

ESTIMATIVA DE UMIDADE SUPERFICIAL DO SOLO POR ÍNDICE ESPECTRAL NO PANTANAL BRASILEIRO

ESTIMATE OF SUPERFICIAL SOIL MOISTURE BY SPECTRAL INDEX IN THE BRAZILIAN PANTANAL

ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD SUPERFICIAL DEL SUELO POR ÍNDICE ESPECTRAL EN EL PANTANAL BRASILEÑO

DOI 10.33360/RGN.2318-2695.2025.i1.p.170-187

Adalto Moreira Braz
Pesquisador Independente
Grupo de Pesquisa Geografia de Paisagens Tropicais (PAISAGEO)
adaltobraz.geografia@gmail.com

Cesar Cardoso Ferreira
Técnico de Laboratório e Professor Colaborador do PPGGEO
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS/CPTL)
cesar.ferreira@ufms.br

Paola Vicentini Boni
Doutora em Geografia
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS/CPTL)
paolavicentiniboni@gmail.com

RESUMO

O trabalho trata da estimativa da umidade do solo no Pantanal brasileiro a partir da análise de sua distribuição geográfica aplicando o Índice de Umidade do Solo Transformado (*Transformed Soil Moisture Index* – TSMI). O Pantanal está localizado no Centro-Oeste do Brasil e caracterizado pela sua dinâmica hídrica sazonal, dada principalmente pela disposição geomorfológica considerada como planície alagável. A técnica baseou-se em procedimentos operacionais executados em ambiente destinado à aquisição, armazenamento, manipulação, análise e apresentação de dados georreferenciados, ou seja, um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Deste modo, destacaram-se significativos valores de umidade superficial dos solos principalmente na borda oeste pantaneira, porém, com menor representatividade territorial. Por outro lado, com maior representatividade, os valores considerados como médios para a umidade superficial dos solos, estão distribuídos em todo o bioma.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Geoinformação, Processamento Digital de Imagens, Área Úmida.

ABSTRACT

The work deals with the estimate of soil moisture in the Brazilian Pantanal from the analysis of its geographic distribution using the Transformed Soil Moisture Index - TSMI. The Pantanal is located in the Midwest of Brazil and is characterized by its seasonal water dynamics, given mainly by the geomorphological layout considered as floodplain. The technique was based on operational procedures performed in an environment for the acquisition, storage, manipulation, analysis and presentation of georeferenced data, that is, a Geographic Information System (GIS). In this way, significant values of soil surface moisture stood out, mainly on the western edge of the Pantanal, however, with less territorial representation. On the other hand, with greater representativeness, the values considered as average for the superficial humidity of the soils, are distributed throughout the biome.

Keywords: Remote Sensing, Geoinformation, Digital Image Processing, Wet Area



RESUMEN

El trabajo aborda la estimación de la humedad del suelo en el Pantanal brasileño a partir del análisis de su distribución geográfica, mediante la aplicación del Índice de Humedad del Suelo Transformado (TSMI). Esta región está ubicada en el centro-oeste de Brasil y se caracteriza por una importante dinámica hídrica estacional, originada principalmente por la existencia de un relieve plano asociado a la llanura de inundación del río Paraguay. La técnica utilizada se basa en la aplicación de los procedimientos operativos existentes en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), destinados a la adquisición, almacenamiento, manipulación, análisis y presentación de datos georreferenciados. De esta forma, se destaca la existencia de valores altos de la humedad superficial del suelo, en el borde occidental de la región, aunque con menor representación espacial y por otro lado, con una mayor distribución espacial encontramos, valores considerados como medios para la humedad superficial del suelo, en la mayor parte del bioma.

Palabras clave: Teledetección, Geoinformación, Procesamiento de Imágenes Digitales, Área Húmeda.

1.INTRODUÇÃO

Com influência na dinâmica biológica e hidrológica principalmente nos processos de relacionados com o escoamento superficial, infiltração, evaporação e transpiração da vegetação, a umidade do solo é um aspecto relevante para o funcionamento e interação sistemática no regime hidrológico.

O teor de água no solo é variável no espaço e no tempo, mesmo que em uma mesma unidade pedológica, justificado pela ação de diversos fatores, especialmente associados ao uso e manejo do solo. As variações de umidade do solo podem gerar alterações significativas no balanço da energia da superfície e, em menor proporção para o ciclo hidrológico. Podem influenciar também no balanço de água e energia dada pelos aspectos de calor latente e calor sensível. Assim, a umidade do solo é um parâmetro de suma relevância na modelagem de processos hidrológicos e sua interação com a superfície. Desse modo, os estudos de estimativas de umidade do solo são fundamentais para a compreensão dos processos hidrológicos e pedológicos relacionados à disponibilidade de água nos solos, bem como a sua distribuição espacial (ZENG et al., 2004; ZHAN et al., 2004; ÁVILA, MELLO e Silva, 2010; SAAVEDRA, 2016).

O comportamento espectral dos solos sofre alterações diretas por diversos fatores, dentre os principais estão a cor, umidade, a textura, os teores de matéria orgânica e óxido, dentre outros. Diferente dos solos secos, que tendem a absorver menos energia eletromagnética e ter maior participação na reflectância, os solos quando úmidos (escuras) tendem a absorver mais radiação eletromagnética devido à quantidade de água em sua composição, o que faz com que a sua reflectância seja menor na região espectral do visível e do infravermelho próximo.

Como possibilidade para a determinação de estimativas de umidade do solo, têm-se o sensoriamento remoto, através de imagens de satélite em determinados intervalos espectrais. Nesse sentido, para demonstrar os fluxos de energia na superfície da terra considerando-se a estimativa de umidade do solo, utiliza-se como dados de entrada a combinação das variáveis de índices de



vegetação associados à temperatura da superfície terrestre (*Land Surface Temperature* – LST) (SMITH et al., 1997; SAAVEDRA, 2016).

Conforme avaliado por Baptista e Madeira Netto (2019), a variação na umidade dos solos pode ser complexa diante do seu comportamento espectral. De acordo com os autores, qualquer material que contenha substância absorvedora e que seja umedecido poderá induzir variações de reflectância semelhantes na região visível do espectro. Nesse sentido, a maioria dos solos apresentam coloração mais escuras quando associados a umidade, diferentemente em situações caracterizadas como secos. Isso resulta de um decréscimo na refletância da radiação incidente na região do visível do espectro eletromagnético (EPIPHÂNIO et al., 1992).

