



**LILIANE MOREIRA NERY**

**ANÁLISE ESPACIAL E ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
POR MEIO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS DA APA DE  
ITUPARARANGA**

Sorocaba

2025



**LILIANE MOREIRA NERY**

**ANÁLISE ESPACIAL E ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO  
POR MEIO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAS DA APA DE  
ITUPARARANGA**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutora em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" na Área de Concentração Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva

Coorientador: Prof. Dr. Antônio César Germano Martins

Sorocaba

2025

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| N456a | <p>Nery, Liliane Moreira</p> <p>Análise espacial e estimativa da evapotranspiração por meio de redes neurais artificiais da APA de Itupararanga / Liliane Moreira</p> <p>Nery. -- Sorocaba, 2025</p> <p>109 p. : il., tabs.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba</p> <p>Orientador: Darllan Collins da Cunha e Silva</p> <p>Coorientador: Antônio César Germano Martins</p> <p>1. Sensoriamento remoto. 2. Geociências. 3. Geoprocessamento. 4. Evapotranspiração. I. Título.</p> |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA TESE:** ANÁLISE ESPACIAL E ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR MEIO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAS DA APA DE ITUPARARANGA

**AUTORA:** LILIANE MOREIRA NERY

**ORIENTADOR:** DARLLAN COLLINS DA CUNHA E SILVA

**COORIENTADOR:** ANTONIO CESAR GERMANO MARTINS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciências Ambientais, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. DARLLAN COLLINS DA CUNHA E SILVA (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Ambiental / Unesp - Campus Sorocaba



Prof. Dr. LUIS ARMANDO DE ORO ARENAS (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciencia e Tecnologia - UNESP - Campus de Sorocaba



Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. VANESSA CEZAR SIMONETTI (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia / Universidade de Sorocaba (UNISO)



Prof. Dr. RENAN ANGRIZANI DE OLIVEIRA (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade de Sorocaba (UNISO)



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**Câmpus de Sorocaba**

Profª. Drª. KELLY CRISTINA TONELLO (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Florestal / Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR

Sorocaba, 14 de fevereiro de 2025

Dedico este trabalho à Deus. Sem Ele nada seria possível.  
À minha família pelo apoio incondicional.  
Aos professores e professoras que me influenciaram e me formaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por Sua infinita bondade e graça. Mesmo diante dos momentos mais desafiadores e difíceis desta jornada, Ele me guardou, fortaleceu e guiou com amor e misericórdia.

Aos meus pais, minha madrasta e meu padrasto, meus irmãos e a minha irmã, que, com palavras de incentivo e apoio incondicional, foram minha base emocional e fonte de força. Obrigada por nunca medirem esforços para demonstrar o orgulho que sentem por mim e por estarem sempre ao meu lado, tanto na vida pessoal quanto na profissional.

À minha mãe, que desde quando eu era pequena insistiu para que eu me dedicasse aos estudos e que, há 10 anos, me incentivou a iniciar minha jornada profissional por meio do ensino técnico. Obrigada por acreditar em mim e plantar essa semente de conhecimento, que se transformou em uma paixão pela ciência.

Um agradecimento especial, ao professor doutor Darllan, mais que um chefe e orientador, é um verdadeiro amigo. Obrigada por me guiar não apenas na elaboração desta tese, mas também na construção da minha carreira. Foram três anos de muita parceria, desafios e aprendizados, que resultaram não só neste trabalho, mas também em novos projetos e financiamentos. Sua dedicação e apoio foram fundamentais para minha evolução profissional.

Aos meus colegas e amigos do LabGeo, por compartilharem comigo cafés da manhã, risadas, desafios e parcerias ao longo dessa trajetória. À Giovana, nossa querida técnica do LabGeo, por nos dar suporte e participar de muitos momentos felizes também!

Minha gratidão também aos alunos de iniciação científica que tive a honra de coorientar e que contribuíram diretamente para este trabalho: Anderson, Enzo, Thales e Helena. Vocês deixaram sua marca nesta pesquisa.

Às novas amigas, Ana e Gabriela, que estiveram ao meu lado, oferecendo suporte emocional e motivação sempre que precisei, mesmo quando não sabiam que eu precisava. Obrigada por tornarem essa caminhada mais leve e especial.

Aos professores e pesquisadores Pablo Sarricolea, Hugo Ramero e Cristian Ruíz, pela acolhida calorosa na Universidad de Chile e na Universidad Católica de Chile. Agradeço também às chicas e chicos da FAU-UChile, em especial à Laura, por toda a receptividade e amizade durante minha estadia no Chile. Vocês tornaram essa experiência ainda mais enriquecedora.

Aos professores que aceitaram gentilmente o convite para compor a banca de defesa, dedico meu profundo agradecimento por disporem do seu tempo para compartilhar suas vivências e contribuir com suas experiências na melhoria deste trabalho.

Aos professores e à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, pelo conhecimento compartilhado, apoio e suporte constante. Também expresso minha gratidão ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, pela oportunidade de desenvolver este projeto.

Gratidão à todos os professores e pesquisadores que cruzaram meu caminho nesta jornada acadêmica e científica, obrigado por compartilharem seus conhecimentos e experiências, deixando marcas indeléveis em minha formação.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta caminhada. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada contribuição, por menor que tenha sido, tornou possível a realização deste sonho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - processo 444734/2023-6.



*“Ensina-me o bom senso e o conhecimento, pois confio em teus mandamentos.”*  
Salmos 119:66.

## RESUMO

NERY, Liliane Moreira. **Análise espacial e estimativa da evapotranspiração por meio de redes neurais artificiais da APA de Itupararanga**. 2025. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2025.

Essa pesquisa parte da compreensão teórica sobre os efeitos das mudanças no uso da terra e seu impacto no ciclo hidrológico em virtude do desequilíbrio no fluxo energético, com ênfase na importância do monitoramento ambiental para a gestão dos recursos hídricos. Utilizando uma combinação de técnicas de sensoriamento remoto e inteligência artificial, a pesquisa procurou compreender a dinâmica da superfície terrestre através de uma análise espaço-temporal por um período de 35 anos, mas também propor estimar a evapotranspiração através de dados uso e cobertura da terra e bandas espectrais de imagens Landsat, utilizando uma Rede Neural Artificial *Multi-Layer Perceptron* (RNA-MLP). Para isso, procurou-se, inicialmente, analisar as mudanças no uso e cobertura da terra na Área de Proteção Ambiental (APA) de Itupararanga ao longo do tempo através de dados MapBiomas. Na sequência, modelou-se a evapotranspiração região na região, utilizando o algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), e verificou-se a relação entre as mudanças no uso da terra e as variações na evapotranspiração através de estatística zonal. Por fim, a pesquisa avança com a aplicação de redes neurais artificiais para estimar a evapotranspiração na APA. Para isso, utilizou-se o modelo *Multi-Layer Perceptron*, dados de reflectância e radiância espectral e dados de uso e cobertura da terra do MapBiomas. A acurácia dos modelos foi avaliada comparando as previsões com os dados reais, mostrando resultados promissores para o uso dessa tecnologia no monitoramento ambiental. A capacidade de estimar com precisão a evapotranspiração e monitorar as mudanças no uso da terra fornece subsídios cruciais para a adoção de políticas que visem garantir a sustentabilidade hídrica da APA de Itupararanga. Com base nos resultados obtidos, recomenda-se a implementação de medidas de preservação e um planejamento mais eficiente do uso da água, beneficiando diretamente a população que depende do reservatório.

