

Estimativa da fração areia do horizonte superficial dos solos no Bioma Pantanal: uma abordagem preliminar com dados de emissividade

Sand fraction estimation in the topsoil of the Pantanal Biome: a preliminary approach using emissivity data

Fábio Marcelo Breunig^{*}, Edenilson Roberto do Nascimento^{**}, Tony Vinicius Moreira Sampaio^{***}, Elias Fernando Berra^{****}, Elaine de Cacia de Lima Frick^{*****}, Marcos Adami^{*****}, Lênio Soares Galvão^{*****}, Romário Trentin^{*****}, William Gaida^{*****}, Leonardo José Cordeiro Santos^{*****}, José Guilherme Oliveira^{*****}

^{*} Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná – UFPR, fabio-breunig@ufpr.br

^{**} Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná – UFPR, deni_ern@ufpr.br

^{***} Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná – UFPR, tonysampaio@ufpr.br

^{****} Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná – UFPR, eliasberra@ufpr.br

^{*****} Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná – UFPR, elaine-cacia@ufpr.br

^{*****} Divisão de Observação da Terra e Geoinformática (DIOTG), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, marcos.adami@inpe.br

^{*****} Divisão de Observação da Terra e Geoinformática (DIOTG), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, lenio.galvao@inpe.br

^{*****} Departamento de Geociências e Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, romario.trentin@gmail.com

^{*****} Departamento de Geociências e Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, ufsm.william@gmail.com

^{*****} Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná – UFPR, santos.ufpr@gmail.com

^{*****} Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná – UFPR, joseguilhermegeo@gmail.com

<https://doi.org/10.5380/raega.v63i2.99824>

Resumo

O Bioma Pantanal é caracterizado por sua alta biodiversidade de fauna e flora, em grande parte associada à sua planície de inundação. Com o aumento da ocorrência de eventos extremos, como secas, inundações e incêndios, aumentam as chances de degradação ambiental e do agravamento de processos como a arenização. Este estudo tem como objetivo estimar a fração areia nos horizontes superficiais dos solos do Bioma Pantanal com uso de dados do infravermelho termal. Essas estimativas foram obtidas a partir dos dados de emissividade do produto Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Emissivity Dataset (GED). Além dos dados de emissividade, também foram considerados dados de elevação e de hidrografia. Para estimativa da fração areia, foi utilizado um modelo de regressão empírico. A análise espectral dos terrenos arenosos mostrou a presença de feições associadas à sílica (feições de reststrahlen), permitindo sua distinção de vegetação verde/seca e água. A normalização dos dados da faixa termal possibilitou a aplicação de um modelo logístico para estimar a distribuição das áreas com maior probabilidade de concentração de fração areia nos solos do Pantanal. As regiões leste, central e centro-sul do bioma apresentaram maiores concentrações de fração areia. Em parte, os resultados sugerem uma relação entre o percentual de areia com as pequenas variações de altimetria no bioma

e com a ausência de drenagens permanentes. Estudos adicionais são necessários para validar o modelo, sendo recomendada cautela na interpretação e uso dos resultados apresentados.

Palavras-chave:

Sensoriamento remoto, ASTER, Restsrahlen, Arenização, Infravermelho termal.

Abstract

The Pantanal Biome is characterized by its high biodiversity of fauna and flora, largely associated with its floodplain. With the increasing occurrence of extreme events such as droughts, floods, and fires, the risks of environmental degradation and the intensification of processes like sandization also rise. This study aims to estimate the sand fraction in the surface horizons of the soils in the Pantanal Biome using thermal infrared data. These estimates were obtained from the emissivity data of the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Emissivity Dataset (GED). In addition to emissivity data, elevation and hydrography data were also considered. To estimate the sand fraction, an empirical regression model was employed. Spectral analysis of sandy terrains revealed features associated with the presence of silica (restsrahlen features), enabling its distinction from green/dry vegetation and water. Normalization of thermal band data allowed for the application of a logistic model to estimate the distribution of areas with higher concentrations of sand fraction in the soils of the Pantanal. The eastern, central, and central-southern regions showed higher concentrations of sand fraction. The results partially suggest a relationship between the sand percentage, small altimetric variations in the biome, and the absence of permanent drainage systems. Further studies should be conducted to validate the model, and caution is recommended when interpreting and using the presented results.

Keywords:

Remote sensing, ASTER, Restsrahlen, Sandization, Thermal infrared.

I. INTRODUÇÃO

O Bioma Pantanal é caracterizado por abrigar a maior bacia de inundação sazonal do mundo. Nas últimas décadas, tem enfrentado episódios de intenso estresse hídrico, associados a secas e incêndios de grande escala bem como chuvas extremas (Bergier; Assine, 2016; Garcia et al., 2021; Leal Filho et al., 2021; Libonati et al., 2022a, Libonati et al., 2022b; Tomas et al., 2019; SOS Pantanal, 2024). Além disso, o processo de desmatamento da vegetação nativa tem avançado, apesar dos alertas dos sistemas de monitoramento e detecção (ANA, 2024; INPE, 2024). Todos esses fatores tendem a afetar a “qualidade dos solos”, tipicamente arenosos, podendo levar a um processo de degradação, incluindo o surgimento de manchas arenosas (Suertegaray, 1995; Freitas et al., 2003; Breunig et al., 2024).

Embora as manchas arenosas sejam facilmente observáveis in situ, sua identificação torna-se desafiadora em larga escala quando utilizados recursos de sensoriamento remoto para o seu mapeamento. O uso de imagens de satélites obtidas nas faixas espectrais do visível, infravermelho próximo (NIR) e infravermelho

de ondas curtas (SWIR) pode não permitir a distinção de solos de alta reflectância (solos claros), que frequentemente se confundem com a presença de vegetação não-fotossinteticamente ativa (NPV) nas cenas (Breunig et al., 2009; Breunig et al., 2008; Chen et al., 2021).

Esse cenário é frequente no bioma pantaneiro na época seca, semelhante aos padrões do Bioma Cerrado. Contudo, no infravermelho termal, esses tipos de solos são passíveis de discriminação dos demais materiais. Devido à presença de feições de reemissão (reststrahlen) no infravermelho termal (thermal infrared – TIR) (Salisbury; D'Aria, 1992a, 1992b), a sílica pode ser facilmente detectada nos espectros TIR, possibilitando a separação de horizontes superficiais arenosos dos demais componentes de cena. Entretanto, para explorar o uso dessa feição de sílica, é necessário a utilização de sensores que operem em uma faixa mais estreita do infravermelho termal, especificamente entre 8 e 14 micrômetros.

Alguns sensores orbitais operam em múltiplas bandas na faixa do TIR, como o Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a bordo do satélite Terra (Platnick, 2024), e o Ecosystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station (ECOSTRESS), instalado na Estação Espacial Internacional (ISS) (JPL/NASA, 2025). Ambos possuem cinco bandas com posicionamentos espectrais similares. O ASTER foi um dos primeiros sensores orbitais com cinco bandas cobrindo a faixa espectral do TIR entre 8 a 14 micrômetros (ERSDAC, 2007; Sobrino et al., 2007). Além desses sensores, destacam-se os sensores Thermal Infrared Sensor (TIRS), a bordo dos satélites Landsat 8 e 9, e o MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), que opera nos satélites Terra e Aqua, com duas bandas na região do infravermelho termal. Por fim, alguns novos sensores estão previstos para lançamento, com foco na melhoria da resolução espacial, a exemplo do Sustainable Development Science Satellite 1 (SDGSAT-1) (Guo et al., 2023) e do sensor desenvolvido pela Constellr GmbH (Spengler et al., 2024).

