

Geotechnology applied to the monitoring of the GI4 hydrographic basin in the sub-middle of the São Francisco river

Haylla R. de A. L. Leonardo*, Daniela M. F. Tavares*, Sylvana M. dos Santos*, Leidjane M. M. de Oliveira*, Suzana M. G. L. Montenegro*

*Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, Pernambuco, Brasil. E-mails:haylla.rebeka@ufpe.br (autor correspondente), daniela.fernandes@ufpe.br, sylvana.santos@ufpe.br, leidjane.oliveira@ufpe.br, suzanam.ufpe@gmail.com

Received 30 October 2021; accepted 30 December 2021

Abstract

Remote sensing techniques consist of relevant indicators in the analysis and monitoring of the behavior of environmental areas, which can influence public health and natural resources. The most relevant indicators in the vegetative and water analysis are the biophysical indices. Thus, the objective of this work is to analyze the area of the hydrographic basin of small inland rivers 4, in the sub-middle region of the São Francisco river, in the state of Pernambuco, for the years 2000 and 2019, applying the processing of biophysical indices. Images of the area, obtained by the satellite TM Landsat 5 for the date 09/24/2000 and OLI Landsat 8 for the date 09/13/2019, were used. Image processing was performed using GRASS and QGIS software. It was evidenced that the SAVI and the IAF indicated vegetation with greater water stress in 2000 than in 2019, corroborating the rainfall at that time. The NDWI and NDBI results also showed a greater predominance of exposed soil areas for the year 2000 compared to the year 2019. The year 2000 had lower surface temperature values than the year 2019. It is noted that the year 2019 presents a response of greater density of vegetation than the year 2000, with greater water input in the vegetation cover. Keywords: Biophysical Indices, Remote sensing, Surface Temperature.

Geotecnologia aplicada no monitoramento da bacia hidrográfica GI4 no submédio do rio São Francisco

Resumo

As técnicas de sensoriamento remoto consistem em relevantes indicadores na análise e monitoramento do comportamento de áreas ambientais, que podem influenciar a saúde pública e os recursos naturais. Os indicadores de maior relevância na análise vegetativa e hídrica são os índices biofísicos. Sendo assim, o objetivo deste trabalho consiste em analisar a área da bacia hidrográfica de pequenos rios interiores 4, na região do submédio do rio São Francisco, no estado de Pernambuco, para os anos de 2000 e 2019, aplicando o processamento de índices biofísicos. Foram utilizadas imagens da área, obtidas pelo satélite TM Landsat 5 para a data 24/09/2000 e OLI Landsat 8 para a data 13/09/2019. Realizou-se o processamento das imagens nos softwares GRASS e QGIS. Evidenciou-se que o SAVI e o IAF indicaram uma vegetação com maior estresse hídrico para o ano de 2000 do que para o ano de 2019, corroborando com os índices pluviométricos da época. Também os resultados do NDWI e do NDBI evidenciaram uma maior predominância de áreas de solo exposto para o ano de 2000 em comparação com o ano de 2019. O ano de 2000 apresentou valores da temperatura da superfície menores que o ano de 2019. Portanto evidencia-se que o ano de 2019 apresenta uma resposta de maior densidade de vegetação que o ano de 2000, com maior aporte hídrico na cobertura vegetal.

Palavras-chave: Índices Biofísicos, Sensoriamento Remoto, Temperatura da Superfície.

1. Introdução

O Sensoriamento Remoto é uma ferramenta que viabiliza o monitoramento das feições terrestres, por meio de sensores a bordo de satélites, possibilitando a análise holística e de baixo custo de grandes áreas da superfície terrestre (Lima et al., 2021). De forma geral, as técnicas de sensoriamento remoto desempenham um papel relevante em vários campos de pesquisa, sendo um elemento importante

na perspectiva de gerar possibilidades de uma interpretação mais acurada entre os elementos do cenário terrestre (Miljković, 2017; Antunes e Ross, 2018). Nesse contexto se inserem os índices de vegetação, em que, segundo Cohen et al. (2003) e Dorigo et al. (2007), o mais difundido é o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). De acordo com Zanzarini et al. (2013), este índice pode ser analisado por meio da interpretação de imagens de sensores remotos e, em particular, por valores

obtidos em diferentes datas, que permitem avaliar a variação da área verde em certo período de tempo. Em termos práticos, de acordo com Silva et al. (2017), a divisão hidrográfica através de bacias ou Unidades de Planejamento é a que oferece melhores condições para a avaliação das potencialidades, disponibilidades e o aproveitamento dos recursos hídricos de uma região.

A relevância na aplicação do sensoriamento remoto é discutida por diversos autores, entre eles Câmara e Medeiros (1998), Pereira et al. (2020), Bandeira e Cruz (2021). Esses autores ratificam que os índices de vegetação constituem ferramentas relevantes para o monitoramento vegetal, destacando-se o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI), que busca estudar os efeitos do solo exposto a partir das imagens selecionadas. O SAVI é usualmente utilizado para ajuste do NDVI em casos onde a superfície não está completamente coberta por vegetação (Huete, 1988), e a cobertura vegetal é diretamente afetada pelas variações sazonais e pelos fatores climáticos. Outro índice importante no âmbito do monitoramento é o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), cuja aplicação, conforme Pereira et al. (2020), se caracteriza pela análise e monitoramento da água presente na cobertura vegetal correlacionando a mesma com o conteúdo foliar, permitindo acompanhar as mudanças na biomassa e avaliar o estresse hídrico da vegetação. Também de grande importância é a Temperatura da Superfície (LST) geoespacializada por imagens orbitais, a exemplo de Oliveira et al. (2017) na bacia hidrográfica do Alto Ipanema em Pernambuco nos anos de 2013, 2015 e 2016 onde detectaram corpos d'água e vegetação nativa.

Essa ferramenta tem sido utilizada em diversas localidades no mundo, sendo que seu emprego em áreas que sofrem com a escassez hídrica é especialmente relevante devido à possibilidade de mitigação dos problemas correlacionados que afetam a qualidade de vida de seus habitantes. Assim sendo, apresenta-se o cenário observado no semiárido pernambucano, em que estudar as alterações que ocorrem é de extrema importância para a formulação de políticas públicas, principalmente àquelas voltadas para o uso da água (França et al., 2020).

O monitoramento da região semiárida de Pernambuco apresenta significativa relevância, conforme Barbosa et al. (2021). Os autores afirmaram que a região é caracterizada por baixa precipitações pluviométricas, ocasionando estresse hídrico na cobertura vegetal e baixo aporte hídrico nos corpos d'água. Em termos de cobertura vegetal, a região semiárida apresenta como principal bioma a Caatinga, caracterizada pela rápida resposta de tais coberturas às precipitações pluviométricas ocorridas. Por outro lado, observa-se que o bioma da Caatinga

vem sendo degradado de maneira exacerbada ao longo do tempo, com medidas de monitoramento, planejamento e gestão ainda insuficientes para o melhor entendimento e controle das atividades antrópicas na região. Diante disso, a importância em aplicar tecnologias de sensoriamento remoto, visando melhoria na qualidade e desenvolvimento de atividades no semiárido brasileiro (Duarte, 1999; Souza et al., 2007), é ainda maior.

Pereira et al. (2019) afirmam que os estudos realizados na Caatinga ainda precisam ser intensificados. Segundo os autores, o uso das Geotecnologias e dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) destacam-se como importantes ferramentas para realizar as análises de monitoramento, devido à alta capacidade de armazenamento de informações e grande poder de processamento de dados que possibilitam realizar o mapeamento do uso e ocupação do solo, e, com isso, fortalecer as ações ambientais, agindo como suporte para os instrumentos jurídicos de controle e fiscalização. Diante do exposto, este estudo tem por finalidade analisar as mudanças ocorridas na cobertura vegetal, o crescimento urbanístico, e os impactos da variabilidade climática na área correspondente à Bacia Hidrográfica de Pequenos Rios Interiores 4 (GI-4) e a um trecho do Rio São Francisco, a partir do processamento de índices espectrais (SAVI, IAF, NDWI, NDBI) e da temperatura de superfície, comparando a variação temporal ocorrida ao longo de 19 anos.