No entanto, uma perspectiva da utilização desses produtos em uma variedade de condições ambientais tem sido muitas vezes limitada. A umidade do solo, nesse caso, corresponde à água nas camadas superficiais do solo. Este parâmetro é fortemente afetado por muitos fatores, como a textura do solo, materiais orgânicos, topografia do terreno e a precipitação, bem como o uso e cobertura da terra (DENG et al., 2019).

Os dados de observação da terra a partir de sensores remotos, no âmbito da geoinformação, permitem a derivação de inúmeras outras informações a partir do Processamento Digital de Imagens (PDI). Dentre as possibilidades, encontra-se a geração de índices de estimativa da umidade superficial do solo, bem como a sua representação espacial.

O Pantanal está localizado no Centro-Oeste do Brasil, possui aproximadamente 150.063,25km² de extensão, sendo caracterizado pela sua dinâmica hídrica sazonal, dada principalmente pela disposição geomorfológica considerada como planície alagável com adaptações de ecossistemas brasileiros como Cerrado, Mata Atlântica e Amazônia, bem como, o Chaco boliviano (Figura 1).

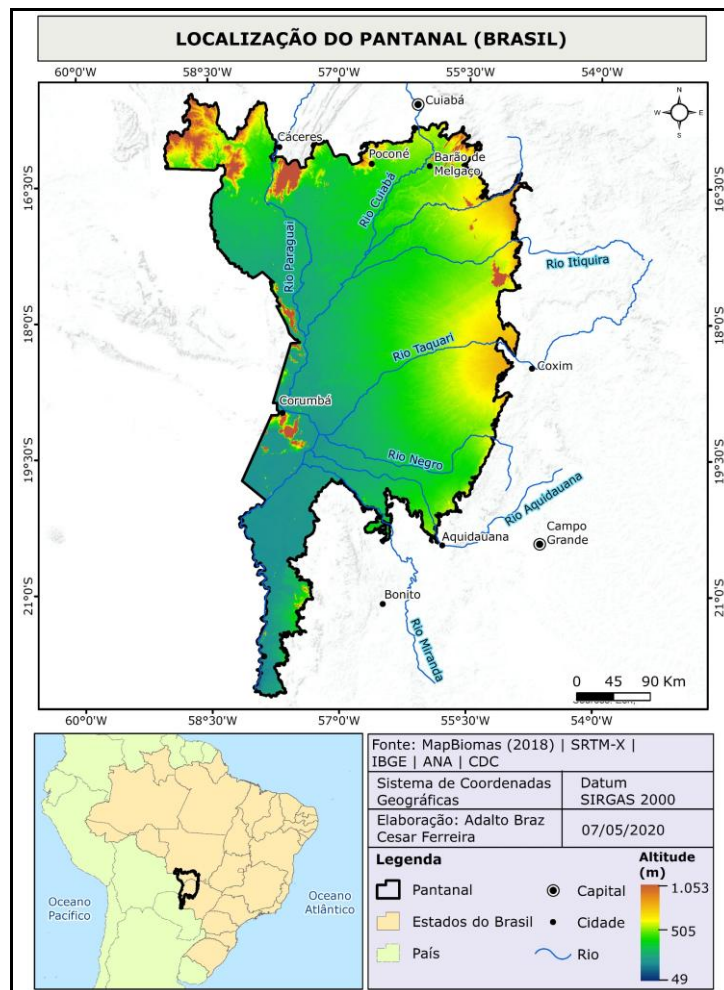
O Pantanal é uma planície sazonalmente inundável e por ser uma extensa área úmida, exerce influência no ciclo hidrológico regional através de sua capacidade de controle e retenção de cheias e de armazenamento de água em seus solos. Isso destaca a capacidade do Pantanal em realizar troca de massa e energia com a atmosfera, a partir da evapotranspiração da região. Além disso, a sazonalidade na inundação de suas terras, caracterizam uma de suas principais singularidades de funcionamento da planície no contexto de umidade dos solos.

A estimativa de umidade superficial dos solos por meio de sensores remotos tem sido aplicada, principalmente, na avaliação do potencial de regiões à agricultura. Entretanto, estimar e monitorar a umidade do solo no Pantanal traz à tona um assunto de grande importância associada principalmente ao funcionamento do ciclo hidrológico. Outro aspecto relevante sobre a determinação da espacialização geográfica da estimativa da umidade dos solos na planície pantaneira, relaciona-se com a influência de tal condição no destino do escoamento superficial e



subsuperficial, na infiltração da água no solo, no ciclo geoquímico de nutrientes, na disponibilização de água na atmosfera, recargas subterrâneas e, mais uma vez, no balanço hídrico global.

Figura 1 - Localização do Pantanal (Brasil).



Fonte: Autores (2019).

Deste modo, justifica-se a escolha do Pantanal para esse estudo devido a sua singularidade no regime de inundações e, consequentemente, umidade dos solos. De um modo geral ressalta-se ainda a motivação pela exploração de novas abordagens para estudos de grandes escalas geográficas envolvendo a umidade dos solos. Tal situação motiva o desenvolvimento de pesquisas para a estimativa da umidade superficial dos solos através de Processamento Digital de Imagens (PDI).

Além disso, mesmo com a relevância de seu regime hidrológico e sua singularidade enquanto área úmida e de relevância internacional, o Pantanal apresenta escassez de pesquisas que considerem a estimativa e distribuição da umidade superficial dos solos desse bioma.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é de estimar a umidade do solo no Pantanal brasileiro e analisar sua distribuição geográfica, a partir da aplicação do Índice de Umidade do Solo Transformado (*Transformed Soil Moisture Index – TSMI*).

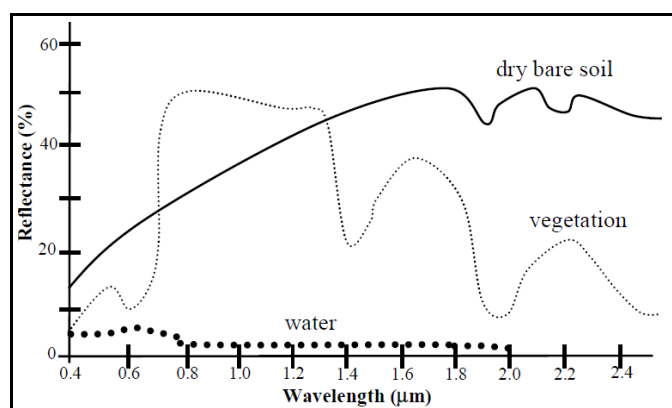
2. PROCEDIMENTOS

Os procedimentos operacionais para a realização deste trabalho foram organizados com as seguintes etapas: 1) aquisição dos dados; 2) Processamento Digital de Imagens (PDI): a) correção atmosférica; b) LST (*Land Surface Temperature*), c) NDWI (*Normalized Difference Water Index*), d) TSMI (*Transformed Moisture Soil Index*).

