



**Análise Qualitativa do Desmatamento na Floresta
Amazônica a partir de Sensores SAR, Óptico e Termal**
Qualitative Analysis of Deforestation in the
Amazonian Rainforest from SAR, Optical and Thermal Sensors

Claudia Arantes Silva¹; Giancarlo Santilli²; Edson Eyji Sano³ & Suzan Waleska Pequeno Rodrigues¹

¹Universidade de Brasília (UnB), Instituto de Geociências,
Departamento de Geologia Geral, Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70.910-900, Brasília, DF, Brasil

²Universidade de Brasília (UnB), Faculdade do Gama, Engenharia Aeroespacial,
St. Leste Projeção A, Gama Leste, 72.444-240, Brasília, DF, Brasil

³Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA),
SCEN LA Norte, 70818-900, Brasília, DF, Brasil

E-mails: arantes.claudia16@gmail.com; santilli@aerospace.unb.br; edson.sano@ibama.gov.br; suzanpequeno@unb.br

Recebido em: 17/04/2019 Aprovado em: 11/06/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_4_1_18_29

Resumo

A mitigação de mudanças climáticas e preservação de ecossistemas depende da redução do desmatamento e degradação de florestas tropicais. O objetivo deste estudo foi analisar imagens de radar, ópticas e termais para identificar desmatamentos por corte raso no período de 2016 a 2018 em uma área localizada no arco de desmatamento da Amazônia. Foram utilizadas imagens de radar em bandas X (satélite COSMO-SkyMed) e C (satélite SENTINEL-1A), índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índices de umidade por diferença normalizada (NDMI) e temperaturas da superfície terrestre (LST) (satélite Landsat-8). As áreas com evidências de antropismo mapeadas com base nas imagens do satélite COSMO-SkyMed no município de Novo Progresso (PA), período de 2016 a 2018, foram utilizadas como máscara inicial. Imagens de radar identificaram, com boa precisão relativa, as épocas e as áreas de desmatamento. NDVI e NDMI evidenciaram, respectivamente, quedas nas atividades fotossintéticas e nos níveis de biomassa nas áreas de desmatamento identificadas. Já a LST foi mais elevada nas áreas de rebrota em relação à vegetação densa. A análise do potencial de imagens de radar, ópticos e termais mostrou elevada relevância na detecção de desmatamento por corte raso em ambiente florestal úmido.

Palavras-chave: Floresta tropical; Degradação; Análise temporal

Abstract

The mitigation of climate change and the preservation of ecosystems depends on the reduction of deforestation and degradation of tropical forests. The objective of this study is to analyze radar, optical, and thermal images to identify clear cut deforestation from 2016 to 2018 in an area located in the arch of deforestation of the Amazon forest. We used X- (COSMO-SkyMed satellite) and C-bands (SENTINEL-1A satellite) radar data, normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference moisture index (NDMI), and land surface temperature (LST) (Landsat-8 satellite). We considered, as an initial mask, the areas with evidence of anthropogenic actions in the municipality of Novo Progresso (PA), from 2016 to 2018. Radar features were able to be identified, with relative accuracy, the time and the area of deforestation. NDVI and NDMI indices showed, respectively, decrease in the photosynthetic activities and the biomass levels in deforested areas. On the other hand, the LST was higher in regrowth areas than in dense vegetation. The analysis of potential of radar, optical, and thermal data showed to be relevant in the identification of clear cut deforestation in tropical rainforest environment.

Keywords: Tropical forest; Degradation; Temporal analysis



1 Introdução

As ações para reduzir o desmatamento e a degradação das florestas estão diretamente relacionadas aos esforços globais para preservar os ecossistemas únicos de nosso planeta e mitigar as mudanças climáticas (Aragão *et al.*, 2014). Para mitigação e adaptação decorrente de mudanças climáticas e estimativas do ciclo do carbono, é fundamental um monitoramento integrado para obter um entendimento mais assertivo da dinâmica dos processos na floresta. A floresta tropical da Amazônia possui uma extensão territorial de 5,5 milhões de km². O desmatamento da floresta Amazônica por ações antropogênicas ocorre principalmente por meio de corte seletivo e corte raso. O corte seletivo é a retirada de espécies de árvores com valor econômico elevado. No processo de extração, ocorre a derrubada de árvores vizinhas que se encontram na trajetória de queda da árvore derrubada. Esse processo é realizado principalmente por madeireiros e antecede o corte raso, que corresponde à retirada completa da vegetação. Nas práticas de manejo da terra, realizadas principalmente por pecuaristas e fazendeiros, clareiras são abertas, a floresta então é derrubada e queimada (Morton *et*

al., 2006; Matricardi *et al.*, 2010; Domingues & Bermann, 2012; Souza *et al.*, 2017).

A dinâmica do desmatamento nas florestas tropicais se inicia pelas bordas florestais (Nepstad *et al.*, 1999, 2001; Cochrane, 2003) (Figura 1). As aberturas de caminhos e estradas dentro da floresta permitem o acesso de colonos em áreas antes inacessíveis, fragmentam a floresta, a umidade diminui e o microclima local é alterado e a floresta torna-se mais vulnerável ao fogo. Os incêndios florestais e as emissões de fumaças acarretam diminuição das chuvas; as áreas previamente queimadas são mais propensas às reincidências. A resiliência do ecossistema diminui, tornando a floresta mais susceptível a incêndios e outros danos. O aumento no nível de degradação da floresta e mudanças no estoque de carbono foram reportados por diversos autores como Arima *et al.* (2005), Soares-Filho *et al.* (2006), Broadbent *et al.* (2008), Butt *et al.* (2011), Knox *et al.* (2011), Davidson *et al.* (2012), Barros & Fearnside (2016) e Jusys (2016). Durante o manejo da terra, incêndios podem penetrar em florestas degradadas ou intactas na forma de fogo de superfície (Guenther *et al.*, 2017), cujos danos são mais difíceis de serem documentados (Asner *et al.*, 2005).



Figura 1
Dinâmica de desmatamento e degradação da floresta Amazônica (modificado de Cochrane 2003).

O monitoramento de desmatamento baseado em satélites é uma ferramenta essencial nos estudos de efeitos antropogênicos em florestas tropicais, pois permite a identificação das diferentes formas de exploração das florestas e manejo da terra em grandes extensões territoriais, com tempo de revisita adequado e um custo razoável (Hosonuma *et al.*, 2012; Hansen *et al.*, 2013; Thompson *et al.*, 2013; Aragão *et al.*, 2014; Bustamante *et al.*, 2016; Mitchell *et al.*, 2017). Historicamente, técnicas de sensoriamento remoto têm desempenhado um papel fundamental no monitoramento da cobertura vegetal dos biomas brasileiros, conforme relatado por Ferreira *et al.* (2008), Souza *et al.* (2013) e Carreiras *et al.* (2017). Porém, durante os meses de chuva, a cobertura persistente de nuvens cria uma forte limitação para o uso de sensores ópticos. É durante o período chuvoso que ocorre a intensificação de cortes raso e seletivo de árvores na Amazônia. Nos meses de seca, a baixa umidade relativa do ar favorece a queima de árvores derrubadas e posterior transformação em áreas de pastagens. Apesar da limitação do emprego de sensores ópticos pela presença de nuvens, os mesmos ainda são amplamente utilizados no monitoramento da floresta Amazônica (INPE, 2013; Shimabukuro *et al.*, 2015; Grecchi *et al.*, 2017).