2. Material e métodos

Área de estudo

De acordo com a Apac (2020), o estado de Pernambuco está dividido em 29 Unidades de Planejamento Hídrico (UP), caracterizando assim, a Divisão Hidrográfica Estadual, composta de 13 Bacias Hidrográficas, 06 Grupos de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos (GL1 a GL6), 09 Grupos de Bacias de Pequenos Rios Interiores (GI1 a GI9) e uma bacia de pequenos rios que compõem a rede de drenagem do arquipélago de Fernando de Noronha. A maior parte das grandes bacias hidrográficas pernambucanas situa-se integralmente dentro dos limites do Estado, exceto as bacias dos rios Una, Mundaú, Ipanema e Moxotó que possuem parte de sua área de drenagem no Estado de Alagoas. Além destas, há pequenas bacias compartilhadas com os estados do Ceará (GI9), Paraíba (GL6) e Alagoas (GL5). A área de estudo está localizada na porção sudoeste do estado de Pernambuco, entre as coordenadas 08° 27' 08" e 08° 52' 39" de latitude sul, e 38° 40' 20" e 39° 16' 45" de longitude oeste (Figura 1), e compreende a bacia hidrográfica GI4, que está inserida no grupo de bacias de pequenos rios

interiores pertencente à UP 23.

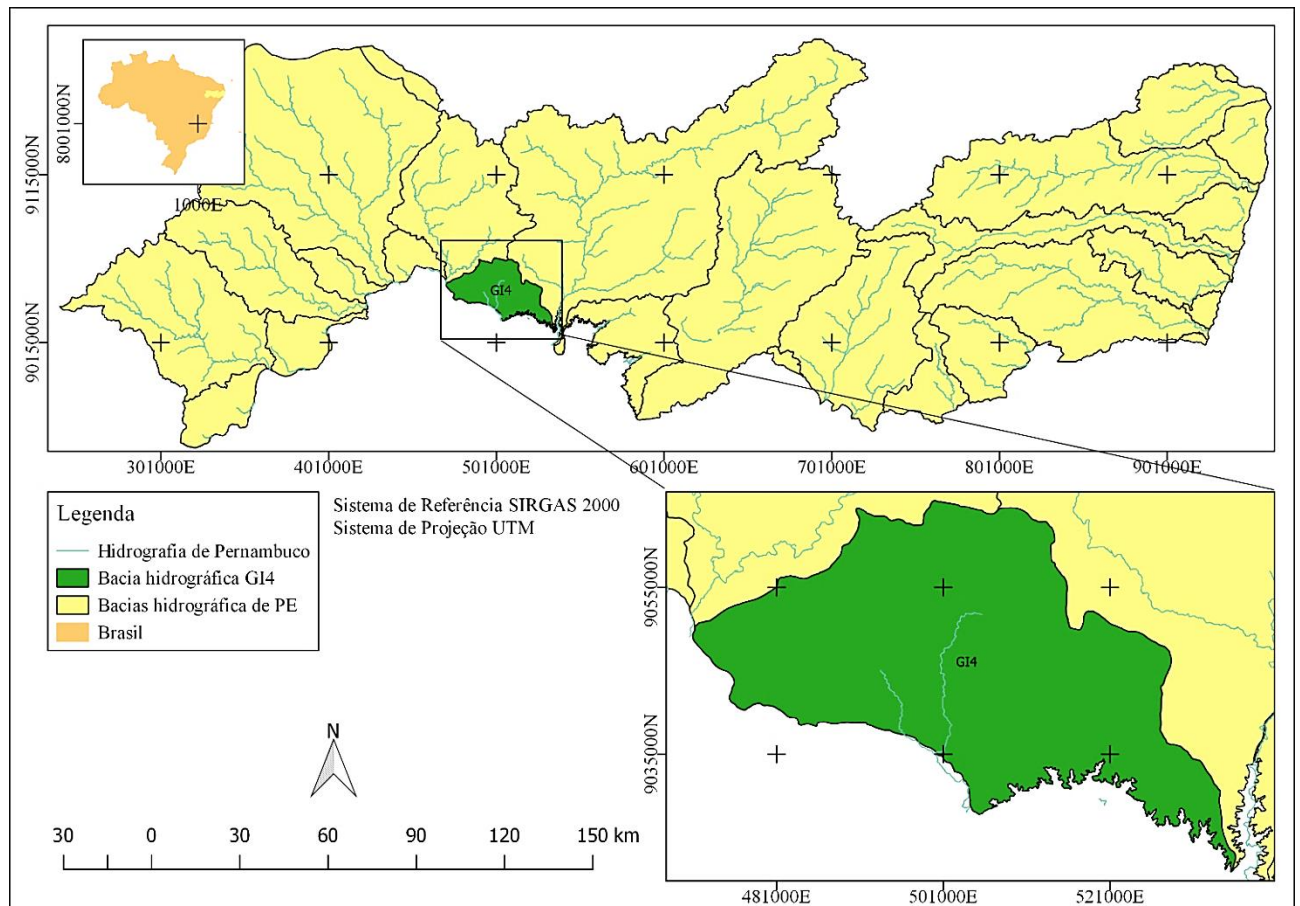


Figura 1 - Localização da área de estudo, Bacia Hidrográfica GI4.

A Bacia Hidrográfica GI4, conforme Apac (2020), compreende uma área de 1.308,72 km² correspondendo a 1,33% da área total do estado de Pernambuco, e sua totalidade está inserida em parte dos municípios de Belém do São Francisco, incluindo sua sede, e Itacuruba. Ainda inseridos na GI4 existem dois reservatórios, o reservatório Bom Viver e o Riacho da Porta com capacidades de 4.200.000 m³ e 6.500.000 m³, respectivamente, e ambos situados no município de Belém do São Francisco. Em relação à hidrografia, a GI4 é formada por diversos rios de pequena extensão que desaguam na barragem de Itaparica, no rio São Francisco. De acordo com a Apac (2020), os principais corpos hídricos da GI4 são: riacho da Porta, Ipueira, de Baixo, da Simpatia, do Mocó, do Cachorro e da Coroa, onde destaca-se a bacia do rio de Baixo que percorre o município de Belém de São Francisco e tem aproximadamente 27 km de extensão. A área em que está situada a bacia GI4 é a região do Submédio São Francisco, abrangendo o município de Remanso (BA) até a barragem de Paulo Afonso (BA), sendo que toda a passagem da bacia do São Francisco por

Pernambuco, está inserida na referida porção do Submédio. Segundo Fay e Silva (2006), o Submédio São Francisco possui um complexo agroindustrial significativo, e concentra cerca de 2,5 milhões de pessoas, em 35 sub-bacias e 73 municípios. Considerando a natureza descrita das atividades de uso e ocupação do solo, podem ocorrer impactos/degradações ambientais na área, indicando, por isso, a necessidade de estudos que contribuam para a elaboração de estratégias de qualidade ambiental envolvendo as questões de agricultura, indústria e projetos urbanísticos.

Distribuição pluviométrica

Os dados de precipitação pluviométrica acumulada mensal (Figura 2) foram obtidos do banco de dados da Agência Pernambucana de Águas e Clima (Apac), referente ao posto 9, que está situado no município de Belém de São Francisco, em Pernambuco. Os dados analisados referem-se ao ano de 2000, correspondente à data da imagem TM Landsat 5, e ao ano de 2019, referentes à data da imagem OLI Landsat 8.

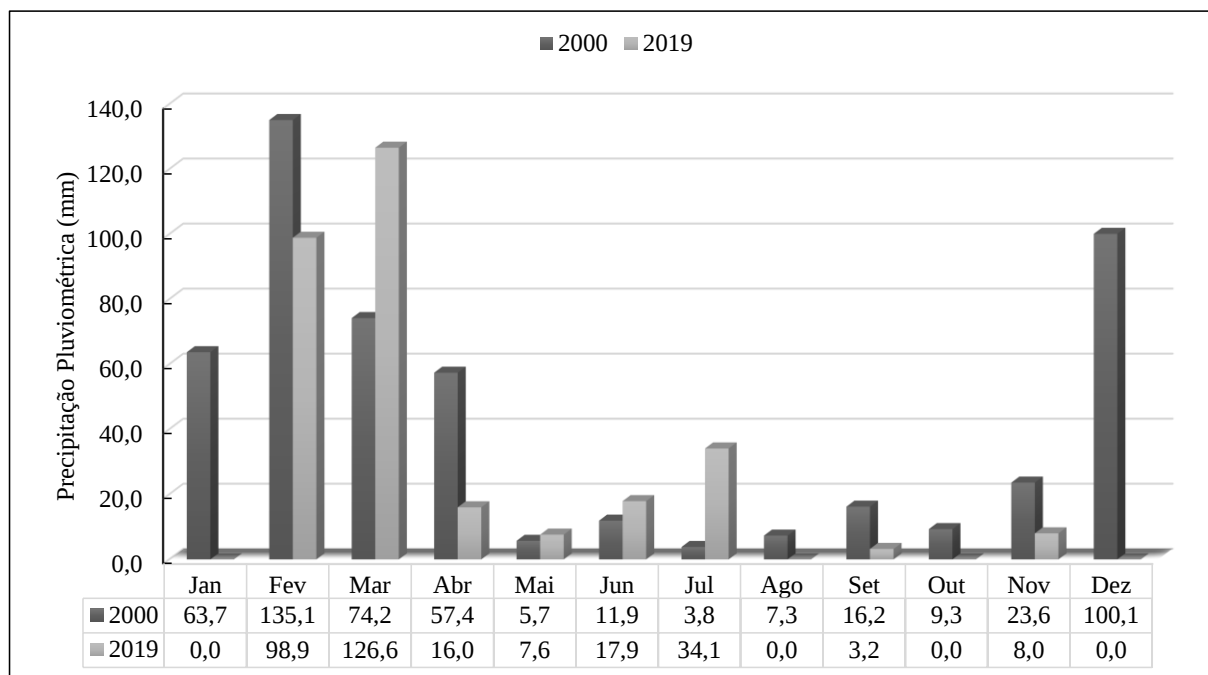


Figura 2 - Precipitação pluviométrica acumulada mensal (mm) dos anos de 2000 e 2019 do município de Belém de São Francisco – PE. Fonte: Apac (2021).