O sensor TIR do ASTER tem possibilitado a geração de dados de emissividade, com resolução espacial de 90 metros, desde os anos 2000 (Gillespie et al., 1998). A presença de um sensor multiespectral no termal permitiu avanços importantes no desenvolvimento de algoritmos para separação de dados de temperatura e emissividade em escala global com boa acurácia (Gillespie et al., 1999). Dada a disponibilidade de uma grande série temporal de dados de emissividade do ASTER, Hulley et al. (2015) desenvolveram o produto Global Emissivity Dataset (GED). O produto representa uma base contínua de dados de emissividade da superfície, com duas resoluções espaciais de 100 metros ou 1 quilômetro. Esse produto consiste na resposta média de todas as imagens de emissividade de 2000 a 2008 (produto composto do TIR), obtidas com controle de qualidade e filtragem para efeitos de sombras, nuvens e aerossóis (Hulley; Hook, 2011). O GED oferece uma oportunidade

única de testar a aplicação de dados de emissividade em ambientes com presença de horizonte superficial arenoso, características de áreas sazonalmente alagadas, como as do Bioma Pantanal.

Considerando a importância do Bioma Pantanal e a fragilidade de seu ecossistema (Santos et al., 2006; Cardozo et al., 2016), este estudo testa a hipótese de que áreas de solo com horizontes superficiais arenosos podem ser identificados a partir de uma estratégia de normalização de medidas de emissividade na faixa do infravermelho termal. Contribuindo, desta forma, para o entendimento de relações entre o uso e cobertura da terra na região e os possíveis impactos de cenários extremos, associados às mudanças climáticas.

O objetivo deste estudo foi estimar a fração areia do horizonte superficial dos solos situados no Bioma Pantanal utilizando o produto ASTER GED. Após a identificação, o estudo propõe uma discussão sobre as características geográficas da distribuição desses horizontes em relação à fração areia estimada, bem como sua variação em comparação as características pedológicas típicas da região.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo abrange o Bioma Pantanal, totalizando 150.988 km². O bioma inclui porções dos estados brasileiros de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, além de áreas no Paraguai e Bolívia (**Figura 1a**), estando localizado na porção montante da Bacia do Paraguai. Os solos da planície pantaneira são predominantemente arenosos, derivados de depósitos de sedimentos diversos trazidos por rios para a “Bacia do Pantanal”, de granulometria média a pequena (Schiavo et al., 2012). Os solos que predominam são os Neossolos, Planossolos, Plintossolos, Vertissolos, Gleissolos, Cambissolos Flúvicos e Luvisolos (Schiavo et al., 2012; Soares et al., 2006; Boin et al., 2019). Em geral, estes solos apresentam características como o hidromorfismo associado à sazonalidade da precipitação pluviométrica.

Do ponto de vista climático, o bioma apresenta duas estações bem definidas: a estação chuvosa, predominantemente nos meses de novembro a março, e a estação seca, que ocorre entre maio e setembro (Tomas et al., 2019). A região é marcada por uma alta biodiversidade em termos de fauna e flora (Leal Filho et al., 2021). Durante a estação chuvosa, as drenagens cobrem grande parte do bioma; no entanto, muitos rios e lagos são perenes, mantendo-se presentes ao longo do ano (**Figura 1**). A dinâmica espacial sazonal dos corpos d'água refletem em parte as mudanças no uso e cobertura da terra no bioma pantaneiro e no planalto onde as drenagens se originam (Zorzetto, 2015; Assine et al., 2014; Kuerten et al., 2013; McGlue et al., 2012). Considerando as alterações futuras previstas em cenários de modelagem climática, o bioma poderá passar por

relevantes modificações nos padrões de temperatura e de precipitação até o final do século 21 (Beck et al., 2023).

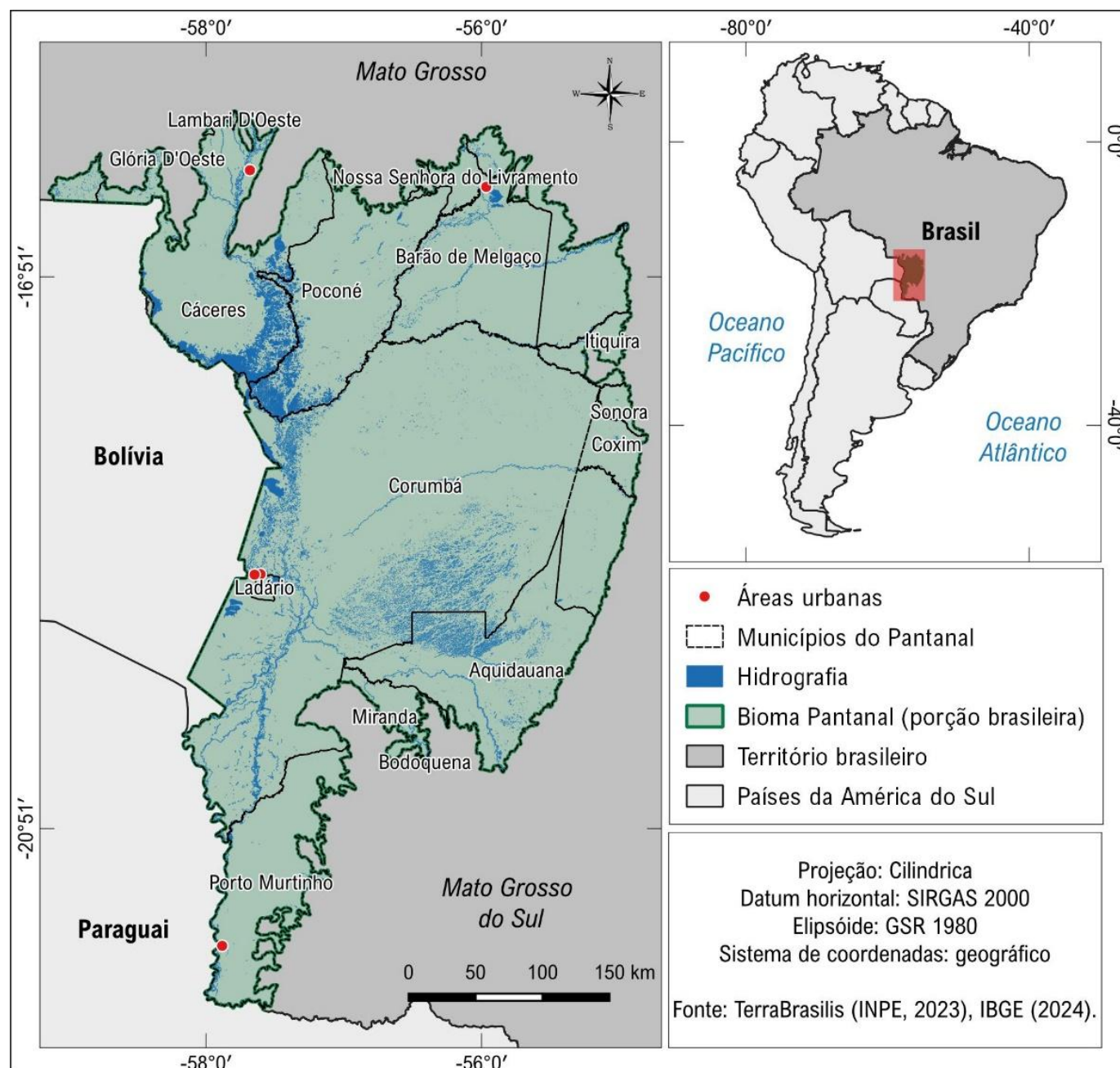


Figura 1 – Localização do Bioma Pantanal no centro da bacia hidrográfica do Rio Paraguai e no centro da América do Sul. Hidrografia geral no Bioma Pantanal. Fonte dos dados vetoriais da plataforma TerraBrasilis (INPE, 2023 e IBGE 2024).

Aquisição dos dados e processamento

Para esse estudo foram utilizados dados do produto ASTER GED (HDF5 V003). No total, foram obtidos 53 *tiles* (1°x1°) para todo o Bioma Pantanal com resolução espacial de 100 metros. Os dados foram obtidos da plataforma EarthData, disponível no endereço eletrônico: <<https://search.earthdata.nasa.gov/search>>. Após o

download dos dados, foi extraída a emissividade média para cada *tile*. Dados do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) (Rouse et al., 1973), com respectivos valores de desvio padrão, também extraídos do produto GED na resolução espacial de 100 m. Para o processo de mosaicagem dos tiles utilizou-se o algoritmo de reamostragem do vizinho mais próximo, preservando a consistência do produto original.