2.1 Aquisição dos dados

Estudos de Bowers e Hanks (1965) identificaram que à medida que a umidade do solo aumenta, ocorre uma diminuição na sua refletância. Bowers e Smith (1972) explicam que a forma das curvas de refletância são afetadas fortemente pela presença da água, principalmente nas bandas de absorção entre $1,45\mu\text{m}$ e $1,95\mu\text{m}$ (solo seco), conforme figura 2 e ocasionalmente nas bandas de absorção entre $0,97\mu\text{m}$ a $1,2\mu\text{m}$ (solo úmido).

Figura 2 - Refletância espectral de solo exposto seco, vegetação e água.



Fonte: Polidório et al. (2010).

Assim, as imagens utilizadas para o trabalho foram tomadas pelo satélite Landsat-8, sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). As imagens são disponibilizadas gratuitamente através do Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* – USGS) através da plataforma online Earth Explore <<https://earthexplorer.usgs.gov>>. Foram adquiridas 10 cenas imageadas pelos sensores entre 24 e 31/07/2016.

As imagens correspondem aos sensores OLI e TIRS do satélite Landsat-8. A escolha dos dois sensores obedece à demanda de imagens no intervalo do visível (Banda 3 Verde: $0,53 - 0,59\mu\text{m}$; Banda 4 Vermelho: $0,64 - 0,67\mu\text{m}$), infravermelho próximo (Banda 5: $0,85 - 0,88\mu\text{m}$) e infravermelho termal (Banda 10: $10,60 - 11,19\mu\text{m}$), sobretudo pela demanda dos índices a serem gerados.



Em relação ao dado de uso e cobertura da terra, foram adquiridas informações do “Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil” (MapBiomas) coleção 2.3. Tal dado foi fundamental para o entendimento da relação entre umidade superficial dos solos e uso e cobertura da terra no Pantanal.

2.2 Processamento Digital de Imagens (PDI)

Há diferentes propostas de índices para estimativa da umidade superficial do solo a partir do sensoriamento remoto, Narasimhan e Srinivasan (2005) desenvolveram o *Soil Moisture Deficit Index* (SMDI), Wang et al. (2009) utilizaram o *Soil Moisture Index* (SMI), Carrão et al. (2016) propuseram o *Empirical Standardized Moisture Index* (ESSMI), Yaping et al. (2018) utilizaram o *Standardized Soil Moisture Index* (SSI).

Martínez-Fernández et al. (2015), aplicaram o *Soil Water Deficit Index* (SWDI) numa área agrícola da Espanha. Shafian e Maas (2015) sugeriram o *Perpendicular Soil Moisture Index* (PSMI) utilizando bandas espectrais do vermelho (visível), infravermelho próximo e termal. Blyverket et al. (2019) também propuseram o *Standardized Brightness Temperature Index* (STBI) para monitorar as secas, baseando-se em dados passivos de temperatura de brilho na região espectral das micro-ondas. Por fim, Wang e Qu (2009) fazem uma revisão mais ampla de outros índices para estimativa da umidade superficial do solo.

Com base em tais estudos, o Processamento Digital das Imagens (PDI) foi dividido em 5 fases. A primeira fase, do pré-processamento, constou na reprojeção das imagens de satélite, reorientadas para a projeção UTM, datum SIRGAS 2000 e fuso 22 Sul. Posteriormente, todas as 10 cenas foram mosaicadas em um único raster, ocupando 90,7% da área do Pantanal. As demais cenas foram descartadas, pois, foram tomadas em condições atmosférica adversas da maior parte das cenas (e área core) do Pantanal.

Os procedimentos foram realizados no Sistema de Informações Geográficas (SIG) ArcGIS 10.4®, através dos módulos ArcMap e ArcCatalog. Os cálculos de correção atmosférica, grandezas radiométricas e demais índices, foram realizados pela ferramenta *Raster Calculator* presente na ArcToolbox do ArcMap.

2.3 Correção atmosférica

A correção atmosférica constou na conversão dos números digitais (*Digital Numbers – DN*) em grandezas de radiância das bandas 3 (verde – 0,53 a 0,59 μ m), 4 (vermelho – 0,64 a 0,67 μ m), 5 (infravermelho próximo – 0,85 a 0,88 μ m) e 10 (infravermelho termal – 10,60 a 11,19 μ m), conforme a equação 1.



$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + AL \quad (1)$$

Onde, L_{λ} representa a radiância espectral no topo da atmosfera; M_L o fator multiplicativo reescalado da radiância para a banda específica; Q_{cal} o valor do DN do pixel; e AL o fator aditivo reescalado da radiância para a banda usada (USGS, 2019).

Posteriormente, apenas as bandas 3, 4, e 5 foram convertidas de grandezas de radiância para grandezas de reflectância (Equação 2).

$$\rho_{\lambda}' = M_p Q_{cal} + A_p \quad (2)$$

Onde, ρ_{λ} representa a reflectância planetária no topo da atmosfera sem correção do ângulo solar; M_p o fator multiplicativo reescalado da reflectância para a banda específica; Q_{cal} o valor de radiância espectral por pixel; e A_p o fator aditivo reescalado da reflectância para a banda usada (USGS, 2019).

2.4 Land Surface Temperature – LST

A Land Surface Temperature (LST) ou temperatura da superfície terrestre exige o processamento de alguns índices e grandezas obtidas a partir de valores de reflectância ou radiância. Os processamentos indicados abaixo (NDVI, BT, P_v , ε e LST) foram adaptados de Avdan e Jovanovska (2016).

O processamento iniciou a partir do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) ou índice de vegetação por diferença normalizada. Para o NDVI, apropriou-se das imagens corrigidas para reflectância e o índice foi calculado pela razão das bandas espectrais 4 na região do visível (vermelho) e 5 na região do infravermelho próximo. O cálculo leva em consideração a equação 3, conforme proposta de Rouse et al. (1973).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR(5)} - \rho_{RED(4)}}{\rho_{NIR(5)} + \rho_{RED(4)}} \quad (3)$$

Onde, ρ_{NIR} representa a reflectância para banda do infravermelho próximo (*near-infrared*) e ρ_{Red} representa a reflectância para a banda do vermelho.

O resultado do NDVI é um raster com valores entre -1 a 1, onde os valores mais próximos de 1 representam áreas com maiores quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa, enquanto os valores mais próximos de -1 representam áreas com menor quantidade de vegetação fotossinteticamente ativa.