Observou-se que os meses de maio a outubro apresentaram os menores valores de precipitação pluviométrica acumulada para os anos de 2000 e 2019. Também na análise dos dados pluviométricos evidenciou que o ano de 2000 caracterizou-se pela maior ocorrência de eventos chuvosos, totalizando 508,3 mm de precipitação pluviométrica acumulada no respectivo ano, por outro lado, o ano de 2019 totalizou apenas 312,3 mm de precipitação pluviométrica acumulada no ano. Observa-se ainda que no mês de setembro, selecionado para mês de análise, no ano de 2000 ocorreu maior precipitação pluviométrica acumulada

mensal que o mesmo mês do ano 2019.

Pré-processamento

Foram utilizadas as imagens referentes ao dia 24 de setembro de 2000, do satélite Land Remote Sensing Satellite (Landsat 5), sensor Thematic Mapper (TM), órbita 216 e ponto 66, e ao dia 13 de setembro de 2019, do satélite Land Remote Sensing Satellite (Landsat 8), sensor Operational Land Imager composta por bandas espectrais adquiridas gratuitamente através do site do United States Geological Survey (USGS), Tabela 1.

Tabela 1 - Data da imagem, hora e ângulo de elevação do Sol para a órbita 216 e ponto 66.

Data (dd/mm/aaaa)	Hora (UTM)	Ângulo de elevação do sol (rad)
24/09/2000	12:42:05	60,2563
13/09/2019	12:20:09	57,5286

Fonte: USGS (2021).

As imagens orbitais e os arquivos vetoriais foram reprojados para o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), UTM fuso 24 Sul. Em seguida, procedeu-se com o recorte da cena conforme a área de interesse da bacia hidrográfica. A

aquisição dos parâmetros biofísicos SAVI, NDWI, NDBI, IAF e da temperatura de superfície (LST) foi realizada a partir da utilização do software GRASS 7.8. A Figura 3 explicita as etapas realizadas para o processamento digital das imagens e obtenção dos mapas temáticos.

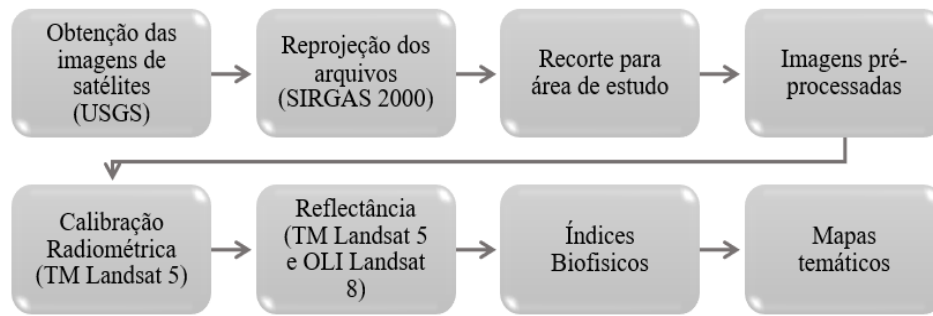


Figura 3 - Fluxograma com as etapas de processamento.

Processamento das imagens do TM Landsat 5

Para o cálculo dos índices foram utilizadas a radiância espectral e a reflectância das bandas 1, 3, 4 e 5 do TM Landsat5. Em primeira instância, realizou-se a calibração radiométrica das imagens de satélite, que corresponde à conversão do número digital (ND) de cada célula de grade (*pixel*) da imagem em radiância espectral ($L_{\lambda i}$), que foi mensurada a partir da Equação 1 proposta por Markham e Baker (1987), utilizando os coeficientes,

referentes à cada banda, estabelecidos por Chander et al. (2009) conforme a Tabela 2.

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad (1)$$

Em que: $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral de cada banda ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), a e b são as constantes de calibração espectral de cada banda do sensor do satélite e correspondem, respectivamente às radiâncias espectrais mínimas e máximas.

Tabela 2 - Dados de comprimento de onda (μm), coeficientes de calibração ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) e irradiância espectral no topo da atmosfera – $K_{\lambda i}$ ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$) das bandas do TM Landsat5.

Bandas	Comprimento de onda (mm)	Coeficientes de calibração ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)		Irradiância espectral no topo da atmosfera – $K_{\lambda i}$ ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$)
		a	b	
1 (Azul)	0,452 – 0,518	-1,52	152,10	1983
3 (V-vermelho)	0,626 – 0,693	-1,17	204,30	1536
4 (IVP – próximo)	0,776 – 0,904	-1,51	206,20	1031
5 (IVM – médio)	1,567 – 1,784	-0,37	27,19	220
6 (IV – Termal)	10,45 – 12,42	1,2378	15,303	-

Fonte: Adaptado de Chander et al. (2009).

Na sequência, procedeu-se com o cálculo da reflectância monocromática de cada banda ($\rho_{\lambda i}$), obtida pela razão entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente, em conformidade com Allen et al. (2002), conforme as Equações 2, 3 e 4:

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{K_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (2)$$

$$\cos Z = \cos \left(\frac{\pi}{2} - E \right) \quad (3)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{DSA \cdot 2\pi}{365} \right) \quad (4)$$

Em que: $\rho_{\lambda i}$ é a reflectância monocromática de cada banda ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral de cada banda ($Wm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), $K_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral no topo da atmosfera ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$), Z é o ângulo zenital (rad), d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol em dado dia do ano, E é o ângulo de elevação do sol (rad) no momento em que a imagem foi capturada pelo sensor a bordo do satélite, e DSA é o dia Juliano do ano.

$2 \mu m^{-1}$), Z é o ângulo zenital (rad), d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol em dado dia do ano, E é o ângulo de elevação do sol (rad) no momento em que a imagem foi capturada pelo sensor a bordo do satélite, e DSA é o dia Juliano do ano.

Processamento das imagens do OLI Landsat 8

Para o processamento das imagens Landsat 8 OLI realizou-se a conversão dos valores quantizados e calibrados, números digitais, do sistema sensor Landsat 8 OLI, para reflectância espectral, em conformidade com Silva et al. (2015), utilizou-se coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens, bem como informações de características do sensor (Tabela 3). Em seguida foi realizado o cálculo da reflectância planetária no topo da atmosfera (ρ_{λ}), com o emprego da Equação 5.

Tabela 3 - Dados de comprimento de onda (μm) e resolução espacial (m x m) das imagens do satélite OLI Landsat8.

Bandas	Comprimento de onda (μm)	Resolução espacial (m x m)
2 (Azul)	0,450 – 0,510	30
4 (V - Vermelho)	0,640 – 0,670	30
5 (IVP – Próximo)	0,850 – 0,880	30
6 (IVM – Médio)	1,570 – 1,650	30
10 (IV – Termal)	10,600 – 11,190	100

Fonte: USGS (2021).

$$\rho_{\lambda} = \frac{M_p * Q_{cal} + A_p}{\cos(\theta_{sz}) \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^2} \quad (5)$$

Em que: M_p é o fator multiplicativo de reescalonamento para cada banda (disponível nos metadados da imagem), Q_{cal} é o número digital para cada *pixel*, A_p é o fator aditivo de reescalonamento para cada banda (disponível nos metadados da imagem), ρ_{λ} corresponde à reflectância planetária no topo da atmosfera corrigida, θ_{sz} corresponde ao ângulo zenital solar local (calculado a partir de $\theta_{sz} = 90^\circ - \theta_{se}$), θ_{se} corresponde ao ângulo de elevação solar e d a distância Terra-Sol (disponível nos metadados da imagem).