Paralelamente, dados atuais da missão ECOSTRESS foram obtidos, com o objetivo de gerar estimativas para dias específicos, permitindo relacionar os resultados com o uso e cobertura da terra. Foi utilizado o produto de nível 2 (L2) “*Land Surface Temperature & Emissivity and Cloud Mask*”. Utilizou-se dados ECOSTRESS dos anos de 2024 e 2025 para que as imagens recentes do espectro refletido, disponíveis no Google Earth Pro® (Mountain View, Califórnia, EUA), pudessem ser comparadas temporalmente com as imagens TIR, facilitando a interpretação dos resultados. Esses dados foram utilizados de forma complementar e qualitativa.

Além disso, buscou-se na literatura dados disponíveis sobre a fração areia dos solos do Pantanal (Pires Filho et al., 1982; Coringa et al., 2012; Cardoso et al., 2011; Cardoso et al., 2016; Stieven et al., 2009; Pereira et al., 2007; Projeto RADAM - Folha Corumbá, 1982). Em função da estimativa de precisão posicional das amostras coletadas nestes trabalhos, considerando a resolução espacial da presente investigação, apenas uma pequena parte destes dados foi útil na análise.

Análise dos dados

De forma geral, os dados de emissividade foram primeiramente analisados inspecionando-se espectros para alvos como areia, vegetação e água. Esses espectros foram aleatoriamente extraídos no bioma, de forma a ressaltar as diferenças de emissividade entre solos com alta fração arenosa e porções das imagens com vegetação e água.

A partir do cálculo do *Normalized Thermal Sandy Index* (NTSI), utilizando-se a Equação I e as bandas 10 e 14, centradas em 8,3 e 11,3 μm , respectivamente (Breunig et al., 2008; Breunig et al., 2009). Esse processo de normalização tende a reduzir os efeitos das variações bidirecionais na geometria de observação das cenas, da influência atmosférica residual após pré-processamento dos dados e da relação sinal-ruído do sensor. Em geral, são esperados valores no intervalo de -1 a 1, sendo que valores para areia pura (p. ex., solos muito arenosos) tendem a ser positivos, enquanto valores para alvos com maior emissividade nas bandas 10 a 12 do ASTER tendem a ser negativos ou muito próximos a zero (p. ex., solos argilosos, vegetação e água).

$$NTSI = \frac{(\varepsilon_{11,3\mu m} - \varepsilon_{8,3\mu m})}{(\varepsilon_{11,3\mu m} + \varepsilon_{8,3\mu m})} \quad (I)$$

onde: ε representa a emissividade na respectiva banda.

Foi utilizada uma função logística, baseada em um estudo semelhante realizado no noroeste do Paraná, no qual se aplicou uma equação exponencial, conforme detalhado na Equação II (Santos et al., 2024). Esse modelo deverá ser ajustado localmente no futuro em função das amostras que serão coletadas para diferentes áreas do bioma. Portanto, ainda, cabe avaliar a sua acurácia na estimativa da fração areia do solo para o Pantanal, o que foi feito apenas parcialmente nesse trabalho. Outra limitação que deve ser considerada na presente análise, refere-se ao uso de uma composição de oito anos dos imageamentos do ASTER de 2000 a 2008. Isso pode alterar significativamente o valor da emissividade média, de acordo com a estação do ano, presença de vegetação/água, entre outras relações. A expectativa é que solos com maior concentração de areia tendem a apresentar menor cobertura vegetal, e assim, maior índice normalizado.

$$y = \frac{a}{\left(1 + \exp(-k * (x - xc))\right)} \quad (II)$$

onde: y é a estimativa da fração areia, a corresponde ao valor de 91,7296 ($\pm 5,25305$); xc ao valor de 0,00664 ($\pm 9,65731E-4$) e k a 241,42138 ($\pm 34,6913$).

Após a aplicação do modelo, os dados foram espacializados e os mapas resultantes foram analisados, considerando a distribuição das manchas com maior e menor concentração estimada da fração areia. Paralelamente, os dados foram avaliados em função do modelo de elevação digital FABDEM (versão 1.2) (Hawker et al., 2022), parâmetros geomorfológicos e da rede de drenagem (INPE, 2024).

Para a estimativa dos resultados, foram adotadas duas estratégias. Inicialmente, foram consideradas informações disponíveis na literatura (Filho et al., 1982; Coringa et al., 2012; Cardoso et al., 2013; Stieven et al., 2009; Pereira et al., 2007; dados do projeto RADAM - Folha Corumbá). Tendo em conta que nem todos os dados disponíveis possuíam precisão posicional adequada, os mesmos foram filtrados visando manter apenas pontos mais precisos. Numa segunda etapa, analisou-se de forma integrada: (I) os dados de campo; (II) as informações resultantes da interpretação de imagens de alta resolução espacial do Google Earth Pro; (III) os dados interanuais do NDVI médio e seu desvio padrão obtido do produto GED; e (IV) os dados da estimativa da fração

areia. Essa análise combinada de dados evidenciou áreas com visível deposição de areia (bancos de areia de drenagens), com concentração média e baixa de areia, e com estimativas superiores a 50% de fração areia. Por fim, algumas fotografias de campo foram associadas às suas respectivas estimativas de fração areia.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise espectral mostrou claramente diferenças existentes nas emissividades entre alvos arenosos, vegetação e água (**Figura 2**). Em geral, as feições de *reststrahlen* ficaram evidentes em terrenos arenosos expostos para o satélite (Salisbury; D'Aria, 1992a, 1992b; Breunig et al., 2008). Devido a essa característica espectral de reemissão, à medida que a fração areia aumenta, a emissividade nas bandas 10 a 12 do ASTER (8,125 – 8,475 μm ; 8,475 – 8,825 μm ; 8,925 – 9,275 μm , respectivamente) diminui. Por outro lado, as bandas 13 e 14 (10,250 – 10,950 μm e 10,950 – 11,650 μm) mantêm-se relativamente estáveis para todos os alvos avaliados.

A normalização do TIR, obtendo valores adimensionais, mostrou imagens onde os tons mais claros tendem a representar as áreas de maior concentração de areia. Já as áreas mais escuras usualmente estão associadas com a ocorrência de vegetação verde, seca (NPV) ou com corpos d'água (**Figura 3**). Na **Figura 3**, percebe-se alguns efeitos associados ao processamento e aquisição das imagens ASTER ao longo de nove anos (2000-2008), visto que alguns tiles podem ser visualmente identificados.