Os sensores de radar de abertura sintética (SAR) praticamente não sofrem interferência atmosférica, pois conseguem atravessar as nuvens e, portanto, permitem a aquisição de dados independentemente da estação climática, permitindo o monitoramento contínuo do desmatamento, focos de incêndios e rebrota (Bernhard *et al.*, 2011; Reiche *et al.*, 2015; Martone *et al.*, 2018). Dados SAR permitem, por meio da análise de retroespalhamento volumétrico da vegetação, a produção de informações sobre cobertura vegetal, copa, galhos e troncos (Henderson & Lewis, 1998; Aboud Neta *et al.*, 2010; Ernhard *et al.*, 2011; Lardeux *et al.*, 2011; Capodici *et al.*, 2013; Lei *et al.*, 2018).

O objetivo dessa pesquisa é apresentar uma análise qualitativa de imagens SAR nas bandas X e C, ópticas e termal para identificar desmatamento por corte raso em uma área localizada no arco de desmatamento na floresta Amazônica. A metodologia testada acrescenta informações sobre como os diferentes comprimentos de onda em que os sensores de radar operam respondem ao desmatamento em um ambiente de floresta tropical úmido. Espera-se que esse estudo possa acrescentar informações

que auxiliem em metodologias futuras de controle de desmatamento em larga escala.

2 Métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo localiza-se na região sudeste da Amazônia Legal, a norte do município de Novo Progresso, estado do Pará (PA) (Figura 2). A porção leste da área é cortada pela rodovia BR-163. A maioria dos desmatamentos na região são convertidos em áreas de pastagem e em áreas de cultivo agrícola. O clima é marcado por um período úmido e um período seco mais prolongado (Figura 3).

2.2 Dados de Sensoriamento Remoto

Para esse estudo, foram utilizadas imagens de radar em banda X do satélite COSMO-SkyMed, banda C do satélite Sentinel-1A, imagens ópticas e termais do satélite Landsat-8, sensor *Operational Land Imager* (OLI) nas bandas 4 (vermelho, 0,64 – 0,67 μm), 5 (infravermelho próximo, 0,85 – 0,88 μm) e 6 (infravermelho de ondas curtas, 1,57 – 1,65 μm) e sensor *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) na banda 10 (infravermelho termal, 10,6 – 11,19 μm) do período de 2016 a 2018. Imagens ópticas de 2015 foram utilizadas para realçar a presença de floresta intacta (antes dos desmatamentos ocorridos a partir de 2016).

O sistema italiano COSMO-SkyMed consiste em uma constelação de quatro satélites de médio porte, de baixa órbita terrestre e no mesmo plano orbital, cada um equipado com um sensor em banda X (Covello *et al.*, 2010). As imagens do COSMO-SkyMed foram adquiridas pelo Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (Censipam) no período de 2016 a 2018 e no modo de imageamento *StripMap*, *HighImage*, faixa de imageamento de 40 km e polarização HH. Foram selecionadas imagens de abril de cada ano (Tabela 1).

As imagens do Sentinel-1A são obtidas pela Agência Espacial Europeia (ESA), composta por uma constelação de dois satélites A e B que compartilham o mesmo plano orbital (Torres *et al.*, 2012). As imagens são de acesso livre e foram selecionadas de acordo com as datas próximas às imagens do COSMO-SkyMed. Na área de estudo, haviam dis-

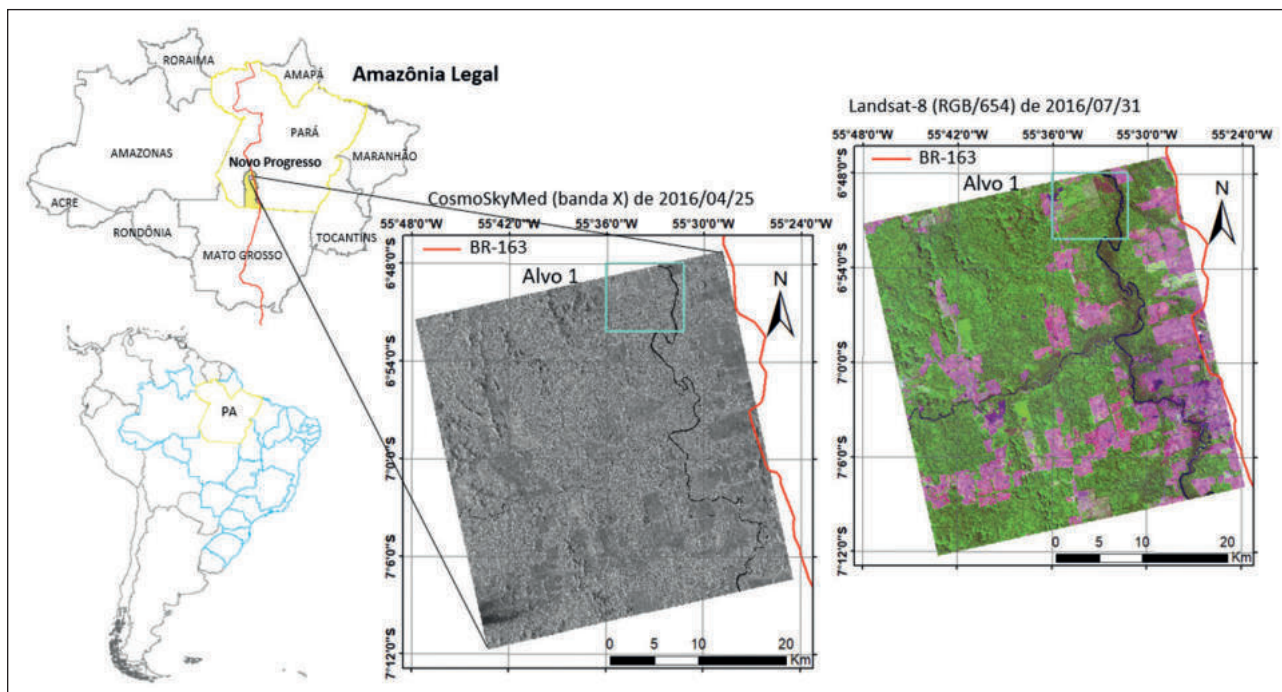


Figura 2 Mapa de localização da área de estudo em imagens dos satélites COSMO-SkyMed e Landsat-8 de 2016. Alvo 1 corresponde a um maior detalhamento da imagem apresentado nas Figuras 5 e 6.

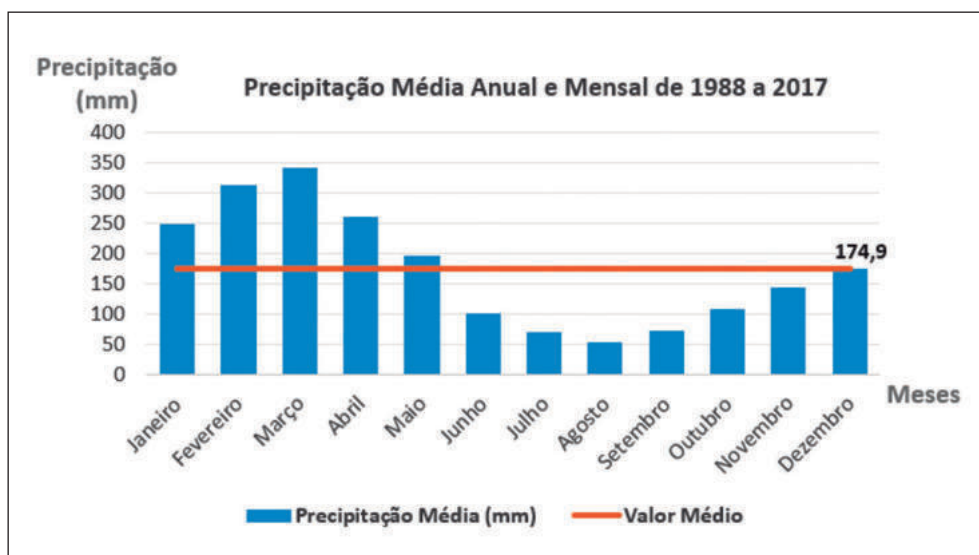


Figura 3 Precipitação média anual e mensal da série temporal de 1988 a 2017 da região de Novo Progresso (retirado de INMET, 2019).

