

# A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE E DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL NA VARIABILIDADE TEMPORAL E ESPACIAL NOS MANGUEZAIS DO SISTEMA COSTEIRO CANANÉIA-IGUAPE, SP

THE INFLUENCE OF SURFACE TEMPERATURE AND RAINFALL ON TEMPORAL AND SPATIAL VARIABILITY IN THE MANGROVES OF THE CANANEIA-IGUAPE COASTAL SYSTEM, SP

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL Y DE LA PRECIPITACIÓN SOBRE LA VARIABILIDAD TEMPORAL Y ESPACIAL EN LOS MANGLARES DEL SISTEMA COSTERO CANANEIA-IGUAPE, SP

## AUTOR

<sup>1</sup> Jakeline Baratto   
<sup>1</sup> Nádia Gilma Beserra de Lima   
<sup>1</sup> Emerson Galvani 

## FILIAÇÃO INSTITUCIONAL

<sup>1</sup> UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

## E-MAIL

jakelinebarattogeo@gmail.com  
nadiagilma@gmail.com  
egalvani@usp.br

DATA DE SUBMISSÃO: 03/09/24

DATA DE APROVAÇÃO: 11/12/25

DOI: 10.12957/GEOUERJ.2025.87058



E-ISSN 1981-9021

ESTE É UM ARTIGO DE ACESSO ABERTO  
DISTRIBUÍDO SOB OS TERMOS DA LICENÇA  
CREATIVECOMMONS BY-NC-SA 4.0, QUE  
PERMITE USO, DISTRIBUIÇÃO E REPRODUÇÃO  
PARA FINS NÃO COMERCIAIS, COM A CITAÇÃO  
DOS AUTORES E DA FONTE ORIGINAL E SOB  
A MESMA LICENÇA.

## // RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar a variação dos índices de vegetação obtidos nos manguezais do Sistema Costeiro Cananéia-Iguape, e relacioná-los com os atributos climáticos para o período de 2003 até 2022. Para esta pesquisa foram utilizados dados dos índices de vegetação como NDVI, EVI e LAI, dados de temperatura de superfície e precipitação pluvial. Os dados foram trabalhados em processamento em nuvem, sendo que a correlação temporal realizada no Google Colab e a correlação espacial no Google Earth Engine. Os resultados indicaram que a correlação temporal anual entre os índices de vegetação e os atributos climáticos não tem correlação significativa. No entanto, a correlação temporal sazonal foi significativa para o NDVI e a precipitação pluvial em julho, agosto e setembro - JAS ( $r = -0,54$ ) e outubro, novembro e dezembro - OND ( $r = -0,46$ ), EVI e precipitação em OND ( $r = -0,46$ ) e LAI e temperatura de superfície em JFM ( $r = 0,72$ ) e JAS ( $r = 0,45$ ). A análise de defasagem (lag) demonstrou que o EVI apresentou correlações significativas, revelando-se mais sensível às variações climáticas passadas. Na correlação espacial, o setor oeste do Parque Estadual da Ilha do Cardoso e no curso inferior do Rio Ribeira de Iguape correspondem as áreas que mais tiveram correlação significativa com os atributos climáticos. Esses resultados mostraram serem promissores nas análises dos atributos climáticos em relação ao impacto no manguezal. No entanto, precisa-se aprofundar na compreensão das respostas tardias dos índices de vegetação para melhor entender como o manguezal responde a mudanças nos atributos climáticos.

**Palavras-chave:** correlação linear. NDVI. EVI. LAI, mangue, atributos climáticos

## // ABSTRACT

The aim of this study is to analyze the variation in vegetation indices obtained in the mangroves of the Cananeia-Iguape Coastal System, and relate them to climatic attributes for the period from 2003 to 2022. For this research, data from vegetation indices such as NDVI, EVI and LAI, surface temperature and rainfall data were used. The data was processed in the cloud, with the temporal correlation carried out in Google Colab and the spatial correlation in Google Earth Engine. The results indicate that the annual temporal correlation between vegetation indices and climatic attributes has no significant correlation. However, the seasonal temporal correlation was significant for NDVI and rainfall in July, August and September - JAS ( $r = -0.54$ ) and October, November and December - OND ( $r = -0.46$ ), EVI and rainfall in OND ( $r = -0.46$ ) and LAI and surface temperature in JFM ( $r = 0.72$ ) and JAS ( $r = 0.45$ ). The lag analysis demonstrated that the EVI presented significant correlations, revealing itself to be more sensitive to past climate variations. In terms of spatial correlation, the western sector of the Ilha do Cardoso State Park and the lower course of the Ribeira de Iguape River were the areas with the highest significant correlation with climatic attributes. These results proved to be promising for analyzing climatic attributes in relation to their impact on mangroves. However, a deeper understanding of the late responses of vegetation indices is needed to better understand how mangroves respond to changes in climatic attributes.

**Keywords:** linear correlation. NDVI. EVI. LAI. mangrove. climatic attributes.

## // RESUMEN

El objetivo de este estudio es analizar la variación de los índices de vegetación obtenidos en los manglares del Sistema Costero Cananeia-Iguape, y relacionarlos con los atributos climáticos para el período de 2003 a 2022. Para esta investigación se utilizaron datos de índices de vegetación como NDVI, EVI y LAI, datos de temperatura superficial y de precipitación. Los datos se procesaron en la nube, realizándose la correlación temporal en Google Colab y la espacial en Google Earth Engine. Los resultados indican que la correlación temporal anual entre los índices de vegetación y los atributos climáticos no presenta una correlación significativa. Sin embargo, la correlación temporal estacional fue significativa para NDVI y precipitación en julio, agosto y septiembre - JAS ( $r = -0,54$ ) y octubre, noviembre y diciembre - OND ( $r = -0,46$ ), EVI y precipitación en OND ( $r = -0,46$ ) y LAI y temperatura superficial en JFM ( $r = 0,72$ ) y JAS ( $r = 0,45$ ). El análisis de desfase temporal mostró que el EVI tiene correlaciones significativas, siendo más sensible a las fluctuaciones climáticas pasadas. En correlación espacial, el sector al oeste del Parque Estatal Ilha do Cardoso y en el curso inferior del río Ribeira de Iguape fueron las áreas que tuvieron la correlación más significativa con los atributos climáticos. Estos resultados son prometedores para el análisis de los atributos climáticos en relación con su impacto en los manglares. Sin embargo, se necesita una comprensión más profunda de las respuestas tardías de los índices de vegetación para entender mejor cómo responden los manglares a los cambios en los atributos climáticos.

**Palabra Clave:** correlación lineal. NDVI. EVI. LAI. manglares. atributos climáticos

## INTRODUÇÃO

Os manguezais são ecossistemas de grande importância para a humanidade, pois fornecem bens e serviços ecossistêmicos (BIMRAH, et al. 2022, GETZNER, et al, 2020). Eles são locais biogeoquimicamente importantes para o meio ambiente devido ao acúmulo de sedimentos, carbono e nutrientes (ALONGI, 2002; 2015). Somado a isso, os manguezais desempenham a função de estabilizar a costa, reduzindo o impacto de desastres naturais extremos como tsunamis e furacões (ALONGI, 2002; TAILLIE, et al., 2020). Além disso, são fontes de alimentos, remédios, combustível e materiais de construção para as comunidades locais (GETZNER, et al., 2020).

O clima tem um papel fundamental para os manguezais, podendo limitar a colonização, o crescimento e o desenvolvimento de sua flora. No entanto, no cenário das mudanças climáticas, a dinâmica dos manguezais pode ser alterada, afetando sua distribuição global, diversidade e abundância das espécies (OSLAND, 2016). Os manguezais são ambientes sensíveis às mudanças climáticas (ASBRIDGE et al., 2015).

Diante disso, tanto as perturbações antropogênicas quanto naturais nos manguezais, têm recebido muita atenção devido aos sinais de mudanças climáticas cada vez mais intensos (ALONGI, 2022). As áreas de manguezais estão ganhando destaque no cenário internacional (WARD et al., 2016; ASBRIDGE et al., 2016; ALONGI, 2022) e nacional (RIBEIRO et al., 2007; SANTOS et al., 2014), devido a sua importância frente às questões climáticas globais (LIMA; CUNHA-LIGNON; GALVANI, 2021; GALVANI; LIMA; CUNHA-LIGNON, 2017).

Neste cenário, altas temperaturas e baixa precipitação pluvial levam a eventos de aquecimento extremo que podem aumentar a mortalidade dos manguezais (ALONGI, 2022). A diminuição da precipitação pluvial pode aumentar a salinidade nas áreas dos manguezais e afetar as espécies menos tolerantes à alta salinidade (OSLAND et al., 2016). Por outro lado, o aumento da precipitação pluvial influencia na expansão desse ecossistema, ocasionando

abundância de espécies (ASBRIDGE et al., 2015). Além disso, o aumento da temperatura pode acarretar a expansão do manguezal (FAZLIOGLU, WAN e CHEN, 2020).

As pesquisas em nível global tentam explicar a relação dos manguezais com as mudanças climáticas (ALONGI, 2015; OSLAND et al., 2015). Muitos estudos relacionam dados de temperatura do ar e de precipitação pluvial na abrangência dos manguezais, porém essas pesquisas, na sua maioria, abrangem a escala global (ASBRIDGE et al., 2015; WARD et al., 2016; OSLAND et al., 2016b). Contudo, principalmente em território brasileiro, há poucas discussões sobre os efeitos da alteração da precipitação pluvial e da temperatura do ar e superfície na expansão e/ou diminuição dos manguezais.

Pesquisas mais atuais têm se dedicado a entender a relação da vegetação com as alterações na precipitação pluvial, temperatura do ar e a temperatura da superfície (YUE et al., 2007; GUHA et al., 2020; KHAN; JAVED, 2022; HAN et al., 2022; SHARMA et al., 2021). Esses estudos indicam que os índices de vegetação, principalmente o NDVI, têm relação positiva com a precipitação pluvial e negativa com a temperatura da superfície. Assim, a precipitação pluvial e a temperatura influenciam diretamente no balanço hídrico, causando alterações no regime de umidade do solo que, por sua vez, influenciam o crescimento da vegetação (WANG et al., 2003).

Por outro lado, alguns autores apontam que a nível local, ao relacionar os índices de vegetação, como o NDVI, e os atributos climáticos, como a precipitação pluvial e a temperatura da superfície não foram encontradas relações significativas ou são insignificantes (RUAN et al., 2022; XUEFEI et al., 2021).

A influência das alterações climáticas nos manguezais ainda requer muitos estudos, principalmente em escala local, como no Sistema Costeiro Cananeia-Iguape, no litoral sul do estado de São Paulo. Nessa região, estudos microclimáticos buscaram estabelecer a relação dos elementos climáticos e a interação com a estrutura da floresta de mangue (LIMA e GALVANI, 2012; LIMA et al., 2013 e LIMA e GALVANI 2018, LIMA et al., 2023). Diante disso, o objetivo deste artigo é analisar a variação dos índices de vegetação obtidos nos manguezais do Sistema Costeiro Cananéia-Iguape, e relacioná-los com os atributos climáticos para o período de 2003 até 2022.