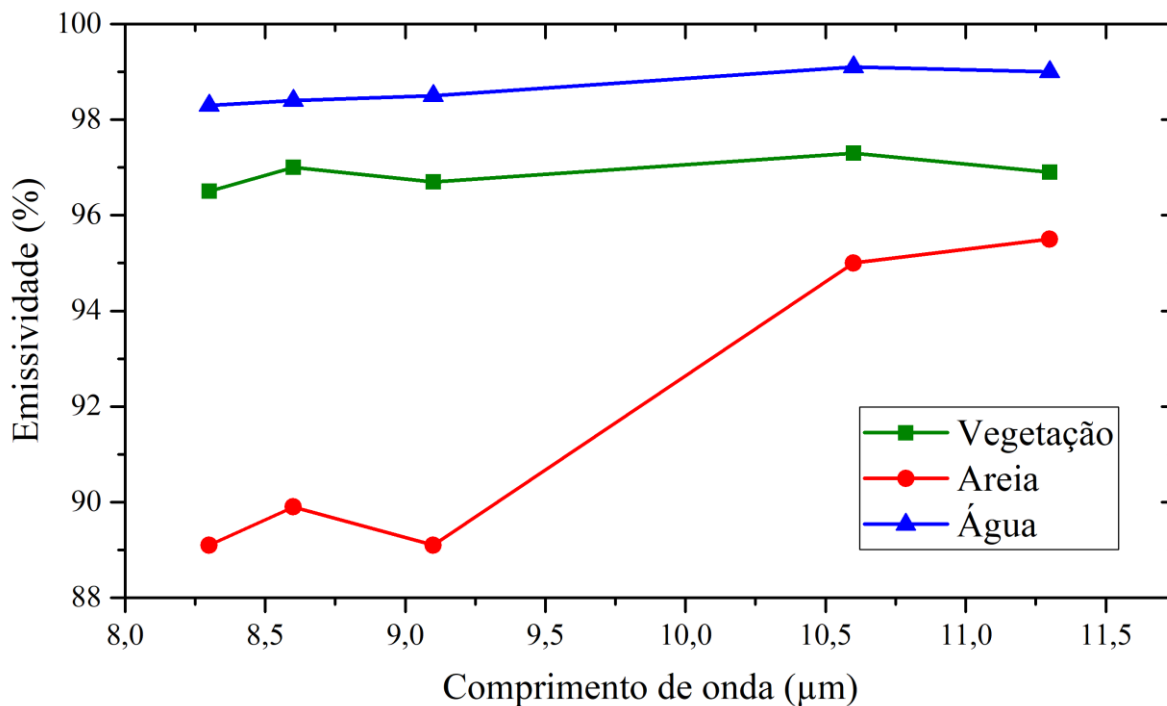


Figura 2 – Espectros de emissividades do infravermelho termal (TIR) obtidos dos produtos ASTER GED para solos arenosos e áreas de vegetação e água, do Bioma Pantanal.

A espacialização da estimativa da fração areia do horizonte superficial do solo, gerada de acordo com a equação de Santos et al. (2024), é apresentada na **Figura 4**. Os dados são visualmente semelhantes aos da **Figura 3**, que retrata os dados da normalização do termal (NTSI). A partir dessa normalização foi possível extrair valores estimados para a fração areia, com o modelo empírico desenvolvido a partir de amostras de campo e uma regressão logística (**Figura 4**). Claramente, verifica-se manchas com maior quantidade de talhões avermelhados na porção central, margem leste e centro-sul do Pantanal. Por outro lado, as demais regiões apresentam a grande maioria dos pixels com valores mais baixos de estimativa de fração areia, que podem estar associados às características do solo ou à presença de uma cobertura vegetal ao longo do período de aquisição de imagens TIR do ASTER (2000 a 2008). Em estudos futuros, expedições de campo e mapeamentos detalhados de solo, poderão auxiliar na validação das estimativas e na explicação dos processos geológicos-geomorfológicos associados, como feito em estudos conduzidos no Mato Grosso e Rio Grande do Sul (Breunig et al., 2008, 2009, 2024).

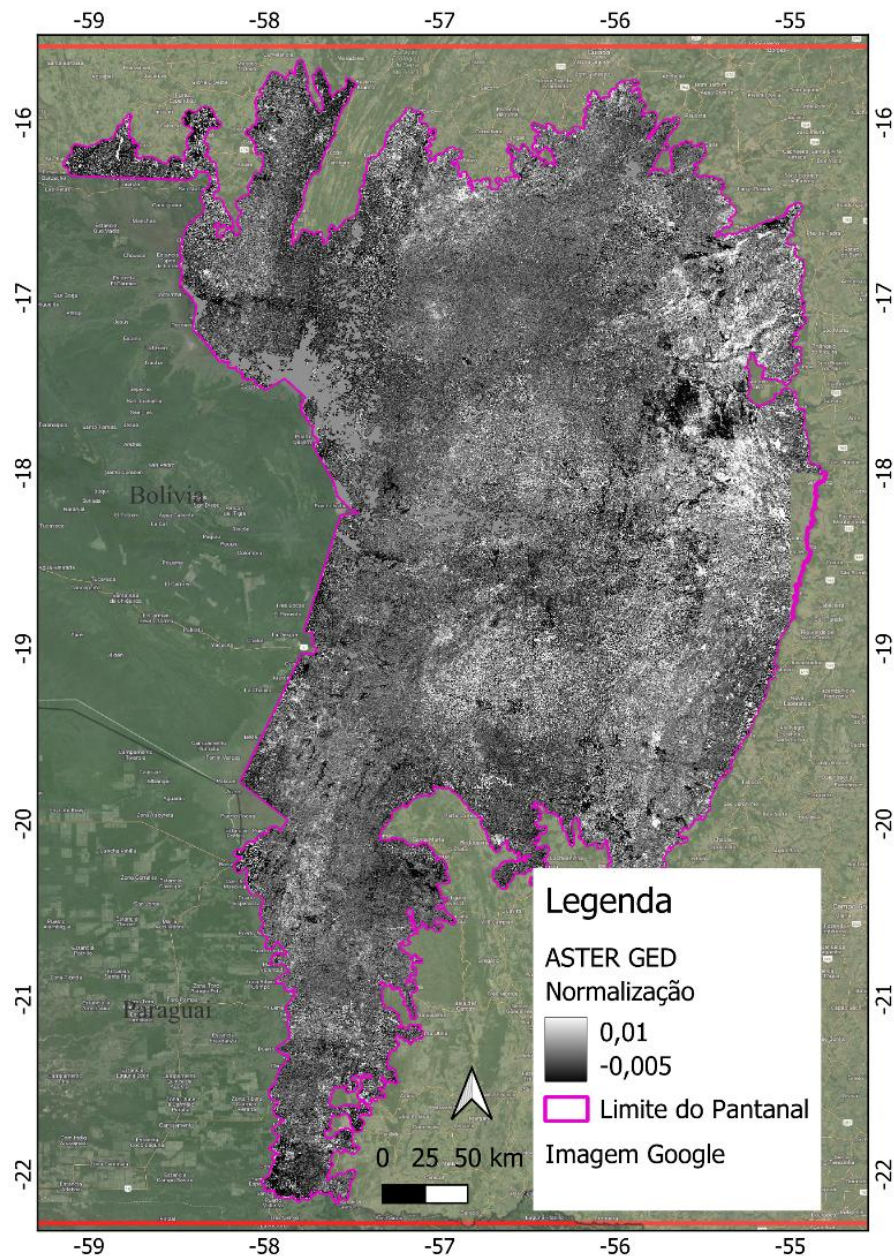


Figura 3 – Distribuição espacial dos valores de normalização das bandas 10 e 14 do ASTER GED para o Bioma Pantanal. Uma imagem Google Earth é apresentada como fundo.