Em continuidade, apropriou-se da banda 10 (infravermelho termal) convertida em radiância para calcular a temperatura de brilho no sensor (*Brightness Temperatura – BT*), conforme equação 4.

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (4)$$



Onde, T é a temperatura em graus Kelvin, $L\lambda$ a radiância espectral, e $K1$ e $K2$ são as constantes de conversão térmica para a banda usada (USGS, 2019).

Em seguida, calculou-se o cálculo de proporção da vegetação (*Proportion of Vegetation* – P_v), utilizando o NDVI, bem como seu valor mínimo e valor máximo (Equação 5).

$$P_v = \frac{NDVI - NDVI_{min.}}{NDVI_{máx.} - NDVI_{min.}} \quad (5)$$

Onde P_v é a proporção da vegetação, NDVI corresponde ao raster do índice de vegetação por diferença normalizada, NDVI min. é o valor mínimo do NDVI extraído do raster e NDVI máx. é o valor máximo do NDVI extraído do raster (WENG, LU e SCHUBRING, 2004; JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2009; WANG et al., 2015; AVDAN e JOVANOVSKA, 2016).

A última grandeza calculada antecedendo a temperatura da superfície foi a emissividade da superfície (*Emissivity* – ε), conforme Equação 6.

$$\varepsilon = 0.004 \times P_v + 0.986 \quad (6)$$

Onde ε é a emissividade da superfície, P_v é a proporção da vegetação, “0,004” e “0,986” são constantes propostas para a equação. A emissividade é importante para estimar a LST, uma vez que a emissividade é um fator de proporcionalidade que dimensiona a radiância dos corpos negros (conforme lei de Planck) para prever a radiação emitida, e é a eficiência de transmitir a energia térmica através da superfície para a atmosfera (SOBRINO, JIMÉNEZES-MUÑOZ e PAOLINI, 2004; JIMÉNEZ-MUÑOZ et al., 2006; WANG et al., 2015; AVDAN e JOVANOVSKA, 2016).

Por fim, a temperatura da superfície (*Land Surface Temperature* – LST) foi calculada a partir da temperatura de brilho (BT) e da emissividade da superfície (ε), conforme equação 7.

$$LST = \frac{BT}{1 + \left[\frac{\lambda \times BT}{\rho} \right] \times \ln \varepsilon} - 273,15 \quad (7)$$

Onde LST é a temperatura da superfície (em graus Kelvin), BT é a temperatura de brilho no sensor (em graus Kelvin), $L\lambda$ que o comprimento de onda da radiação emitida e nessa equação foi assumida a constante “0,00115”, ρ é ($h \times c / \sigma = 1,439 \times 10^{-2}$) mK) resultando na constante “1,4388” e ε representa a emissividade espectral da superfície terrestre (MARKHAM e BARKER, 1985; MARKHAM e BARKER, 2007; AVDAN e JOVANOVSKA, 2016).

Ainda, σ é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$) e c é a velocidade da luz ($2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$) (WHENG, LU e SCHUBRING, 2004; AVDAN e JOVANOVSKA, 2016). A constante 273,15 é utilizada para a conversão de graus Kelvin (K) para graus Celsius (°C).



2.5 Normalized Difference Water Index – NDWI

O índice de água por diferença normalizada (*Normalized Difference Water Index* – NDWI) foi calculado a partir das imagens de reflectância das bandas espectrais 3 na região do visível (verde) e 5 na região do infravermelho próximo. A equação 8 foi proposta por McFeeters (1996).

$$NDWI = \frac{\rho_{GREEN(3)} - \rho_{NIR(5)}}{\rho_{GREEN(3)} + \rho_{NIR(5)}} \quad (8)$$

Onde, ρ_{Green} representa a reflectância para a banda do verde e ρ_{NIR} representa a reflectância para banda do infravermelho próximo (near-Infrared).

O resultado do NDWI é um raster com valores entre -1 a 1, onde as características de água possuem valores mais próximos de 1, enquanto as características de solo e de vegetação possuem valores mais próximos de -1 (McFEETERS, 1996).

2.6 Transformed Soil Moisture Index – TSMI

O Índice de Umidade do Solo Transformado (*Transformed Soil Moisture Index* – TSMI) foi proposto a partir da adaptação do *Soil Moisture Index* (SMI) de Zhan, Qin e Wang (2004) e Whang et al. (2010), e posteriormente aplicado por Lopes et al. (2011). Inicialmente os autores optam por realizar a estimativa através da modelagem da temperatura de brilho (*Brightness Temperature* – BT) e diretamente pelo índice de vegetação por diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI).

A transformação do índice consta, mais precisamente, na substituição do NDVI pelo índice de água por diferença normalizada (*Normalized Difference Water Index* – NDWI) proposto por McFeeters (1996). Enquanto o NDVI é um índice para avaliar a estrutura da vegetação ativa (biomassa), o NDWI é um índice desenvolvido para delinear a presença de água na superfície terrestre, eliminando algumas características da vegetação e do solo (McFEETERS, 1996).

Com relação à BT, essa representa a temperatura de brilho no sensor. O avanço para LST permite representar a temperatura da superfície com maior rigor, agregando a emissividade da superfície e a proporção da vegetação, esses, derivados diretamente do NDVI. Tal fato contribui para amenizar as interferências atmosféricas na temperatura da superfície, quando estimada diretamente pela radiância associada ao pixel (BT).

Desse modo o TSMI é calculado a partir da estimativa de umidade da LST (9) e estimativa de umidade do NDWI (10).

$$TSMI_{LST} = \frac{LST_{max} - LST}{LST_{max} + LST_{min}} \quad (9)$$

Onde LST_{max} e LST_{min} são os valores máximos e mínimos de LST, respectivamente, para a área de estudo.



$$TSMINDWI = 1 - \left(\frac{NDWI_{\max} - NDWI}{NDWI_{\max} + NDWI_{\min}} \right) \quad (10)$$

Onde $NDWI_{\max}$ e $NDWI_{\min}$ são os valores máximos e mínimos de NDWI, respectivamente, para a área de estudo e 1 é a constante necessária para inversão dos valores, pois quanto maior o NDWI maior também será o índice de umidade superficial solo (LOPES et al., 2011; ZHAN, QIN e WANG, 2004; WANG et al., 2010).