Processamento dos índices espectrais

Nesta etapa foram determinados, na sequência: o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), o Índice de Construção por Diferença Normalizada (NDBI), o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), o Índice de Área Foliar (IAF), a emissividade da superfície (ϵ_{NB}), e a Temperatura da Superfície (LST). O NDWI, proposto por Gao (1996), detecta com maior qualidade a mudança da biomassa vegetal no que concerne a quantidade de água em culturas agrícolas, pela configuração do estresse hídrico no ambiente. O NDBI (França et al., 2012) detecta e identifica as áreas urbanas e construídas, baseia-se no incremento da resposta espectral das áreas construídas, em que são obtidos valores entre -1 e 1, sendo que os valores positivos correspondem às áreas construídas. Ambos índices, NDWI e NDBI, são determinados por meio da razão entre as bandas do infravermelho próximo (ρ_{IVP}) e do infravermelho médio (ρ_{IVM}), de acordo com as Equações 6 e 7, respectivamente. Para

calcular o SAVI, utilizou-se a Equação 8, em que L é uma constante apresentada frequentemente na literatura com um valor de 0,5, e ρ_V é a reflectância da banda do vermelho. O IAF é a razão entre a área total de todas as folhas de uma planta e a área do solo representado pela planta, conforme Equação 9. No caso de valores de IAF maiores ou iguais a 3, o valor da emissividade da superfície (ϵ_{NB}), que representa o comportamento da superfície para emissão térmica na faixa relativamente estreita do Landsat (10,4 a 12,5 μm), é 0,98, caso contrário, de acordo com Allen et al. (2002), a referida emissividade é calculada a partir da Equação 10. No cálculo da LST utilizou-se a Equação 11, em que L_{λ} corresponde à radiância espectral da superfície na banda termal do sensor de abertura, e K_1 e K_2 são as constantes de calibração explicitados na Tabela 4.

$$NDWI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{IVM}}{\rho_{IVP} + \rho_{IVM}} \quad (6)$$

$$NDBI = \frac{\rho_{IVM} - \rho_{IVP}}{\rho_{IVM} + \rho_{IVP}} \quad (7)$$

$$SAVI = \frac{(1+L) * (\rho_{IVP} - \rho_V)}{(L + \rho_{IVP} + \rho_V)} \quad (8)$$

$$IAF = - \frac{\ln \left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59} \right)}{0,91} \quad (9)$$

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 * IAF \quad (10)$$

$$LST = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{\epsilon_{NB} * K_1}{L_{\lambda}} + 1 \right)} \quad (11)$$

Tabela 4 - Constantes de calibração para obtenção da Temperatura da Superfície.

Satélite	K_1 ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)	K_2 (K – Kelvin)
TM Landsat 5	607,76	1260,56
OLI Landsat 8	774,89	1321,08

Fonte: Adaptado de Chander et al. (2009).

3. Resultados e discussão

A partir dos dados pluviométricos obtidos para a bacia hidrográfica GI4, Figura 2, fica evidente que o período seco corresponde aos meses de maio a novembro. Assim sendo, considerando que as cenas analisadas se referem às datas de 13/09/2000 e de 24/09/2019, observou-se que os meses antecedentes às imagens utilizadas correspondem ao período seco (quadra que vai de maio a agosto). Comparando o regime pluviométrico antecedente nos dois anos investigados, observou-se que em 2000 o acumulado mensal máximo não superou o montante de 11,9 mm (no mês de junho) e o total acumulado na quadra seca antecedente (maio a agosto) foi de 28,7 mm, enquanto que em 2019, os valores foram de 34,1 mm (no mês de julho) para o acumulado mensal máximo e de 59,6 mm para o total acumulado na quadra seca antecedente (maio a agosto).

A partir da observação do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), Figura 4, fica evidente que houve aumento nas classes que variam entre os valores de 0,119 e 0,228 para 2000 e 2019, respectivamente, indicando maior atividade de

vegetação entre os anos considerados, em conformidade com o comparativo dos respectivos regimes pluviométricos antecedentes. Como o índice de vegetação SAVI utiliza uma metodologia de amortização da interferência do solo, a intensidade da interferência do solo não atrapalha as leituras e é possível detectar as mudanças na vegetação. Segundo as conclusões obtidas por Luz et al. (2021), um fator que pode interferir na densidade da vegetação é a dinâmica pluviométrica de anos anteriores. Nesse contexto, o SAVI explicitou mudanças na presença e densidade da vegetação ao se comparar os cenários de 2000 e de 2019. Além disso, com a suavização do SAVI, conclui-se que as mudanças ocorridas na cobertura vegetal não foram abruptas. Os valores do SAVI para o ano de 2000 variam entre 0,000 e 0,065, coloração vermelha e alaranjada respectivamente, apresentando pontos de coloração verde nas áreas próximas ao rio São Francisco, seus tributários e em alguns reservatórios presentes na bacia. Para o ano de 2019 o SAVI variou entre os valores de 0,065 a 0,174, que indicam áreas mais adensadas por vegetação e com menor incidência de solo exposto.

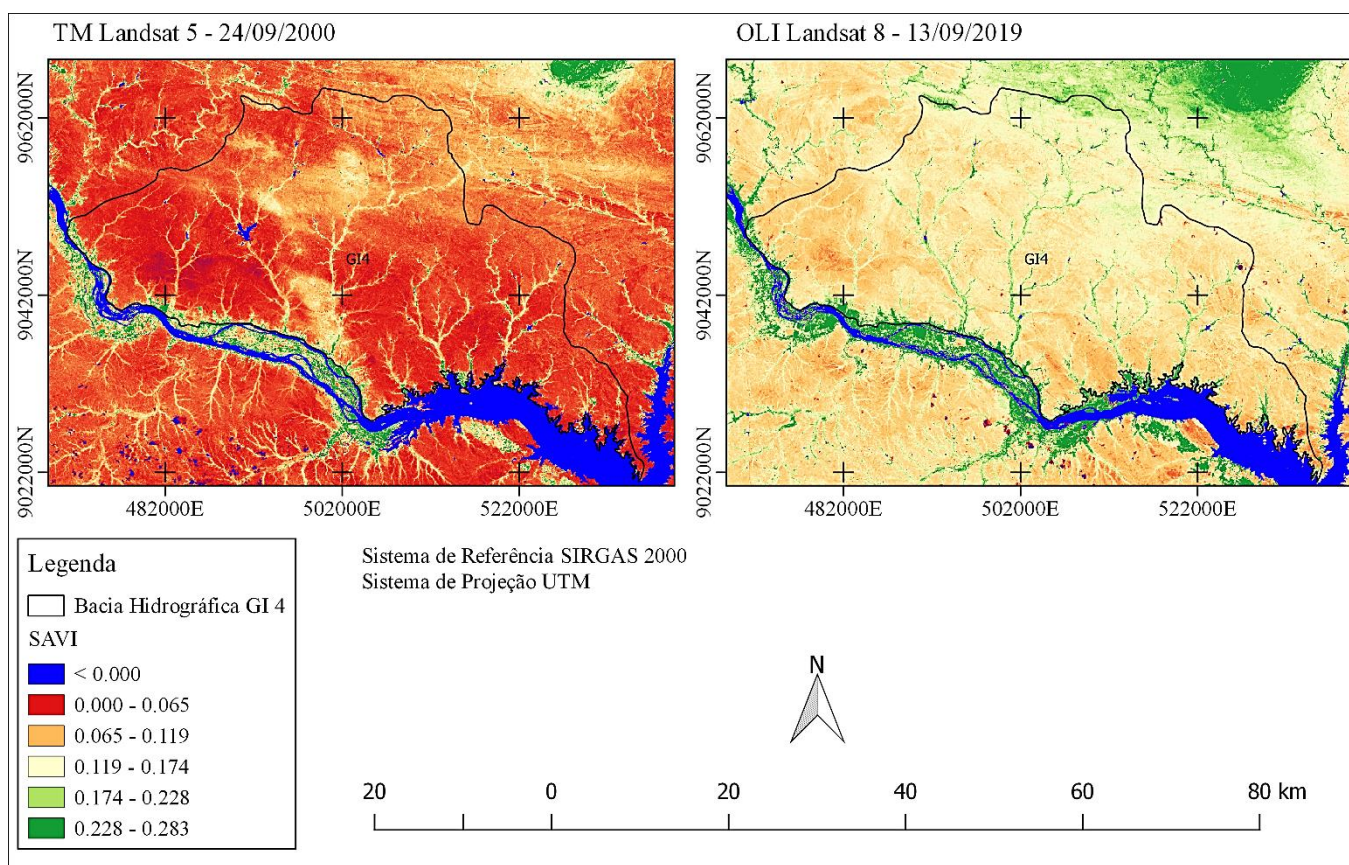


Figura 4 - SAVI da bacia hidrográfica GI4 nas datas de 24/09/2000 e 13/09/2019.