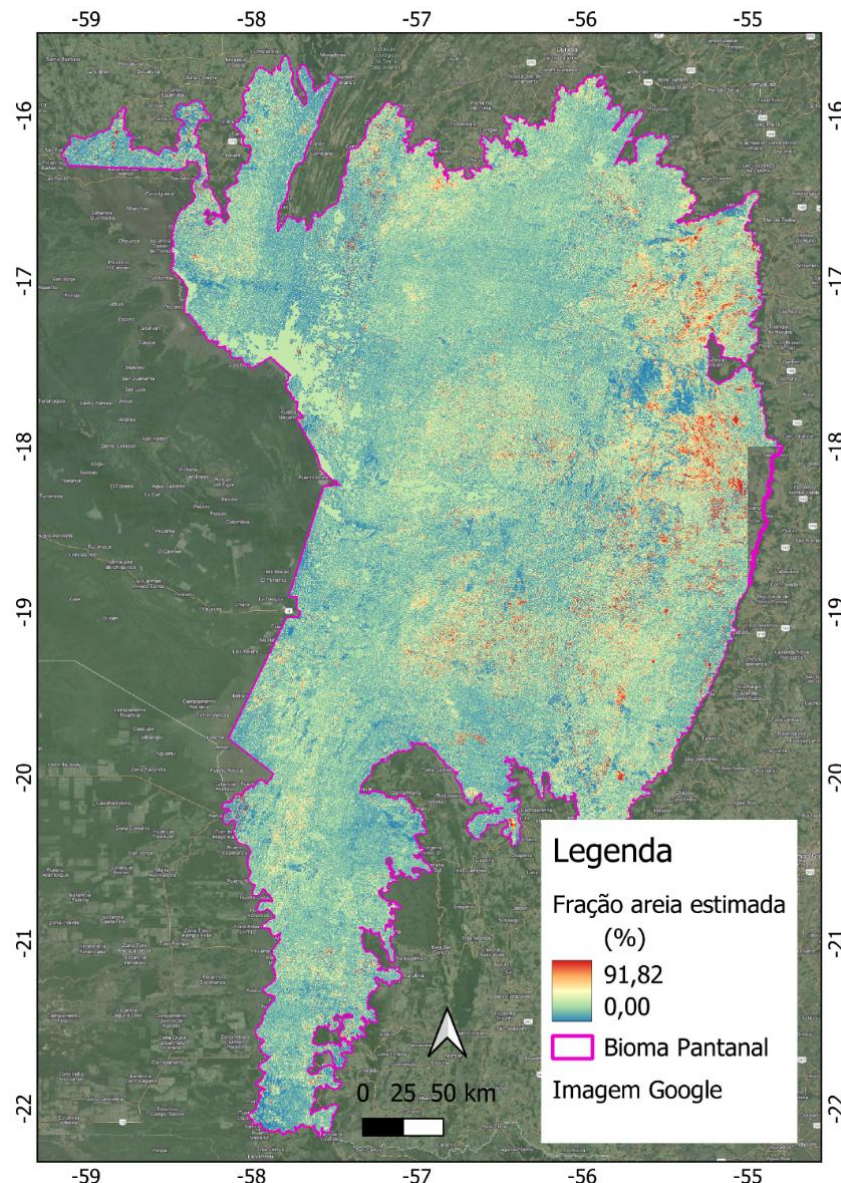


Figura 4 – Estimativa da fração areia da camada superficial do solo para o bioma Pantanal, utilizando dados ASTER GED, com 100 metros de resolução espacial. Uma imagem Google Earth é apresentada como fundo.

Quando foram feitas avaliações qualitativas da estimativa da fração areia (**Figura 5a**) em função das características topográficas do bioma, observou-se indícios de um predomínio de áreas muito arenosas em regiões mais elevadas (**Figura 5b**). Essa relação foi analisada para a área de elevações entre 140 e 160 metros, no centro-leste da área de estudo. Contudo, deve-se investigar melhor esta possibilidade, com amparo de dados de campo. Apparentemente existe um controle associado à altitude, apesar das variações de elevação no Bioma Pantanal serem pequenas (Assine et al., 2014; Kuerten et al., 2013; McGlue et al., 2012). Ao se relacionar os

dados com a drenagem, verificou-se também que as regiões com maiores estimativas de fração areia estavam localizadas em áreas sem a presença constante de água (**Figura 5c**).

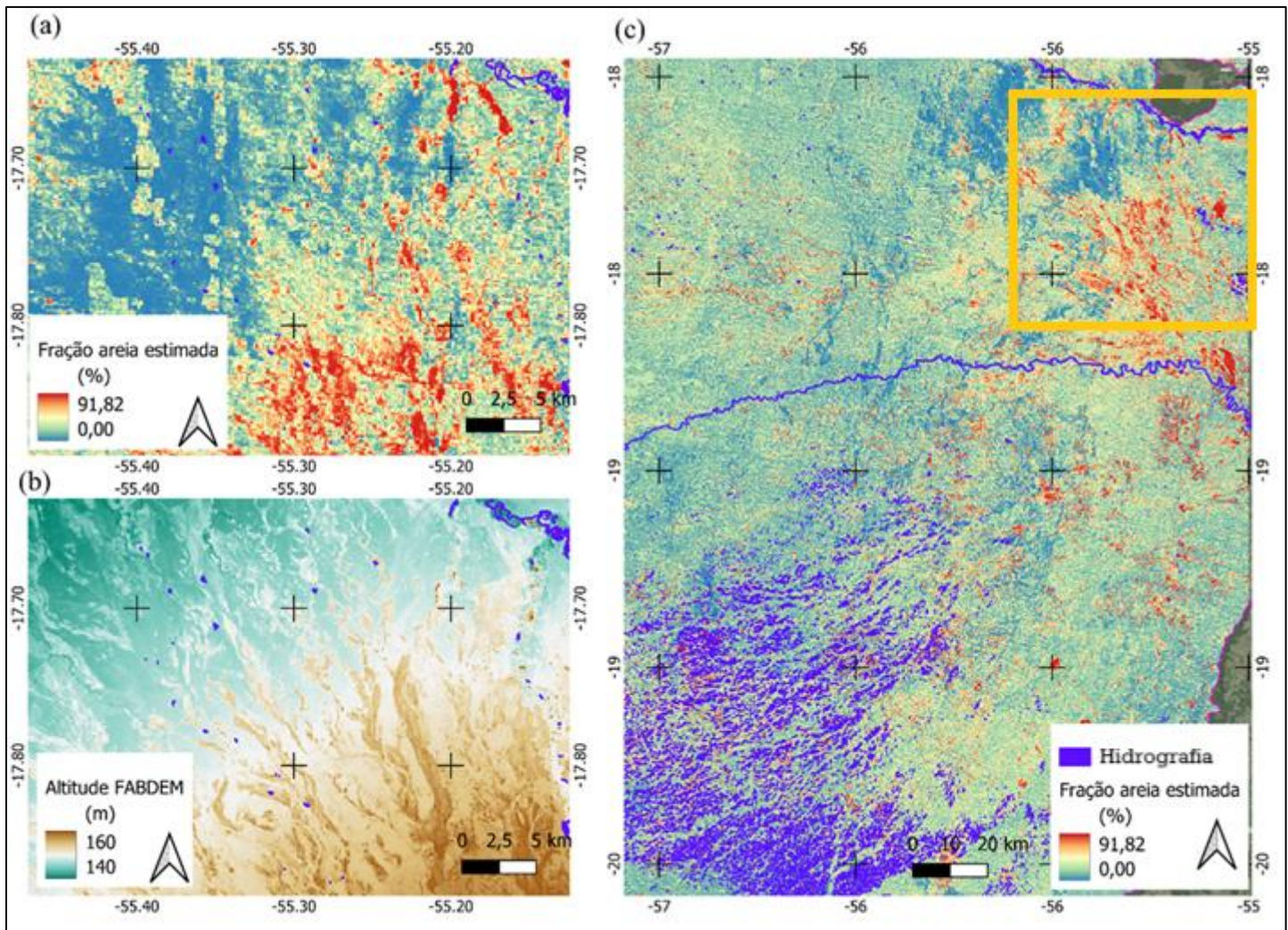


Figura 5 – (a) Comparação da estimativa da fração areia com dados de (b) elevação do modelo FABDEM para o Bioma Pantanal. (c) Sobreposição da drenagem sobre a estimativa da fração areia no Pantanal. O retângulo amarelo da Figura (c) indica a região aproximada destacada nas figuras (a) e (b).

Utilizando dados de alta resolução espacial do Google Earth Pro®, junto com observações de NDVI, de seus desvios-padrões do produto ASTER GED e das estimativas de fração areia, foram selecionados alguns pontos de interesse para validação dos resultados. Os resultados da validação são apresentados para áreas de alta concentração de areia na **Figura 6** (>70% com amostras de campo), como também para áreas de concentração mediana da fração areia (**Figura 7**). Em geral, a expectativa era de que áreas com maior concentração da fração areia na camada superficial dos solos apresentassem menores valores de NDVI e de desvio-padrão. Essa expectativa confirmou-se nos casos examinados, considerando o fato de que áreas com altas concentrações de areia tendem a ser espectralmente mais estáveis ao longo dos anos, resultando em uma

menor variação dos valores de NDVI e, portanto, de seu respectivo desvio-padrão (**Figura 8**). Assim, as manchas com maiores concentrações de areia são mais isotrópicas nas imagens, devido à cobertura esparsa ou rala da vegetação e da menor influência espectral de sua resposta sazonal nas imagens.