Palavras-chave: Mata Atlântica; SEBAL; Landsat; Represa de Itupararanga; Sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

NERY, Liliane Moreira. **Spatial analysis and estimation of evapotranspiration using artificial neural networks in the Itupararanga Environmental Protection Area**. 2025. Doctoral dissertation (Doctorate in Environmental Sciences) – Institute of Science and Technology, São Paulo State University, Sorocaba, 2025.

This research begins with a theoretical understanding of the effects of land-use changes and their impact on the hydrological cycle due to the imbalance in energy flow, emphasizing the importance of environmental monitoring for water resource management. Using a combination of remote sensing and artificial intelligence techniques, it sought to understand the dynamics of the Earth's surface through a spatiotemporal analysis over a 35-year period, and also propose to estimate evapotranspiration through land-use and land-cover data, as well as spectral bands from Landsat images, using a Multi-Layer Perceptron Artificial Neural Network (MLP-ANN). To this end, the research initially analyzed the changes in land use and cover in the Itupararanga Environmental Protection Area over time using MapBiomas data. Subsequently, evapotranspiration in the region was modeled using the SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) algorithm, and the relationship between land-use changes and evapotranspiration variations was assessed through zonal statistics. Finally, the research advances with the application of artificial neural networks to estimate evapotranspiration in the Itupararanga Environmental Protection Area (EPA). A Multi-Layer Perceptron model, spectral reflectance and radiance data, and land-use and land-cover data from MapBiomas were used. The accuracy of the models was evaluated by comparing the predictions with actual data, showing promising results for the use of this technology in environmental monitoring. The ability to accurately estimate evapotranspiration and monitor land-use changes provides crucial support for adopting policies aimed at ensuring the water sustainability of the Itupararanga APA. Based on the obtained results, the implementation of preservation measures and more efficient water-use planning is recommended, directly benefiting the population that depends on the reservoir.

Keywords: Atlantic Forest; SEBAL; Landsat; Itupararanga Reservoir; Remote sensing.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1: Localização da Área de Proteção Ambiental de Itupararanga.                                                                                                                                                                                                             | 36  |
| Figura 2: Dados meteorológicos na região da APA de Itupararanga durante o período de 1986 a 2021.                                                                                                                                                                                | 37  |
| Figura 3: Zoneamento ambiental de acordo com o plano de manejo da Área de Proteção Ambiental de Itupararanga.                                                                                                                                                                    | 39  |
| Figura 4: Distribuição espacial do uso e cobertura da terra na APA de Itupararanga entre 1986 e 2021.                                                                                                                                                                            | 42  |
| Figura 5: Análise da tendência de mudança do uso e cobertura da terra na APA de Itupararanga, para: (a) área florestal; (b) culturas permanentes; (c) culturas temporárias; (d) áreas urbanizadas; (e) silvicultura; (f) área campestre; (g) pastagem; e (h) águas continentais. | 44  |
| Figura 6: Linha do tempo da criação de políticas públicas no contexto da APA de Itupararanga.                                                                                                                                                                                    | 49  |
| Figura 7: Fluxograma de aplicação do algoritmo SEBAL para cálculo da evapotranspiração.                                                                                                                                                                                          | 60  |
| Figura 8: Processo iterativo para a determinação o calor sensível.                                                                                                                                                                                                               | 73  |
| Figura 9: Distribuição espaço-temporal da evapotranspiração real diária para as diferentes classes de uso e cobertura da terra na APA de Itupararanga.                                                                                                                           | 78  |
| Figura 10: Evapotranspiração real (mm/dia) de 2021 reclassificada.                                                                                                                                                                                                               | 92  |
| Figura 11: Comparação da distribuição espacial da evapotranspiração real obtida por (a) SEBAL e (b) RNA-MLP na classificação a cada 0,50 mm/dia.                                                                                                                                 | 100 |
| Figura 12: Comparação da distribuição espacial da evapotranspiração real obtida por (a) SEBAL e (b) RNA-MLP na classificação a cada 1,00 mm/dia.                                                                                                                                 | 101 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1: Extensão do uso e cobertura da terra na APA de Itupararanga ao longo de 1986 a 2021 expressos em área (km <sup>2</sup> ) e proporção (%).   | 45  |
| Tabela 2: Análise da expansão e diminuição dos usos e cobertura da terra da APA de Itupararanga expressos em área (km <sup>2</sup> ) e proporção (%). | 46  |
| Tabela 3: Tabela cruzada para a comparação entre cada classe de uso e cobertura da terra expressos em área (km <sup>2</sup> ).                        | 47  |
| Tabela 4: Características das imagens utilizadas.                                                                                                     | 62  |
| Tabela 5: Valores de $\omega\lambda$ para as bandas espectrais dos satélites Landsat 5 e Landsat 8.                                                   | 63  |
| Tabela 6: Determinação do coeficiente de correção LSAVI do índice SAVI a partir da análise estatística do NDVI.                                       | 64  |
| Tabela 7: Análise da estatística zonal do NDVI em relação ao uso e cobertura da terra da APA de Itupararanga.                                         | 64  |
| Tabela 8: Evolução do coeficiente $\lambda$ em relação ao SAVI máximo para a APA de Itupararanga (1986-2021).                                         | 66  |
| Tabela 9: Relação de G/Rn para as várias classes de uso e cobertura da terra na APA de Itupararanga.                                                  | 69  |
| Tabela 10: Análise estatística dos valores obtidos de evapotranspiração por meio do modelo SEBAL.                                                     | 76  |
| Tabela 11: Estatística zonal e descritiva da evapotranspiração real diária.                                                                           | 79  |
| Tabela 12: Descrição da quantidade de pixels a serem amostrados em cada imagem reclassificada.                                                        | 91  |
| Tabela 13: Análise dos modelos de RNA-MLP avaliados.                                                                                                  | 96  |
| Tabela 14: Valores do índice Kappa para cada modelo avaliado.                                                                                         | 99  |
| Tabela 15: Valores do Índice de Concordância Kappa (KIA) para cada classe do Modelo 2.                                                                | 100 |
| Tabela 16: Valores do Índice de Concordância Kappa (KIA) para cada classe do Modelo 5.                                                                | 101 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP – Áreas Protegidas

APA – Área de Proteção Ambiental

CIIAGRO – Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas

CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente

DN – Digital Number

DP – Desvio Padrão

ET – Evapotranspiração

ET<sub>24</sub> – Evapotranspiração Real Diária

ET<sub>p</sub> – Evapotranspiração Potencial

ET<sub>r</sub> – Evapotranspiração Real

ET<sub>o</sub> – Evapotranspiração de Referência

ESUN – Irradiâncias Espectrais Exoatmosféricas

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

G – Calor no Solo

H – Calor Sensível

IAF – Índice de Área Foliar

IAF<sub>APA</sub> – Índice de Área Foliar da APA de Itupararanga

IDW – Interpolação pela Ponderação do inverso da Distância

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IV – Índice de Vegetação

LE – Calor Latente

MapBiomass – Projeto MapBiomass Brasil

MDE – Modelo Digital de Elevação

MLP – *Multi-layer perceptron*

MAE – Erro Médio Absoluto

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NASADEM – *NASA Digital Elevation Model*

NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*

NA – Não Aplicável

P – Precipitação

PMMA – Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica

RMS – Raiz Quadrada da Média dos Quadrados  
RMSE – Raiz do Erro Quadrático Médio  
RNA – Rede Neural Artificial  
RNA-MLP – Rede Neural Artificial *Multi-layer perceptron*  
RS – Radiação Solar  
T – Temperatura  
SAVI - *Soil Adjusted Vegetation Index*  
SCP – *Semi-Automatic Classification Plugin*  
SEBAL – *Surface Energy Balance Algorithm for Land*  
SSEBop – *Simplified Surface Energy Balance Operational*  
SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza  
SR – Sensoriamento Remoto  
S/d – Sem Dado  
TOA – Topo da Atmosfera  
UC – Unidade de Conservação  
UCT – Uso e Cobertura da Terra  
USGS – *United States Geological Survey*  
UTM – *Universal Transversa de Mercator*  
ZCB – Zona de Conservação da Biodiversidade  
ZCRH – Zona de Conservação dos Recursos Hídricos  
ZOC – Zona de Ocupação Consolidada  
ZOD – Zona de Ocupação Diversificada  
ZOR – Zona de Ocupação Rural

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$  – Albedo

$\alpha_{toa}$  – Albedo no topo da atmosfera

$A_L$  – Fator de redimensionamento aditivo específico para cada banda

$\cos$  – Cosseno

$\cos\theta$  – Cosseno da incidência solar

$c_p$  – Calor específico do ar

$d_r$  – Inverso da distância relativa Terra-Sol

$d$  – Índice de Willmott

$D_i$  – Distância euclidiana

$dT$  – Diferença de temperatura

$\varepsilon_a$  – Emissividade atmosférica

$\varepsilon_{NB}$  – Emissividade da superfície no comprimento 10,4 a 12,5  $\mu\text{m}$

$\varepsilon_0$  – Emissividade da superfície no comprimento 6 a 14  $\mu\text{m}$

$G_{sc}$  – Constante solar

$h$  – Hora

$\text{km}$  – Quilômetro

$\text{km}^2$  – Quilômetro quadrado

$k$  – Constante de von Karman

$k_1$  – Constante 1 de calibração da radiância da banda termal

$k_2$  – Constante 2 de calibração da radiância da banda termal

$K_{no}$  – *Kappa index agreement for no information*

$K_{location}$  – *Kappa index agreement for location*

$K_{locationstrata}$  – *Kappa index agreement for location stratification*

$K_{standard}$  – *Kappa index agreement standard*

$L_\lambda$  – Radiância espectral para cada banda

$L_{PI}$  – Plano de informação referente ao valor de  $L$  do SAVI

$L_{SAVI}$  – Fator de correção do SAVI

$L$  – Comprimento de Monin-Obukhov

$m$  – Metro

$m^2$  – Metro quadrado

$m^3$  – Metro cúbico

$\text{mm}$  – Milímetro



Mha – Mega hectares

$M_L$  – Fator de dimensionamento multiplicativo específico para cada banda

$M_{cal}$  – Valor do número digital

$N_h$  – Quantidade de nós na camada oculta, em número inteiro

$N_f$  – Quantidade de nós na camada de saída

$N_i$  – Quantidade de nós na camada de entrada

$\pi$  – Número Pi

% – Porcentagem

$\rho_\lambda$  – Refletância espectral para cada banda

$\rho_{ar}$  – Massa específica do ar

$\rho_w$  – Massa específica da água

$\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann

$r_{ah}$  – Resistência aerodinâmica ao transporte de calor

$r_{ah_{APA}}$  – Resistência aerodinâmica ao transporte do calor na APA de Itupararanga

$R_a$  – Valor médio de radiação recebida na APA de Itupararanga durante 24 horas

$R_{aex}$  – Radiação extraterrestre

$R_n$  – Fluxo de radiação líquida

$R_{n24}$  – Valor médio do fluxo da radiação líquida diária

$R_S\downarrow$  – Radiação solar de ondas curtas incidente na superfície

$R_{toa}$  – Radiação solar no topo da atmosfera

$R_L\downarrow$  – Radiação de ondas longas emitida pela superfície

$R_L\uparrow$  – Radiação de ondas longas refletida pela superfície

sin – Seno

sen $\theta$  – Seno do ângulo da incidência solar

$T_a$  – Temperatura do ar

$T_{aAPA}$  – Temperatura do ar interpolada para a APA de Itupararanga

$T_s$  – Temperatura da superfície

$\tau_{sw}$  – Transmissividade atmosférica

$u_{est}$  – Velocidade do vento na estação meteorológica a 10m de altura

$u_{méd}$  – Velocidade média do vento

$u$  – Velocidade de fricção do vento

$u_{APA}$  – Velocidade de fricção para a APA de Itupararanga

$u_{est}$  – Velocidade de fricção do vento na estação meteorológica

$u_{200}$  – Velocidade do vento a 200m de altura

$u_{200APA}$  – Velocidade do vento a 200m de altura na APA de Itupararanga

$u_{estAPA}$  – Velocidade do vento interpolada para a APA de Itupararanga

W – Watt

$\omega_\lambda$  – Coeficiente de ponderação para cálculo do albedo superficial

$\omega_s$  – Ângulo horário do pôr-do-sol

$z_{est}$  – Altura de medição da velocidade do vento na estação meteorológica

$z_{0mest}$  – Comprimento da rugosidade da superfície na estação meteorológica

$z_{0m}$  – Comprimento da rugosidade da superfície

$z_{0mAPA}$  – Comprimento da rugosidade da superfície na APA de Itupararanga

$\lambda$  – Calor latente de vaporização da água

$\Lambda$  – Coeficiente para cálculo do SAVI

$\delta$  – Ângulo da declinação solar

$\varphi$  – Latitude

$\Lambda$  – Fração de evaporação

$\varpi_{est}$  – Coeficiente de ponderação da velocidade do vento na estação meteorológica

$\varpi_{APA}$  – Coeficiente de ponderação da velocidade do vento na APA de Itupararanga

$\psi_{m,h}$  – Parâmetros de correção de estabilidade da atmosfera

## SUMÁRIO

|          |                                                                                                               |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO GERAL</b>                                                                                       | <b>18</b> |
| 1.1      | Referências bibliográficas                                                                                    | 20        |
| <b>2</b> | <b>HIPÓTESE</b>                                                                                               | <b>22</b> |
| <b>3</b> | <b>OBJETIVOS</b>                                                                                              | <b>22</b> |
| 3.1      | Objetivo geral                                                                                                | 22        |
| 3.2      | Objetivos específicos                                                                                         | 22        |
| <b>4</b> | <b>CAPÍTULO 1 - REFERENCIAL TEÓRICO</b>                                                                       | <b>23</b> |
| 4.1      | Considerações sobre os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra                                       | 23        |
| 4.2      | Compreendendo o ciclo hidrológico para a gestão dos recursos hídricos                                         | 25        |
| 4.3      | Integrando sensoriamento remoto e inteligência artificial para compreender a dinâmica na superfície terrestre | 27        |
| 4.4      | Referências bibliográficas                                                                                    | 29        |
| <b>5</b> | <b>CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DA MUDANÇA NO USO E COBERTURA DA TERRA DA APA DE ITUPARARANGA</b>                     | <b>33</b> |
| 5.1      | Introdução                                                                                                    | 33        |
| 5.2      | Material e método                                                                                             | 35        |
| 5.2.1    | Área de estudo                                                                                                | 35        |
| 5.2.2    | Material                                                                                                      | 39        |
| 5.2.3    | Método                                                                                                        | 40        |
| 5.3      | Resultados e discussão                                                                                        | 41        |
| 5.4      | Conclusão                                                                                                     | 53        |
| 5.5      | Referências bibliográficas                                                                                    | 53        |
| <b>6</b> | <b>CAPÍTULO 3 - ANÁLISE ESPACIAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA APA DE ITUPARARANGA</b>                              | <b>59</b> |
| 6.1      | Introdução                                                                                                    | 59        |
| 6.2      | Material e método                                                                                             | 61        |
| 6.2.1    | Albedo                                                                                                        | 62        |
| 6.2.2    | Temperatura superficial                                                                                       | 63        |
| 6.2.3    | Fluxo de radiação líquida                                                                                     | 67        |
| 6.2.4    | Calor no solo                                                                                                 | 68        |
| 6.2.5    | Calor sensível                                                                                                | 69        |
| 6.2.6    | Calor latente e evapotranspiração                                                                             | 73        |
| 6.2.7    | Validação dos valores de evapotranspiração obtidos pelo algoritmo SEBAL                                       | 75        |
| 6.2.8    | Análise estatística da relação entre o uso e cobertura da terra com evapotranspiração                         | 75        |
| 6.3      | Resultados e discussão                                                                                        | 76        |
| 6.3.1    | Validação dos valores de evapotranspiração obtidos através do SEBAL                                           | 76        |
| 6.3.2    | Estimativa da evapotranspiração na APA de Itupararanga                                                        | 76        |