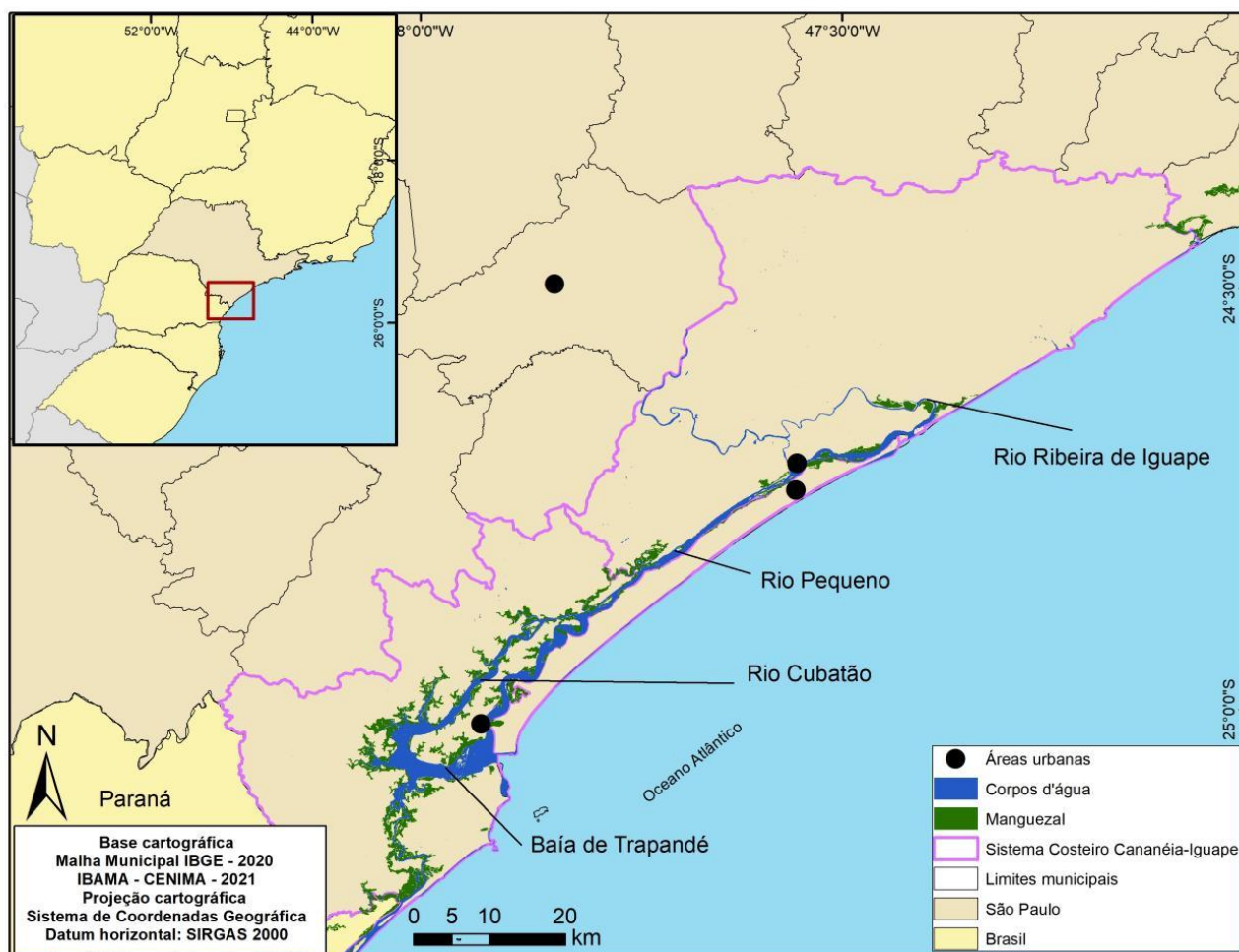
## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

O manguezal estudado está localizado no Sistema Costeiro Cananéia-Iguape (SCCI), que abrange os municípios de Cananéia, Iguape e Ilha Comprida (Figura 1). O SCCI possui uma área total de 3414 km<sup>2</sup>, sendo que a área de manguezal corresponde a 3,7% da área de estudo (125 km<sup>2</sup>) (CENIMA, 2021). Este sistema costeiro situa-se na Planície Costeira Cananéia-Iguape, que apresenta manguezais juntamente com planícies e cordões arenosos marinhos (ROSS, 2002).

O SCCI é composto por um complexo de canais lagunares que se divide em setor norte e setor sul. O manguezal do setor norte apresenta intensas alterações devido às mudanças de salinidade e à deposição de sedimentos provocadas pela abertura de um canal artificial, denominado de Canal do Valo Grande (MAHIQUES et al., 2009). Em contraste, o setor sul tem o manguezal mais conservado, principalmente devido às unidades de conservação existentes (CUNHA-LIGNON et al., 2011).

**Figura 1.** Localização do Sistema Costeiro Cananéia-Iguape e do limite do manguezal.



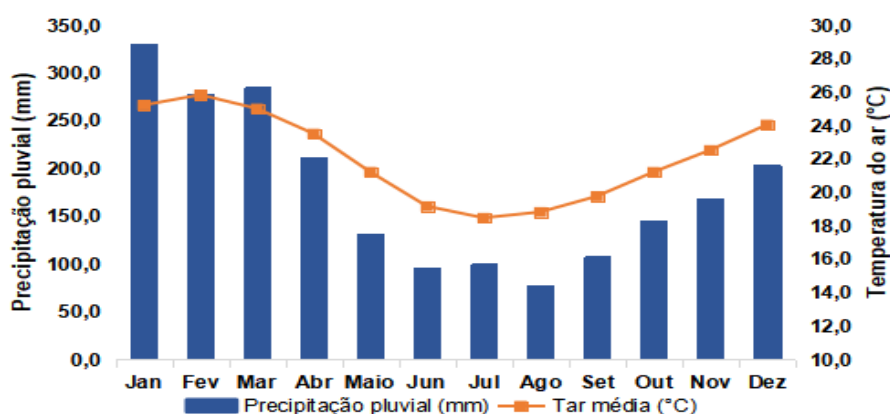
Fonte: Autores (2024)

A dinâmica climática da área de estudo é marcada pela faixa de transição entre a atuação dos sistemas tropicais, como a massa tropical atlântica, e extratropicais, como as massas polares e frentes frias (SANT'ANNA NETO, 1991). Conforme a classificação climática de Köppen, o tipo climático da região é Cfa, caracterizado por um clima subtropical úmido com verão quente (ALVARES et al., 2013; BECK et al., 2018). Além disso, a mais recente classificação climática de Novais, o tipo climático da Litorâneo Sul é o que atua na região, abrangendo a planície litorânea até as escarpas de planaltos ou serras (NOVAIS; GALVANI, 2022; GALVANI et al., 2023).

A precipitação pluvial anual oscila entre 1956,0 mm até 2868,8 mm, com os maiores volumes pluviais concentrando-se nos meses de dezembro até março, variando entre 250 mm e 380 mm. Os meses de junho, julho e agosto são os menos chuvosos, com volumes pluviais que

variam entre 70 mm e 150 mm (GALVANI, LIMA E ALVES, 2012). Assim, os totais pluviais são máximos no verão e mínimos no inverno. Os dados da estação meteorológica de Cananéia refletem essa oscilação sazonal da precipitação pluvial (Figura 2).

**Figura 2.** Temperatura do ar e precipitação pluvial para a Estação Meteorológica de Cananéia, SP para o período de 2001 até 2022.



Fonte: [CIIAGRO](#) (2023).

Baratto et al. (2024) identificaram que nos meses de fevereiro e abril, a precipitação pluvial tende a diminuir no SCCI, enquanto no mês de outubro há tendência em aumentar. Além disso, os autores identificaram que a partir de 2020, a precipitação pluvial tem diminuído nesse trecho costeiro do estado de São Paulo.

Em relação à temperatura do ar, as médias mensais variam de 20,2°C em maio e 17,8°C em julho, conforme Tarifa (2004). Nesse período, as mínimas absolutas podem chegar até 10°C, quando ocorre a passagem de frentes frias e ciclones extratropicais (TARIFA, 2004). Para a estação meteorológica de Cananéia, o mês de fevereiro tem a temperatura do ar mais elevada, chegando até 25,8°C, enquanto julho foi o mês mais frio com 18,5°C.

### Procedimentos operacionais

Os índices de vegetação são amplamente utilizados para identificar a saúde da vegetação, inclusive para os manguezais. Assim, os índices de vegetação são algoritmos que podem

identificar a condição e a densidade das florestas de mangue (WANG et al., 2003; HUETE, 2012; PONZONI et al., 2012).

Para esta análise, foram utilizados dados de três índices de vegetação: o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o índice de vegetação melhorado (EVI) e o Índice de Área Foliar (LAI). Esses índices utilizam a sensibilidade da vegetação às bandas do vermelho e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, fornecidas por imagens de satélite, para estimar a biomassa e a saúde da vegetação (PRADHAN et al., 2024).

O LAI foi definido por Watson (1974) como a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo ( $m^2/m^2$ ). Assim, LAI é um importante parâmetro florestal utilizado em modelos e estudos de processos, e é definido como a área unilateral de folhas em uma copa projetada no solo (HUETE, 2012). O LAI é um parâmetro biofísico chave que determina o estado de crescimento das plantas (ZHAO et al., 2022). Ele resulta das respostas ecofisiológicas das plantas às condições químicas, físicas e biológicas do solo, às condições do microclima.

Os três índices foram coletados pelo sensor Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Os conjuntos de dados do MODIS fornecem informações consistentes e de longo prazo relacionadas às características da vegetação (PRADHA; YOON; LEE, 2024).

O NDVI e o EVI foram obtidos do receptor MODIS/Aqua (MYD13Q1) (DIDAN, 2015) e o LAI do receptor MODIS/Terra (MOD15A2H). O sensor MODIS/Aqua coleta imagens às 01h30min e às 13h30 min, com resolução temporal de 16 dias e espacial de 250 metros (USGS, 2023). Os dados MODIS/Terra estão disponíveis às 10h30min da manhã e 22h30min da noite, hora local. Estes dados referem-se a um composto de 8 dias com resolução de 500 m (MYNENI et al., 2024).

Os dados de temperatura de superfície ( $T_s$ ) foram adquiridos do satélite MODIS/Aqua (MYD11A2) (WAN et al., 2015). A resolução espacial é de 1 km e a resolução temporal refere-se à média de 8 dias (YUE et al., 2007; ZHAO et al., 2019). Os dados de temperatura do MOD11A2 estão organizados em uma banda com os valores diurnos (LST\_Day\_1km) e outras com os valores noturnos (LST\_Night\_1km). Para estimar a temperatura de superfície média,

denominada Ts, utilizou-se a média dessas duas bandas (ALQASEMI et al., 2020; YU et al., 2022).

Os dados de precipitação pluvial utilizados foram do Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations - CHIRPS, desenvolvidos pelo United States Geological Survey (USGS) e pelo Climate Hazards Group at the University of California, Santa Barbara (UCSB) (<https://www.chc.ucsb.edu/data>). Os dados do produto CHIRPS estão disponíveis diariamente, com resolução espacial de 0,05° (aproximadamente 5 km) (CHC, 2022). O sensor CHIRPS foi escolhido, pois foi identificado como sendo o melhor produto de precipitação orbital para a área de estudo (Baratto et al., 2024).

Os processamentos dos dados foram realizados em dois programas: no Google Earth Engine (GEE) (MUTANGA; KUMAR, 2019), utilizando a linguagem JavaScript, e no Google Colab, utilizando a linguagem Python. Para essa análise, os dados anuais e sazonais de todas as variáveis foram recordados para o limite do manguezal, disponibilizados pelo Centro Nacional de Monitoramento e Informações Ambientais (CENIMA, 2021).

Para compreender a correlação entre os índices de vegetação e a temperatura de superfície (Ts) e a precipitação pluvial (P), utilizou-se o coeficiente de Pearson (r) (WANG et al., 2003; YUE et al., 2007; RUAN et al., 2022). A correlação temporal foi realizada em linguagem Python no Google Colab utilizando a função corr. Os dados foram separados em períodos sazonais, abrangendo o período de 2003 a 2022. Os períodos sazonais se referem: JFM (janeiro, fevereiro e março), AMJ (abril, maio e junho), JAS (julho, agosto e setembro) e OND (outubro, novembro e dezembro). Assim, os valores médios de todos os pixels no manguezal foram calculados para representar as médias anuais e sazonais, bem como realizados em trabalhos anteriores (KUMARI et al., 2021). A análise de defasagem (lag) também foi aplicada aos dados sazonais, a fim de determinar o tempo de resposta dos índices de vegetação às variáveis climáticas. Além disso, foram extraídos dados de estatística descritiva, como valores máximos, mínimos, médias e medidas de dispersão, incluindo desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV).