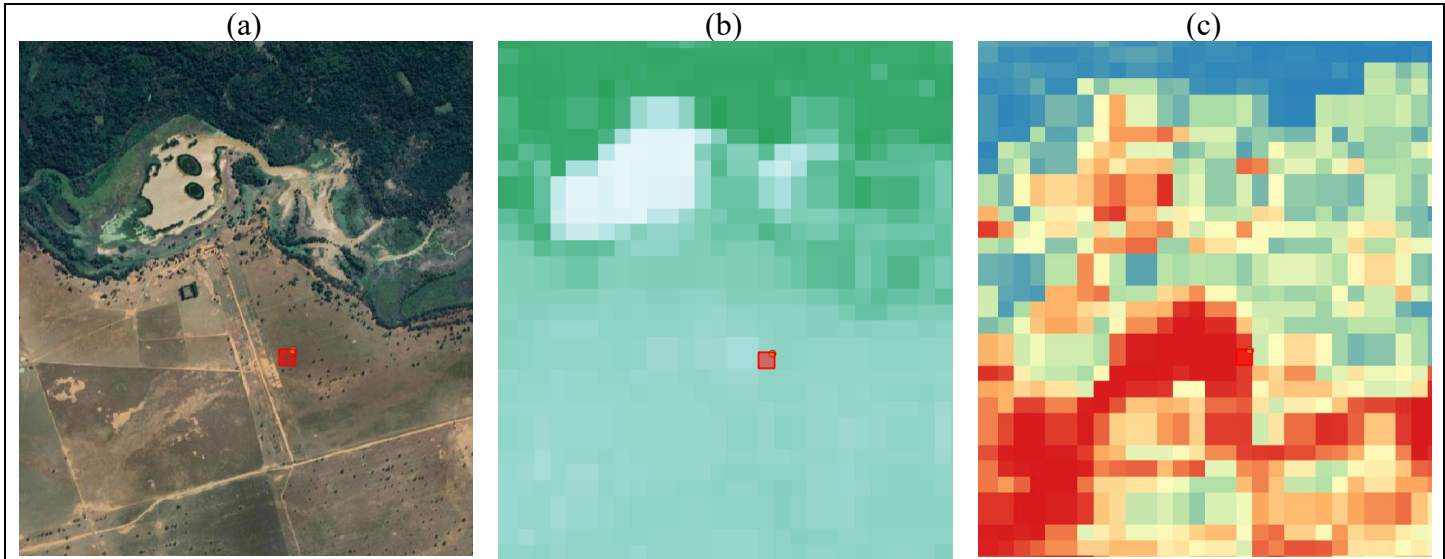


Figura 6 – Processo de validação com base na inspeção de campo de algumas amostras, considerando (a) a composição cor verdadeira; (b) o NDVI médio do produto ASTER GED e; (c) a estimativa da fração areia para a mesma área. Um pixel apresentou uma fração areia estimada de 86% contra um valor medido em amostra de campo de 71% na camada superficial do solo. O NDVI correspondente ao pixel foi de 0,30.

Dentre as limitações a serem destacadas no trabalho, menciona-se a utilização de uma média temporal de nove anos de dados de emissividade. Apesar de representar um padrão de longa data, esse tipo de dado não permite capturar especificamente os padrões de uso e cobertura do solo para cada pixel em cada data de aquisição. Devido as limitações associadas a alta cobertura de nuvens no período chuvoso, os dados tendem ser gerados para a estação seca. Além disso, a dinâmica do manejo do solo se reflete em padrões regulares de manchas de areia, que provavelmente representam a região, mas que devido à integração temporal do produto ASTER GED, não é possível capturar.

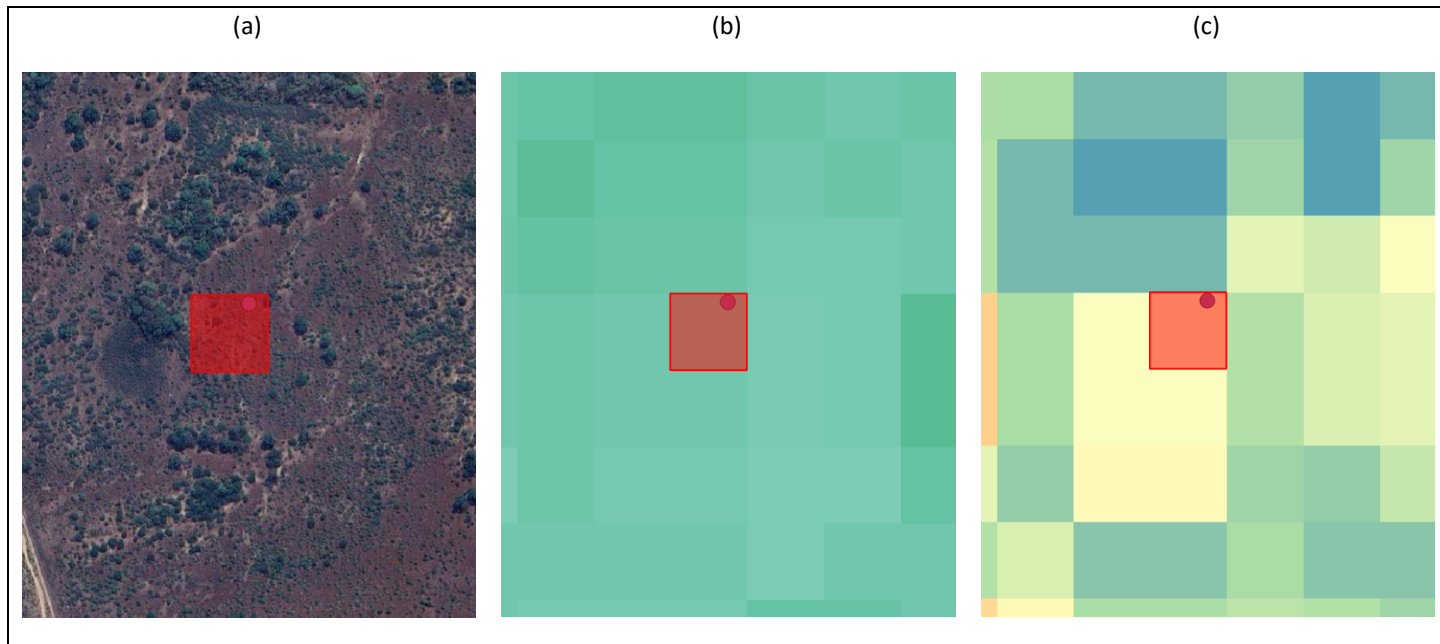


Figura 7 – Validação das amostras da estimativa da fração areia com concentração média de 44%, comparada ao valor medido no local de 40%, e com um NDVI médio de 0,39, em uma região de média concentração de fração areia no horizonte superficial do solo. A composição cor verdadeira, o NDVI médio do produto ASTER GED e a estimativa da fração areia são mostradas em (a), (b) e (c), respectivamente.

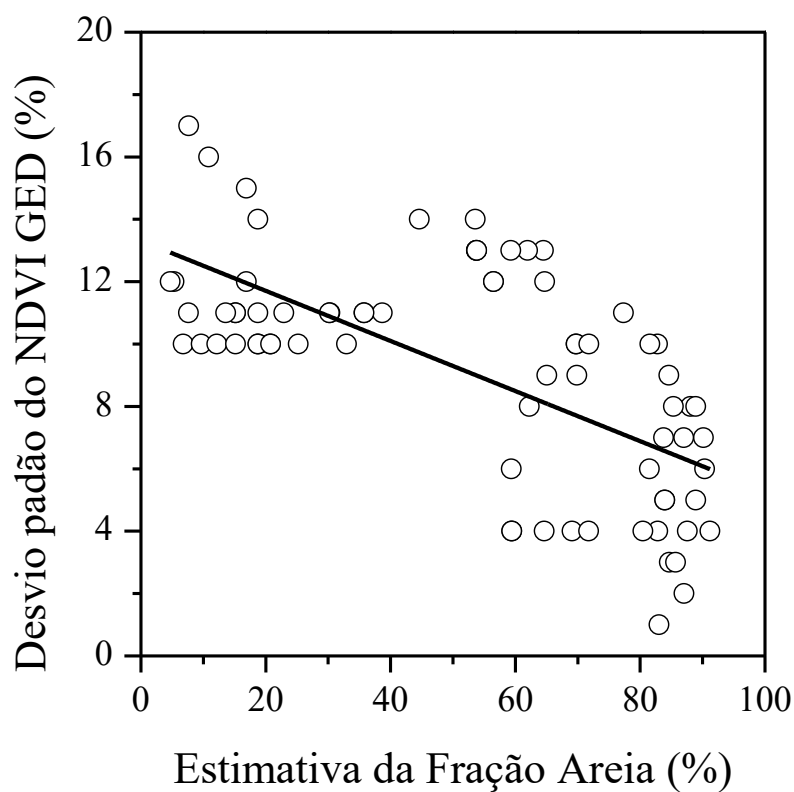


Figura 8 – Variação temporal do desvio padrão para áreas de alta, média e baixa concentração estimada para alguns pixels na área de estudo. Os valores de concentração média em campo são apresentados na figura de forma complementar.