Tabela 1 Datas de aquisição das imagens utilizadas: COSMO-SkyMed (banda X), Sentinel-1 (banda C) e Landsat-8 (bandas: vermelho, infravermelho próximo, infravermelho de ondas curtas e infravermelho termal).

Ano	Satélite		
	COSMO-SkyMed	Sentinel-1A	Landsat-8
2015	-	-	14 de agosto
2016	25 de abril	19 de janeiro	31 de julho
2017	07 de abril	19 de abril	03 de agosto
2018	08 de abril	08 de maio	05 de julho

poníveis imagens no modo de aquisição *Interferometric Wide* (IW), faixa de imageamento de 250 km e polarizações VV e VH.

As imagens ópticas foram obtidas pelo satélite norte-americano Landsat-8 que opera com dois sensores denominados de OLI e TIRS (Barsi *et al.*, 2014; Knight & Kvaran, 2014). Os dois sensores proporcionam imagens coincidentes da superfície terrestre, porém, em diferentes regiões espectrais. Foram selecionadas imagens ópticas da cena 227/65 dos sensores OLI e TIRS, com presença mínima de cobertura de nuvens. Todos os dados foram projetados para o sistema de coordenadas geográficas, *datum* WGS84.

2.3 Processamento das Imagens

A Figura 4 apresenta a metodologia de processamento aplicada para as imagens SAR, ópticas e termal. As imagens SAR (bandas X e C) foram utilizadas a partir do nível de processamento *Single Look Complex* (SLC). As imagens do COSMO-SkyMed seguiram o procedimento padrão de processamento sugerido pela Agência Espacial Italiana por meio do

programa *SARscape* (ISA, 2009). A análise multi-temporal (*change detection*) foram aplicadas para detectar as mudanças ocorridas entre as imagens no período de 2016 a 2018. A técnica de detecção de mudança multi-temporal (Lu *et al.*, 2004) faz uma análise de imagens na mesma posição geográfica em diferentes datas para identificar quaisquer mudanças ocorridas entre as duas datas. Foram calculados os seguintes parâmetros estatísticos: covariância, gradiente, valor mínimo, valor máximo, média, mediana e desvio-padrão para investigar as alterações de retroespalhamento de múltiplas imagens ao longo do tempo.

As imagens SAR do Sentinel-1A foram processadas utilizando o *software SNAP* da ESA. Depois de processados, esses dados foram analisados por meio de divisão de bandas e combinação das diferentes polarizações. Os valores digitais das imagens do Landsat-8 foram convertidos para reflectância na superfície terrestre, aplicando-se a técnica de remoção de nuvens por meio do *plug-in RS & GIS*, disponível no programa QGIS. Posteriormente, foram calculados o NDVI, o NDMI e a LST por meio das seguintes equações:

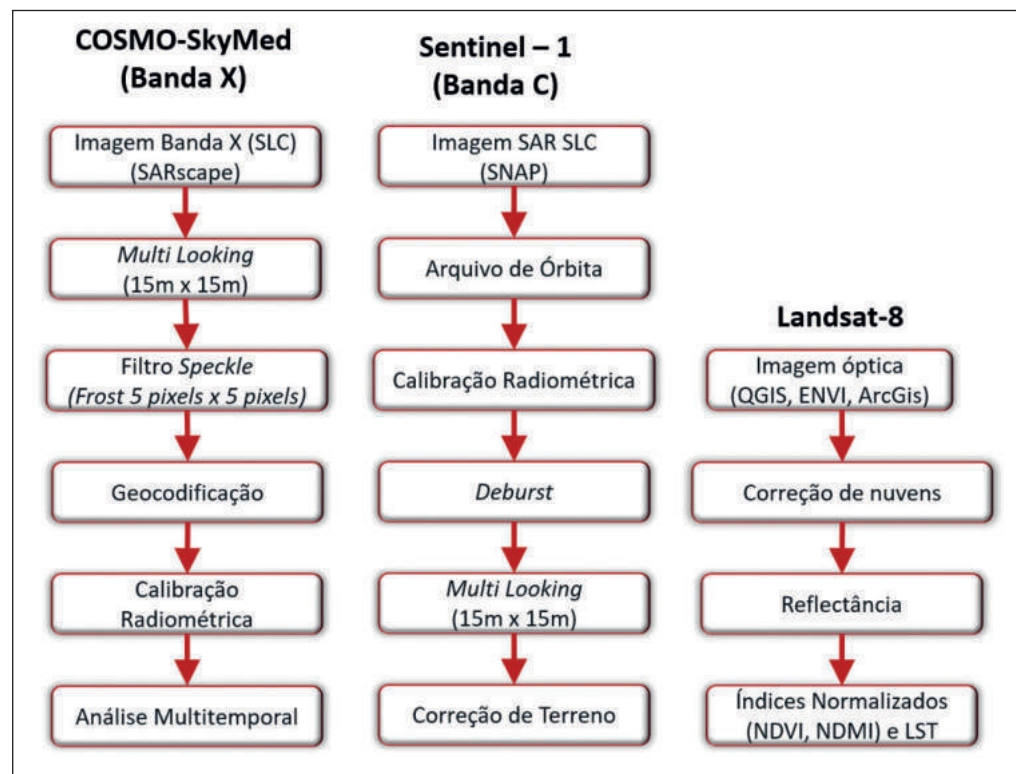


Figura 4 Fluxo de processamento digital das imagens SAR (bandas X e C), ópticas e termal.

$$NDVI = \frac{Red - NIR}{Red + NIR} \quad (1)$$

$$NDMI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (2)$$

$$LST = \frac{k_1}{\ln\left(\frac{k_2}{L_i+1}\right)} \quad (3)$$

onde Red, NIR e SWIR correspondem às reflectâncias nas faixas espectrais do vermelho, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, respectivamente; k_1 e k_2 correspondem a constantes de conversão das bandas termais; e L_i refere-se à radiância no topo da atmosfera.

2.4 Dados de Referência

Foram utilizados, como dados de referência de áreas desmatadas, as composições coloridas de imagens ópticas entre 2015 e 2018; os polígonos de desmatamento do sistema de detecção de indicativos de desmatamento em tempo quase real (DETER-B) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para os anos de 2017 e 2018; e os polígonos de desmatamento (T0) mapeados pelo Censipam em 2016. As composições coloridas RGB das imagens ópticas foram formadas com as bandas espectrais 6 (SWIR), 5 (NIR) e 4 (RED), respectivamente.

O INPE, por meio do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia por Satélites (PRODES), tem calculado as taxas anuais de desmatamento por corte raso em áreas maiores que 6,25 hectares na Amazônia Legal brasileira (INPE, 2013). O sistema faz uso de dados ópticos de resolução espacial moderada provenientes principalmente dos satélites Landsat (30 m de resolução espacial e revisita de 16 dias) e CBERS (20 metros de resolução espacial e revisita de 26 dias). Esse monitoramento é possível de ser realizado apenas de seis a oito meses no ano, correspondente ao período seco, o que é insuficiente para ações de prevenção, fiscalização e controle do desmatamento em curto prazo (Escada *et al.*, 2010).