Por fim, o TSMI foi estabelecido a partir do cálculo entre $TSMI_{LST}$ e $TSMI_{NDWI}$ (11).

$$TSMI = \left(\frac{TSMI_{LST} + TSMI_{NDWI}}{2} \right) \quad (11)$$

Onde $TSMI_{LST}$ é o índice de umidade do solo derivado da temperatura de superfície e o $TSMI_{NDWI}$ o índice de umidade do solo derivado do índice de água por diferença normalizada (LOPES et al., 2011; ZHAN, QIN e WANG, 2004).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

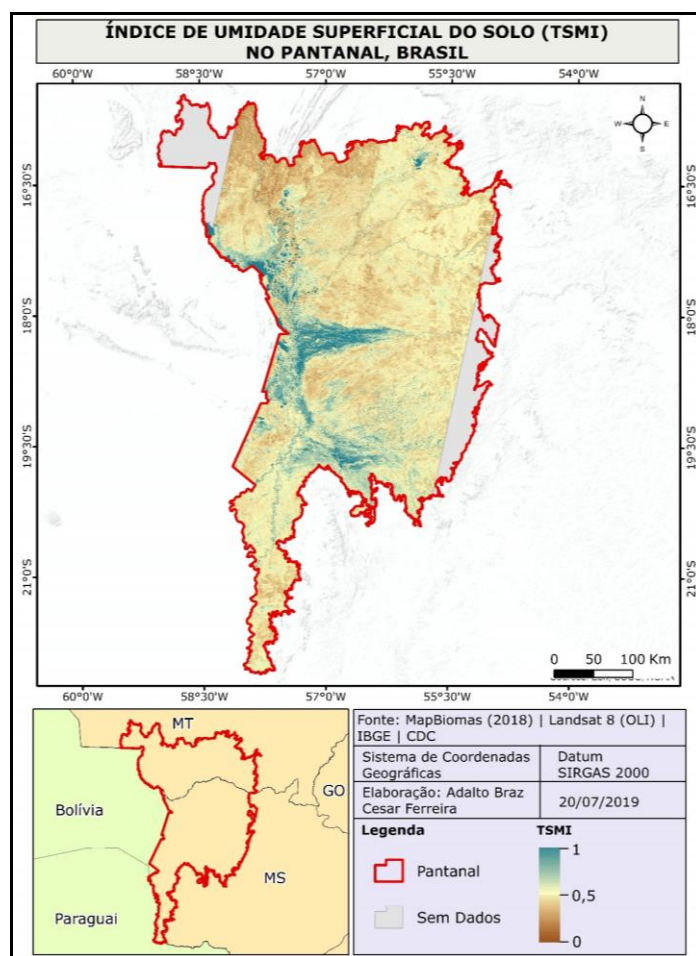
Sendo o *Transformed Soil Moisture Index* (TSMI) um índice normalizado, este apresenta seu resultado variando de 0 a 1, ou seja, áreas que apresentam menores proporções de umidade superficial do solo até áreas que caracterizadas como tendo alta umidade superficial no solo, respectivamente. No Pantanal destacou-se principalmente sua borda oeste, indicando significativa umidade superficial dos solos, com valores desde 0,67 a 0,91, porém, com menor representatividade territorial. Valores entre 0,55 a 0,63, indicando média umidade dos solos no contexto do Pantanal, são encontradas distribuídas ao longo de todo o limite Pantanal (Figura 3).

É importante destacar que o TSMI apresentou valores mínimos de 0,26, indicando presença de umidade superficial nos solos ao longo de toda extensão do Pantanal. Ainda assim, os menores valores do TSMI foram representados de maneira muito restrita, com pequenas áreas a noroeste.

Tal cenário corrobora com o fato de o Pantanal ser um grande bioma destacado por suas áreas úmidas naturais (planície inundável) com a ausência de valores entre 0 a 0,20 do TSMI, que representam solos com pouca ou nenhuma umidade superficial.

Valores de 0,63 a 0,67 são, do ponto de vista da distribuição geográfica, as maiores áreas no que tange aos solos com média umidade superficial. Estão distribuídos ao longo da borda oeste – por entre valores que vão de 0,67 a 0,91, solos mais úmidos superficialmente, fortalecendo a indicação dessa porção como a mais significativa do ponto de vista da umidade superficial dos solos no Pantanal – e se estendem com maior destaque para o sul do Pantanal.

Figura 3 - Índice de umidade superficial do solo (TSMI) no Pantanal, Brasil.



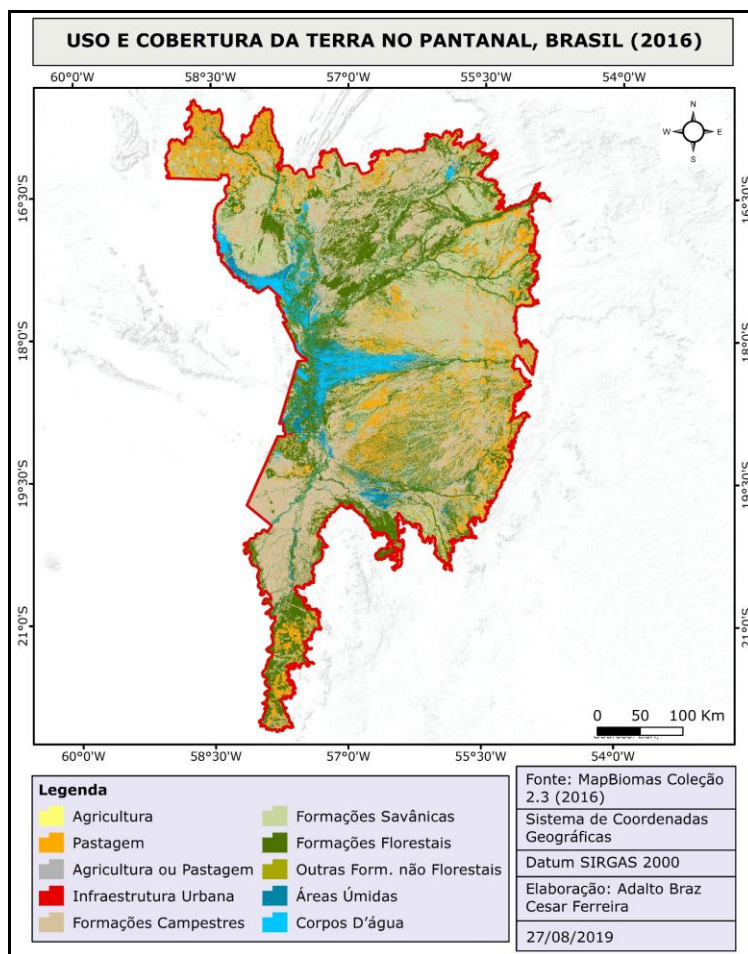
Fonte: Autores (2019).