IV. CONCLUSÕES

O estudo mostrou o potencial do uso de dados de emissividade ASTER GED para a estimativa da fração areia da camada superficial dos solos do Bioma Pantanal. Os resultados indicaram a ocorrência de áreas com maior concentração de areia nas regiões centro, leste e sul, coincidindo com as regiões de maior elevação do bioma.

As áreas de alta concentração estimada de fração areia apresentaram um padrão sazonal de menor variabilidade de NDVI, e um caráter mais isotrópico de emissividade. Este resultado indica potencial importante do uso desses dados para estimar a fração areia dos leques aluviais muito comuns nesse bioma e para avaliar a dinâmica de movimentação dos sedimentos e dos riscos de degradação da terra.

Os resultados desta investigação foram validados de forma indireta com dados de campo disponíveis na literatura, imagens de alta resolução espacial do espectro refletido e dados de NDVI. Deve-se considerar, no entanto, a necessidade de futuras validações mais elaboradas e a realização de cruzamentos das estimativas com dados pedológicos e mapeamentos de campo.

A utilização de sensores TIR, juntamente com imagens de alta resolução nas faixas VNIR e SWIR, é recomendada para trabalhos futuros. Entre os dados a serem explorados, destacam-se aqueles produzidos por missões como as do ECOSTRESS, SDGSat-1 e Constellr.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ, processos 113769/2018-0, 309030/2017-0, 317538/2021-7, 305452/2023-1, 302449/2022-1); Fundação Araucária (PI 13/2022, protocolo número UFP2022251000030); a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), 001.

V. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Avaliação da proposta de Declaração de situação crítica de escassez quantitativa dos recursos hídricos na Região Hidrográfica do Paraguai. Nota técnica conjunta nº3/2024/SRE/SOE/SHE/SGH/SFI. Documento n. 02500.023156/2024-39. Brasília: ANA, 2024. p. 17. Disponível em: <<https://verificaassinatura.ana.gov.br/ler.aspx?file=1D980439>>. Acesso em: 27 jan. 2025.

ASSINE, M. L.; CORRADINI, F. A.; PUPIM, F. N.; MCGLUE, M. M. Channel arrangements and depositional styles in the São Lourenço fluvial megafan, Brazilian Pantanal wetland. *Sedimentary Geology*, v. 301, p. 172-184, 2014.

BECK, H. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; LUTSKO, N. J.; DUFOUR, A.; ZENG, Z.; JIANG, X.; VAN

DIJK, A. I. J. M.; MIRELLES, D. G. High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901 – 2099 based on constrained CMIP6 projections. *Scientific Data*, v. 10, n. 1, 724, 2023.

BERGIER, I.; ASSINE, M. L. Potenciais efeitos da mudança do clima sobre a hidrologia do Pantanal. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2016. p. 2. Disponível em: <http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/online/ADM161>. Acesso em: 29 jul. 2024.

BOIN, M. N.; MARTINS, P. C. S.; DA SILVA, C. A.; SALGADO, A. A. R. Pantanal: the brazilian wetlands. In: SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C.; PAISANI, J. C. The physical geography of Brazil: environment, vegetation and landscape. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019. cap. 5, p. 75-91.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretária-geral. Projeto RADAMBRASIL. Folha SE.21 Corumbá e parte da Folha SE.20; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1982. 452 p. 5 mapas (Levantamento de Recursos Naturais, 27).

BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; DAMI, M.; DALAGNOL, R.; SAMPAIO, T. V.; TRENTIN, R. Thermal remote sensing application on brazilian subtropical region to identify sandinization processes. In: EUROPEAN ASSOCIATION OF REMOTE SENSING LABORATORIES (EARSeL) SYMPOSIUM, 43. 2024, Manchester. Proceedings... Manchester: EARSeL, 2024. p. 1-4.

BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R. Detection of sandy soil surfaces using ASTER-derived reflectance, emissivity and elevation data: potential for the identification of land degradation. *International Journal of Remote Sensing*, v. 29, n. 6, p. 1833-1840, 2008.

BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; COUTO, E. G. The combined use of reflectance, emissivity and elevation Aster/Terra data for tropical soil studies. *Revista Brasileira de ciência do solo*, v. 33, n. 6, p. 1785-1794, 2009.

CARDOSO, E. L.; SANTOS, S. A.; URBANETZ, C.; CARVALHO FILHO, A. C.; NAIME, U. J.; SILVA, M. L. N.; CURI, N. Relação Entre Solos e Unidades da Paisagem no Ecossistema Pantanal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 9, p. 1231-1240, 2016.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FREITAS, D. A. F. D. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul-Mato-Grossense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 613-622, 2011.

CHEN, S.; REN, H.; LIU, R.; TAO, Y.; ZHENG, Y.; LIU, H. (2021). Mapping sandy land using the new sand differential emissivity index from thermal infrared emissivity data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 59, n. 7, p. 5464–5478, 2021.

CORINGA, E. D. A. O.; COUTO, E. G.; OTERO PEREZ, X. L.; TORRADO, P. V. Atributos de solos hidromórficos no Pantanal Norte Matogrossense. *Acta Amazonica*, v. 42, p. 19-28, 2012.

EARTH REMOTE SENSING DATA ANALYSIS CENTER (ERSDAC). ASTER User's Guide Part II Level 1 Data Products Version 5.1. 2007. p. 66. Disponível em: <http://www.science.aster.ersdac.or.jp/en/documnts/users_guide/index.html>. Acesso em: 29 jul. 2024.

FREITAS, C. A.; GOULART, D. D.; ALVES, F. D. O processo de arenização no sudoeste do Rio Grande do Sul: uma alternativa para o seu desenvolvimento socioeconômico. Porto Alegre: Fundação Estadual de Estatística, 2003. p. 16. Disponível em: <http://www.fee.rs.gov.br/sitefee/download/eeg/1/mesa_11_freitas_goulart_alves.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2024.

GARCIA, L. C.; SZABO, J. K.; ROQUE, F. O.; PEREIRA, A. M. M.; CUNHA, C. N.; DAMASCENO-JÚNIOR, G. A.; MORATO, R. G.; TOMAS, W. M.; LIBONATI, R.; RIBEIRO, D. B. Record-breaking wildfires in the world's largest continuous tropical wetland: Integrative fire management is urgently needed for both biodiversity and humans. *Journal of Environmental Management*, v. 293, 2021.

GILLESPIE, A.; ROKUGAWA, S.; HOOK, S.; MATSUNAGA, T.; KAHLE, A. B. Temperature/emissivity separation algorithm theoretical basis document. Version 2.4. Pasadena, 1999. Disponível em: <http://www.science.aster.ersdac.or.jp/en/documnts/pdf/2b0304.pdf>.

GILLESPIE, A.; ROKUGAWA, S.; MATSUNAGA, T.; STEVEN COTHERN, J.; HOOK, S.; KAHLE, A. B. A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36, n. 4, p. 1113–1126, 1998.

GUO, H.; DOU, C.; CHEN, H.; LIU, J.; FU, B.; LI, X.; ZOU, Z.; LIANG, D. SDGSAT-1: the world's first scientific satellite for sustainable development goals. *Science Bulletin*, v. 68, n. 1, p. 34–38, 2023.