Com o objetivo de apoiar a vigilância e o controle do desmatamento, o INPE vem desenvolvendo sistemas complementares de monitoramento.

Esse é o caso do DETER-B, baseado em imagens do sensor *Wide Field Imager* (WFI) a bordo do satélite CBERS-4 (resolução espacial de 64 m) e principalmente em imagens do *Advanced Wide Field Sensor* (AWIFS) do satélite indiano Resourcesat-1, com resolução espacial de 56 m e resolução temporal de 5 dias (Diniz *et al.*, 2015). O DETER-B demonstrou ser capaz de indicar alterações florestais em diferentes estágios de degradação, contribuindo para o combate de desmatamento no arco de desflorestamento localizado na Amazônia Legal.

Durante o período de chuvas, em que o monitoramento por meio de satélites ópticos do INPE fica prejudicado, o Censipam colabora com os órgãos federais de fiscalização (IBAMA e ICMBio). Com base nos dados do PRODES, o IBAMA define os *hotspots* de desmatamento para que o Censipam, por meio de imagens radar, possa mapear os polígonos menores, mais difíceis de serem identificados por sensores de resolução moderada, gerando alertas de desmatamento na Amazônia em tempo próximo ao real. O Censipam faz uso de imagens em banda X do satélite italiano COSMO-SkyMed e mapeia as áreas desmatadas, com resolução espacial de 3 a 6 m, chamada base T0. Desde 2016, a área monitorada tem sido de 300.000 km² mensais, no período compreendido entre outubro a abril nos estados da Amazônia.

3 Resultados

Foi realizada uma análise temporal calculando-se, sobre pares de imagens, a covariância, o gradiente, o valor mínimo, o valor máximo e o desvio-padrão para três períodos: 2016 a 2017; 2017 a 2018; e 2016 a 2018. Os resultados são apresentados em composições coloridas RGB que melhor evidenciaram os limites das áreas de desmatamento e os períodos aproximados de ocorrência. A Figura 5 apresenta as combinações temporais RGB das imagens do COSMO-SkyMed dos parâmetros calculados na análise temporal. Em todas as composições coloridas, no canal vermelho (R) foram inseridas as imagens do período de 2016 a 2017, no canal verde (G), as imagens de 2016 a 2018 e no canal azul (B), as imagens de 2017 a 2018. Imagens do Landsat-8 foram selecionadas durante os períodos secos dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018 para comparação e validação visual das mudanças ocorridas na área.

Nas imagens de covariância (A) e gradiente (B), as áreas desmatadas durante o período de 2016 a 2017 foram evidenciadas pela coloração amarela. As colorações em ciano e magenta mostram mudanças ocorridas entre 2017 e 2018. Porções da área de coloração escura a preta mostram áreas desmatadas mais antigas. A imagem de valores máximos (C) não se mostrou adequada para definir as áreas de desmatamento. A imagem de valores mínimos (D) apresentou uma textura mais lisa das áreas desmatadas mais antigas. Dos parâmetros temporais calculados, o gradiente (B) e o valor mínimo (D) mostraram-se mais eficientes em diferenciar as áreas que sofreram alteração e as áreas de desmatamento mais antigas. A combinação de desvio-padrão não foi mostrada na figura por apresentar as mesmas características do gradiente (B).

Uma segunda avaliação foi realizada para o período total de 2016 a 2018, combinando-se os melhores resultados da análise dos parâmetros temporais calculados (covariância, gradiente e valor mínimo), imagens de retroespalhamento (σ^0 , unidade em dB) e diferenças de bandas (Figura 6). Na imagem cov-min-grad (A) (composição RGB: R = covariância;

G = valor mínimo; e B = gradiente), as áreas que sofreram alteração entre 2016 e 2018 foram evidenciadas pela cor magenta e as áreas desmatadas mais antigas apresentaram-se com padrão verde escuro. Na imagem dif-min-grad (B) (composição RGB: R = diferença de σ^0 de 2016- σ^0 de 2018; G = valor mínimo; e B = gradiente), o padrão azulado permitiu definir melhor os limites das áreas que sofreram alteração, quando comparada com a imagem cov-min-grad (A). As áreas desmatadas mais antigas puderam ser observadas na cor marrom. Na imagem dif- σ^0_{16} - σ^0_{18} (C) (composição RGB: R = diferença entre σ^0 de 2016 e σ^0 de 2018; G = σ^0 de 2016; e B = σ^0 de 2018), as áreas em coloração verde claro corresponderam às áreas alteradas em 2016. Porções em verde escuro mostraram áreas desmatadas mais antigas e, nas porções mais azuladas, áreas que foram desmatadas em 2018. Na imagem σ^0_{16} - σ^0_{17} - σ^0_{18} (D) (composição RGB: R = σ^0 de 2016; G = σ^0 de 2017; e B = σ^0 de 2018), a coloração RGB correlacionou-se com os períodos aproximados de desmatamento. Tons amarelos evidenciaram os desmatamentos ocorridos entre 2016 e 2017, tons azulados, os desmatamentos mais recentes (ocorridos entre 2017 e 2018) e os tons mais escuros, as áreas desmatadas

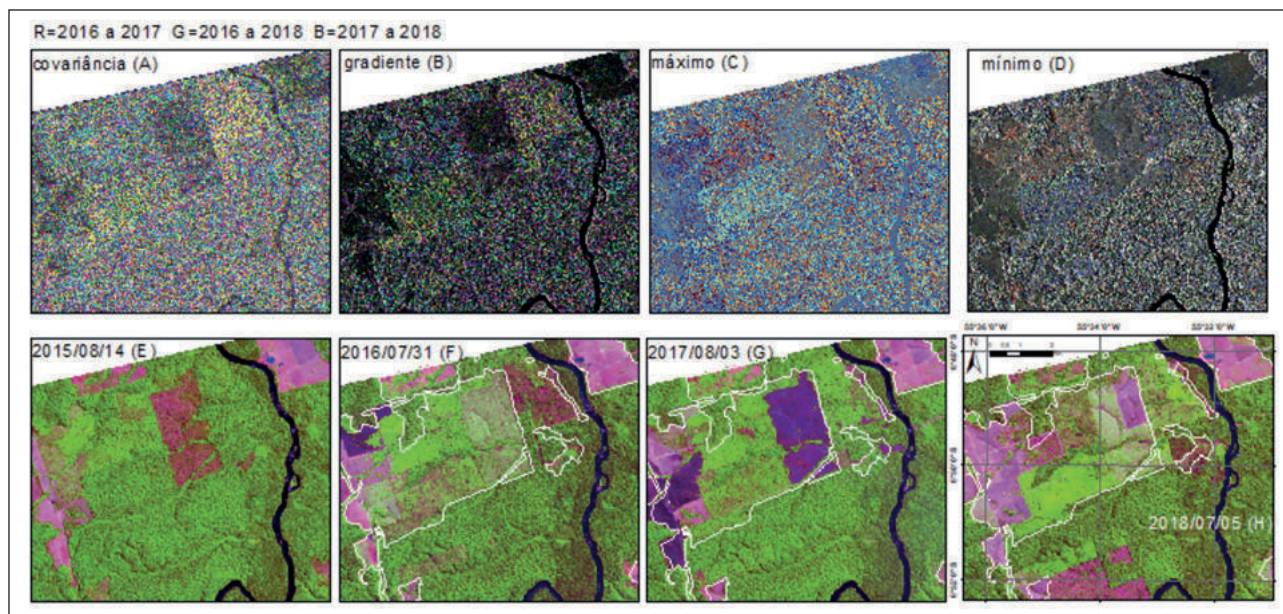


Figura 5 Composições coloridas RGB bitemporais (R = 2016 a 2017; G = 2016 a 2018; e B = 2017 a 2018) derivados dos parâmetros covariância (A), gradiente (B), valor máximo (C) e valor mínimo (D) do satélite COSMO-SkyMed. Na parte inferior da figura, são mostradas as composições coloridas RGB/654 do satélite Landsat-8 obtidas em 2015/08/14 (E), 2016/07/31 (F) (com polígonos de desmatamento T0), 2017/08/03 (G) (com polígonos de desmatamento T0 e DETER-B de 2017) e 2018/07/05 (H) (com polígonos de desmatamento T0 e DETER-B de 2018).