Sobre o Índice de Área Foliar (IAF), segundo Gameiro et al. (2016), o mesmo é utilizado predominantemente para estudo de biomassa vegetal e caracterização de saúde da vegetação. Assim, as

diferenças entre os anos de 2000 e 2019 evidenciam a variação entre os dois fatores supracitados, bem como a influência da precipitação na biomassa vegetal. Para o ano de 2000, o IAF apresentou

valores predominantemente de -0,100 a 0,062 (coloração alaranjada). Seguindo o comportamento do SAVI, o IAF também evidenciou maior densidade vegetativa para o ano de 2019, possibilitando a visualização de maior coloração verde, com classes predominantes variando de 0,062 a 0,358, caracterizando áreas com maior atividade de vegetação (mais saúde e densidade vegetal), Figura 5. Em ambos os cenários, 2000 e 2019, foram observados valores negativos menores que - 0,1

(coloração azul), indicando áreas com presença de água que, neste caso, corresponde a um trecho do Rio São Francisco. As diferenças no comportamento vegetal constatadas ao se comparar as Figuras 4 e 5, e os anos de 2000 e 2019, podem ser compreendidas a partir dos teores de umidade do solo, densidade de dossel e saúde da vegetação, fatores afetados diretamente pelo regime de chuvas, pelo aporte de volume no lençol freático, entre outros fatores.

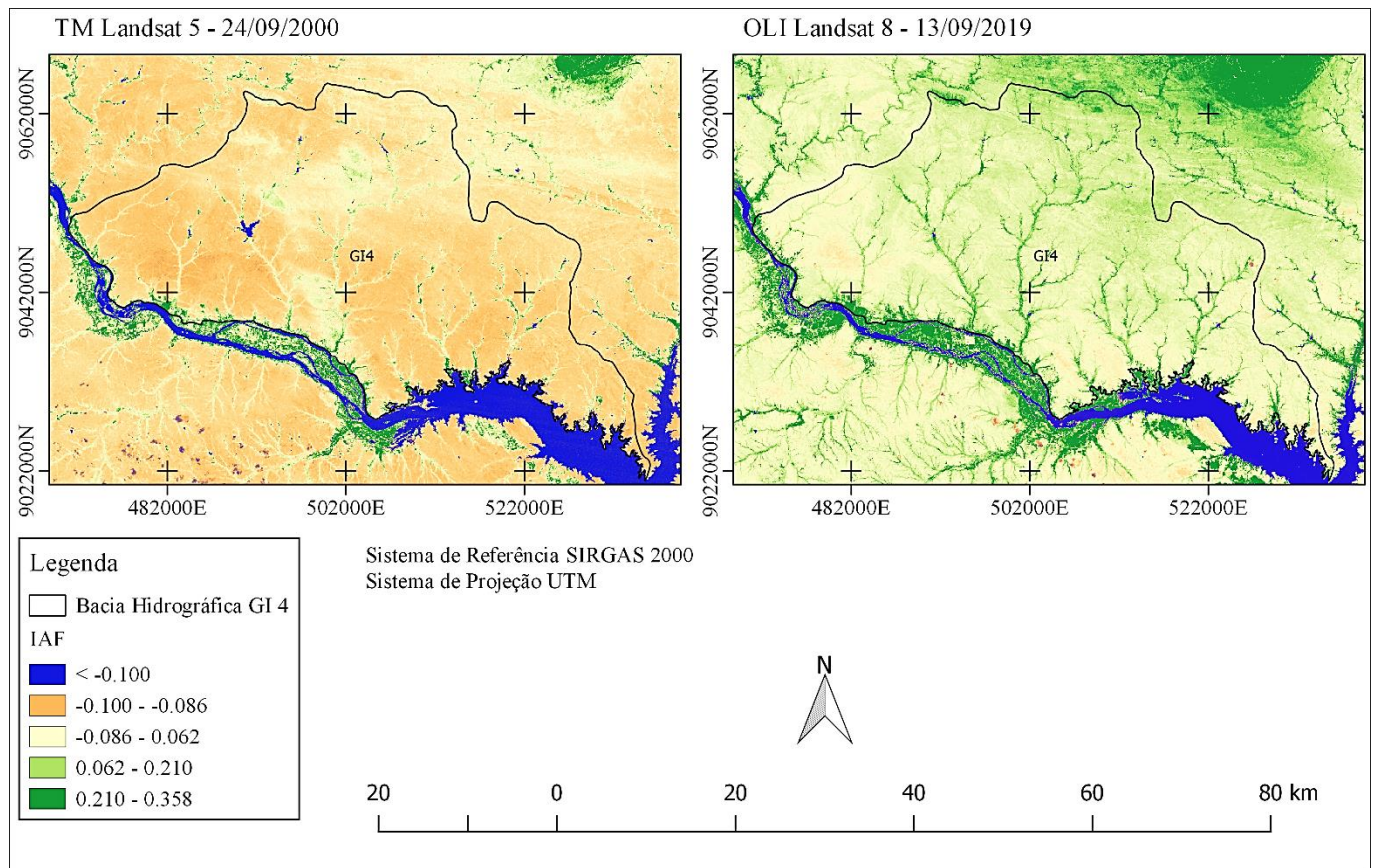


Figura 5- IAF da bacia hidrográfica GI4 nas datas de 24/09/2000 e 13/09/2019.

Sobre o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), Bezerra et al. (2019) afirmam que regiões que apresentam valores de NDWI > 0,08 são referentes a áreas de corpos hídricos ou de acúmulo de água em geral. Em relação aos resultados do Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), Figura 6, observou-se um comportamento parecido com os de SAVI e IAF, porém os valores que representam as cores mais alaranjadas/vermelho se distanciam mais do espectro eletromagnético refletido pela água. Assim, os valores entre -0,420 a -0,007 (coloração alaranjada) representam em ordem

crescente a vegetação e solo exposto. E, em contrapartida, os valores positivos, entre 0,200 e 0,406 expressam a presença de água (coloração azul). A partir do NDWI, procedeu-se com o cálculo da área superficial do espelho d'água do Rio São Francisco para os anos de 2000 e 2019, Figura 7. Evidenciou-se que houve redução no aporte de água no corpo hídrico, no trecho de análise, para o ano de 2019. A área superficial do espelho d'água sofreu redução de 221.392.800 m², entre os anos de 2000 e 2019, em que as áreas eram, respectivamente, 842.559.300 m² e 621.166.500 m².