|                                                                                                      |                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>6.4 Conclusão</b>                                                                                 | <b>83</b>      |
| <b>6.5 Referências bibliográficas</b>                                                                | <b>83</b>      |
| <br><b>7 CAPÍTULO 4 - ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO REDE NEURAL ARTIFICIAL</b>          | <br><b>88</b>  |
| <b>7.1 Introdução</b>                                                                                | <b>88</b>      |
| <b>7.2 Material e métodos</b>                                                                        | <b>90</b>      |
| 7.2.1 Reclassificação da evapotranspiração e amostragem para o treinamento da rede neural artificial | 90             |
| 7.2.2 Estrutura da rede neural artificial utilizada                                                  | 92             |
| 7.2.3 Avaliação do modelo                                                                            | 95             |
| <b>7.3 Resultados e discussão</b>                                                                    | <b>96</b>      |
| 7.3.1 Modelos obtidos                                                                                | 96             |
| 7.3.2 Análise da acurácia dos melhores modelos obtidos                                               | 98             |
| <b>7.4 Conclusão</b>                                                                                 | <b>103</b>     |
| <b>7.5 Referência bibliográficas</b>                                                                 | <b>104</b>     |
| <br><b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                                                                    | <br><b>108</b> |

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

As origens das Áreas Protegidas (AP) remontam ao século XIX, quando a preservação estava fortemente vinculada à apreciação das paisagens e à preservação da beleza natural (Phillips, 2004). Nesse contexto, o primeiro parque nacional surgiu em 1872, com a criação do Parque Nacional de Yellowstone nos Estados Unidos, seguido pela criação de outros parques em países como Austrália, Canadá e Nova Zelândia (Phillips, 2004).

No século XX, o conceito de AP se espalhou globalmente, impulsionado por diferentes motivações (Phillips, 2004). Atualmente, devido à crescente pressão sobre os recursos naturais, governos e sociedades ao redor do mundo tomam medidas para proteger e conservar áreas de significativa importância ambiental (Coelho Júnior *et al.*, 2020; Gurney *et al.*, 2023; Karimi; Yazdandade; Reside, 2023; Soares-Filho *et al.*, 2023). Por exemplo, atualmente 8% dos oceanos do mundo e 17% do território terrestre global estão incluídos em AP (Geldmann *et al.*, 2019; Gurney *et al.*, 2023).

No Brasil, a Lei nº 9.985, promulgada em 18 de julho de 2000, que criou o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), visa orientar a criação, implementação e gestão das AP em todo o Brasil, protegendo os recursos naturais, inclusive aqueles necessários para a subsistência das populações tradicionais, além de salvaguardar os ecossistemas naturais, a fauna e a flora (Brasil, 2000).

O SNUC define diferentes categorias de AP, com objetivos e características específicas, divididas em dois grupos principais: Unidades de Proteção Integral, voltadas para a preservação da natureza sem permitir o uso direto dos recursos naturais; e Unidades de Uso Sustentável, que visam compatibilizar o uso sustentável dos recursos naturais com a preservação da natureza (Brasil, 2000).

Entre as Unidades de Uso Sustentável previstas no SNUC estão as Áreas de Proteção Ambiental (APA), categoria da Unidade de Conservação (UC) desse estudo. A APA de Itupararanga é o foco principal da pesquisa, sendo uma região de grande importância ecológica, com papel fundamental na conservação dos recursos hídricos e naturais do estado da Região Metropolitana de Sorocaba.

De acordo com o Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Sorocaba e Médio Tietê (CBH-SMT), este é um local de interesse regional em termos de gestão hídrica em virtude da presença da Represa de Itupararanga e de outros recursos hídricos que abastecem mais de um milhão de pessoas residentes nos limites dessa UC (CBH - SMT, 2022). Além disso, o relatório publicado pelo CBH-SMT alerta para o aumento da vazão outorgada na região para

uso agrícola, além de um aumento crescente da população que utiliza água da represa, o que diminui a disponibilidade hídrica e agrava a situação do déficit hídrico.

Portanto, a gestão correta dos recursos naturais na APA de Itupararanga é essencial para o abastecimento de água da região, de forma que a dinâmica de uso e cobertura da terra (UCT) é um fator crítico para a sua sustentabilidade. Mudanças no UCT, especialmente aquelas associadas à urbanização e atividades agrícolas, podem alterar drasticamente os processos ambientais da região, impactando tanto a biodiversidade quanto o ciclo hidrológico (Williams; Newbold, 2020; Machado *et al.*, 2020). Portanto, compreender como essas mudanças afetam a evapotranspiração (ET) é vital para a gestão hídrica sustentável da APA.

A ET é um indicador hidrológico essencial para o estudo de recursos hídricos, pois integra os processos de transferência de água do solo e da vegetação para a atmosfera. A capacidade de monitorar a ET de forma precisa, favorece uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, especialmente em áreas sujeitas a estresse hídrico (Li *et al.*, 2017), como a APA de Itupararanga.

Existem três tipos principais de ET amplamente discutidos na literatura: evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>), que se refere à quantidade máxima de água que poderia ser perdida para a atmosfera por evaporação e transpiração se a disponibilidade de água fosse ilimitada (Allen *et al.*, 1998). A evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>), que considera as limitações reais do ambiente e as condições climáticas locais, refletindo a quantidade efetiva de água perdida (Allen *et al.*, 1998). E a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), que se trata de uma estimativa padronizada que representa a evapotranspiração de uma superfície de referência (geralmente grama ou alfafa), usada como base para o cálculo da ET de culturas específicas. (Allen *et al.*, 1998).

A análise das mudanças no UCT é de extrema relevância para a compreensão dos processos ambientais e da resposta dos ecossistemas às pressões antrópicas. Por esse motivo, compreende-se que as variações espaciais e temporais da ET são diretamente influenciadas pelas mudanças no UCT, uma vez que diferentes tipos de cobertura do solo, como florestas, áreas agrícolas e superfícies urbanas, apresentam taxas de ET significativamente distintas, em virtude do fluxo energético do sistema, albedo e índices de vegetação (Karimi; Bastiaanssen, 2015; Machado *et al.*, 2020; Miranda *et al.*, 2022).