já bem consolidadas. Todas as composições RGB das imagens do COSMO-SkyMed apresentaram bons resultados para detecção e discriminação das áreas desmatadas.

Na parte inferior da Figura 6, a primeira imagem à esquerda (I) é composta por imagens do satélite Sentinel-1A (composição RGB: R = σ^0_{VH} de 2016; G = σ^0_{VH} de 2017; e B = σ^0_{VH} de 2018). As áreas que sofreram alteração apresentaram tons amarelos e verdes e áreas desmatadas bem consolidadas em coloração marrom, porém, os limites dessas áreas ficaram pouco definidos. Nas imagens de retroespalhamento dos anos de 2016 (J), 2017 (K) e 2018 (L) (composição RGB: R = σ^0_{VV} ; G = σ^0_{VH} ; e B = diferença VV-VH), não foi possível diferenciar

novas áreas de desmatamento. Os tons escuros nas imagens corresponderam às áreas de desmatamentos bem estabelecidos.

A expansão do desmatamento no arco de desflorestamento da Amazônia ocorre seguindo uma dinâmica de corte seletivo e derrubada da floresta, implantação da pecuária e transformação posterior da área em agricultura mecanizada (Domingues & Bermann, 2012). Com o objetivo de observar o comportamento da vegetação, umidade e temperatura nas áreas de desmatamento, foram calculados os índices NDVI e NDMI e a temperatura superficial terrestre a partir das imagens ópticas. O índice NDVI é aplicado para identificar a presença de vegetação e visualizar o seu nível de vigor (Ponzoni *et al.*, 2015). O

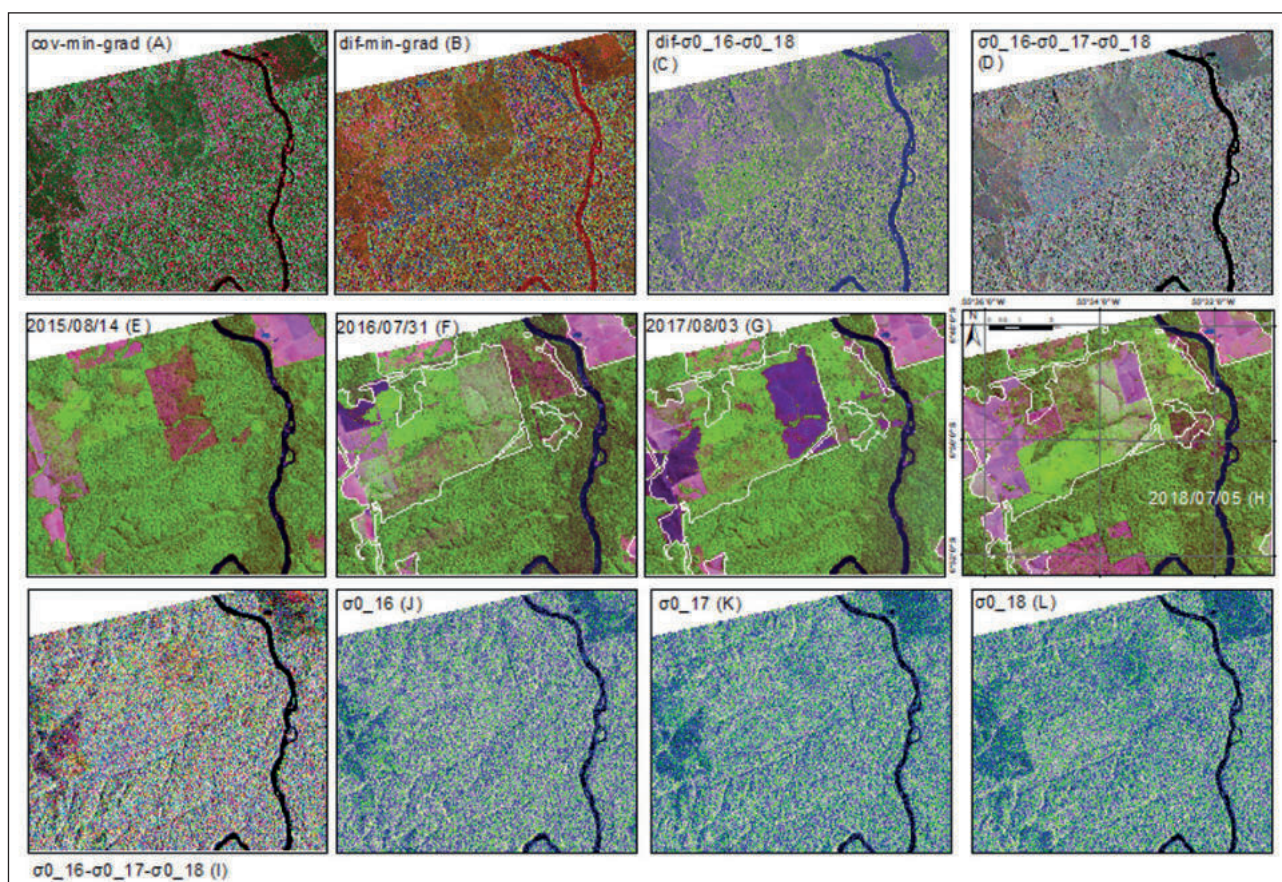


Figura 6 Imagens do COSMO-SkyMed: covariância-mínimo-gradiente (A), diferença σ^0 (2016-2018)-mínimo-gradiente (B), diferença σ^0 (2016-2018)- σ^0_{2016} - σ^0_{2018} (C) e σ^0_{2016} - σ^0_{2017} - σ^0_{2018} (D). Composições coloridas RGB/654 do satélite Landsat-8 obtidas em 2015/08/14 (E), 2016/07/31 (F) (com polígonos de desmatamento T0), 2017/08/03 (G) (com polígonos de desmatamento T0 e DETER-B de 2017) e 2018/07/05 (H) (com polígonos de desmatamento T0 e DETER-B de 2018). Imagens do Sentinel-1A: σ^0_{2016} - σ^0_{2017} - σ^0_{2018} (I) (composição RGB: R = σ^0_{VH} de 2016; G = σ^0_{VH} de 2017; e B = σ^0_{VH} de 2018); σ^0_{16} (J) (composição R = σ^0_{VV} ; G = σ^0_{VH} ; e B = diferença VV-VH) para os anos de 2016-01-19, 2017-04-19 (K) e 2018-05-08 (L).

índice NDMI é aplicado com o objetivo de observar a diferença de umidade nas áreas desmatadas e nas áreas de floresta. Esse último também pode auxiliar na identificação da presença de vegetação (Wilson & Sader, 2002).