Para calcular a correlação pixel a pixel, os dados de temperatura de superfície, precipitação pluvial e LAI foram reamostrados para 250 metros. No GEE, utilizou-se o redutor

ee.Reducer.pearsonsCorrelation, o qual permite obter a Correlação Linear de Pearson ( $r$ ) entre os valores anuais e sazonais das variáveis (WANG et al., 2003; YUE et al., 2007). Neste estudo, a análise de correlação foi baseada em pixels, o que significa que cada pixel possui a correlação entre os índices de vegetação e as variáveis climáticas (KUMARI et al., 2021). Os resultados espaciais foram posteriormente manipulados no QGIS para uma análise mais detalhada.

## RESULTADOS

### Correlação dos índices de vegetação com a temperatura de superfície e a precipitação pluvial

#### Escala anual

Os resultados mostraram que os valores anuais do NDVI, EVI e LAI apresentaram pouca variação, sendo o desvio padrão igual a zero para o NDVI e EVI e 0,2 para LAI. Esses resultados sugerem a estabilidade na vegetação de manguezal, resultados similares ao encontrado por Nepita-Villanueva et al. (2019) no Noroeste no México. A pesquisa de Karsch et al. (2023) no manguezal do Parque Nacional de Sundarbans, em Bangladesh, também não encontrou mudanças na variação temporal.

**Tabela 1.** Estatística descritiva para os índices de vegetação, precipitação (P) e temperatura da superfície (Ts) obtidos para os manguezais do Sistema Costeiro Cananéia-Iguape.

| Variáveis            | Média  | Mínima | Máximo | DP    | CV (%) |
|----------------------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Índices de Vegetação |        |        |        |       |        |
| NDVI                 | 0,7    | 0,7    | 0,7    | 0,0   | 2,7    |
| EVI                  | 0,4    | 0,3    | 0,4    | 0,0   | 2,6    |
| LAI                  | 3,3    | 3,0    | 3,5    | 0,2   | 5,7    |
| Atributos climáticos |        |        |        |       |        |
| P (mm)               | 2191,7 | 1587,2 | 2740,1 | 357,4 | 13,0   |
| Ts (°C)              | 21,0   | 19,9   | 21,6   | 0,5   | 2,3    |

Fonte: Autores (2024)

Os índices de vegetação do SCCI revelaram um ecossistema estável (Tabela 1), com o NDVI permanecendo fixo em 0,7 e o EVI variando entre 0,3-0,4. A média do LAI foi de 3,3 (CV = 5,1%), valor este que, segundo Alongi et al. (2002), é indicativo de um manguezal saudável. Os resultados obtidos nesta pesquisa se alinham com aqueles verificados Conti et al. (2016) na região de estudo. Os autores estudaram a variação do manguezal por meio do NDVI e outros índices de vegetação no período de 1985 a 2014 e identificaram que, para a região de Cananéia, o manguezal não apresentou variação significativa nas características espectrais da vegetação.

A precipitação pluvial registrou seu valor mínimo em 2020 e máximo em 2010. Em relação à temperatura de superfície, o valor mínimo (19,9°C) foi em 2021 e o máximo em 2019 e 2020 (21,6°C).

A correlação anual mostrou que a precipitação pluvial e temperatura de superfície, pouco interferem na variação anual dos índices de vegetação (S1). Os resultados de correlação linear não apresentaram significância estatística, com exceção do LAI e a temperatura de superfície que indicou uma correlação positiva e moderada ( $r = 0,34$ ), conforme Tabela 2.

**Tabela 2.** Correlação linear entre os índices de vegetação e as variáveis climáticas para o período anual no manguezal para os manguezais do Sistema Costeiro Cananéia-Iguape.

| Período | Variáveis | r     | R <sup>2</sup> |
|---------|-----------|-------|----------------|
| Anual   | NDVI e P  | -0,28 | 0,08           |
|         | EVI e P   | -0,09 | 0,01           |
|         | NDVI e Ts | 0,06  | 0,00           |
|         | EVI e Ts  | 0,04  | 0,00           |
|         | LAI e P   | -0,28 | 0,08           |
|         | LAI e Ts  | 0,34  | 0,12           |

Legenda: \* p-valor < 0,05

Fonte: Autores (2024)

A correlação entre o NDVI e a precipitação pluvial indicou que a correlação é negativa e fraca para o manguezal ( $r = -0,28$ ), embora sem significância. A correlação também foi negativa para a precipitação pluvial e o LAI ( $r = -0,28$ ). Esses resultados diferem de grandes partes dos

estudos sobre a influência dos fatores climáticos no manguezal. O estudo de Gitau et al. (2023), por exemplo, investigou as mudanças hidrológicas na dinâmica do manguezal no rio Tana, Delta do Quênia, os resultados indicaram uma correlação positiva moderada entre os valores de NDVI do manguezal e a precipitação. No entanto, algumas outras pesquisas indicam que essas correlações são insignificantes, como em Ruan et al. (2022) e para Xuefei et al. (2021).

A análise em escala puramente anual mostrou-se insuficiente para capturar a dinâmica do manguezal do SCCI. A influência climática não se manifesta em curto prazo (2003–2022). As alterações no manguezal podem ser sobrepostas por forçantes antropogênicas locais, como a descarga de água doce do Canal do Valo Grande (MAHIQUES et al., 2009), ou por eventos extremos de precipitação e temperatura, que podem atuar como perturbações adicionais, influenciando significativamente os processos ecológicos e estruturais do manguezal.

### Escala sazonal

Considerando todo o manguezal, os resultados mostraram que os valores sazonais do NDVI, EVI e LAI apresentaram variações moderadas, sendo que o desvio padrão foi igual a zero. O coeficiente de variação também indicou que os índices apresentaram variações controladas. Nos três primeiros períodos sazonais, a média do NDVI manteve-se superior a 0,70, indicando que a vegetação está saudável e densa (PONZONI et al., 2012; NDUNGU et al., 2019). Esses valores de NDVI (média sazonal 0,70) validam com os valores do NDVI encontrados por Ruan et al. (2022) para a América do Sul (NDVI de 0,8). O valor máximo de NDVI (0,78) foi registrado no trimestre de AMJ para os anos de 2007 e 2014 (Tabela 3).

**Tabela 3.** Estatística descritiva dos índices de vegetação do manguezal do SCCI, no período de 2003 a 2022.

| Período | Variáveis | Média  | Mínima | Máximo  | DP    | CV (%) |
|---------|-----------|--------|--------|---------|-------|--------|
| JFM     | NDVI      | 0,72   | 0,69   | 0,76    | 0,02  | 3,0    |
|         | EVI       | 0,37   | 0,35   | 0,41    | 0,01  | 3,8    |
|         | LAI       | 3,70   | 3,20   | 4,50    | 0,40  | 10,9   |
|         |           |        |        |         | 225,0 |        |
|         | P (mm)    | 909,65 | 527,81 | 1284,27 | 3     | 24,7   |
|         | Ts (°C)   | 23,98  | 22,82  | 25,33   | 0,65  | 2,7    |
| AMJ     | NDVI      | 0,76   | 0,68   | 0,78    | 0,03  | 3,4    |
|         | EVI       | 0,36   | 0,33   | 0,39    | 0,01  | 3,7    |
|         | LAI       | 3,50   | 3,00   | 3,90    | 0,30  | 7,3    |
|         |           |        |        |         | 113,6 |        |
|         | P (mm)    | 412,88 | 236,08 | 653,75  | 3     | 27,5   |
|         | Ts (°C)   | 19,84  | 18,81  | 22,02   | 0,77  | 3,9    |
| JAS     | NDVI      | 0,71   | 0,61   | 0,76    | 0,04  | 5,0    |
|         | EVI       | 0,33   | 0,29   | 0,38    | 0,02  | 5,5    |
|         | LAI       | 2,90   | 2,40   | 3,40    | 0,30  | 10,2   |
|         |           |        |        |         | 113,3 |        |
|         | P (mm)    | 304,71 | 160,09 | 693,25  | 0     | 37,2   |
|         | Ts (°C)   | 18,87  | 17,53  | 20,20   | 0,77  | 4,1    |
| OND     | NDVI      | 0,65   | 0,46   | 0,71    | 0,05  | 8,3    |
|         | EVI       | 0,34   | 0,25   | 0,37    | 0,03  | 7,7    |
|         | LAI       | 3,00   | 2,10   | 3,80    | 0,50  | 15,6   |
|         |           |        |        |         | 119,2 |        |
|         | P (mm)    | 564,42 | 328,51 | 799,46  | 3     | 21,7   |
|         | Ts (°C)   | 21,76  | 20,64  | 23,97   | 0,81  | 3,7    |

Fonte: Autores (2024)

O valor máximo sazonal de EVI foi de 0,41 em JFM (2016). O EVI mostrou-se como um índice mais estável, sem oscilações na variação da vegetação de manguezal. Essa pouca variação pode ser atribuída ao algoritmo do índice de vegetação, que foi desenvolvido para reduzir a influência do sinal do solo e da atmosfera sobre a resposta do dossel (PONZONI et al., 2012). Esses resultados revelam que temporalmente o NDVI e o EVI não apresentaram grandes oscilações. No entanto, observou-se que a maior variação nos índices ocorreu no último trimestre do ano (Tabela 2). Os resultados de Nepita-Villanueva et al. (2019), para o EVI do manguezal no noroeste do México, indicaram que vigor máximo da vegetação no manguezal ocorre no

outono, 4 a 5 meses após a estação mais seca, quando a temperatura máxima e a radiação solar começaram a diminuir, e a precipitação acumulada quase atingiu o seu máximo.

O LAI apresenta a maior média durante o período JFM (3,7) e menor durante JAS (2,91). O desvio padrão e o coeficiente de variação são relativamente baixos em todos os períodos, indicando pouca variabilidade, corroborando com os índices anteriores. O CV foi de 7,3% em AMJ, 10,2% em JAS e 10,9 % em JFM. Esses resultados ressaltam que a área foliar é mais variável que o NDVI e EVI para a área de manguezal.

O estudo remoto do LAI vem se ampliando em pesquisas sobre o manguezal. O monitoramento de Luo et al. (2023), por exemplo, buscou analisar o LAI na Reserva Natural Nacional de Manguezais de Futian para identificar e classificar espécies de floresta de mangue, estimando o Índice de Área Foliar (LAI) de cada espécie com base em imagens de alta resolução. Os autores identificaram que o LAI variou de 1,41 a 5,01, com média de 2,68. Neste estudo, o manguezal do SCCI apresentou valores máximos de LAI bem próximos do encontrado por Luo et al. (2023).

Em relação aos atributos climáticos, a precipitação pluvial registrou maiores variações entre os períodos sazonais. O trimestre JFM registrou tanto a maior média (903,65 mm) quanto a maior variabilidade (DP = 225,03 mm; CV = 24,5%). Em contraste, a menor média ocorreu em JAS (304,71 mm) e a menor variabilidade em AMJ (DP = 113,65 mm). Essa acentuada variação temporal, observada nos dados da estação de Cananéia, é consistente com as características pluviais da região (REBOITA et al., 2012; GALVANI et al., 2012).

Essas variações na precipitação pluvial são fundamentais para a ecologia dos manguezais. Períodos de alta precipitação, como JFM, são cruciais para a renovação dos nutrientes no solo e para o sustento da biota aquática e terrestre dos manguezais. Por outro lado, períodos de baixa precipitação pluvial, como JAS, podem causar estresse hídrico e influenciar a dinâmica da vegetação e a salinidade do solo e da água, afetando a flora e fauna locais (ALONGI, 2022).

A temperatura de superfície é mais elevada em JFM e OND, e mais baixa em JAS. O desvio padrão e o coeficiente de variação são maiores em AMJ e JAS, indicando maior variabilidade nestes períodos. A redução da temperatura de superfície em JAS está associada à passagem de

sistemas frontais, que diminuem a temperatura do ar (MONTEIRO, 1973). Os valores mínimos sazonais registrados em AMJ e JAS corroboram essa influência, pois se aproximaram de 17,8 °C, temperatura indicada por Tarifa (2004) para a área de estudo.

As correlações ajudam a entender como variáveis climáticas, como precipitação e temperatura, influenciam a dinâmica da vegetação nos manguezais ao longo do ano. No entanto, para o manguezal do SCCI, as correlações entre os índices de vegetação e os atributos climáticos não apresentaram resultados claros.