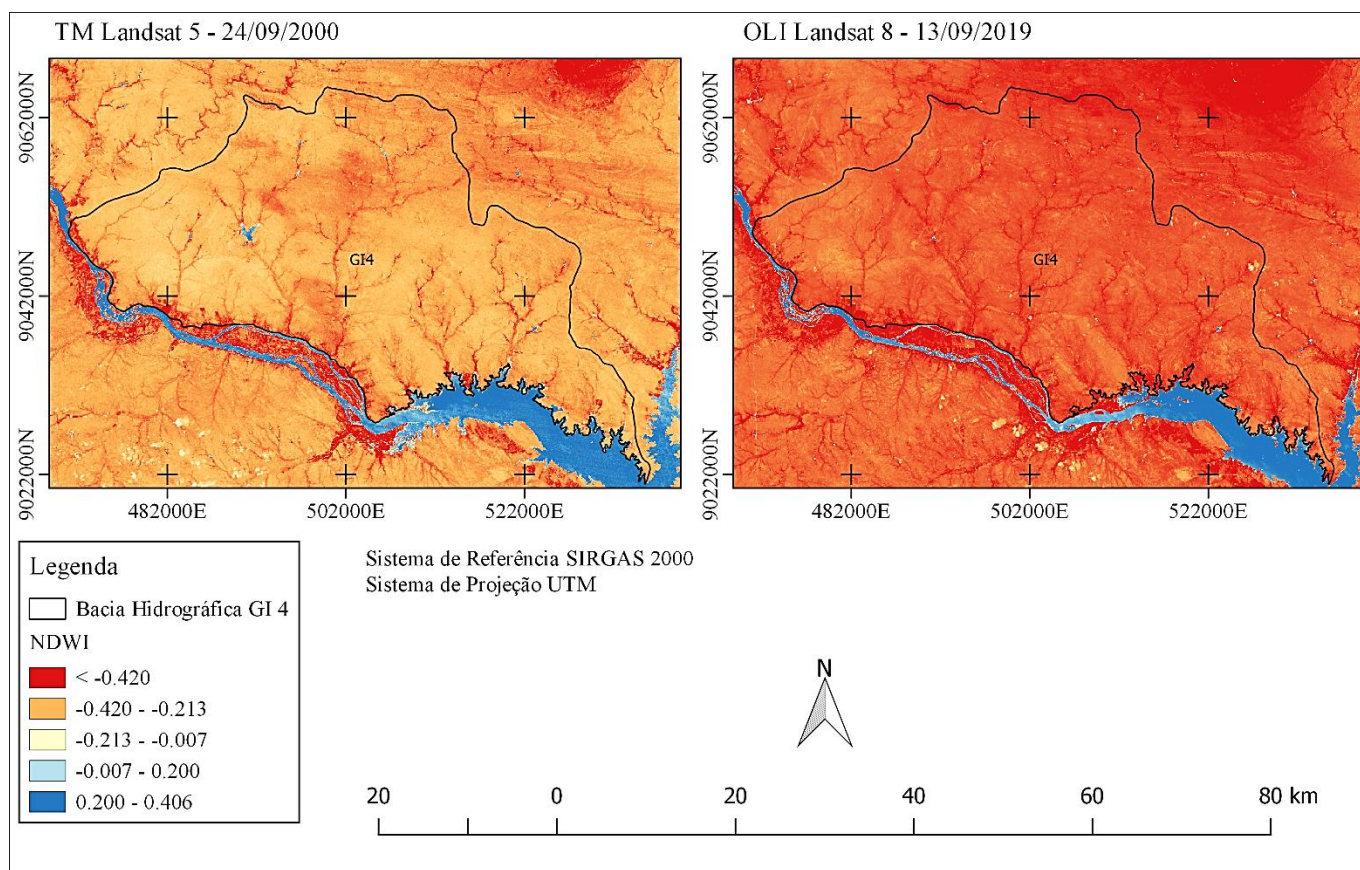


Figura 6. NDWI da bacia hidrográfica GI4 nas datas de 24/09/2000 e 13/09/2019.

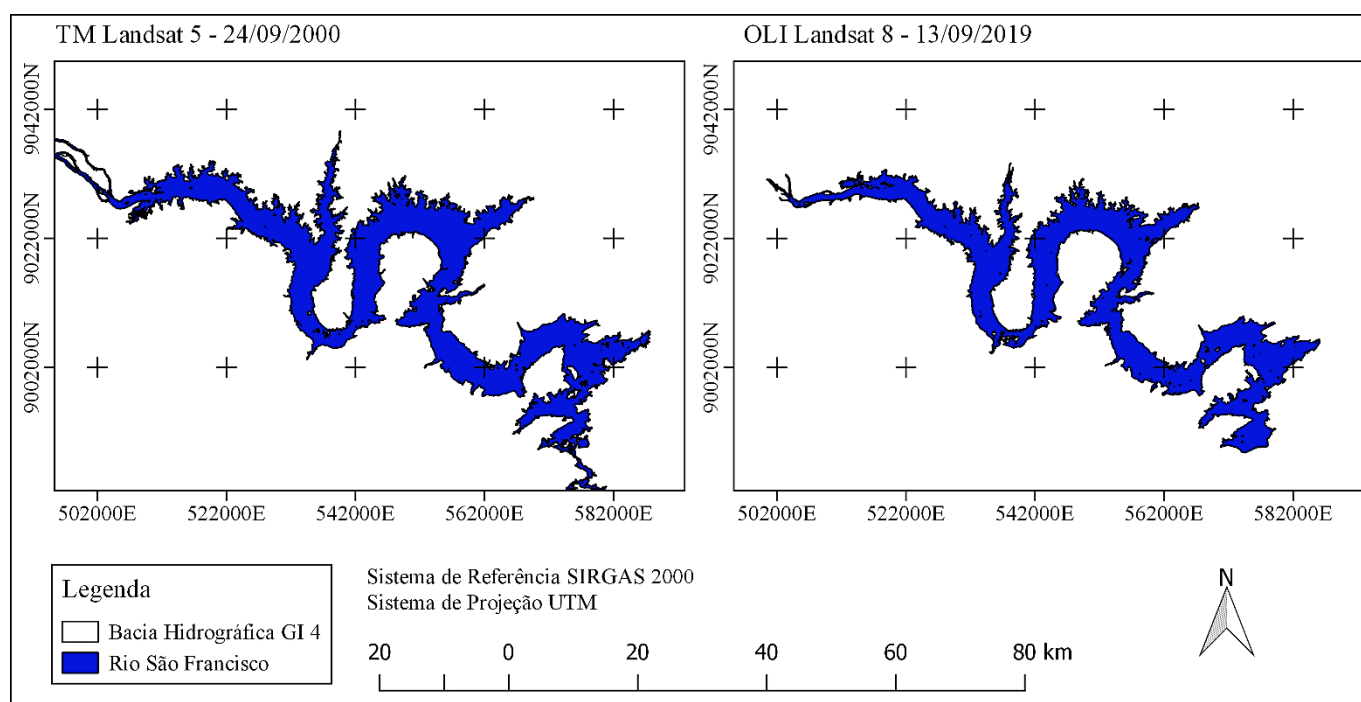


Figura 7. Área Superficial do espelho d'água nas datas de 24/09/2000 e 13/09/2019.

Os valores negativos de NDBI indicam áreas com presença de água, vegetação densa e vegetação mais rasteira. Com isso, observou-se, na Figura 8, valores entre -0,350 e -0,055, referentes às classes citadas, que seguem a mesma dinâmica já encontrada nas análises dos índices de vegetação

(SAVI), área foliar (IAF) e presença de água (NDWI). O ano de 2000 foi caracterizado por um maior estresse hídrico na cobertura vegetal, enquanto que no ano de 2019 ocorreu maior densidade vegetativa. Tendo em vista que os valores de 0,093 e 0,241 (coloração vermelha) de NDBI representam

áreas de solo exposto ou área com infraestrutura urbana, é possível concluir que em 2000 ocorreu uma significativa quantidade de solo exposto em relação

ao ano de 2019, corroborando com os resultados dos índices analisados.