Após o cálculo do NDVI, foi realizada uma classificação no programa ENVI. Foi utilizada a ferramenta SPEAR, que faz uma delimitação da vegetação para permitir identificar a presença de vegetação e visualizar seu nível de vigor. O NDVI gera uma imagem com valores que variam de -1 a +1. Os pixels sem vegetação tendem a -1 enquanto os pixels com vegetação vigorosa tendem a 1. Os valores NDVI foram divididos em quatro classes: áreas não vegetadas (entre -1 a 0,50), vegetação esparsa (acima de 0,50 e abaixo de 0,62), vegetação moderada (acima de 0,62 e abaixo de 0,68) e vegetação densa (entre 0,68 a 1). Os valores foram ajustados visualmente de modo que representassem bem as quatro classes. Para o ano de 2015, os limiares booleanos mínimo e máximo foram de -0,57 e 0,84; em 2016, mínimo de -0,41 e máximo de 0,84; em 2017, mínimo de -0,94 e máximo de 0,86; e em 2018, mínimo de -0,98 e máximo de 0,87. A Figura 7 mostra, em detalhe, para as datas de 2015/08/14, 2016/07/31, 2017/08/03 e 2018/07/05, a classificação do NDVI [(A) a (D)]; imagens RGB-654 usadas como referência [(E) a (H)]; imagens do índice de umidade NDMI [(I) a (L)]; e imagens de temperatura superficial terrestre [(M) a (P)]. Os valores de NDVI variam de -1 a +1, onde os valores mais elevados correspondem a áreas de vegetação fotossinteticamente mais ativas e os valores inferiores representam áreas com baixa vegetação. O NDVI individualizou bem as áreas sem vegetação e vegetação esparsa, porém, as áreas de rebrota e vegetação densa apresentaram o mesmo nível de vigor.

O NDMI também possui valores que variam de -1 a +1, onde os valores mais elevados correspondem às áreas mais úmidas (com presença de vegetação) e os valores menores, às áreas de baixa umidade ou pouca vegetação. Observou-se uma queda da umidade nas áreas desmatadas ou de pouca vegetação. Porém, áreas de rebrota e áreas de vegetação densa apresentaram valores similares e impossibilitaram a individualização dessas

duas classes. A LST foi calculada para observar o comportamento da temperatura nas áreas desmatadas e nas áreas de floresta. Os mapas de temperatura mostraram coerência relativamente alta com os índices de umidade. As regiões com mais alta temperatura apresentaram baixa umidade. Entretanto, as temperaturas nas áreas de rebrota foram levemente mais elevadas que as áreas de floresta densa, permitindo diferenciar visualmente essas duas classes. As áreas de solo exposto alcançaram valores de temperatura de superfície acima de 50 °C.

4 Conclusões

Os dados SAR, em banda X, forneceram informações importantes sobre os atributos temporais e combinações RGB que melhor evidenciaram as áreas de desmatamentos na região. Covariância, gradiente e mínimo foram os parâmetros temporais que melhor evidenciaram os desmatamentos como também o período aproximado de sua ocorrência. Esses parâmetros, quando combinados com dados de retroespalhamento, por exemplo, diferença de σ^0 , mínimo e gradiente, permitiram delimitar os limites de desmatamento com maior definição quando comparados à combinação pura de parâmetros da análise temporal. As composições de diferenças entre bandas de σ^0 também podem ser usadas para extrair informações de alteração como o período aproximado de ocorrência dos desmatamentos.

Os dados SAR, em banda C, não apresentaram resultados capazes de definir inequivocamente áreas de desmatamento. Esses resultados deram-se, provavelmente, à soma de alguns fatores como o modo de aquisição dos dados em banda C ser *Interferometric Wide*, menos detalhado quando comparado ao modo *StripMap*, das imagens em banda X.

Os índices calculados a partir de imagens ópticas forneceram informações importantes sobre a presença e vitalidade da vegetação nas áreas de desmatamento e de sua relação com as condições de umidade e de temperatura nessas áreas. Os índices NDVI e NDMI mostraram-se correlatos, áreas com vegetação densa a moderada apresentaram umidade elevada e áreas sem vegetação ou vegetação esparsa apresentaram baixa umidade. Porém, pôde-se obser-