A correlação entre NDVI e precipitação pluvial só foi significativa ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) nos períodos de JAS ( $r = -0,54$ ) e OND ( $r = -0,46$ ), mas negativa e moderada (S3, S4, S5 e S6). A correlação entre EVI e a precipitação pluvial só foi significativa em OND ( $r = -0,56$ ). Isso indica que a precipitação pode ter um impacto negativo no índice de vegetação, possivelmente devido a condições de inundação ou excesso de umidade.

**Tabela 4.** Correlação linear entre os índices de vegetação e as variáveis climáticas para o período sazonal no manguezal.

| Variáveis | JFM         |                | AMJ           |                | JAS           |                | OND           |                |
|-----------|-------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
|           | r           | R <sup>2</sup> | r             | R <sup>2</sup> | r             | R <sup>2</sup> | r             | R <sup>2</sup> |
| NDVI e P  | -0,08       | 0,00           | -0,39         | 0,2            | <b>-0,54*</b> | 0,3            | <b>-0,46*</b> | 0,2            |
| EVI e P   | 0,11        | 0,00           | -0,21         | 0,0            | -0,38         | 0,2            | <b>-0,46*</b> | 0,2            |
| NDVI e Ts | 0,30        | 0,1            | 0,25          | 0,1            | 0,25          | 0,1            | -0,38         | 0,1            |
| EVI e Ts  | 0,27        | 0,1            | -0,15         | 0,0            | 0,31          | 0,1            | -0,30         | 0,1            |
| LAI e P   | -0,36       | 0,1            | <b>-0,42*</b> | <b>0,2</b>     | -0,20         | 0,0            | -0,20         | 0,0            |
| LAI Ts    | <b>0,72</b> | <b>0,5</b>     | 0,2           | 0,0            | <b>0,45*</b>  | <b>0,2</b>     | -0,12         | 0,0            |

Legenda: \*  $p$ -valor  $< 0,05$

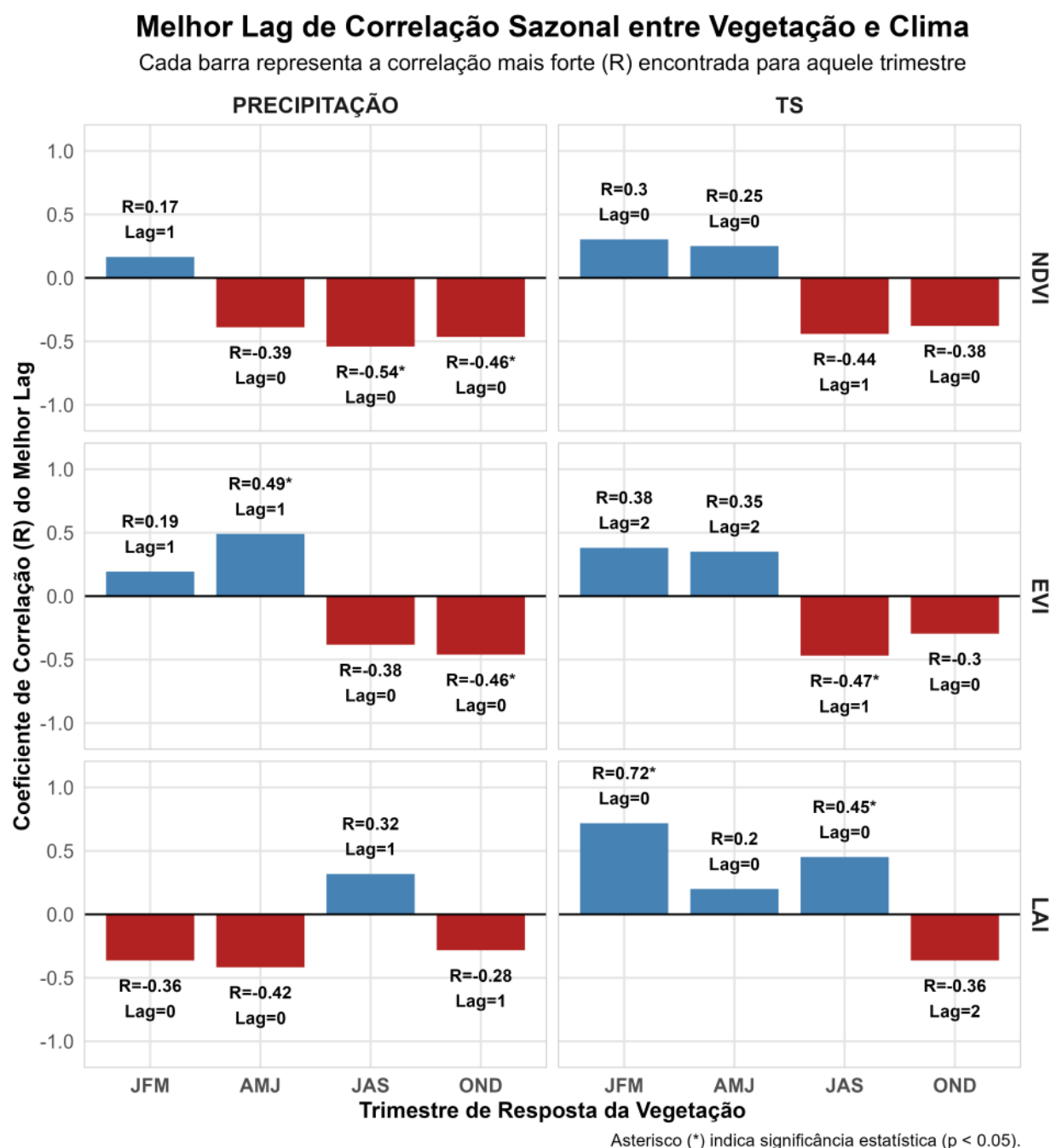
Fonte: Autores (2024)

Em escala global, Ruan et al. (2022) encontraram uma forte correlação positiva entre o NDVI de manguezais e a precipitação ( $r = 0,78$ ), mas fraca com a temperatura ( $r = 0,36$ ). No presente estudo, os resultados para o SCCI corroboram a baixa correlação com a temperatura, entretanto, indicam uma correlação negativa com a precipitação. Essa aparente divergência é consistente com a observação dos mesmos autores de que a relação entre NDVI, chuva e temperatura pode ser incerta em escalas locais, como verificado para o SCCI (Tabela 4).

As correlações entre os índices de vegetação (NDVI e EVI) e a temperatura de superfície foram baixas e não significativas. Este resultado indica uma influência limitada da temperatura, pois a tendência negativa pode refletir o domínio da radiação solar (Sharma et al., 2021), ao mesmo tempo que a presença de água na área de estudo pode mascarar os efeitos térmicos sobre a vegetação. Por outro lado, essa correlação negativa pode refletir no tempo de respostas entre os valores de precipitação pluvial e o NDVI, de acordo com as premissas de Gessner et al. (2013) na Ásia Central e por Chen et al. (2023) no planalto da Mongólia.

A correlação entre LAI e temperatura de superfície é positiva e significativa em JFM ( $r = 0,72$ ) e JAS ( $r = 0,49$ ). Em relação a precipitação, a correlação é negativa em AMJ (Tabela 4). Embora as correlações não sejam significativas, elas sugerem uma tendência de que a precipitação pluvial possa estar associada a uma redução no LAI. Para o mesmo manguezal, no Litoral Sul de SP, Lima e Galvani (2018) estudaram a relação dos atributos climáticos com o manguezal. Os autores encontraram que o índice de Área Foliar (LAI) não tem resposta imediata com os totais pluviométricos ao mês e sim a uma variabilidade de longa duração. No entanto, considerando o manguezal como um todo, os resultados indicam que nem todos os períodos sazonais apresentam respostas significativas às defasagens temporais (Figura 3). Apenas o EVI exibiu correlações defasadas significativas, evidenciando maior sensibilidade às variações climáticas passadas em comparação ao NDVI e ao LAI.

**Figura 3.** Correlação cruzada (lag) entre os índices de vegetação e as variáveis climáticas.



Fonte: Autores (2024)

O EVI apresentou correlação positiva e significativa com a precipitação em AMJ ( $R = 0,49$ ; lag = 1), indicando que uma maior disponibilidade hídrica no trimestre anterior favorece o desenvolvimento da vegetação. Em relação à temperatura de superfície, observou-se correlação negativa e significativa em JAS ( $R = -0,47$ ; lag = 1), sugerindo que temperaturas mais elevadas

estão associadas à redução da atividade fotossintética, possivelmente devido ao estresse térmico e à limitação fisiológica da vegetação frente ao excesso de calor.

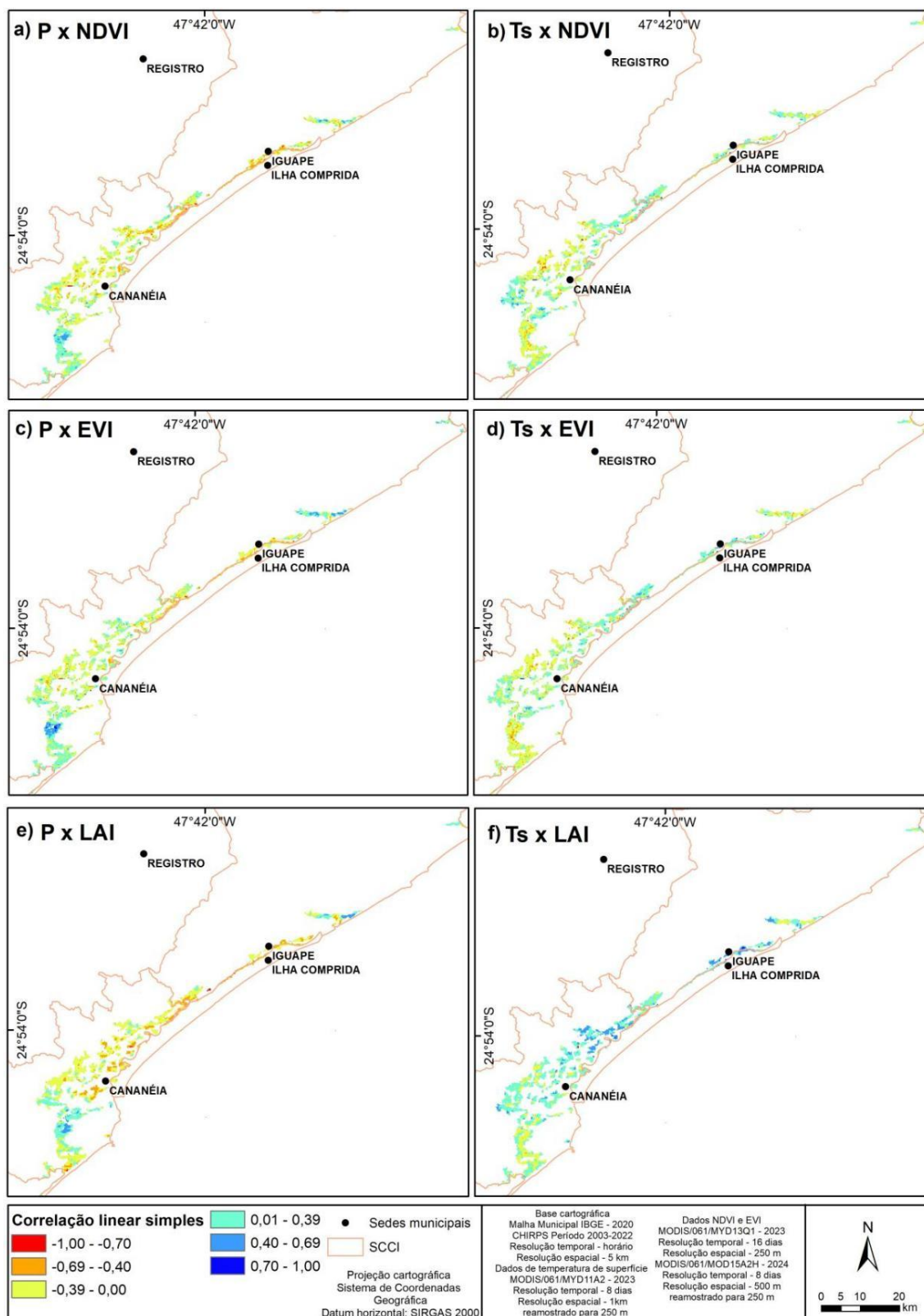
### **Espacialização das correlações dos índices de vegetação com a temperatura de superfície e a precipitação pluvial**

A análise de correlação espacial, tanto anual quanto sazonal, revelou que as áreas com correlação estatisticamente significativa são, em geral, pontuais e geograficamente concentradas. A maior parte do manguezal do SCCI não apresentou correlação forte com as variáveis climáticas no período estudado (S2). Nesta análise só serão destacadas as áreas que apresentaram correlações significativas.