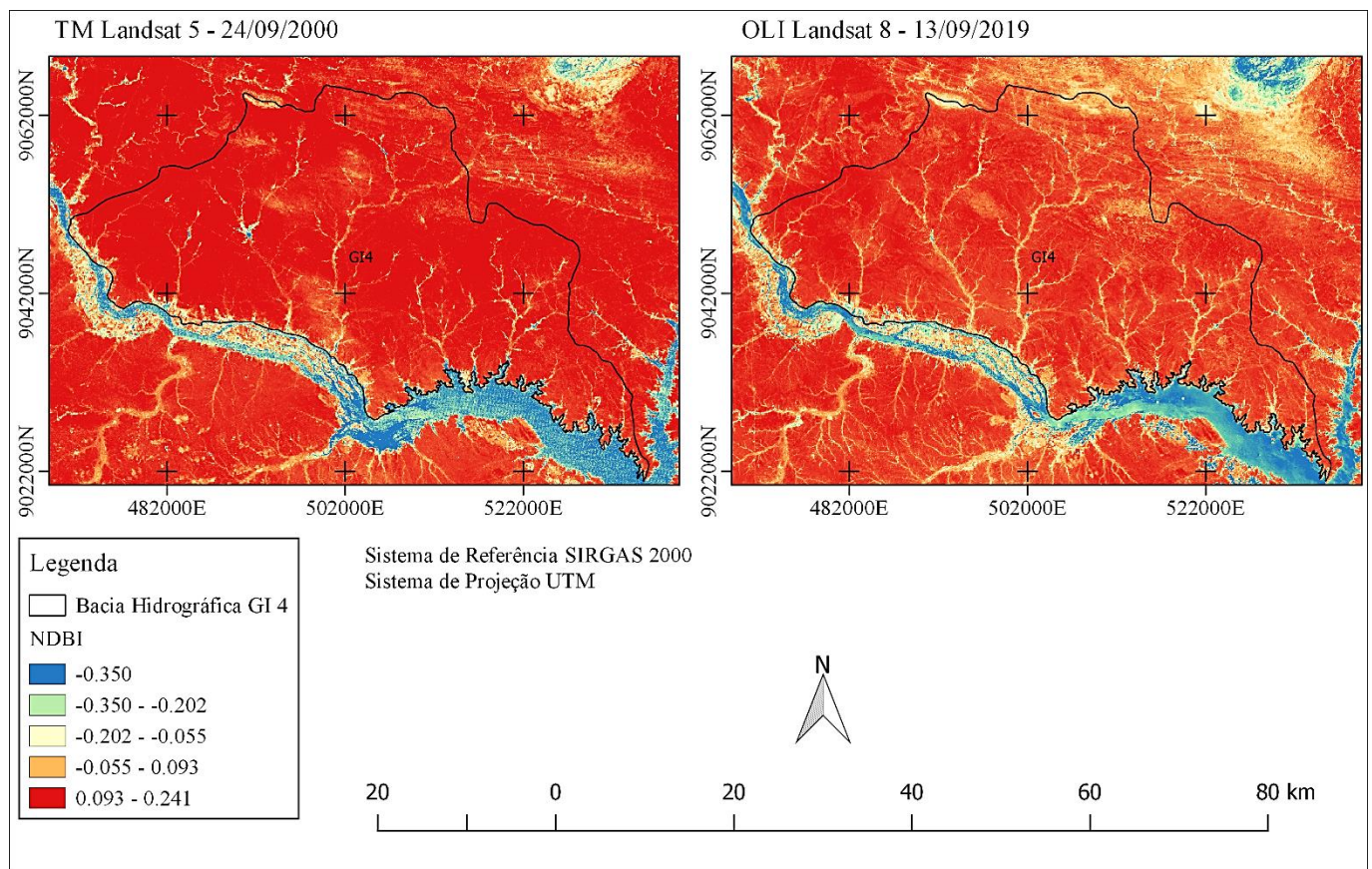


Figura 8. NDBI da bacia hidrográfica GI4 nas datas de 24/09/2000 e 13/09/2019.

Segundo alguns estudos, como Chen et al. (2006), Xiong et al. (2012), entre outros, áreas com SAVI e IAF positivos têm comportamento inverso em relação às análises com NDWI e NDBI, fato também observado com os resultados obtidos nesse estudo. De forma geral, é evidente que a presença de cobertura vegetal e o maior aporte hídrico influencia diretamente na temperatura de superfície da região. Markovic et al. (2021) afirmam que mudanças nos índices de vegetação causam uma resposta direta na temperatura de superfície (LST), e que a diminuição da saúde e da densidade da vegetação resultam em um impacto negativo na referida temperatura da superfície. Como se observa na Figura 9, o ano de 2000 apresenta temperaturas menos elevadas, em sua predominância entre 26,15°C e 31,75°C, em contrapartida com o ano de 2019, que é evidenciado por um aumento na temperatura da superfície, com valores entre 31,75°C e 42,75°C.

Destaca-se também que a ocorrência do evento chuvoso, dias antes de passagem do satélite,

influencia na configuração terrestre e, consequentemente, nos valores da temperatura da superfície processada. Na imagem da Figura 9 em 24/09/2000, ocorreram eventos chuvosos antes da passagem do satélite, ou seja, do dia 05 ao 23 de setembro de 2000 choveu 16,20 mm, amenizando os valores dos pixels da temperatura da superfície. Diferentemente, em 13/09/2019 o evento chuvoso (3,20 mm) ocorreu após a passagem do satélite, gerando assim, maiores valores da temperatura da superfície que o ano de 2000.

Ressalta-se que nas regiões com maior presença de água foram obtidos valores mais baixos, com aproximadamente 20,63°C para o ano de 2000 e entre 20,63°C e 26,15°C para o ano de 2019. Este resultado condiz com Oliveira et al. (2017), quando pesquisaram a temperatura da superfície na bacia hidrográfica do Alto Ipanema - Pernambuco e encontraram valores de pixels entre 15 e 22°C nos alvos terrestres com a presença de água.

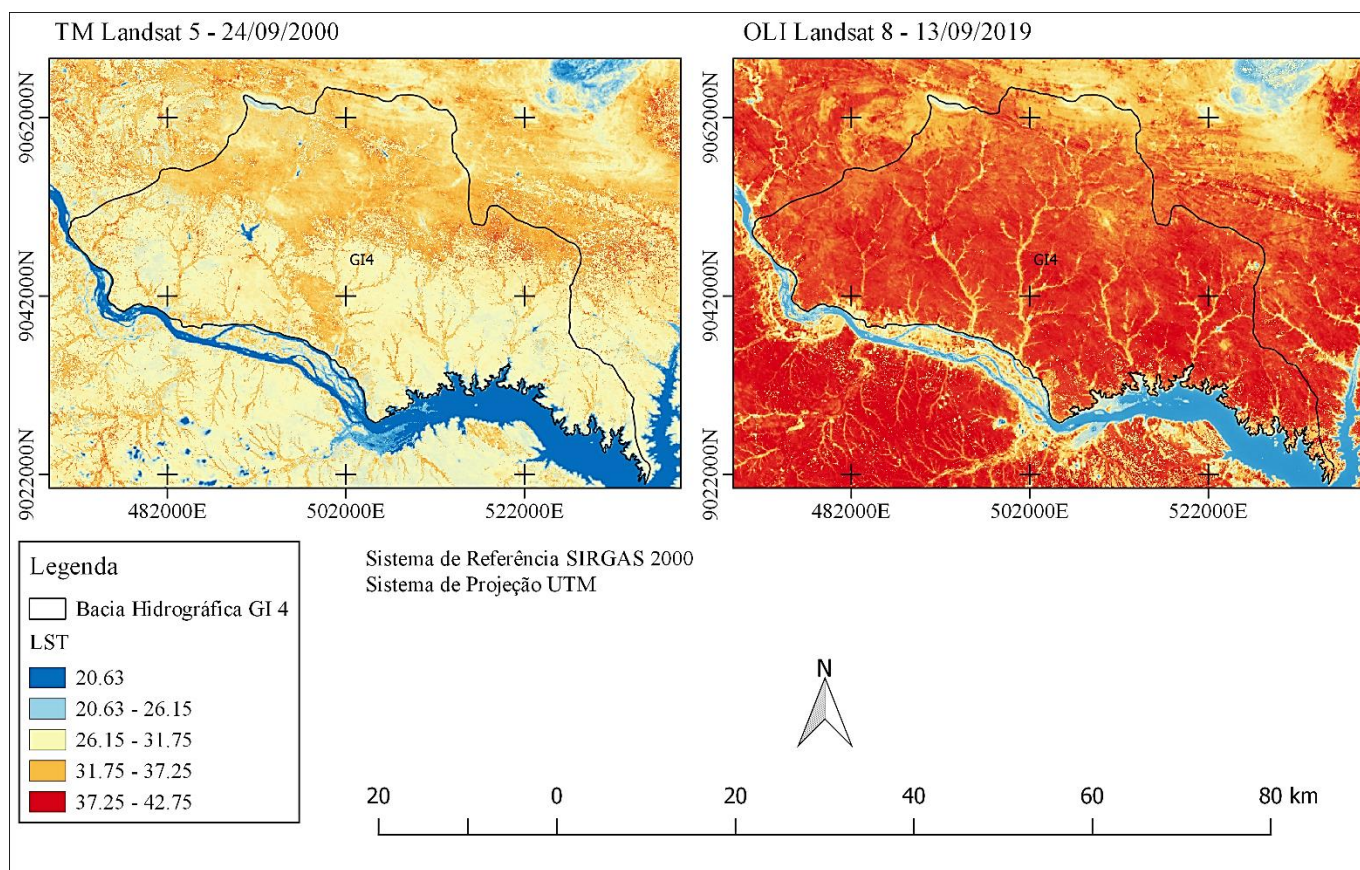


Figura 9. LST da bacia hidrográfica GI4 nos anos de 2000 e 2019.

4. Conclusão

De acordo com as análises obtidas através da utilização dos índices de vegetação, foi possível compreender a variação entre a densidade e saúde da vegetação entre os anos de 2000 e 2019.

O comportamento do SAVI demonstrou que o índice normaliza de forma mais real as classes de vegetação, uma vez que o SAVI utiliza amortização da umidade do solo em relação à vegetação. Sendo assim, os resultados de SAVI e IAF foram claros em mostrar a variação do comportamento da vegetação, corroborando com os resultados encontrados, evidenciando uma significativa diferença na densidade da vegetação ao longo dos anos. Os índices vegetativos indicaram aumento na densidade e saúde da vegetação entre os anos de 2000 e 2019.