Um fator relevante na discussão sobre a umidade superficial dos solos é a sua relação com o uso e cobertura da terra. No Pantanal, as classes de maior extensão territorial são formações campestres (5.247.207ha), florestais (3.993.503ha) e savânicas (2.387.871ha), respectivamente. Em seguida, as pastagens são as classes antrópicas de maior magnitude no Pantanal (2.028.909ha) que, juntamente com a formação campestre, movem a economia regional através da pecuária (Figura 4).

Os maiores valores de umidade do solo no Pantanal estão relacionados principalmente com áreas classificadas como corpos d'água (rios, vazantes, lagoas, baías e salinas) e áreas úmidas (campos inundáveis), sobretudo devido aos valores elevados pelo NDWI, por exemplo, as baías de Chacororé e Sinhá Mariana (Figura 5).

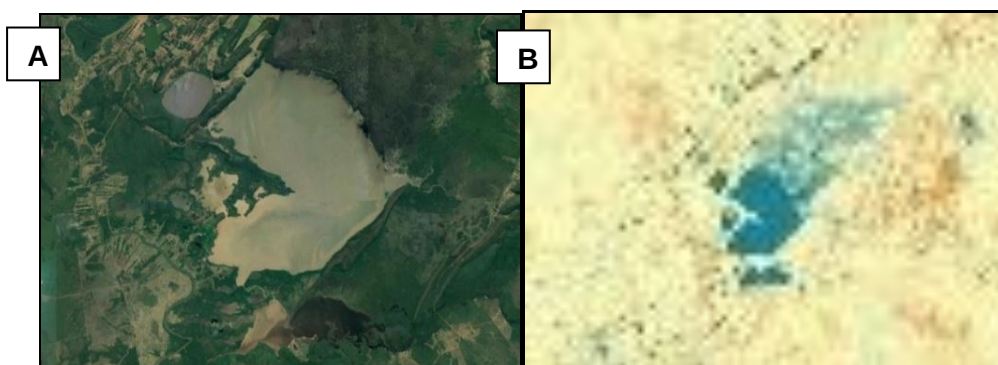


Figura 4 - Uso e cobertura da terra, Pantanal, Brasil.



Fonte: Autores (2018).

Figura 5 - A) Imagem orbital de Chacororé e Sinhá Mariana B) recorte do mapa de umidade superficial do solo no Pantanal.



Fonte: Autores (2020).

Em seguida a formação florestal também se destaca, possivelmente devido à forte relação do dossel com o NDVI (maiores pigmentos fotossinteticamente ativos) e consequentemente à temperatura da superfície (LST), além da associação dessa classe com os corpos d'água (florestas ripárias).



A formação campestre está estreitamente relacionada com valores médios de umidade superficial do solo, e podem ser associadas com as extensas áreas de campos nativos, periodicamente inundados. Em contrapartida, levantou-se a hipótese que os menores índices de umidade estão concentrados ao norte do Pantanal, possivelmente influenciadas devido ao relevo – pela proximidade com o planalto –, já diferenciado da maior parte da planície pantaneira (Tabela 1).

Tabela 1 - Tabulação cruzada das ocorrências de intervalos de umidade superficial do solo por classes de uso e cobertura da terra.

Classe	0,26 a 0,51	0,51 a 0,55	0,55 a 0,59	0,59 a 0,63	0,63 a 0,67	0,67 a 0,71	0,71 a 0,91
Formações Florestais	0,00%	0,10%	7,56%	17,15%	2,17%	0,21%	0,10%
Formações Savânicas	0,00%	0,05%	2,93%	12,05%	0,87%	0,05%	0,00%
Áreas Úmidas	0,00%	0,00%	0,01%	0,21%	1,51%	1,08%	0,13%
Formações Campestres	0,00%	0,11%	8,46%	22,08%	5,12%	0,76%	0,14%
Outras formações não florestais	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Pastagem	0,00%	0,40%	7,19%	3,33%	0,09%	0,00%	0,00%
Agricultura	0,00%	0,02%	0,10%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%
Agricultura ou Pastagem	0,00%	0,03%	0,42%	0,52%	0,04%	0,00%	0,00%
Infraestrutura Urbana	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
Corpos D'água	0,00%	0,00%	0,02%	0,14%	0,50%	1,07%	3,18%

Fonte: Autores (2020).

Outro aspecto relevante é que a umidade superficial dos solos também se relaciona com a caracterização geográfica do Pantanal proposta por Silva e Abdon (1998)¹. É notável a concentração de umidade superficial elevada nos pantanais do Paraguai e Cáceres (ambos na borda oeste do Pantanal), Abobral (quase em sua totalidade), Paiaguás e Miranda (leque do Taquari).

No Pantanal do Paraguai, justifica-se os altos valores de umidade devido à ocorrência dos campos inundados e florestas ripícolas, que acompanham o rio Paraguai e suas planícies fluviais. O Pantanal do Abobral, de acordo com Boni (2020), é uma das primeiras áreas a responder pela dinâmica sazonal de inundação do Pantanal brasileiro, e composto predominantemente por formações campestres (campos inundáveis). O pantanal do Paiaguás concentra os maiores índices de umidade superficial do solo, estando associada ao leque do Taquari, conforme identificado por Assine et al. (2005) e Zani et al. (2009), em seu lobo deposicional².

Além disso, as áreas de maior umidade superficial apresentam solos identificados como Gleissolos e Planossolos. Os Gleissolos estão associados principalmente ao rio Paraguai, por esse ser um rio de planície que ainda não definiu seu leito e, por isso, apresenta uma extensa planície de

¹ Silva e Abdon (1998) propõem onze subdivisões geográficas para pantanal: Cáceres, Poconé, Barão de Melgaço, Paraguai, Paiaguás, Nhecolândia, Abobral, Aquidauana, Miranda, Nabileque e Porto Murtinho.

² “Lobos deposicionais são formas alongadas que expressam o padrão de sedimentação produzido por rede de drenagem distributária, numa dinâmica sedimentar de construção e abandono de lobos” (ZANI et al., 2009, p. 23).



fluvial onde predominam essa ordem de solo sobretudo na borda oeste do Pantanal. Os Planossolos são solos mal drenados (permeabilidade lenta ou muito lenta), típicos de relevo plano ou suave ondulado, em áreas de baixadas, várzeas e depressões, são verdadeiramente solos hidromórficos, cartografados principalmente no centro e a oeste do Pantanal (EMBRAPA, 1999; SOARES, SILVA e FERRARI, 2006).