As correlações entre os atributos climáticos e a LAI foram as que mostraram as maiores áreas com correlação significativas. Para o LAI, a precipitação pluvial apresentou correlação positiva no setor ao sul, incluindo o oeste o Parque Estadual da Ilha do Cardoso. No setor norte, no curso inferior do rio Ribeira de Iguape também tivemos área com correlação positiva ( $r = 0,70$  até  $1,0$ ), correspondendo 3,3% da área de estudo. No setor central do SCCI, as áreas de manguezal apresentaram correlações negativas moderadas para o LAI e precipitação pluvial, cerca de 15,7% do manguezal (Figura 4c). Em relação à temperatura de superfície e ao LAI, a correlação positiva e moderada (14,8%) foi observada no setor central, na região da Ilha de Cananéia, entre o mar de Cubatão e o Mar Pequeno.

Os índices NDVI e EVI apresentaram correlações positivas com a precipitação em áreas ao sul do SCCI e no curso inferior do Rio Ribeira de Iguape (Figura 3). Para o EVI, a correlação foi forte em 0,2% da área e moderada em 5,5% enquanto para o NDVI foi moderada em 2,8%. Em relação à  $T_s$ , ambos os índices registraram correlações positivas e moderadas em áreas próximas à baía de Trapandé e ao mar Pequeno, cobrindo 3,4% (NDVI) e 3,1% (EVI) do manguezal. Este padrão positivo com a  $T_s$  corrobora com os encontrados por Rendana et al. (2023) para o manguezal de Sungsang, costa sul de Ilha de Sumatra, na Indonésia. Em contraste, correlações negativas e fortes com a  $T_s$  foram observadas em áreas pontuais do setor sul e central, correspondendo a 0,1% para o NDVI e 0,2% para o EVI.

**Figura 4.** Correlação linear anual entre os índices de vegetação e a precipitação pluvial (a,b,c) e a temperatura de superfície (d,e,f) entre 2003 até 2022 para o manguezal.



Fonte: Autores (2024)

Os períodos sazonais apresentaram padrões de correlação semelhantes à correlação anual. As correlações significativas também foram em áreas pequenas, principalmente para o NDVI e EVI. Entretanto, para o LAI, as correlações abrangeram áreas mais nos períodos de JFM e JAS.

Em JFM (S7), foram observadas correlações significativas, positivas e moderadas, entre a precipitação pluvial e o NDVI (no sul de Iguape) e entre a precipitação e o EVI (no sul de Cananéia). Adicionalmente, a correlação positiva e forte entre o NDVI e P correspondeu apenas 0,2% da área de estudo. A correlação entre LAI e precipitação foi negativa e moderada para a região central e para o extremo sul do SCCI, correspondendo a 15,1%.

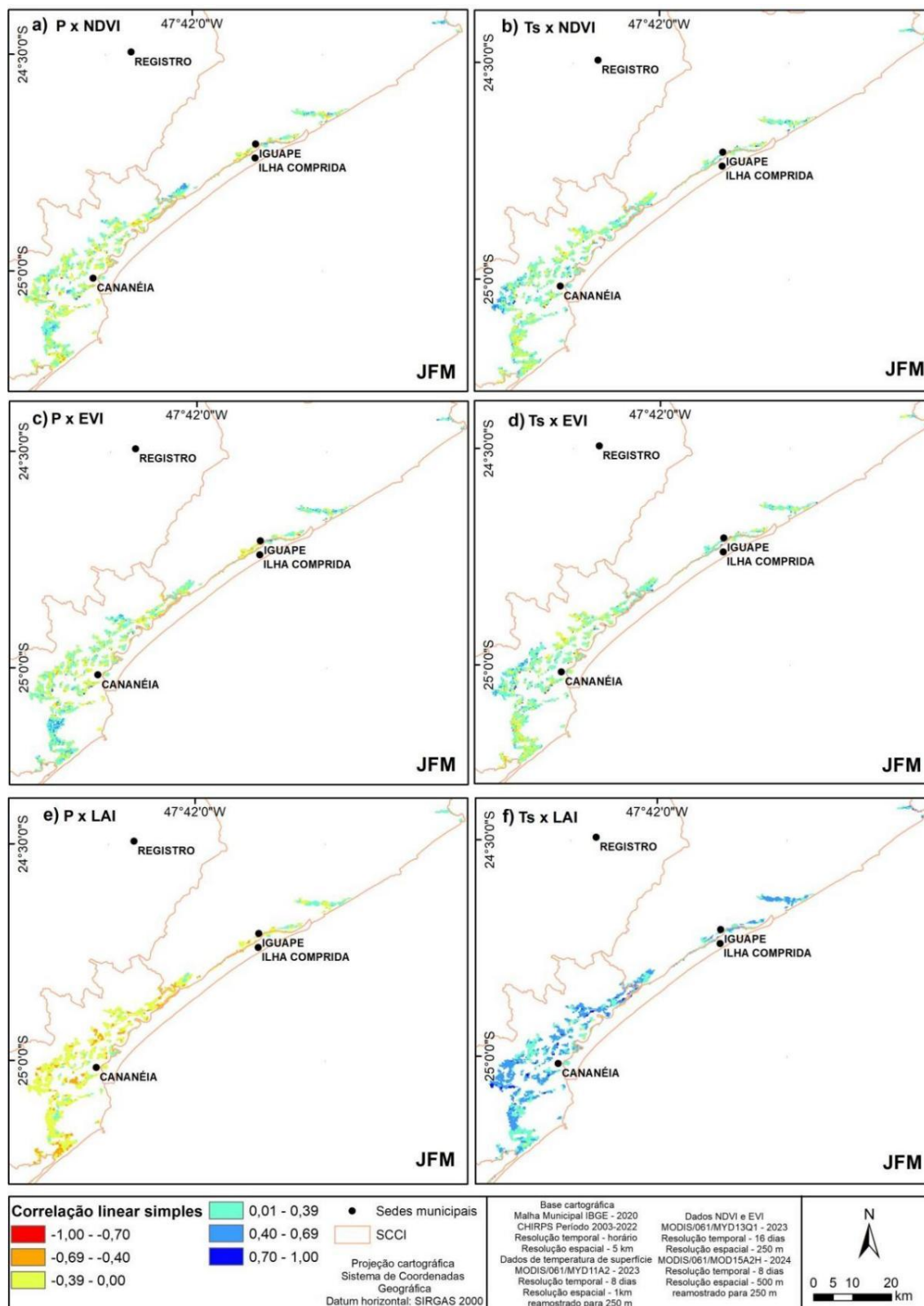
Em relação a Ts, a correlação foi positiva e moderada entre o NDVI e Ts em pequena área no setor central (8,8%). Na região sul, destaca-se a correlação negativa e moderada (1,0%) e negativa e forte (0,1%) entre o NDVI e Ts. A correlação LAI e Ts foi positiva e moderada em grande parte do manguezal (56,0%), abrangendo áreas do sul até o extremo norte. A correlação negativa entre Ts e NDVI encontrada no setor sul do SCCI (Figura 5d) indica que, quando ocorre um aumento nos valores de NDVI, há uma diminuição de Ts, enquanto a diminuição do valor de NDVI leva a um aumento de Ts (GARAI et al., 2022). A relação negativa entre o NDVI e a Ts é explicada por Sharma et al. (2021), como sendo um efeito das radiações solares predominantes em comparação com outras variáveis biofísicas. Além disso, essa correlação negativa é consistente com os resultados da literatura (YUE et al., 2007; GUHA et al., 2020; KHAN; JAVED, 2022; HAN et al., 2022; SHARMA et al., 2021).

No período AMJ, NDVI e EVI exibiram correlações positivas e moderadas com a precipitação, concentradas principalmente no setor sul e abrangendo 2,2% e 4,8% da área, respectivamente. Em contraste, o LAI demonstrou uma relação inversa, com correlação negativa e moderada em 19,2% do manguezal, localizada na região central e no curso inferior do Rio Ribeira de Iguape (Figura 5c) (S8).

A resposta à temperatura de superfície (Ts) foi heterogênea. O NDVI apresentou correlação positiva e moderada em uma área restrita do setor central (2,0%, Figura 6a), enquanto o EVI revelou correlação negativa e moderada na parte continental de Cananéia (5,0%). Entretanto, a

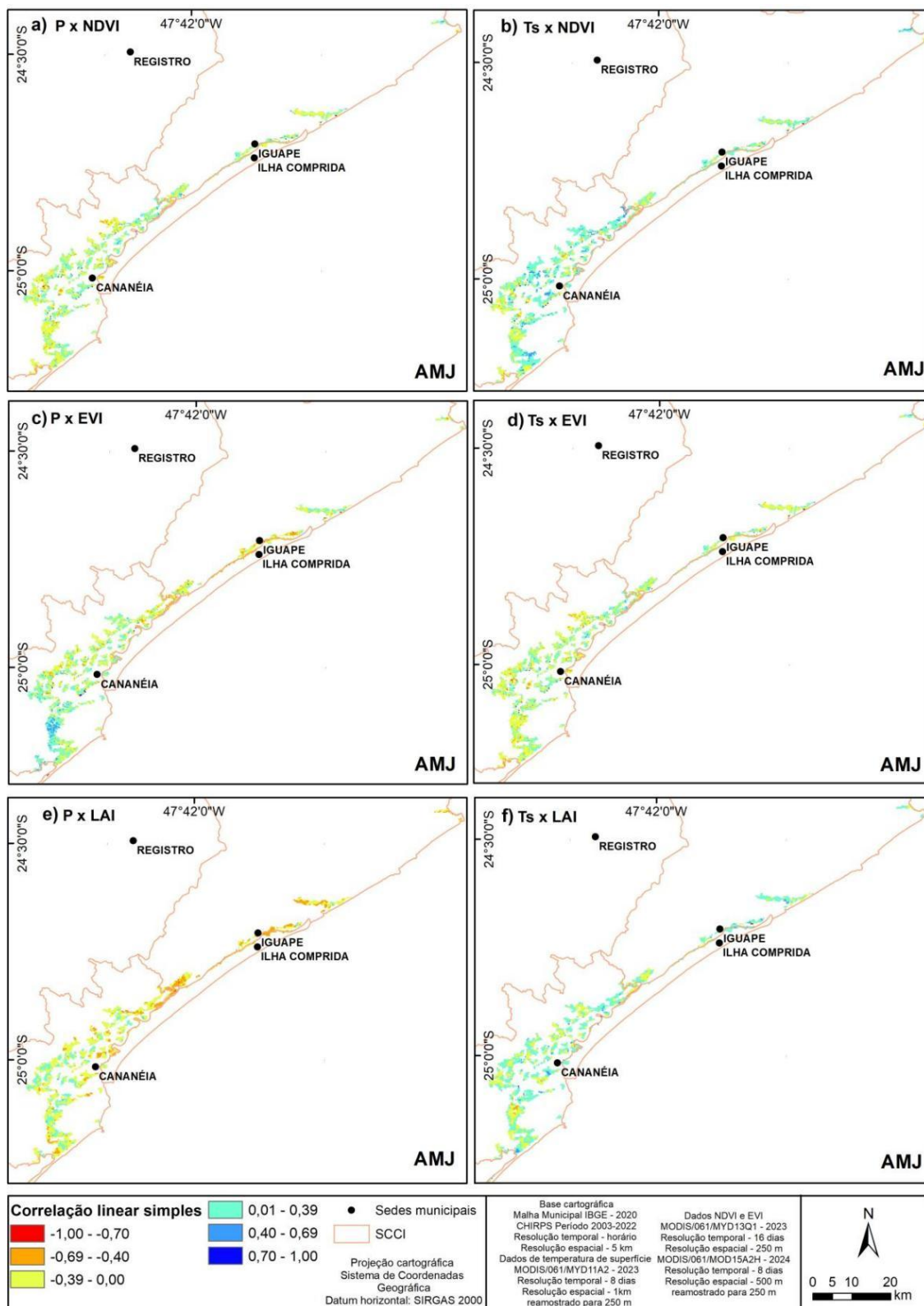
correlação entre LAI e Ts foi positiva e moderada na metade norte do SCCI (3,6%). A associação positiva entre os índices e a Ts, como a observada para o NDVI e LAI, pode ser um reflexo da temperatura do mar, conforme apontado por Osland et al. (2016) e Lima e Galvani (2018).