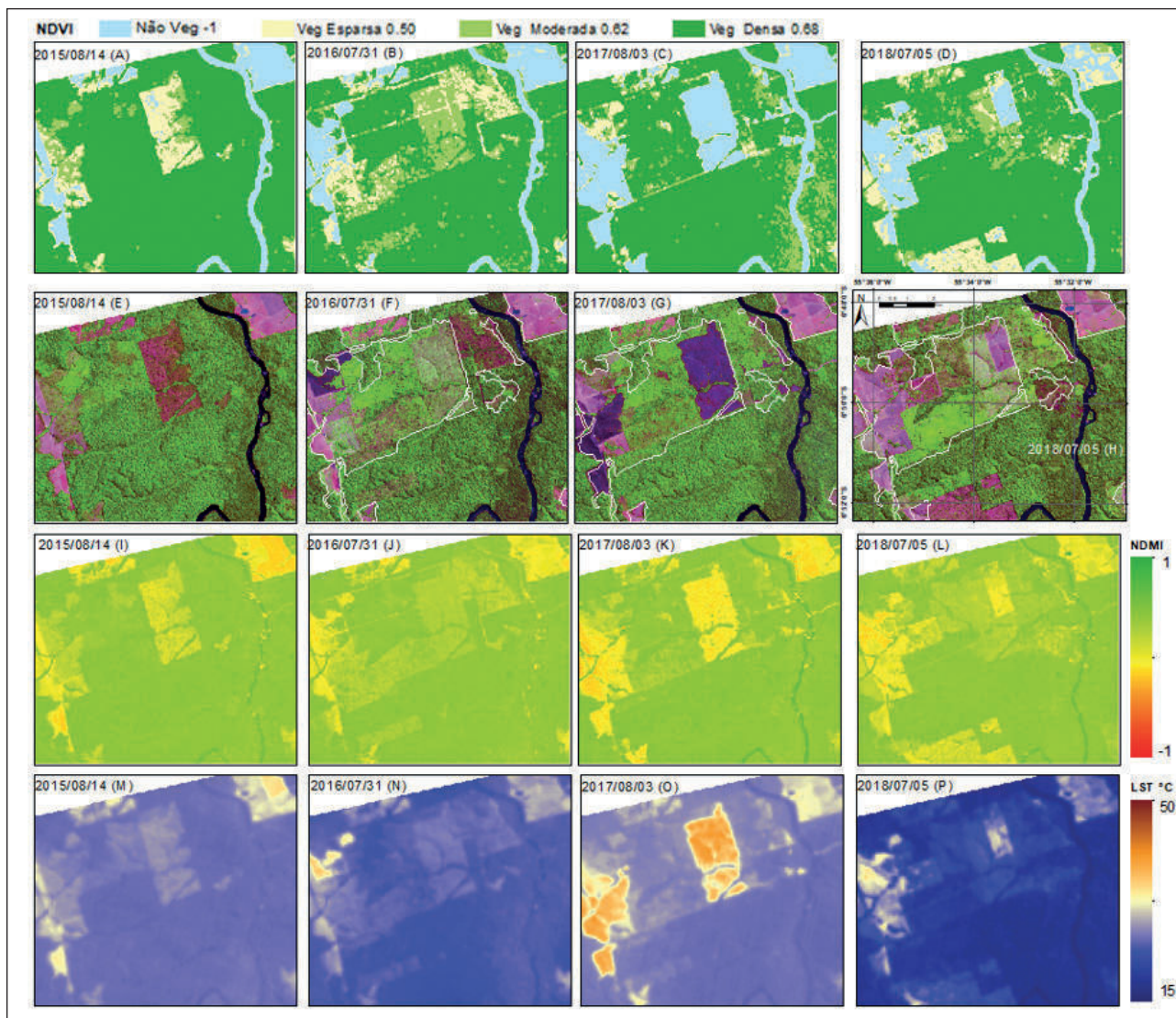


Figura 7 Mapas de classificação do NDVI para 2015-08-14 (A), 2016-07-31 (B), 2017-08-03 (C) e 2018-07-05 (D). Composições coloridas RGB/654 do satélite Landsat-8 obtidas em 2015/08/14 (E), 2016/07/31 (F) (com polígonos de desmatamento T0), 2017/08/03 (G) (com polígonos de desmatamento T0 e DETER-B de 2017) e 2018/07/05 (H) (com polígonos de desmatamento T0 e DETER-B de 2018). Mapas de índices de umidade (NDMI) para 2015-08-14 (I), 2016-07-31 (J), 2017-08-03 (K) e 2018-07-05 (L). Mapas de temperatura superficial terrestre (LST) para 2015-08-14 (M), 2016-07-31 (N), 2017-08-03 (O) e 2018-07-05 (P).

var, pelas imagens ópticas, que, nas áreas que foram desmatadas e posteriormente houve uma rebrota da vegetação, esses dois índices apresentaram valores similares em relação às áreas de vegetação densa, não permitindo uma diferenciação entre essas duas classes. A temperatura superficial terrestre mostrou-se mais sensível que os índices normalizados pela diferença onde foi possível observar uma temperatura levemente maior nas áreas de rebrota e uma

temperatura mais baixa nas áreas de vegetação densa, sendo possível fazer uma separação visual entre essas duas áreas.

A tecnologia SAR mostrou-se útil na identificação dos desmatamentos durante o período de chuvas na Amazônia Legal. Neste estudo, foi relevante avaliar os parâmetros temporais e combinações RGB que melhor ressaltaram as áreas de desmatamentos e seus limites na área de estudo. Em pesquisas futu-

ras, pretende-se realizar análises de textura de dados SAR para uma melhor definição e discriminação das classes vegetais como também análises quantitativas das informações SAR e ópticas.

5 Agradecimentos

Ao Censipam, por ceder as imagens do COSMO-SkyMed e uma máquina de processamento para a realização do trabalho.

6 Referências

- About Neta, S.R.; Freitas, C.C. & Dutra, L.V. 2010. Uso de imagens ALOS/PALSAR multipolarizadas para detecção de incremento de desflorestamento na Amazônia. *Revista Brasileira de Cartografia*, 62(2): 417-431.
- Aragão, L.E.O.C.; Poulter, B.; Barlow, J.B.; Anderson, L.O.; Malhi, Y.; Saatchi, S.; Phillips, O.L. & Gloor, E. 2014. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. *Biological Reviews*, 89(4): 913-931.
- Arima, E.Y.; Walker, R.T.; Perz, S.G. & Caldas, M. 2005. Loggers and forest fragmentation: behavioral models of road building in the Amazon basin. *Annals of the Association of American Geographers*, 95(3): 525-541.
- Asner, G.P.; Knapp, D.E.; Broadbent, E.N.; Oliveira, P.J.C.; Keller, M. & Silva, J.N. 2005. Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science*, 310: 480-482.
- Barros, H.S. & Fearnside, P.M. 2016. Soil carbon stock changes due to edge effects in Central Amazon Forest fragments. *Forest Ecology and Management*, 379:30-36.
- Barsi, J.; Schott, J.R.; Hook, S.J.; Raqueno, N.G.; Markham, B.L. & Radocinski, R.G. 2014. Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. *Remote Sensing*, 6: 11607-11626.
- Bernhard, G.E.M.; Stein, E.; Twele, A. & Gahler, M. 2011. Synergistic use of optical and radar data for rapid mapping of forest fires in the European Mediterranean. In: ISPRS WORKSHOP, 38(4). Hannover, Germany. 2011. *Proceedings*, p. 14-17.
- Broadbent, E.N.; Asner, G.P.; Keller, M.; Knapp, D.E.; Oliveira, P.J.C. & Silva, J.N. 2008. Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective logging in the Brazilian Amazon. *Biological Conservation*, 141(7): 1745-1757.
- Bustamante, M.M.C.; Roitman, I.; Aide, T.M.; Alencar, A.; Anderson, L.O.; Aragão, L.; Asner, G.P.; Barlow, J.; Berenguer, E.; Chambers, J.; Costa, M.H.; Fanin, T.; Ferreira, L.G.; Ferreira, J.; Keller, M.; Magnusson, W.E.; Morales-Barquero, L.; Morton, D.; Ometto, J.P.H.B.; Palace, M.; Peres, C.A.; Silvério, D.; Trumbore, S. & Vieira, I.C.G. 2016. Toward an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery on carbon stocks and biodiversity. *Global Change Biology*, 22(1): 92-109.
- Butt, N.; Oliveira, P.A. & Costa, M.H. 2011. Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondônia, Brazil. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(11): 2-9.
- Capodici, F.; D'Urso, G. & Maltese, A. 2013. Investigating the relationship between X-band SAR data from COSMO-SkyMed satellite and NDVI for LAI detection. *Remote Sensing*, 5(3): 1389-1404.
- Carreiras, J.M.B.; Jones, J.; Lucas, R.M. & Shimabukuro, Y.E. 2017. Mapping major land cover types and retrieving the age of secondary forests in the Brazilian Amazon by combining single-date optical and radar remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 194: 16-32.
- Cochrane, M.A. 2003. Fire science for rainforests. *Nature*, 421(6926): 913-919.
- Covello, F.; Battazza, F.; Coletta, A.; Fiorentino, C.; Pietranera, L.; Valentine, G. & Zoffoli, S. 2010. COSMO-SkyMed an existing opportunity for observing the Earth. *Journal of Geodynamics*, 49(3-4): 171-180.
- Davidson, E.A.; Araújo, A.C.; Artaxo, P.; Balch, J.K.; Brown, I.F.; Bustamante, M.M.C.; Coe, M.T.; DeFries, R.S.; Keller, M.; Longo, M.; Munger, W.; Schroeder, W.; Soares-Filho, B.S.; Souza Jr, C.M. & Wofsy, S.C. 2012. The Amazon Basin in transition. *Nature*, 481(7381): 321-328.
- Diniz, C.G.; Souza, A.A.A.; Santos, D.C.; Dias, M.C.; Luz, N.C.; Moraes, D.R.V.; Maia, J.S.; Gomes, A.R.; Narvaes, I.S.; Valeriano, D.M.; Maurano, L.E.P. & Adami, M. 2015. DETER-B: the new Amazon near real-time deforestation detection system. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(7): 3619-3628.
- Domingues, M.S. & Bermann, C. 2012. O arco de desflorestamento na Amazônia: da pecuária à soja. *Ambiente & Sociedade*, 15(2): 1-22.
- Ernhard, E.M.; Twele, A.; Gahler, M. 2011. Rapid mapping of forest fires in the European Mediterranean region – a change detection approach using X-band SAR-data. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, 2011(4): 261-270.
- ESA. 2018. *Sentinel online. Missions. Sentinel-1*. Disponível em: <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>>. Acesso em: 10 jan. 2018.
- Escada, M.I.S.; Maurano, L.E.; Rennó, C.D.; Amaral, S. & Valeriano, D.M. 2011. Avaliação de dados dos sistemas de alerta da Amazônia: DETER e SAD. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. Curitiba, PR. 2011. *Anais*, São José dos Campos: INPE, p. 2934-2943.
- Ferreira, L.G.; Ferreira, N.C. & Ferreira, M.E. 2008. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado-da-arte. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*, 30(4): 379-390.
- Grecchi, R.C.; Beuchle, R.; Shimabukuro, Y.E.; Aragão, L.E.O.C.; Arai, E.; Simonetti, D. & Achard, F. 2017. An integrated remote sensing and GIS approach for monitoring areas affected by selective logging: A case study in northern Mato Grosso, Brazilian Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 61: 70-80.
- Guenther, C.K.F.; Bufacchi, P.; Santos, J.C.; Veras, C.A.G.; Alvarado, E.C.; Mell, W. & Carvalho Jr, J.A. 2017. Probability of surface fire spread in Brazilian rainforest fuels from outdoor experimental measurements. *European Journal of Forest Research*, 136(2): 217-232.