HAWKER, L.; UHE, P.; PAULO, L.; SOSA, J.; SAVAGE, J.; SAMPSON, C.; NEAL, J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, v. 17, n. 2, 2022.

HULLEY, G. C.; HOOK, S. J. Generating consistent land surface temperature and emissivity products between ASTER and MODIS data for earth science research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 49, n. 4, p. 1304–1315. 2011.

HULLEY, G. C.; HOOK, S. J.; ABBOTT, E.; MALAKAR, N.; ISLAM, T.; ABRAMS, M. The ASTER Global Emissivity Dataset (ASTER GED): Mapping Earth's emissivity at 100-meter spatial scale. *Geophysical Research Letters*, v. 42, n. 19, p. 7966–7976, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). PRODES Bioma Pantanal. São José dos Campos: INPE, 2024. Disponível em: <<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/home>>. Acesso em: 29 jul. 2023.

KUERTEN, S.; PAROLIN, M.; ASSINE, M. L.; MCGLUE, M. M. Sponge spicules indicate holocene environmental changes on the Nabileque River floodplain, Southern Pantanal, Brazil. *Journal of Paleolimnology*, v. 49, n. 2, p. 171–183, 2013.

LEAL FILHO, W.; AZEITEIRO, U. M.; SALVIA, A. L.; FRITZEN, B.; LIBONATI, R. Fire in paradise: why the Pantanal is burning. *Environmental Science and Policy*, v. 123, p. 31–34, 2021.

LIBONATI, R.; GEIRINHAS, J. O. L.; SILVA, P. S.; RUSSO, A.; RODRIGUES, J. A.; BELÉM, L. B. C.; ... TRIGO, R. M. (2022). Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. *Environmental Research Letters*, v. 17, n. 1, 2022. DOI: 10.1088/1748-9326/ac462e.

LIBONATI, R.; DA CAMARA, C. C.; PERES, L. F.; DE CARVALHO, L. A. S.; GARCIA, L. C. Rescue Brazil's burning Pantanal wetlands. *Nature*, v. 588, n. 7837, p. 217–219, 2020.

LIBONATI, R.; GEIRINHAS, J. L.; SILVA, P. S.; RUSSO, A.; RODRIGUES, J. A.; BELÉM, L. B. C.; NOGUEIRA, J.; ROQUE, F. O.; DACAMARA, C. C.; NUNES, A. M. B.; MARENGO, J. A.; TRIGO, R. M. Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. *Environmental Research Letters*, v. 17, n. 1, 2022.

MCGLUE, M. M.; SILVA, A.; ZANI, H.; CORRADINI, F. A.; PAROLIN, M.; ABEL, E. J.; ... RASBOLD, G. G. Lacustrine Records of Holocene Flood Pulse Dynamics in the Upper Paraguay River Watershed (Pantanal Wetlands, Brazil).

Quaternary Research, v. 78, n. 2, p. 285–294, 2012. DOI: 10.1016/j.yqres.2012.05.015.

PEREIRA, N. R.; AMARAL, F. C. S.; ZARONI, M. J.; CARVALHO JUNIOR, W.; BHERING, S. B.; SILVA, E. F.; CUNHA, T. J. F.; CHAGAS, C. S.; GONCALVES, A. O.; AGLIO, M. L. D.; AMORIM, A. M.; DANIEL FILHO, A. C. B.; LOPES, C. H. L.; TAKAGI, J. S. Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do Município de Nioaque, Estado do Mato Grosso do Sul. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. p. 91.

PIRES FILHO, A. M.; DOS SANTOS, H. G.; MOTHCI, E. P.; SOBRAL FILHO, R. M. Levantamento de reconhecimento de média intensidade, avaliação da aptidão agrícola das terras e indicação de culturas em áreas homogêneas de solos de alguns municípios do sudoeste do Estado de Mato Grosso. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1982. p. 484.

PLATNICK, S. Over Thirty Years Reporting on NASA's Earth Science Program. The Earth Observer, v. 35, n. 7, p. 1–34, 2024.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3, Washington, 1973. Proceedings... Washington, 1973.

SALISBURY, J. W.; D'ARIA, D. M. Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 microns atmospheric window. Remote Sensing of Environment, v. 42, n. 2, p. 83–106, 1992b.

SALISBURY, J. W.; D'ARIA, D. M. Infrared (8-14 microns) remote sensing of soil particle size. Remote Sensing of Environment, v. 42, n. 2, p. 157–165, 1992a.

SANTOS, L. J. C.; OLIVEIRA, J. G.; BREUNIG, F. M.; CALEGARI, M. R.; BERRA, E. F.; FIDALSKI, J. Sandy soil spots in northwestern Paraná: approaches for identification and quantification. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 25, n. 4, 2024.

SANTOS, L. J. C.; OLIVEIRA, J. G.; BREUNIG, F. M.; CALEGARI, M. R.; BERRA, E. F.; FIDALSKI, J. Sandy soil spots in northwestern Paraná: approaches for identification and quantification. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 25, n. 4, 2024.

SCHIAVO, J. A.; DIAS NETO, A. H.; PEREIRA, M. G.; ROSSET, J. S.; SEGRETTI, M. L.; PESSENDA, L. C. R. Characterization and classification of soils in the Taquari River Basin - Pantanal Region, State of Mato Grosso do Sul, Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, n. 3, p. 697-708, 2012.

SOARES, A. F.; DA SILVA, J. S. V.; FERRARI, D. L. Solos da paisagem do pantanal brasileiro – adequação para o atual sistema de classificação. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 1, Campo Grande, 2006. Anais... São José dos Campos: INPE, 2006. p. 275-284. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 25, n. 4, 2024.

SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; BALICK, L.; GILLESPIE, A. R.; SABOL, D. A.; GUSTAFSON, W. T. Accuracy of ASTER Level-2 thermal-infrared Standard Products of an agricultural area in Spain. Remote Sensing of Environment, v. 106, n. 2, p. 146–153, 2007.

SOS Pantanal. Seca no Pantanal. Nota Técnica: SOS Pantanal. Disponível em: <https://www.sospantanal.org.br/wp-content/uploads/2024/06/NT-SECA-FINAL.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2024.

SPENGLER, D.; IBRAHIM, E.; ZHANG, T.; TAYMANS, M. Monitoring land surface temperature from space - new perspectives for environmental monitoring. In: EUROPEAN ASSOCIATION OF REMOTE SENSING LABORATORIES (EARSeL) SYMPOSIUM, 43, Manchester, 2024. Proceedings... EARSeL, 2024. p 1-2.

STIEVEN, A.; CAMPOS, D.; MALHEIROS, C.; SILVA, M.; FERREIRA, M.; OLIVEIRA, E.; NETO, N. População e

biomassa microbiana em solo do pantanal matogrossense. Biodiversidade, v. 8, n. 1, 2009.

SUERTEGARAY, D. M. A. O Rio Grande do Sul descobre seus “desertos”. Ciência & Ambiente, v. 1, n. 1, p. 34–52, 1995.

TERRABRASILIS. TerraBrasilis Catalogue. São José dos Campos: INPE, 2019. Disponível em: <<https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/home>>. Acesso em 29 de julho de 2024.

TOMAS, W. M.; ROQUE, F. O.; MORATO, R. G.; MEDICI, P. E.; CHIARAVALLOTI, R. M.; TORTATO, F. R.; PENHA, J. M. F.; IZZO, T. J.; GARCIA, L. C.; LOURIVAL, R. F. F.; GIRARD, P.; ALBUQUERQUE, N. R.; ALMEIDA-GOMES, M.; ANDRADE, M. H. S.; ARAUJO, F. A. S.; ARAUJO, A. C.; ARRUDA, E. C.; ASSUNÇÃO, V. A.; BATTIROLA, L. D.; ... JUNK, W. J. Sustainability agenda for the Pantanal Wetland: perspectives on a collaborative interface for science, policy, and decision-making. Tropical Conservation Science, v. 12, 2019.

ZORZETTO, R. Rios com vontade própria: alterações frequentes de curso deixam cicatrizes na paisagem do Pantanal. Pesquisa FAPESP, p. 43–45, 2015.