O Capítulo 1 dessa tese corresponde ao referencial teórico, contendo a base conceitual e metodológica necessária para a compreensão do estudo, validação da hipótese e embasamento para discutir os resultados esperados nos capítulos posteriores, abordando a

relação entre alterações no uso e cobertura da terra, os impactos no ciclo hidrológico e o potencial do sensoriamento remoto e da inteligência artificial na análise da dinâmica da superfície terrestre.

Nesse sentido, no Capítulo 2 é realizada uma análise das transformações no UCT ao longo do tempo na APA de Itupararanga, que forneceu uma base sólida para a interpretação dos impactos dessas mudanças na ET, tema abordado no Capítulo 3. Sendo, a estimativa da ET um processo complexo, dada a dificuldade na disponibilidade de dados meteorológicos e a complexidade de algoritmos existentes no cálculo da ET por meio de sensoriamento remoto e processamento de imagens. Portanto, a utilização de Redes Neurais Artificiais (RNA) para estimativa da ET pode representar uma inovação metodológica importante no contexto do monitoramento ambiental.

No Capítulo 4, é verificada a possibilidade de aplicação de RNA na estimativa espacial da ET, integrando dados de UCT e bandas espectrais de satélites, buscando enfatizar as interações entre a cobertura do solo e os processos hidrológicos.

O estudo contribui para a área de Ciências Ambientais, ao avaliar novos métodos para análise de mudanças ambientais e previsão de processos hidrológicos, integrando técnicas avançadas de geoprocessamento e inteligência artificial. As descobertas podem apoiar políticas públicas voltadas à gestão sustentável da APA de Itupararanga, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em particular o ODS 6 (Água Potável e Saneamento) e o ODS 15 (Vida Terrestre), que incentivam a conservação e o uso sustentável dos recursos hídricos e ecossistemas terrestres.

## 1.1 Referências bibliográficas

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome: FAO, 1998.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19985.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm). Acesso em: 08 de fev. 2023.

CBH-SMT. Comitê da Bacia Hidrográfica Sorocaba-Médio Tietê. **Relatório de Situação 2022: Ano base 2021**. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents//CBH-SMT/23316/rs-2022-2021.pdf>. Acesso em: 14 de jul. de 2023.

COELHO JUNIOR, M. G.; BIJU, B. P.; DA SILVA NETO, E. C.; DE OLIVEIRA, A. L.; DE OLIVEIRA TAVARES, A. A.; BASSO, V.; TURETTA, A. P. D.; CARVALHO, A. G.; SANSEVERO, J. B. B. Improving the management effectiveness and decision-making

by stakeholders' perspectives: A case study in a protected area from the Brazilian Atlantic Forest. **Journal of Environmental Management**, v. 272, p. 111083, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111083>.

GELDMANN, J.; MANICA, A.; BURGESS, N. D.; COAD, L.; BALMFORD, A. A global-level assessment of the effectiveness of protected areas at resisting anthropogenic pressures. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 46, p. 23209-23215, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1908221116>.

GURNEY, G. G.; ADAMS, V. M.; ÁLVAREZ-ROMERO, J. G.; CLAUDET, J. Area-based conservation: taking stock and looking ahead. **One Earth**, v. 6, p. 98–104, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.01.012>.

KARIMI, P.; BASTIAANSEN, W. G. M. Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 507-532, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-19-507-2015>.

KARIMI, A.; YAZDANDAD, H.; RESIDE, A. E. Spatial conservation prioritization for locating protected area gaps in Iran. **Biological Conservation**, v. 279, p. 109902, 2023.

LI, Z.; WU, W.; LIU, X.; FATH, B. D.; SUN, H.; LIU, X.; XIU, X.; CAO, J. Land use/cover change and regional climate change in an arid grassland ecosystem of Inner Mongolia, China. **Ecological Modelling**, v. 353, p. 86-94, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.07.019>.

MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S.; ANGELINI, L. P.; QUERINO, C. A. S.; ANGELINI, P. C. B. Impact of changes in surface cover on energy balance in a tropical city by remote sensing: A study case in Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, p. 100373, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100373>.

SOARES-FILHO, B. S.; OLIVEIRA, U.; FERREIRA, M. N.; MARQUES, F. F. C.; OLIVEIRA, A. R.; SILVA, F. R.; BÖRNER, J. Contribution of the Amazon protected areas program to forest conservation. **Biological Conservation**, v. 279, p. 109928, 2023.

PHILLIPS, A. The history of the international system of protected area management categories. **Parks**, v. 14, n. 3, p. 4-14, 2004.

WILLIAMS, J. J.; NEWBOLD, T. Local climatic changes affect biodiversity responses to land use: A review. **Diversity and Distributions**, v. 26, n. 1, p. 76-92, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/ddi.12999>.



## 2 HIPÓTESE

É possível estimar a evapotranspiração real através de dados do uso e cobertura da terra e bandas espectrais de imagens Landsat, utilizando uma Rede Neural Artificial *Multi-Layer Perceptron* (RNA-MLP), obtendo resultados comparáveis aos obtidos pelo algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), oferecendo uma abordagem mais flexível e acessível para estimar a ET e possibilitando o desenvolvimento de outras ferramentas que auxiliem na gestão de recursos hídricos, como aplicativos e softwares.

## 3 OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo geral

Analisar e estimar espacialmente a evapotranspiração (ET) real na Área de Proteção Ambiental (APA) de Itupararanga entre o período de 1986 a 2021 por meio de técnicas de sensoriamento remoto para desenvolvimento de um modelo local com o auxílio de Rede Neural Artificial *Multi-Layer Perceptron* (RNA-MLP) a partir de dados de uso e cobertura da terra (UCT) e bandas espectrais do satélite Landsat.

### 3.2 Objetivos específicos

- Analisar as dinâmicas de mudança no UCT na APA de Itupararanga entre 1986 e 2021, utilizando dados do Projeto MapBiomias e análise documental dos planos diretores municipais e o plano de manejo da APA.
- Estimar a ET real histórica para o período de 1986 a 2021, utilizando o algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*).
- Desenvolver um modelo de RNA-MLP com base nos dados de UCT, bandas espectrais Landsat e evapotranspiração estimados pelo SEBAL.
- Comparar as estimativas de ET geradas pela RNA com os valores obtidos pelo SEBAL, avaliando a acurácia e a eficiência do modelo.

## 4 CAPÍTULO 1 - REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Considerações sobre os efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra

Ao falar de clima fazemos referência a variações de fatores, como temperatura (T) e precipitação (P), que estão sendo analisados e observados por um longo período (Swain *et al.*, 2020). Contudo, a compreensão das mudanças climáticas contribui para entendermos a modificação desses fatores em uma escala diária de observação (Swain *et al.*, 2020).

Alterar o balanço energético do sistema superfície-atmosfera terrestre, influencia fatores climáticos como a T e P (Fawzy *et al.*, 2020). Além disso, a mudança climática pode ser considerada o principal fator responsável por mudanças ecossistêmicas, capaz de afetar locais altamente dependentes de água (El-Hamid *et al.*, 2020).

Entre as consequências das alterações na T, radiação solar (RS) e P, podemos citar: pressão sobre diferentes setores socioeconômicos; risco à integridade e a sobrevivência de espécies, e por consequência, perda de biodiversidade; episódios extremos de ondas de calor; e perda da produtividade das culturas (Abbas *et al.*, 2022). Modificar P e ET, impacta o balanço hídrico climático e leva a necessidade de adaptação dos sistemas antrópicos e ecológicos, frente à tendência de intensificação de eventos de seca (Prävãlie *et al.*, 2019).