**Figura 5.** Correlação linear sazonal (JFM) entre os índices de vegetação e a precipitação pluvial (a,b,c) e a temperatura de superfície (d,e,f) entre 2003 até 2022 para o manguezal.



Fonte: Autores (2024)

**Figura 6.** Correlação linear sazonal (AMJ) entre os índices de vegetação e a precipitação pluvial (a,b,c) e a temperatura de superfície (d,e,f) entre 2003 até 2022 para o manguezal.



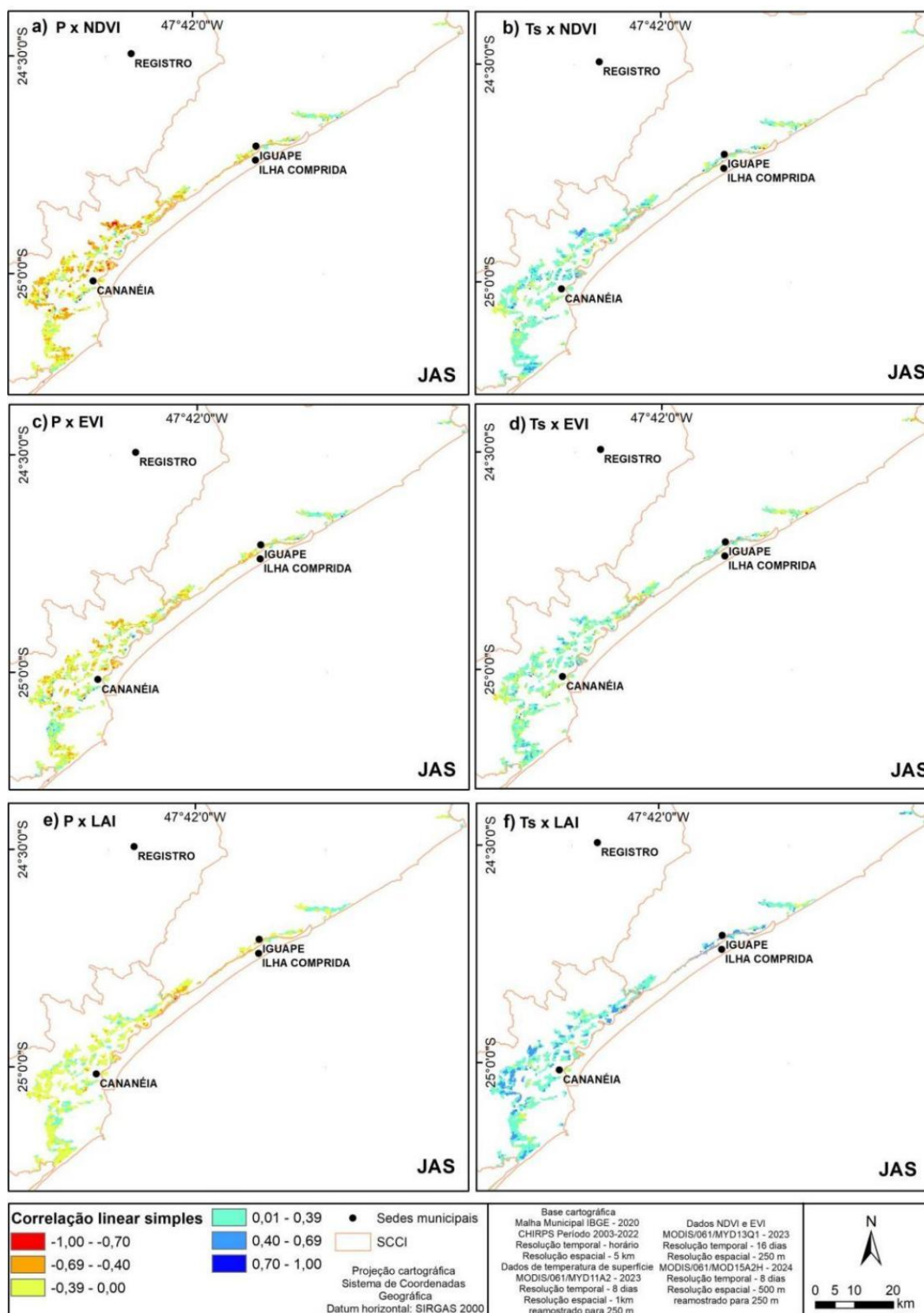
Fonte: Autores (2024)

No período de JAS (Figura 7), as correlações significativas com a precipitação pluvial exibiram um claro padrão espacial (S9). No curso inferior do Rio Ribeira de Iguape, a correlação foi positiva para os três índices. Em contraste, o setor central registrou uma correlação negativa, sendo esta mais acentuada para o NDVI e, no caso do LAI, abrangendo 6,0% da área no sudoeste de Iguape. Para o LAI, a predominância da correlação negativa pode ser atribuída à resposta tardia da vegetação à sazonalidade hídrica, o que corrobora a análise de defasagem temporal (lag), que revelou respostas temporal tardias (1 trimestre) em todo o ecossistema, embora não significativa. Dessa forma, o trimestre JAS coincide com o ápice da estação menos chuvosa (Figura 2), e a consequente baixa disponibilidade de água pode induzir estresse na vegetação de manguezal, que depende de um delicado equilíbrio de umidade e salinidade (ALONGI, 2015). A redução das chuvas também diminui a lavagem dos sais do substrato, um processo fundamental para o desenvolvimento do manguezal em litorais brasileiros (HERZ, 1991).

A  $T_s$  apresentou correlação significativa para o NDVI e EVI em poucas áreas no setor central. A correlação positiva e moderada correspondeu 7,4 % para o EVI e 10,3% para o NDVI. A correlação positiva entre o LAI e  $T_s$  foi em 25,0% das áreas, refletindo em maiores áreas no setor central e foz do Rio Ribeira de Iguape.

Em OND (Figura 8), a correlação com a precipitação foi predominantemente negativa e moderada para NDVI e EVI, abrangendo 22,6% e 22,8% da área no setor central, respectivamente. Em uma pequena região no sul de Cananéia, a oeste do Parque Estadual da Ilha do Cardoso, foram observadas correlações positivas com a precipitação. Para o NDVI, essa correlação correspondeu a 0,4% (moderada) e 0,1% (forte) (S10). Para o EVI, a área foi de 1,2% (moderada) e 0,1% (forte) (Figura 8a, 8b). Apesar de abranger uma pequena área no manguezal do SCCI, essa correlação positiva é consistente com os resultados de estudos que analisam a variação da vegetação em função da precipitação pluvial (YUE et al., 2007; Guha et al., 2020; KHAN; JAVED, 2022; Han et al., 2022).

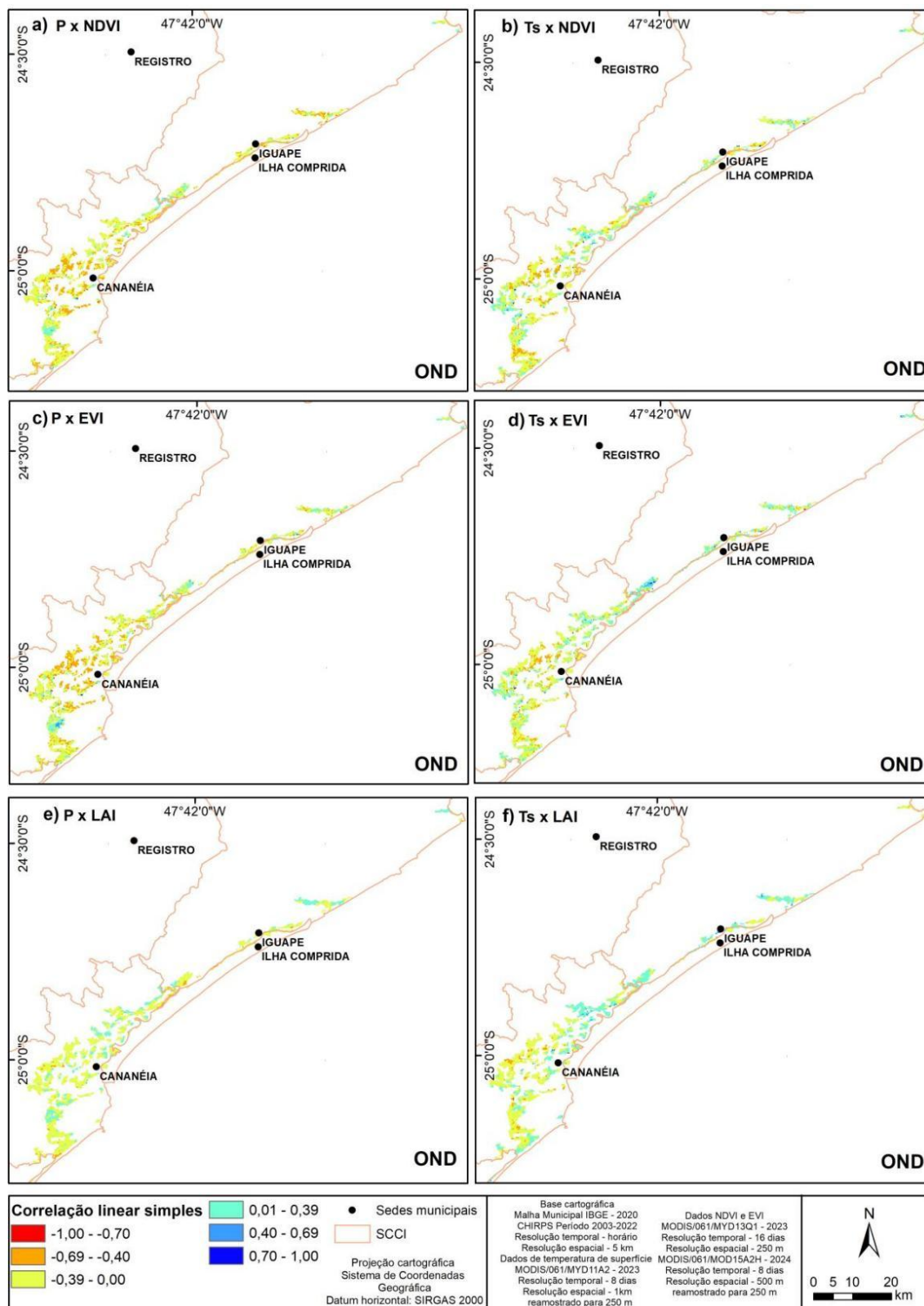
**Figura 7.** Correlação linear sazonal (JAS) entre os índices de vegetação e a precipitação pluvial (a,b,c) e a temperatura de superfície (d,e,f) entre 2003 até 2022 para o manguezal.



Fonte: Autores (2024)

Para as correlações significativas com a Ts, o NDVI apresentou correlação positiva (1,2%) ao norte de Cananéia (Figura 7d), mas negativa e moderada em 12,9%, no sul de Cananéia e na região central. O EVI apresentou correlação em áreas similares, a correlação positiva no setor sul de Iguape e negativa nos setores central e sul do SCCI. Estes resultados são consistentes com a literatura, que aponta para uma relação não uniforme entre Ts e NDVI em manguezais. A ocorrência de correlações positivas em algumas de nossas áreas de estudo alinha-se aos encontrados por Rendana et al. (2023). Ao mesmo tempo, a tendência geral de correlação fraca na maior parte do manguezal corrobora as observações de Ruan et al. (2022).