Com relação aos resultados de NDWI e NDBI, observou-se que suas classes de uso do solo seguiram o mesmo padrão das classes obtidas com o SAVI e o IAF. Porém seus resultados utilizam uma escala inversa a dos outros índices, resultando em mais detalhamento na variação da presença de corpos hídricos e de infraestrutura urbana e/ou solo exposto. Com isso, identificou-se maior presença de solo exposto para o ano de 2000 e maior densidade de vegetação para o ano de 2019, seguindo em concordância com SAVI e IAF. Entretanto, a

aplicação do NDWI permitiu a observação da redução na área superficial do espelho d'água no trecho do Rio São Francisco para o ano de 2019, apesar do maior suprimento hídrico na vegetação.

Apesar da maior densidade vegetativa, foi observado um aumento na temperatura da superfície em toda a região de análise, apresentando valores entre 31,75°C e 42,75°C para o ano de 2019, devido a ocorrência das chuvas em dias antecedentes da passagem do satélite.

A aplicação dos índices biofísicos possibilitou a análise com eficiência da variabilidade temporal ocorrida na região da bacia hidrográfica GI4 ao longo de 19 anos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pelo incentivo a pesquisa e concessão de bolsas de Pós-Graduação da primeira autora (Processo No. IBPG-1425-3.01/19) e da segunda autora (Processo No. IBPG-0169-3.01/20); ao United States Geological Survey (USGS) pela aquisição da imagem de satélite; a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) pelo banco de dados hidrológicos; à PROPESQI/UFPE pelo apoio financeiro (Processo No. 23076.041635/2020-55-Edital Propesqi No. 07/2020) e, ao Projeto de

pesquisa "Coberturas vegetal e hídrica de bacias hidrográficas utilizando imagens orbitais no estado de Pernambuco", aprovado na Chamada Universal MCTIC/CNPq 2018, processo nº 433914/2018-1 da penúltima autora.

Referências

- Allen, R.G., Waters, R., Trezza, R., Tasumi, M., Bastiaanssen, W., 2002. Sebal-surface energy balance algorithms for land: Idaho implementation: advance training and users manual. Idaho Department of Water Resources, Moscow.
- Antunes, R.L.S., Ross, J.L.S., 2018. Interpretação das fisionomias da paisagem e sua fisiologia a partir do sensoriamento remoto no sul do Brasil. *Geoambiente On-line* 30, 74-96. doi: <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i30.52828>
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Climas, 2020. Produto 1 – Plano de Trabalho Detalhado. Atualização do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – PERH/PE. Código do documento: SIRH_PE_PERH_PTD_REV01.
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Climas, 2021. Monitoramento pluviométrico. Disponível: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso: 20 jan. 2021.
- Bandeira, T.V., Cruz, M.L.B., 2021. Estudo da cobertura vegetal do município de Guaiúba/CE com base na utilização dos índices de vegetação SAVI e NDVI. *Geosul* 36, 410-433. doi: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2021.e73138>
- Barbosa, A.H.S., Cuellar, M.D.Z., Moreira, M.M., Arraes, K.A., Silva, C.S.P., 2021. Seis anos de seca: Análise Espaço-temporal dos Espelhos d'água dos Reservatórios do Ceará por Sensoriamento Remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14, 2220-2241. doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2220-2241>
- Bezerra, U.A., Silva, L.T.M.S., Oliveira, L.M.M., Ribeiro Neto, A., Almeida, D. N.O., Andrade, J.M., 2019. Comparativo do Índice NDWI entre os Satélites Landsat-8 e Sentinel-2 no Entorno do Reservatório Poço da Cruz - PE. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Foz do Iguaçu.
- Câmara, G., Medeiros, J.S., 1998. *Geoprocessamento para Projetos Ambientais*. 2 .ed. INPE, São José dos Campos.
- Chander, G., Markham, B.L., Helder, D.L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113, 893–903. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chen, X., Zhao, H., Li, P., Yin, Z., 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment* 104, 133-146. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016>
- Cohen, W.B., Maersperger, T.K., Gower S.T., Turner, D.P., 2003. An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+ data. *Remote Sensing of Environment* 84, 561-571. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00173-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00173-6)
- Dorigo, W.A., Milla, R.Z., Wit, A.J.W., Brazile, J., Singh, R., Schaepman, M.E., 2007. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9, 165-193. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.05.003>
- Duarte, R., 1999. A seca nordestina de 1998-1999: da crise econômica à calamidade social. SUDENE-FJN, Recife.
- Fay, E.F., Silva, C.M.M.S., 2006. Índice de uso sustentável da água (ISA-Água) na região do sub-médio São Francisco. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna.
- França, A.F., Tavares Junior, J.R., Moreira Filho, J.C.C., 2012. Índices NDVI, NDWI E NDBI como ferramentas ao mapeamento temático do entorno da lagoa olho d'água, em Jaboatão dos Guararapes-PE. *Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*, Recife.
- França, L.M.A., Miranda, R.Q., Costa, V.S.O., Galvêncio, J.D., 2020. Análise do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Pajeú (Pernambuco) com o produto MODIS MCD12Q1. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto* 1, 011-027. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3968958>
- Gameiro, S., Teixeira, C.P.B., Silva Neto, T.A., Lopes, M.F.L., Duarte, C.R., Souto, M.V.S., Zimback, C.R.L., 2016. Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. *Terræ* 13, 15-22.
- Gao, B., 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58, 257-266. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Huete, A.R., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, 205-309. doi: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Lima, J.F., Oliveira, L.M.M., Farias, A.A.M., Silva, B.B., Rodrigues, D.F.B., Montenegro, S.M.G.L., 2021. Geotecnologia para Caracterização do Albedo e Temperatura da Superfície no Sertão de

- Pernambuco, Brasil. Anuário do Instituto de Geociências 44, 35481. doi: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_35481
- Luz, L.R., Giongo, V., Santos, A.M., Lopes, R.J.C., Lima Júnior, C., 2021. Biomass and vegetation index by remote sensing in different caatinga forest areas. *Ciência Rural* 52, 1-10. doi: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20201104>
- Marković, M., Cheema, J., Teofilović, A., Cepić, S., Popović, Z., Tomićević-Dubljević, J.; Pause, M., 2021. Monitoring of Spatiotemporal Change of Green Spaces in Relation to the Land Surface Temperature: A Case Study of Belgrade, Serbia. *Remote Sensing* 13, 3846. 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/rs13193846>
- Markham, B.L., Barker, J.L., 1987. Thematic Mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances. *International Journal of Remote Sensing* 8, 517-523. doi: <https://doi.org/10.1080/01431168708948658>
- Miljković, V., 2017. Spatial Calibration of Multispectral and Hyperspectral Sensors in Close-Range Photogrammetry. Thesis., Zagreb, University of Zagreb.
- Oliveira, J.D.A., Medeiros, B.C., Silva, J.L.B., Moura, G.B.A., Lins, F.A.C., Nascimento, C.R., Lopes, P.M.O., 2017. Space-temporal evaluation of biophysical parameters in the High Ipanema watershed by remote sensing. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 7, 357-366.
- Pereira, J.A.V., Brito, E.F., Souza, Y.G., 2019. Análise Espaço-Temporal do Uso da Superfície no Parque Nacional da Serra da Capivara/PI a Partir do Sensoriamento Remoto. *Espaço Aberto* 9, 129-142. doi: <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2019.23811>
- Pereira, J.A.V., Souza, Y.G., Correia, I.M.G., Souza, B.I., 2020. Uso e cobertura do solo e comparação entre os índices de vegetação SAVI e NDWI na área de Proteção Ambiental das Onças, Paraíba, Brasil. *Revista de Geografia (Recife)* 37, 278-298. doi: <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2020.245694>
- Silva, A. M., Silva, R.M., Silva, B.B., 2015. Determinação de temperatura da superfície e estimativa do saldo de radiação e evapotranspiração usando imagens Landsat e dados observados. *Revista Brasileira de Cartografia* 66/67, 1203-1216.
- Silva, R.O.B., Montenegro, S.M.G.L., Souza, W.M., 2017. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 22, 579-589. doi: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017142481>
- Souza, B.I., Silans, A.M.B.P., Santos, J.B., 2007. Contribuição ao estudo da desertificação na Bacia do Taperoá. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 8, 292-298. doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662004000200019>
- USGS. United States Geological Survey, 2021. Aquisição de Imagens. Disponível: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso: 20 jan. 2021.
- Xiong, Y., Huang, S., Chen, F., Ye, H., Wang, C., Zhu, C., 2012. The impacts of rapid urbanization on the thermal environment: a remote sensing study of Guangzhou, South China. *Remote Sensing* 4, 2033-2056. doi: <https://doi.org/10.3390/rs4072033>
- Zanzarini, F.V., Pissarra, T.C.T., Brandão, F.J.C., Teixeira, D.D.B., 2013. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 17, 608-614. doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000600006>