Os centros urbanos devem ser os principais locais a se preparem para essas possíveis consequências (Jiang *et al.*, 2017), pois países já enfrentam os efeitos da urbanização desordenada, combinados com as alterações climáticas regionais e globais (Dilawar *et al.*, 2021). Portanto, avaliar e simular o avanço dinâmico da urbanização são ferramentas importantes e relevantes para o planejamento urbano, buscando compreender como as mudanças no uso e cobertura da terra (UCT) afetam micro e macro climas (Jiang *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2020).

A transformação de áreas vegetadas em áreas construídas é considerada um indicador de mudanças climáticas regionais, promovendo alterações significativas na umidade, T e P (Arshad *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020). Esses dados apoiam gestores no desenvolvimento de políticas voltadas para a adaptação e mitigação às mudanças climáticas e seus efeitos (Jiang *et al.*, 2017; Sharifi, 2020). Nichos climáticos mais secos e mais quentes estão sendo observados em virtudes das mudanças de UCT, uma vez que a remoção da vegetação natural, provocada pela ocupação humana, pode diminuir a taxa de ET (Williams; Newbold, 2019).

Todavia, considerando que a temperatura da superfície ( $T_s$ ) possui estreita relação com a dinâmica de ocupação da terra (Dilawar *et al.*, 2021), compreender como as diferentes classes de UCT afetam parâmetros climáticos é uma ação recomendável para que não haja subestimação ou extrapolação dos valores estudados (Chapman *et al.*, 2017). As interações

no fluxo de energia na superfície são modificadas à medida em que as alterações no UCT acontecem, pois, essas alterações impactam no albedo terrestre e no índice de área foliar (IAF), ocasionando variações espaço-temporais nos fluxos de calor latente (LE), calor sensível (H) e calor no solo (G), afetando o microclima através do aumento da T e diminuição da ET (Li, G. *et al.*, 2017; Li, Z. *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2020).

Meer e Mishra (2020), verificaram que P e ET variam de forma dependente, sugerindo que a diminuição de áreas com vegetação densa e corpos d'água diminuem a ET, que por sua vez deixa de fornecer vapor d'água necessário para a formação de nuvens, e por consequência, diminui a quantidade de chuvas. Portanto, entende-se que as alterações no UCT não se limitam apenas ao compartimento litosférico, mas impactam na dinâmica biosférica.

O comportamento das interações futuras entre as diferentes classes de UCT podem afetar serviços ecossistêmicos como a provisão de água, de modo que os impactos dessas interações sobre a dinâmica dos fluxos de energia e a sua relação com o ciclo hidrológico é incerto (Guo *et al.*, 2021; Martin, 2021). Contudo, autores destacam que os impactos dessas mudanças podem ser mais facilmente percebidos na estação seca (Caballero; Ruhoff; Biggs, 2022), tornando a avaliação dos possíveis cenários de mudanças nos UCT uma ferramenta atrativa e útil para a formulação de estratégias que garantam os usos múltiplos dos recursos hídricos de forma sustentável (Guo *et al.*, 2021; Martin, 2021).

A avaliação da ET em regiões com cultivos torna-se uma ferramenta relevante para compreender as alterações desse componente em virtude da sazonalidade das culturas (Chemura *et al.*, 2020), principalmente por considerarmos a relevância desse componente no ciclo hidrológico e dos efeitos de suas alterações. Porém, pouco se sabe sobre a dinâmica espaço-temporal do fluxo hídrico nesses locais (Chemura *et al.*, 2020), aumentando a importância da realização de estudos que tenham essa abordagem, especialmente pelo fato de que regiões dependentes socioeconomicamente do primeiro setor, também são altamente dependentes de recursos hídricos.

Por fim, dentro desse contexto, informações espaciais sobre o fluxo de água dentro do sistema superfície-atmosfera são críticas para o gerenciamento da água em face das modificações antropogênicas (Chemura *et al.*, 2020). Portanto, compreender o ciclo hidrológico e seus componentes torna-se imprescindível para o gerenciamento dos recursos hídricos de forma integrativa, principalmente em regiões altamente dependentes da água para abastecimento público, irrigação e geração de energia.

## 4.2 Compreendendo o ciclo hidrológico para a gestão dos recursos hídricos

A água é o elemento impulsionador dos ciclos biogeoquímicos que garante o funcionamento integral dos ecossistemas, além de ser um componente essencial no desenvolvimento territorial e econômico (Tundisi, 2013). Dessa forma, é evidente que os múltiplos usos da água associados à alta demanda pressionam esse indispensável recurso, tornando a crise da água uma crise de gestão (Tundisi, 2013).

Essa pressão é proveniente de dois grandes fatores: crescimento populacional e demanda. Cada vez mais se demanda de água para irrigação e produção de alimentos, de modo que a redução no volume da água disponível também tem afetado de forma significativa ciclos hidrológicos regionais (Chemura *et al.*, 2020), sugerindo que haja uma transição no gerenciamento e governança da água, focados em uma gestão local e setorial, para uma gestão ecossistêmica e integrativa, que considera o ciclo hidrológico e os múltiplos usos da água (Tundisi, 2008), pois os compartimentos em que a água transita sobre a superfície-atmosfera não são delimitados por limites físicos e políticos, o que reforça a necessidade de uma análise ampla e descentralizada da crise hídrica. Portanto, uma abordagem abrangente considera os fluxos ambientais inerentes ao ciclo da água (Tundisi; Tundisi, 2017).

O fluxo da água ocorre em duas direções: vertical, através da ET e da P; e longitudinal, através do escoamento superficial e subterrâneo (Tucci; Clarke, 1999). O balanço hídrico é inicialmente dependente dos processos verticais (Tucci; Clarke, 1999), ponderando a importância de se saber como esses fenômenos estão sendo afetados pelas mudanças realizadas na superfície.

A energia solar impulsiona o ciclo hidrológico e o transporte da água ao longo do ciclo, e é influenciado pelas diferenças de absorção de energia e refletância da superfície (Tundisi, 2003; Tucci; Clarke, 1999). Ao atingir a Terra, essa energia é parcialmente absorvida e outra parte é refletida, sendo que a proporção entre a energia recebida e a refletida é influenciada pelo tipo de superfície, é denominado como albedo ( $\alpha$ ) (Tucci; Clarke, 1999).

Assim, a vegetação possui um papel fundamental no balanço energético e hídrico, pois, em virtude de sua área foliar é capaz de reter água durante a P, que posteriormente é evaporada, além do processo de transpiração que ocorre quando as plantas passam a perder umidade ao fim da evaporação (Tucci; Clarke, 1999), contribuindo significativamente para a entrada de água no ciclo hidrológico.

Além disso, a remoção da vegetação aumenta o  $\alpha$  (Tucci; Clarke, 1999), impactando no fluxo energético que influencia o ciclo da água. A ET também é um componente crítico para o ciclo hidrológico e altamente vulnerável as mudanças de T e RS. As alterações no UCT promovidas pelo homem aumentam a rugosidade superficial, ao reduzir as áreas de vegetação, de modo que regiões tropicais podem ter seu ciclo hidrológico significativamente afetado quando ocorre uma perda aproximada de 45% de sua cobertura vegetal (Dimitriadou; Nikolakopoulos, 2021).