Em termos de resultados técnicos a estimativa da umidade superficial do solo, através de um índice espectral, o *Transformed Soil Moisture Index* (TSMI) apresentou respostas coerentes às características geográficas do Pantanal, a exemplo da relação com campos úmidos e florestas ripícolas, e solos hidromórficos (Gleissolos e Planossolos).

Diferente de Zhan, Qin e Wang (2004) que aplicaram um índice espectral para estimativa da umidade superficial através de sensoriamento remoto para uma área de semiárido, no platô de Loess chinês ocidental; Wang et al. (2010) que aplicaram numa área predominantemente constituída de pastagem e agricultura; e Lopes et al. (2011) que fizeram para o núcleo de desertificação entre os estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte; este artigo teve como objetivo a aplicação do TSMI para o Pantanal, a partir de adaptações no *Soil Moisture Index* (SMI) utilizado pelos autores supracitados, e que assim como nesses artigos, houve uma boa correspondência para a estimativa da umidade superficial do solo a partir de valores normalizados (0 a 1).

Assim, o sensoriamento remoto possibilitou a consolidação de inúmeras técnicas para observação da terra e de elementos e fenômenos que fazem parte da sua dinâmica. Nos últimos anos, têm aumentado a variedade de satélites e, conseqüentemente, do desenvolvimento de novas técnicas de aplicação. Especialmente sobre os solos, há possibilidades para estimar diferentes características, como a umidade, conteúdo de matéria orgânica, teor de argila, proporção de areia etc., em aplicações que geralmente estão associadas à índices espectrais e relacionadas à vantagem de mensurar amplas áreas continuamente ao longo do tempo.

Deste modo, a utilização de índices espectrais passíveis de aplicação com imagens satélites de distribuição gratuitas, a exemplo do Landsat-8 usado neste artigo, é fundamental para difundir índices espectrais que possam estimar a umidade normalizada superficial do solo, sobretudo em grandes escalas territoriais, onde há pouca expectativa para mensurações de campo, mas que as modelagens podem contribuir na estimativa destes cenários.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Especificamente sobre o *Transformed Soil Moisture Index* (TSMI), a principal adaptação com relação ao *Soil Moisture Index* (SMI) (ZHAN, QIN e WANG, 2004; WHANG et al., 2010; LOPES et al., 2011) foi a substituição de BT pela LST e inclusão do NDWI. Não há pretensão de



proposição de um novo índice, mas com a adaptação, optou-se por especificar que o SMI foi transformado, com a inclusão da LST e substituição do NDVI pelo NDWI na fórmula do índice.

A aplicação no Pantanal apresentou coerência, tendo em vista a ausência de valores abaixo de 0,20. Isso corrobora para uma estimativa aceitável do TSMI, considerando que o Pantanal é uma planície inundável com grandes extensões de áreas úmidas. Embora a proposta do SMI seja considerada como consolidada e já tenha passado por validações na proposta original, com a adaptação para o TSMI, é preciso aplicar estudos específicos de validação e comparação de dados de campo. Além disso, notou-se a relação com os resultados de TSMI com aspectos geográficos como o uso e cobertura da terra, bem como, com a caracterização fisiográfica.

Neste sentido, é importante frisar que, há alguns fatores que reconhecidamente alteram a resposta espectral da superfície terrestre e que podem influenciar diretamente na análise da umidade superficial dos solos através do índice espectral TSMI, tais como: as condições de iluminação, o espalhamento atmosférico, o ângulo de incidência de energia, o ângulo de observação dos alvos terrestres, a variação do relevo e ambientais, dentre outros fatores.

O artigo também aborda a aplicação do índice num período específico e, portanto, é preciso ter atenção ao expandir as datas de aplicação ao longo das estações do ano, e sua variabilidade hídrica, principalmente.

Outro aspecto relevante foi a limitação encontrada em função da diferenciação das características das cenas a noroeste (228/71 e 228/72) e a leste (225/72, 225/73 e 225/74), nas quais, impossibilitaram seu processamento, ou seja, sem dados na análise (*no data*). Essa é uma restrição que ocorre devido às condições atmosféricas e ou climáticas distintas no momento da tomada da imagem pelo sensor.

Entretanto, é possível elencar alguns aspectos favoráveis ao uso do TSMI para estimativa da umidade superficial do solo, tais como: considera-se uma técnica de baixo custo de aplicação; a capacidade de aplicação em extensas áreas; e a possibilidade de implementação de monitoramentos sistemático (devido à resolução temporal dos satélites gratuitos).

Por fim, os aspectos desfavoráveis estão relacionados à alta dependência da cobertura da terra, devido a utilização do LST e, conseqüentemente do NDVI, o que pode superestimar a umidade em áreas de vegetação bem desenvolvida; condições atmosféricas na tomada de imagens pelo sensor (quando da necessidade de criação de mosaicos); e a limitante de estimativa em períodos chuvosos, devido às nuvens; aos aspectos da morfologia do terreno (sombras). Além disso, recomenda-se análises comparativas do TSMI entre períodos de seca e cheia, tendo em vista que a análise deste trabalho se concentrou no mês de julho, historicamente considerado como período seco no Pantanal.



REFERÊNCIAS

- AVDAN, U.; JOVANOVSKA, G. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using Landsat 8 satellite data. **Journal of Sensors**, Pamplona, p. 1-8, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1480307>.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da. Continuidade e distribuição espacial da umidade do solo em Bacia Hidrográfica da Serra da Mantiqueira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, p.1257-1266, 2010.
- ASSINE, M. L.; PADOVANI, C. R.; ZACHARIAS, A. A.; ÂNGULO, R. J.; SOUZA, M. C. Compartimentação geomorfológica, processos de avulsão fluvial e mudanças de curso do rio Taquari, Pantanal Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, vol. 6, n. 1, p. 97-108, 2005.
- BAPTISTA, G. M. M.; MADEIRA NETTO, J. S.; SOUZA, D. T. M. Reflectância dos solos. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. M. (Org.). **Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. p. 163-188.
- BONI, P. V. **Estudo biogeográfico em cordilheiras sob pressão da pecuária no Pantanal do Abobral**. 143 f. 2020. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Três Lagoas, 2020.
- BOWERS, S. A.; HANKS, R. J. Reflection of radiant energy from soils. **Soil Science**, New Brunswick, vol. 100, n. 2, p. 130-138, 1965.
- BOWERS, S. A.; SMITH, S. J. Spectrophotometric determination of soil water content. **Soil Science Society of America Journal**, Corvallis, vol. 36, n. 6, p. 978-980, 1972.
- BLYVERKET, J.; HAMER, P. D.; SCHNEIDER, P.; ALBERGEL, C.; LAHOZ, W. A. Monitoring soil moisture drought over Northern High Latitudes from space. **Remote Sensing**, Bristol, vol.11, n. 1200, Preprints, 2019. DOI:10.3390/rs11101200
- CARRÃO, H.; RUSSO, S.; SEPULCRE-CANTOA, G.; BARBOSA, P. An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, vol. 48, p. 74-84, 2016.
- DENG, K. A. K.; LAMINE, S.; PAVLIDES, A.; PETROPOULOS, G. P.; BAO, Y.; SRIVASTAVA, P. K.; GUAN, Y. Large scale operational soil moisture mapping from passive MW radiometry: SMOS product evaluation in Europe & USA. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, vol. 80, p. 206-217, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.015>
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999.
- EPIPHÂNIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. Projeto Financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP. INPE: São José dos Campos, 1992.



JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; SOBRINO, J. A.; PLAZA, A.; GUANTER, L.; MORENO, J.; Martínez, P. Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: case study of PROBA/CHRIS data over an agricultural area. **Sensors**, Gainesville, vol. 9, n. 2, p. 768-793, 2009.

LOPES, H. L.; CANDEIAS, A. L. B.; ACCIOLY, L. J. O.; SOBRAL, M. C. M. Modelagem de parâmetros biofísicos para desenvolvimento de algoritmo para avaliação e espacialização de risco a desertificação. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v.15, n. 4, p.655-668, 2009.

LOPES, H. L.; ACCIOLY, L. J. O.; SILVA, F. H. B. B.; SOBRAL, M. C. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; CANDEIAS, A. L. B. Espacialização da umidade do solo por meio de temperatura da superfície e índice de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, vol. 15, n. 9, p. 973-980, 2011.

MAPBIOMAS. Coleção 2.3 da Série anual de mapas de cobertura e uso do solo do Brasil, acessado em 20 mar. 2018 através do link: <<http://mapbiomas.org/pages/infra-data>>

MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Spectral characterization of the Landsat Thematic Mapper sensors. **International Journal of Remote Sensing**, Morgantown, vol. 6, n. 5, p. 697-716, 1985.

MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J.; GONZÁLEZ-ZAMORA, A.; SÁNCHEZ, N.; GUMUZZIO, A. A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator. **Journal of Hydrology**, Storrs, vol. 522, p. 265-273, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.051>

McFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, Morgantown, vol. 17, n.7, 1425-1432, 1996. DOI: 10.1080/01431169608948714

NARASIMHAN, B.; SRINIVASAN, R. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring. **Agricultural and Forest Meteorology**, Ontario, vol. 133, p. 69-88, 2005.

POLIDÓRIO, A. M.; FLORES, F. C.; FRANCO, C.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G. Enhancement of terrestrial surface features on high spatial resolution multispectral aerial images. In: SIBGRAPI CONFERENCE ON GRAPHICS, PATTERNS AND IMAGENS, 23., 2010, Gramado. **Proceedins...** New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2010. p. 1-6. DOI:10.1109/SIBGRAPI.2010.46

ROUSE, 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., 1973. Washington. **Proceedings...** Whashington: NASA, 1974. p.309-317.

SAAVEDRA, O. F. C. **Estimativa da umidade do solo através de séries temporais de NDVI e LST na planície de inundação da Ilha do Bananal**. 2016. 65 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 2016.

SHAFIAN, S.; MASS, S. T. Index of soil moisture using raw Landsat image digital count data in Texas High Plains. **Remote Sensing**, Bristol, vol. 7, p. 2352-2372, 2015. DOI: 10.3390/rs70302352. P. 2352-2372

SILVA, N. S. **Estimativa da umidade do solo por sensoriamento remoto no cultivo de feijão com palha em Itai-SP**. 2016. 77 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Botucatu, 2016.



SMITH, J. A.; CHAUHAN, N. S.; SCHMUGGE, T. J.; BALLARD, J. R. Remote sensing of land surface temperature: the directional viewing effect. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Pasadena, v.35, n. 4, p. 972-974, 1997.

SOARES, A. F.; SILVA, J. S. V.; FERRARI, D. L. Solos da paisagem do Pantanal brasileiro – adequação para o atual sistema de classificação. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS DO PANTANAL, 1., 2006, Campo Grande. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2006. p. 275-284.

SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5. **Remote Sensing of Environment**, Ontario, vol. 90, n. 4, p. 434-440, 2004.

United States Geological Survey – USGS. **Using the USGS Landsat Level-1 Data Product**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/using-usgs-landsat-level-1-data-product>>. Acesso em: 22 set. 2018.

WANG, F.; QIN, Z.; SONG, C.; TU, L.; KARNIELI, A.; ZHAO, S. An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. **Remote Sensing**, Bristol, vol. 7, n. 4, pp. 4268-4289, 2015.

WANG, L.; QU, J. J. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: a review. **Frontiers of Earth Science in China**, Xangai, vol. 3, n. 2, p. 237-247, 2009.

WANG, H.; LI, X.; LONG, H.; XU, X.; BAO, Y. Monitoring the effects of land use and cover type changes on soil moisture using remote-sensing data: a case study in China's Yongding River basin. **Catena**, Amsterdam, vol. 82, n. 3, p. 135-145, 2010. doi:10.1016/j.catena.2010.05.008

WENG, Q. H.; LU, D. S.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies, **Remote Sensing of Environment**, Ontario, vol. 89, n. 4, p. 467-483, 2004.

XU, Y.; WANG, L.; ROSS, K. W.; LIU, C.; BERRY, K. Standardized soil moisture index for drought monitoring based on soil moisture active passive observations and 36 years of North American land data assimilation system data: a case study in the Southeast United States. **Remote Sensing**, Bristol, vol. 10, n. 301, p. 1-18, 2018. DOI: 10.3390/rs10020301

ZANI, H.; ASSINE, M. L.; SILVA, A.; CORRADINI, F. A. Redes de drenagem distributária e formas deposicionais no megaleque do Taquari, Pantanal: uma análise baseada no MDE-SRTM. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, vol. 10, n. 2, p. 21-28, 2009.

ZENG, Y.; FENG, Z.; XIANG, N. Assessment of soil moisture using Landsat ETM+ temperature/vegetation index in semiarid environment. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, Pasadena, v.6, p. 4036-4039, 2004.

ZHAN, Z.; QIN, Q.; WANG, X. The application of LST/NDVI index for monitoring land surface moisture in semiarid area. **IEEE Transactions on geosciences and Remote Sensing**, Pasadena, v.3, p.1551-1554, 2004.