**Figura 8.** Correlação linear sazonal (OND) entre os índices de vegetação e a precipitação pluvial (a,b,c) e a temperatura de superfície (d,e,f) entre 2003 até 2022 para o manguezal.



Fonte: Autores (2024)

Para o LAI, não foi encontrada correlação significativa com a precipitação. Contudo, sua relação com a Ts foi análoga à do EVI, exibindo um padrão espacialmente dividido: correlação positiva e moderada no setor central (1,4%) e negativa e moderada na porção continental mais ao sul (4,1%). Apesar de setores pontuais do manguezal apresentarem correlações significativas, observou-se um padrão recorrente em determinadas áreas. Geralmente, a região oeste do PEIC apresentou correlação positiva com a precipitação e negativa com a Ts, padrão este que está de acordo com pesquisas sobre a variação dos índices de vegetação em relação aos atributos climáticos (YUE et al., 2007; Guha et al., 2020; KHAN; JAVED, 2022; Han et al., 2022).

Diante disso, essa seria uma região com maior propensão a mudanças se ocorrerem oscilações na precipitação pluvial. Assim, se a precipitação aumentar, o manguezal se expande, e se a precipitação diminuir o manguezal diminui. Em pesquisas recentes, a tendência da precipitação pluvial para essa região é diminuir, indicando que num cenário futuro poderá ter a diminuição do manguezal (BARATTO et al., 2024). Apesar de os dados temporais sazonais não apresentarem respostas significativas a esse atraso de tempo, a precipitação pode variar espacialmente entre as diferentes áreas do manguezal. Além disso, a resolução do sensor também pode ser um fator limitante para a obtenção de correlações mais precisas.

A correlação com a precipitação, positiva em JFM e JAS, tornou-se negativa em AMJ e OND (principalmente para o NDVI). Esta resposta podem ser influenciada pelos impactos de alterações ambientais e eventos extremos já documentados para esta área por Lima et al. (2023; 2024).

De maneira geral, observou-se que os dados apresentados nesta pesquisa corroboram com outros trabalhos sobre a variação do manguezal em relação aos índices de vegetação e os atributos climáticos. Assim, observou-se que, em partes, os dados indicam que esses resultados não apresentaram correlações insignificantes, como em Ruan et al. (2022), Xuefei et al. (2021) e em Raihan et al. (2023), que também encontraram relações insignificantes entre os índices de vegetação e os atributos climáticos. No entanto, a correlação espacial mostrou que algumas

regiões do SCCI se destacam com correlações significativas entre os atributos climáticos e os índices de vegetação.

## CONCLUSÕES

As correlações entre os índices de vegetação e os atributos climáticos indicaram que a precipitação pluvial e a temperatura de superfície apresentaram pouca interferência na variação da vegetação do manguezal, tanto temporalmente quanto espacialmente. No entanto, a temperatura de superfície mostra uma correlação positiva com o LAI, indicando que temperaturas mais altas favorecem a densidade foliar nesses períodos. A análise da defasagem temporal evidenciou que o EVI se mostrou mais sensível às condições climáticas passadas ( $\text{lag} = 1$ ), ao correlacionar-se positivamente com a precipitação e negativamente com a temperatura do trimestre anterior.

Duas áreas se destacaram pela maior sensibilidade, sendo o setor oeste da Ilha do Cardoso vulnerável a alterações de precipitação e temperatura, e o curso inferior do Rio Ribeira de Iguape influenciado principalmente pela precipitação. A identificação dessas áreas pode subsidiar políticas públicas voltadas à mitigação dos impactos associados às mudanças climáticas, bem como orientar medidas de adaptação em escala local.

Esses resultados mostraram serem promissores nas análises dos atributos climáticos em relação ao impacto no manguezal. No entanto, futuras pesquisas devem focar na compreensão das respostas tardias da vegetação, a fim de detalhar a resposta espacial do manguezal às mudanças nos atributos climáticos. Além disso, sugere-se a realização de outros estudos locais, pois as limitações dos sensores orbitais, como a resolução espacial, podem ocultar relações mais finas. Tais estudos locais permitiriam validar as correlações e incorporar o efeito de eventos extremos, que também podem aprimorar essas análises.

## AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão da Bolsa de Pós-Doutorado (PD) - (Número do Processo: 2022/02383-3). O terceiro autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Bolsa de Produtividade - Nível 1D (Número do Processo: 304973/2017-3).

## REFERÊNCIAS

- ALONGI, Daniel.M. The impact of climate change on mangrove forests. **Current Climate Change Reports** 1:p. 30–39. 2015.
- ALONGI, Daniel.M. Present state and future of the world's mangrove forests. **Environ. Conserv.** 29, p. 331–49. 2002.
- ALONGI, Daniel .M. Climate Change and Mangroves. In Mangroves: Biodiversity, Livelihoods and Conservation; **Springer Nature**: Singapore, 2022; pp. 175–198, ISBN 9789811905193
- ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; GONÇALVES, José Leonardo de Moraes; SPAROVEK, Gerd. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728. dez. 2013.
- ALQASEMI, Abduldaem S. et al. Retrieval of monthly maximum and minimum air temperature using MODIS aqua land surface temperature data over the United Arab Emirates. *Geocarto International*, v. 37, n. 11, p. 2996-3013, 2022. DOI: 10.1080/10106049.2020.1837261. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1837261>. Acesso em: 22 out. 2025.
- ASBRIDGE, Emma; LUCAS, Richard; ACCAD, Arnon; DOWLING, Ralph. Mangrove Response to Environmental Changes Predicted Under Varying Climates: case studies from australia. **Current Forestry Reports**, v. 1, n. 3, p. 178-194.jul. 2015.
- [BARATTO, Jakeline](#); DE BODAS TERASSI, Paulo Miguel ; DE BESERRA DE LIMA, Nádia Gilma ; GALVANI, Emerson. Precipitation Anomalies and Trends Estimated via Satellite Rainfall Products in the Cananeia-Iguape Coastal System, Southeast Region of Brazil. *Climate*, v. 12, p. 22. 2024.
- BECK, Hylke E.; ZIMMERMANN, Niklaus E.; MCVICAR, Tim R.; VERGOPOLAN, Noemi; BERG, Alexis; WOOD, Eric F.. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, v. 5, n. 1, p. 1-12. 30. out. 2018.

BIMRAH, Kanika; DASGUPTA, Rajarshi; HASHIMOTO, Shizuka; SAIZEN, Izuru; DHYANI, Shalini. Ecosystem Services of Mangroves: a systematic review and synthesis of contemporary scientific literature. **Sustainability**, v. 14, n. 19, p. 12051. set. 2022.

CONTI, Luis Américo; ARAÚJO, Carlos Alberto Sampaio de; CUNHA-LIGNON, Marília. Spatial database modeling for mangrove forests mapping; example of two estuarine systems in Brazil. **Modeling Earth Systems And Environment**, v. 2, n. 2, p. 1-12, 12. abr. 2016.

CHIRPS. Climate Hazards Center. **InfraRed Precipitation with station data (CHIRPS)**. Disponível em: <<https://www.chc.ucsb.edu/data>>. Acesso em : 17 jan. 2022.

CENIMA. **Centro Nacional de Monitoramento e Informações Ambientais**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/composicao/quem-e-quem/centros/cenima>. Acesso em: 21 maio 2022.

CHEN, Yang; MA, Long; LIU, Tingxi; HUANG, Xing; SUN, Guohua. The Synergistic Effect between Precipitation and Temperature for the NDVI in Northern China from 2000 to 2018. **Applied Sciences**, v. 13, n. 14, p. 8425. jul. 2023.

[CUNHA-LIGNON, M.](#); [KAMPEL, M.](#); [MENGHINI, R. P.](#); CINTRON, G.; SCHAFFER--NOVELLI, Y.; DAHDOUH-GUEBAS, F. Mangrove Forests Submitted to Depositional Processes and Salinity Variation Investigated using satellite images and vegetation structure surveys. **Journal of Coastal Research**, v. 1, p. 344-348, 2011.

DIDAN, K.. MYD13Q1 MODIS/Aqua Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Acesso em: 25 maio. 2024.

FAZLIOGLU, Fatih; WAN, Justin S. H.; CHEN, Luzhen. Latitudinal shifts in mangrove species worldwide: evidence from historical occurrence records. **Hydrobiologia**, v. 847, n. 19, p. 4111-4123. set. 2020.

[GALVANI, Emerson.](#); [LIMA, Nádia. Gilma Beserra. de](#); ALVES, Rogério. Roger. Variabilidade e tendência das precipitações no litoral Sul de São Paulo. **Ravista Geonorte**, v. 3 nº 8, p. 1163. 2012.

[GALVANI, Emerson.](#); LIMA, Nádia Gilma. Beserra.. de ; CUNHA-LIGNON, Marília. Análise microclimática de manguezais em Unidades de Conservação de Proteção Integral e de Uso Sustentável. In: Perez Filho, A., Reis, R.R.. (Org.). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. 1ed.Campinas: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 2017, p. 1457-1468.

GALVANI, Emerson; EMILIANO, Valéria Machado.; BARATTO, Jakeline. Comparação dos principais sistemas de classificação climática aplicado à bacia hidrográfica do rio Ribeira de Iguape. In: NOVAIS, Giuliano Tostes. **Climas do Brasil::** classificação climática e aplicações. Porto Alegre: Totalbooks, 2023. p. 266-273.

GARAI, Sanjoy; KHATUN, Masjuda; SINGH, Ronak; SHARMA, Jassi; PRADHAN, Minakshi; RANJAN, Ashish; RAHAMAN, Sk Mujibar; KHAN, Mohammed Latif; TIWARI, Sharad. Assessing correlation between Rainfall, normalized difference Vegetation Index (NDVI) and land surface temperature (LST) in Eastern India. **Safety In Extreme Environments**, v. 4, n. 2, p. 119-127. jun. 2022.

GESSNER, Ursula; NAEIMI, Vahid; KLEIN, Igor; KUENZER, Claudia; KLEIN, Doris; DECH, Stefan. The relationship between precipitation anomalies and satellite-derived vegetation activity in Central Asia. **Global And Planetary Change**, v. 110, p. 74-87, nov. 2013.

GETZNER, Michael; ISLAM, Muhammad Shariful. Ecosystem Services of Mangrove Forests: results of a meta-analysis of economic values. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, [S.L.], v. 17, n. 16, p. 5830. ago. 2020.

GITAU, Peter N.; DUVAIL, Stéphanie; VERSCHUREN, Dirk. Evaluating the combined impacts of hydrological change, coastal dynamics and human activity on mangrove cover and health in the Tana River delta, Kenya. **Regional Studies In Marine Science**, v. 61, p. 102898, jul. 2023.

GUHA, Subhanil; GOVIL, Himanshu. Land surface temperature and normalized difference vegetation index relationship: a seasonal study on a tropical city. **Sn Applied Sciences**, v. 2, n. 10, p. 1-14.set. 2020.

HERZ, R. **Manguezais do Brasil**. São Paulo: IO/USP /CIMR, 1991. 227p

HUETE, Alfredo R.. Vegetation Indices, Remote Sensing and Forest Monitoring. **Geography Compass**, v. 6, n. 9, p. 513-532. set. 2012.

KARSCH, Gwendolyn; MUKUL, Sharif A.; SRIVASTAVA, Sanjeev Kumar. Annual Mangrove Vegetation Cover Changes (2014–2020) in Indian Sundarbans National Park Using Landsat 8 and Google Earth Engine. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 5592.mar. 2023.

KHAN, Z. ;JAVED, A. Correlation between land surface temperature (LST) and normalized difference vegetation index(NDVI) in Wardha Valley Coalfield, Maharashtra, Central India. **Nova Geodesia**, 2(3):53. 2022.