Dentro desse contexto e frente aos desafios da gestão da água, planejar o ordenamento territorial urbano, através de planos diretivos, é uma das medidas necessárias para conservar espaços naturais e estratégicos para garantir a disponibilidade hídrica (Tucci, 2017). A insuficiência do suprimento de água está relacionada com as alterações na P e ET, de modo que a variabilidade espaço-temporal desses componentes do ciclo hidrológico afeta o desenvolvimento de atividades socioeconômicas (Tadese; Kumar; Koech, 2020), enfatizando a necessidade de compreender e quantificar a influência humana no ciclo hidrológico, para melhor integrar a gestão hídrica (Li, G. *et al.*, 2017).

Porém, estimar esses parâmetros em campo para grandes áreas é um desafio. Todavia, os avanços tecnológicos permitiram o desenvolvimento de modelagens matemáticas aplicadas em imagens de satélite, o que permite esse monitoramento. Modelos matemáticos em conjunto com sensoriamento remoto ganharam popularidade nos últimos anos para estimar a ET (Degano *et al.*, 2021; Aryalekshmi *et al.*, 2021). Esses métodos podem ser baseados no balanço energético, que transformam dados referentes a radiação em: radiação líquida, referente ao saldo entre a entrada e saída de energia; fluxo de calor no solo, referente à energia que aquece o solo; fluxo de calor sensível, referente à energia que aquece o ar; e fluxo de calor latente, que é a energia necessária para alterar o estado da água para vapor (Aryalekshmi *et al.*, 2021).

Frente ao que foi brevemente discutido, é perceptível a necessidade urgente de desenvolver abordagens para compreender o ciclo da água e integrá-lo à gestão dos recursos hídricos. Nesse contexto, o sensoriamento remoto é capaz de fornecer dados para gerar informações em grandes escalas ao longo do tempo, assimilando dados e técnicas importantes para melhorar a precisão de análise do ciclo da água (Yang; Yang; Xia, 2021).

### 4.3 Integrando sensoriamento remoto e inteligência artificial para compreender a dinâmica na superfície terrestre

Sensoriamento remoto (SR) pode ser compreendido como o processo de aquisição de dados e informações de algum objeto sem entrar em contato direto com o mesmo (Lechner; Foody; Boyd, 2020). Entre as formas mais comuns de obtenção de dados terrestres por meio do SR está a utilização de sensores presentes em plataformas aéreas e espaciais, que funcionam de forma semelhante a uma câmera, porém são capazes de adquirir dados espectrais além dos comprimentos de onda da região visível do espectro eletromagnético, como comprimentos de onda do infravermelho e termal (Lechner; Foody; Boyd, 2020).

Isso é possível pois diferentes materiais que constituem a superfície refletem e absorvem energia em diferentes comprimentos de onda, de modo que é por meio dessa característica que diferentes categorias de UCT podem ser identificados (Lechner; Foody; Boyd, 2020). Além disso, os dados obtidos por SR ocorrem em condições relativamente fixas, já que os dados capturados se referem à maneira pela qual a radiação interage com o ambiente, não havendo subjetividade ou complicações em virtude de erros ou padrões diferentes de medição (Lechner; Foody; Boyd, 2020).

É crescente a necessidade de observar e compreender cada vez mais a dinâmica terrestre, de modo que o SR tem potencial para aplicação em diferentes campos das ciências ambientais, auxiliando na tomada de decisão, permitindo detectar e avaliar diferentes condições ambientais (Pimentel *et al.*, 2022), pois ao fornecer uma visão sinótica do ambiente, as imagens obtidas capturam dados em um amplo campo de visão, algo limitado durante atividades realizadas em campo (Lechner; Foody; Boyd, 2020). Portanto, diversas são as aplicações do SR para analisarmos o ambiente, principalmente pela capacidade de se obter dados contínuos ao longo do tempo para o monitoramento a nível nacional, global e regional (Asokan; Anitha, 2019).

Entre essas aplicações, pode-se citar a avaliação de cultivos, estimativa de biomassa, inventário de recursos, monitoramento de recursos hídricos, avaliações mineralógicas e geológicas, prevenção e avaliação de desastres naturais (Pimentel *et al.*, 2022). É notório que o SR está fornecendo informações conclusivas para o estudo de diversos fenômenos, auxiliando na compreensão de mudanças ou de eventos ambientais, e para que possamos nos adaptar e solucionar, ou mitigar, possíveis problemas (Pimentel *et al.*, 2022).

Imagens de satélite estão sendo utilizadas de maneira eficaz na classificação de diferentes UCT e detecção de mudanças ao longo de séries temporais, o que nos permite observar e monitorar as mudanças ambientais (Woodcock *et al.*, 2020; Afaq; Manocha,

2021). Contudo, inicialmente preocupava-se em identificar objetos na superfície e o tamanho de sua extensão, como por exemplo o monitoramento da expansão urbana (Woodcock *et al.*, 2020). Mas, atualmente houve uma mudança de foco, de modo que há uma procura por compreender como ocorrem os avanços e mudanças no espaço e no tempo desses objetos de estudo, procurando identificar, por exemplo, como ocorreu a expansão de determinado centro urbano nos últimos anos (Woodcock *et al.*, 2020).

Portanto, para uma análise abrangente da superfície terrestre e das interações que nela ocorrem, dizer apenas o que mudou ou não ao longo do tempo pode não ser suficiente. Detectar mudanças significa identificar diferenças relevantes, a depender dos objetivos de determinado estudo, em uma mesma área em períodos diferentes no tempo, e essa relevância depende do contexto e da perspectiva em que o objeto de estudo está inserido (Woodcock *et al.*, 2020).

De acordo com as características das imagens utilizadas para a detecção de mudanças, os métodos utilizados podem ser divididos em duas grandes categorias: detecção de mudanças com imagens homogêneas, referente à utilização de imagens homogêneas adquiridas por sensores iguais, que geralmente têm a mesma resolução espectral e espacial; e a detecção de mudanças com imagens heterogêneas de SR, que utiliza imagens provenientes de diferentes sensores (Lv *et al.*, 2022).

No início das operações dos satélites, meados da década de 1970, a precisão obtida na classificação de imagens para determinar categorias de UCT era baixa, devido aos atrasos na atualização dos dados, não sendo possível utilizar com eficácia tais imagens para o monitoramento das mudanças ocorridas na Terra, pois a superfície terrestre encontrava-se em rápida alteração comparada ao período de obtenção das imagens (Fortin; Cardille; Perez, 2020).

Porém, as melhorias ocorridas ao longo do tempo permitiram diminuir erros e confusões durante as classificações (Fortin; Cardille; Perez, 2020), além do fato de que a associação de algoritmos de aprendizagem de máquina (*machine learning*) e o reconhecimento de padrões com técnicas de SR têm contribuído significativamente para a melhorar a compreensão da dinâmica terrestre, sendo possível distinguir fitofisionomias e monitorar a conservação de ecossistemas ao longo do tempo, atingindo, em alguns casos, valores de precisão e acurácia superiores a 85% (Fonseca *et al.*, 2021).

Atualmente, redes neurais artificiais (RNA) e aprendizado profundo de máquinas (*deep learning*) formam a base da maioria dos aplicativos de inteligência artificial (IA) (Haenlein; Kaplan, 2019), os quais têm avançado em termos de capacidade de

processamento, assim como o SR em termos de geração e aprimoramento de imagens, o que tem contribuído para que os usuários dessas imagens passassem a utilizar algoritmos de *deep learning* para resolver diferentes tarefas, com destaque para as atividades de detecção de mudanças, visando aprender características representativas e discriminatórias de um conjunto de dados de forma hierárquica (Khelifi; Mignotte, 2020).

