291, 2013. pp.199-208.