HAN, Weijie; CHEN, Donghua; LI, Hu; CHANG, Zhu; CHEN, Jian; YE, Lizao; LIU, Saisai; WANG, Zuo. Spatiotemporal Variation of NDVI in Anhui Province from 2001 to 2019 and Its Response to Climatic Factors. **Forests**, v. 13, n. 10, p. 1643. out. 2022.

KUMARI, Nikul; SRIVASTAVA, Ankur; DUMKA, Umesh Chandra. A Long-Term Spatiotemporal Analysis of Vegetation Greenness over the Himalayan Region Using Google Earth Engine. **Climate**,v. 9, n. 7, p. 109. jun. 2021.

[LIMA, Nádia.Gilma Beserra. de;](#) [GALVANI, Emerson.](#)Análise da temperatura do solo e do ar no manguezal do litoral sul do estado de São Paulo. **Ravista Geonorte**, v. 3 nº 9, p. 1256-1266.2012.

LIMA, Nádia Gilma Beserra de; GALVANI, Emerson; FALCÃO, Rita Monteiro; CUNHA-LIGNON, Marília. Air temperature and canopy cover of impacted and conserved mangrove ecosystems: a study of a subtropical estuary in brazil. **Journal Of Coastal Research**, v. 165, p. 1152-1157. jan. 2013.

LIMA, Nádia Gilma Beserra de; GALVANI, Emerson. Interaction of climatic attributes in the mangroves of the south coast of São Paulo and their relation with climatic controls. **CONFINS (PARIS)**, v. 1, p. 1-23. 2018.

LIMA, Nádia Gilma Beserra de.; CUNHA-LIGNON, Marília.; [GALVANI, Emerson](#). Microclimatic analysis of mangroves in two distinct categories of Protected Areas and conserved status. **SOCIEDADE & NATUREZA (UFU. ONLINE)**, v. 33, p. 57483. 2021.

LIMA, Nádia Gilma Beserra de; CUNHA-LIGNON, Marília; MARTINS, Alécio; ARMANI, Gustavo; GALVANI, Emerson. Impacts of Extreme Weather Event in Southeast Brazilian Mangrove Forest. **Atmosphere**, v. 14, n. 8, p. 1195. jul. 2023.

LIMA, Nádia Gilma Beserra de et al. A interferência de eventos extremos nos manguezais do sistema costeiro cananeia-iguape. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 20.; ENCONTRO LUSO-AFRO-AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA E AMBIENTE, 4., 2024, Campina Grande. Anais [...]. Campina Grande: Realize Editora, 2024. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/118134>. Acesso em: 22 out. 2025.

LUO, Qin; LI, Zhen; HUANG, Zijian; ABULAITI, Yierxiati; YANG, Qiong; YU, Shixiao. Retrieval of Mangrove leaf area index and its response to typhoon based on WorldView-3 image. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 30, p. 100931. abr. 2023.

MAHIQUES, Michel **Michaelovitch** DE; BURONE, Leticia.; FIGUEIRA, Rubens.Cesar.Lopes.; LAVENÉRE-WANDERLEY, Ana Aamélia de.Oliveira.; CAPELLARI, Benjamim.; ROGACHESKI, Carlos.Eduardo.; BARROSO, Cássia Pianca.; DOS SANTOS, Leornado.Augusto.Samaritano.; CORDERO, Luisa.Mariutti.; CUSSIOLI, Mariana.Coppede. Anthropogenic influences in a lagoonal environment: A multiproxy approach at the valo grande mouth, Cananéia-Iguape system (SE Brazil). **Braz. J. Oceanogr.** 2009, 57, 325–337.

MYNENI, R., Y. KNYAZIKHIN, T. Park. MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. 2021, distributed by NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Acesso em: 26 maio 2024.

MUTANGA, Onesimo; KUMAR, Lalit. Google Earth Engine Applications. **Remote Sensing**, 11(5), 591, 2019.

MONTEIRO, Carlos .Augusto Figueredo. **A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo: estudo geográfico sob forma de Atlas**. São Paulo: Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 1973. 130 p.

NOVAIS, Gustavo Tostes; GALVANI, Emerson. Uma tipologia de classificação climática aplicada ao estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, v.42, p.2-21, 2022.

NDUNGU, Lilian; OWARE, Maungu; OMONDI, Steve; WAHOME, Anastasia; MUGO, Robinson; ADAMS, Emily. Application of MODIS NDVI for Monitoring Kenyan Rangelands Through a Web Based Decision Support Tool. **Frontiers In Environmental Science**,, v. 7, p. 1-12. dez. 2019.

NEPITA-VILLANUEVA, Marta Rocío; BERLANGA-ROBLES, César Alejandro; RUIZ-LUNA, Arturo; BARCENAS, J. Héctor Morales. Spatio-temporal mangrove canopy variation (2001–2016) assessed using the MODIS enhanced vegetation index (EVI). **Journal Of Coastal Conservation**, v. 23, n. 3, p. 589-597. abr. 2019.

OSLAND, Michael J.; DAY, Richard H.; HALL, Courtney T.; BRUMFIELD, Marisa D.; DUGAS, Jason L.; JONES, William R. Mangrove expansion and contraction at a poleward range limit: Climate extremes and land-ocean temperature gradients. **Ecological Society of America**, p. 125-137. 2016.

OSLAND, Michael J.; FEHER, Laura C.; GRIFFITH, Kereen T.; CAVANAUGH, Kyle C.; ENWRIGHT, Nicholas M.; DAY, Richard H.; STAGG, Camille L.; KRAUSS, Ken W.; HOWARD, Rebecca J.; GRACE, James B.. Climatic controls on the global distribution, abundance, and species richness of mangrove forests. **Ecological Monographs**, 87, p.341–359. 2016b.

PRADHAN, Biswajeet; YOON, Sungsoo; LEE, Sanghun. Examining the Dynamics of Vegetation in South Korea: an integrated analysis using remote sensing and in situ data. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 16, n. 2, p. 300, 11 jan. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs16020300>.

PONZONI, Flávio. Jorge.; SHIMABULURO, Yosio.Edemir.; KUPLICH, Tatiana. Mora. Sensoriamento Remoto da Vegetação. 2.ed.atualizada e ampliada. São Paulo: Oficina de Texto, 2012.

RAIHAN, Asif; ALI, Tarig; MORTULA, Md; GAWAI, Rahul. Spatiotemporal Analysis of the Impacts of Climate Change on UAE Mangroves. **Journal Of Sustainable Development Of Energy, Water And Environment Systems**,v. 11, n. 3, p. 1-19. set. 2023.

REBOITA, Michelle Simões.; KRUSCHE, Nisia; AMBRIZZI, Tércio.; PORFÍRIO DA ROCHA, Rosmeri. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. Terra E Didat. 8, 34–50, 2012.

RENDANA, Muhammad; IDRIS, Wan Mohd Razi; RAHIM, Sahibin Abdul; ABDO, Hazem Ghassan; ALMOHAMAD, Hussein; DUGHAIRI, Ahmed Abdullah Al; ALBANAI, Jasem A.. Effects of the built-up index and land surface temperature on the mangrove area change along the southern Sumatra coast. **Forest Science And Technology**, v. 19, n. 3, p. 179-189. jun. 2023.

RIBEIRO, João. Batista. Miranda.; ROCHA, Edson. José. Paulinho. da.; FERREIRA, Marco. Antonio.Vieira.; OLIVEIRA, Paulo.Jorge de.; MATOS, Arthur. Características do balanço de energia no manguezal de Bragança-PA e alterações no fluxo de calor no solo em função do desmatamento. **GEOGRAFIA**, Rio Claro, v. 32, n. 3, p. 683-698. 2007.

ROSS, Jurandyr.Luciano.Sanches. The Morphogenesis of the Ribeira Do Iguape Basin and Environmental Systems.. *GEOUSP—Espaço E Tempo* **2002**, 12, 21–46.

RUAN, Linlin; YAN, Min; ZHANG, Li; FAN, Xiangshun; YANG, Haoxiang. Spatial-temporal NDVI pattern of global mangroves: a growing trend during 2000-2018. **Science Of The Total Environment**, v. 844, p. 157075. out. 2022.

SANT'ANNA NETO, João. Lima. Ritmo climático e a gênese das chuvas na Zona Costeira Paulista. In: III Encuentro de Geógrafos de América Latina, Toluca. Memórias. Toluca: UNAM, 1991. v. 2. p. 49-66. 1991.

SANTOS, Luciana Cavalcanti Maia; MATOS, Humberto Reis; SCHAEFFER-NOVELLI, Yara; CUNHA-LIGNON, Marília; BITENCOURT, Marisa Dantas; KOEDAM, Nico; DAHDUOH-GUEBAS,

Farid. Anthropogenic activities on mangrove areas (São Francisco River Estuary, Brazil Northeast): a gis-based analysis of cbers and spot images to aid in local management. **Ocean & Coastal Management**, v. 89, p. 39-50. mar. 2014.

SHARMA, Manish; BANGOTRA, Pargin; GAUTAM, Alok Sagar; GAUTAM, Sneha. Sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) to land surface temperature, soil moisture and precipitation over district Gautam Buddh Nagar, UP, India. **Stochastic Environmental Research And Risk Assessment**, v. 36, n. 6, p. 1779-1789. 2021.

TAILLIE, Paul J; ROMAN-CUESTA, Rosa; LAGOMASINO, David; CIFUENTES-JARA, Miguel; FATOYINBO, Temilola; OTT, Lesley e; POULTER, Benjamin. Widespread mangrove damage resulting from the 2017 Atlantic mega hurricane season. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 6, p. 064010. maio 2020.

TARIFA, J.R. Unidades climáticas dos maciços litorâneos da Juréia-Itatins. In: **Estação Ecológica Juréia-Itatins: Ambiente Físico, Flora e Fauna**. Org. Otavio A.V. Marques; Wânia Duleba. São Paulo: Holos. 2004. p. 42 a 50.

USGS (United States Geological Survey). **Imagens Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)**. Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov/products/myd13q1v061/>>Acesso:10 agosto 2022.

WAN, Z., S. HOOK, G. HULLEY. MYD11A2 MODIS/Aqua Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V006. 2015, distributed by NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD11A2.006>. Acesso em: 26 maio 2024.

WANG, J.; RICH, P. M.; PRICE, K. P.. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. **International Journal Of Remote Sensing**, [S.L.], v. 24, n. 11, p. 2345-2364.jan. 2003.

WARD, R.D.; D.A. FRIESS, R.H. DAY; R.A. MACKENZIE. Impacts of climate change on mangrove ecosystems: a region by region overview. **Ecosystem Health and Sustainability** 2:e01211, 2016.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, v. 11, p. 41-76. 1947

YUE, W; XU, J; TAN, W; XU, L. The relationship between land surface temperature and NDVI with remote sensing: application to shanghai landsat 7 etm+ data. **International Journal Of Remote Sensing**, v. 28, n. 15, p. 3205-3226. jul. 2007.

YU, P. et al. Global spatiotemporally continuous MODIS land surface temperature dataset. **Scientific Data**, v. 9, p. 1-15, 2022. DOI: 10.1038/s41597-022-01214-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01214-8>. Acesso em: 22 out. 2025.

ZHAO, Demei; ZHEN, Jianing; ZHANG, Yinghui; MIAO, Jing; SHEN, Zhen; JIANG, Xiapeng; WANG, Junjie; JIANG, Jincheng; TANG, Yuzhi; WU, Guofeng. Mapping mangrove leaf area index (LAI) by combining remote sensing images with PROSAIL-D and XGBoost methods. **Remote Sensing In Ecology And Conservation**, v. 9, n. 3, p. 370-389. out. 2022.

XUEFEI; Liujie; GUOTAO, Dong; HUAZHU, Xue. Spatial-temporal variation of NDVI and its responses to precipitation in the upper of Heihe from 2000 to 2019. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 783, n. 1, p. 012148. maio 2021.

**Material complementar I** No seguinte material complementar ([10.5281/zenodo.12557161](https://zenodo.org/record/12557161)) estão disponíveis os gráficos das correlações anuais (S1) e sazonais (S3,S4,S5 e S6). No material se encontra também os mapas com os valores de p-valor das correlações anuais (S2) e sazonais (S7,S8,S9 e S10).