- Hansen, M.C.; Potapov, P.V.; Moore, R.; Hancher, M.; Turubanova, S.A.; Tyukavina, A.; Thau, D.; Stehman, S.V.; Goetz, S.J.; Loveland, T.R.; Kommareddy, A.; Egorov, A.; Chini, L.; Justice, C.O. & Townshend, J.R.G. 2013. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160): 850–853.
- Henderson, F.M. & Lewis, A.J. 1998. *Principles of Application of Imaging Radar*. Manual of remote sensing (3^a ed., v. 2). United States.
- Hosonuma, N.; Herold, M.; Sy, V.; DeFries, R.S.; Brockhaus, M.; Verchot, L.; Angelsen, A. & Romijn, E. 2012. An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7(4): 1-12.
- INMET. 2019. *BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 24 de janeiro de 2019.
- INPE. 2013. *Metodologia para o cálculo da taxa anual de desmatamento na Amazônia Legal*. São José dos Campos: INPE, p. 1-37.
- ISA. 2009. *COSMO-SkyMed SAR Products Handbook*. 105 p.
- Jusys, T. 2016. Fundamental causes and spatial heterogeneity of deforestation in Legal Amazon. *Applied Geography*, 75: 188-199.
- Knight, E.J. & Kvaran, G. 2014. Landsat-8 Operational Land Imager: design, characterization and performance. *Remote Sensing*, 6: 10286-10305.
- Knox, R.; Wang, J. & Bras, R. 2011. Precipitation variability over the forest-to-non forest transition in Southwestern Amazonia. *Journal of Climate*, 24(9): 2368-2377.
- Lardeux, C.; Frison, P.L.; Tison, C.; Souyris, J.C.; Stoll, B.; Frunau, B. & Rudant, J.P. 2011. Classification of tropical vegetation using multifrequency partial SAR polarimetry. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(1): 133–137.
- Lei, Y.; Treuhaft, R.; Keller, M.; Santos, M.; Gonçalves, F. & Neumann, M. 2018. Quantification of selective logging in tropical forest with spaceborne SAR interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 211: 167–183.
- Lu, D.; Mausel, P.; Brondizio, E. & Moran, E. 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12): 2365-2401.
- Martone, M.; Rizzoli, P.; Wecklich, C.; González, C.; Bueso-Bello, J.L.; Valdo, P.; Schulze, D.; Zink, M.; Krieger, G. & Moreira, A. 2018. The global forest/non-forest map from TanDEM-X interferometric SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 205: 352–373.
- Matricardi, E.A.T.; Skole, D.L.; Pedlowski, M.A.; Chomentowski, W. & Fernandes, L.C. 2010. Assessment of tropical forest degradation by selective logging and fire using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114(5): 1117-1129.
- Mitchell, A.L.; Rosenqvist, A. & Mora, B. 2017. Current remote sensing approaches to monitoring forest degradation in support of countries: measurement, reporting and verification (MRV) systems for REDD+. *Carbon Balance and Management*, 12(9): 1-22.
- Morton, D.C.; DeFries, R.S.; Shimabukuro, Y.E.; Anderson, L.O.; Arai, E.; Espírito-Santo, F.B.; Freitas, R. & Morissette, J. 2006. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(39): 14637-14641.
- Nepstad, D.; Verissimo, A.; Alencar, A.; Nobre, C.; Lima, E.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P.; Potter, C.; Moutinho, P.; Mendoza, E.; Cochrane, M. & Brooks, V. 1999. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, 398(6727): 505-508.
- Nepstad, D.; Carvalho, G.; Barros, A.C.; Alencar, A.; Capobianco, J.P.; Bishop, J.; Moutinho, P.; Lefebvre, P.; Silva Jr., U.L. & Prins, E. 2001. Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. *Forest Ecology and Management*, 154(3): 395-407.
- Ponzoni, F.J.; Shimabukuro, Y.E. & Kuplich, T.M. 2015. A imagem como fonte de dados radiométricos (abordagem quantitativa). In: SENSORIAMENTO REMOTO DA VEGETAÇÃO. (2^a ed.). Editora Parêntese, p. 78-115.
- Reiche, J.; Verbesselt, J.; Hoekman, D. & Herold, M. 2015. Fusing Landsat and SAR time series to detect deforestation in the tropics. *Remote Sensing of Environment*, 156: 276–293.
- Shimabukuro, Y.E.; Miettinen, J.; Beuchle, R.; Grecchi, R.C.; Simonetti, D. & Achard, F. 2015. Estimating burned area in Mato Grosso, Brazil, using an object-based classification method on a systematic sample of medium resolution satellite images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(9): 4502–4508.
- Soares-Filho, B.S.; Nepstad, D.C.; Curran, L.M.; Cerqueira, G.C.; Garcia, R.A.; Ramos, C.A.; Voll, E.; McDonald, A.; Lefebvre, P. & Schlesinger, P. 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440(7083): 520-523.
- Souza, C.M.; Siqueira, J.V.; Sales, M.H.; Fonseca, A.V.; Ribeiro, J.G.; Numata, I.; Cochrane, M.A.; Barber, C.P.; Roberts, D.A. & Barlow, J. 2013. Ten-year Landsat classification of deforestation and forest degradation in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing*, 5(11): 5493-5513.
- Souza, G.M.G.; Escada, M.I.S. & Capanema, V.P. 2017. Cicatrizes de queimadas e padrões de mudanças de uso e cobertura da terra no sudoeste do estado do Pará, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. Santos, SP. 2017. *Anais*. São José dos Campos: INPE, p. 5760-5767.
- Thompson, G.; Thompson, I.D.; Guariguata, M.R.; Okabe, K.; Bahamondez, C.; Nasi, R.; Heymell, V. & Sabogal, C. 2013. An operational framework for defining and monitoring forest degradation. *Ecology and Society*, 18(2): 20.
- Torres, R.; Snoeij, P.; Geudtner, D.; Bibby, D.; Davidson, M.; Attema, E.; Potin, P.; Rommen, B.; Floury, N.; Brown, M.; Traver, I.N.; Deghaye, P.; Duesmann, B.; Rosich, B.; Miranda, N.; Bruno, C.; L'Abbate, M.; Croci, R.; Pietropaolo, A.; Huchler, M. & Rostan, F. 2012. GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120: 9-24.
- Wilson, E.H. & Sader, S.A. 2002. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80(3): 385-396.