O SR permite a análise de séries temporais, facilitando o monitoramento terrestre e a identificação desde as mudanças mais sutis na superfície, aumentando nossa capacidade de determinar os impulsionadores dessas alterações, além de permitir um monitoramento quase em tempo real (Woodcock *et al.*, 2020). Portanto, é perceptível a relevância do SR para se obter informações referentes aos múltiplos fenômenos que ocorrem no planeta, assim como os avanços ocorridos para que possamos alcançar os diferentes objetivos das análises realizadas.

#### 4.4 Referências bibliográficas

ABBASS, K.; QASIM, M. Z.; MURSHED, M.; MAHMOOD, H.; YOUNIS, I. Loss and Damage and limits to adaptation: recent IPCC insights and implications for climate science and policy. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-21, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>.

AFAQ, Y.; MANOCHA, A. Analysis on change detection techniques for remote sensing applications: A review. **Ecological Informatics**, v. 63, p. 101310, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101310>.

ARSHAD, A.; ZHANG, W.; ZAMAN, M. A.; DILAWAR, A.; SAJID, Z. Monitoring the impacts of spatio-temporal land-use changes on the regional climate of city Faisalabad, Pakistan. **Annals of GIS**, v. 25, n. 1, p. 57-70, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475683.2018.1543205>.

ARYALEKSHMI, B. N.; BIRADAR, R. C.; CHANDRASEKAR, K.; AHAMED, J. M. Analysis of various surface energy balance models for evapotranspiration estimation using satellite data. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 24, n. 3, p. 1119-1126, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.11.007>.

ASOKAN, A.; ANITHA, J. Change detection techniques for remote sensing applications: A survey. **Earth Science Informatics**, v. 12, p. 143-160, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12145-019-00380-5>.

CABALLERO, C. B.; RUHOFF, A.; BIGGS, T. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. **Social of the Total Environmental**, v. 808, p. 152134, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152134>.

CHAPMAN, S.; WATSON, J. E. M.; SALAZAR, A.; THATCHER, M.; MCALPINE, C. A. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. **Landscape Ecology**, v. 32, p.1921–1935, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4>.



- CHEMURA, A.; RWASOKA, D.; MUTANGA, O.; DUBE, T.; MUSHORE, T. The impact of land-use/land cover changes on water balance of the heterogeneous Buzi sub-catchment, Zimbabwe. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, p. 100292, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100292>.
- DEGANO, M. F.; RIVAS, R. E.; CARMONA, F.; NICLÓS, R.; SÁNCHEZ, J. M. Evaluation of the MOD16A2 evapotranspiration product in an agricultural area of Argentina, the Pampas region. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 24, n. 2, p. 319-328, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2020.08.004>.
- DILAWAR, A.; CHEN, B.; TRISURAT, Y.; TUANKRUA, V.; ARSHAD, A.; HUSSAIN, Y.; MEASHO, S.; GUO, L.; KAYIRANGA, A.; ZHANG, H.; WANG, F.; SUN, S. Spatiotemporal shifts in thermal climate in responses to urban cover changes: a-case analysis of major cities in Punjab, Pakistan. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 12, n. 1, p. 763-793, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1890235>.
- DIMITRIADOU, S.; NIKOLAKOPOULOS, K. G. Evapotranspiration trends and interactions in light of the anthropogenic footprint and the climate crisis: A review. **Hydrology**, v. 8, n. 4, p. 163, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology8040163>.
- EL-HAMID, H. T. A.; CAIYONG, W.; HAFIZ, M. A.; MUSTAFA, E. K. Effects of land use/land cover and climatic change on the ecosystem of North Ningxia, China. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, p. 1099, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06047-6>.
- FAWZY, S.; OSMAN, A. I.; DORAN, J.; ROONEY, D. W. Loss and Damage and limits to adaptation: Recent IPCC insights and implications for climate science and policy. **Environmental Chemistry Letters**, v. 18, p. 2069–2094, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>.
- FONSECA, L. M. G.; KÖRTING, T. S.; BENDINI, H. N.; GIROLAMO-NETO, C. D.; NEVES, A. K.; SOARES, A. R.; TAQUARY, E. C.; MARETTO, R. V. Pattern recognition and remote sensing techniques applied to land use and land cover mapping in the Brazilian Savannah. **Pattern Recognition Letters**, v. 148, p. 54-60, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.04.028>.
- FORTIN, J. A.; CARDILLE, J. A.; PEREZ, E. Multi-sensor detection of forest-cover change across 45 years in Mato Grosso, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 238, p. 111266, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111266>.
- GUO, M.; MA, S.; WANG, L. J.; LIN, C. Impacts of future climate change and different management scenarios on water-related ecosystem services: A case study in the Jianghuai ecological economic Zone, China. **Ecological Indicators**, v. 127, p. 107732, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107732>.
- HAENLEIN, M.; KAPLAN, A. A brief history of artificial intelligence: On the past, present, and future of artificial intelligence. **California Management Review**, p. 1-10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0008125619864925>.
- JIANG, Y.; HOU, L.; SHI, T.; GUI, Q. A review of urban planning research for climate change. **Sustainability**, v. 9, n. 12, p. 2224, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9122224>.
- KHELIFI, L.; MIGNOTTE, M. Deep learning for change detection in remote sensing images: Comprehensive review and meta-analysis. **IEEE Access**, v. 8, p. 1 26385 – 126400, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3008036>.

LECHNER, A. M.; FOODY, G. M.; BOYD, D. S. Applications in remote sensing to forest ecology and management. **One Earth**, v. 2, n. 5, p. 405-412, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.001>.

LI, D.; TIAN, P.; LUO, H.; HU, T.; DONG, B.; CUI, Y.; KHAN, S.; LUO, Y. Impacts of land use and land cover changes on regional climate in the Lhasa River basin, Tibetan Plateau. **Science of the Total Environment**, v. 742, p. 140570, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140570>.

LI, G.; ZHANG, F.; JING, Y.; LIU, Y.; SUN, G. Response of evapotranspiration to changes in land use and land cover and climate in China during 2001–2013. **Science of the Total Environment**, v. 596–597, p. 256–265, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.080>.

LI, Z.; WU, W.; LIU, X.; FATH, B. D.; SUN, H.; LIU, X.; XIU, X.; CAO, J. Land use/cover change and regional climate change in an arid grassland ecosystem of Inner Mongolia, China. **Ecological Modelling**, v. 353, p. 86-94, 10 June 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.07.019>.

LV, Z.; HUANG, H.; LI, X.; ZHAO, M.; BENEDIKTSSON, J. A.; SUN, W.; FALCO, N. Land cover change detection with heterogeneous remote sensing images: Review, progress, and perspective. **Proceedings of the IEEE**, v. 110, n., 12, p. 1976 – 1991, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2022.3219376>.

MARTIN, N. Risk assessment of future climate and land use/land cover change impacts on water resources. **Hydrology**, v. 8, p. 38, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology8010038>.

MEER, M. S.; MISHRA, A. K. Land use/land cover changes over a district in Northern India using remote sensing and GIS and their impact on society and environment. **Journal Geological Society of India**, v. 95, p. 179-182, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12594-020-1407-2>.

PIMENTEL, J. F. F.; ARENAS, R. D.; SANTILLÁN, S. M. S.; APARICIO, P. E. G.; PIMENTEL, D. E. F. Science, technology, innovation and water resources: Opportunities for the future. **International Journal of Environmental, Sustainability, and Social Sciences**, v. 3, n. 1, p. 137-143, 2022. DOI: <https://doi.org/10.38142/ijesss.v3i1.198>.

PRĂVĂLIE, R.; PITICAR, A.; ROȘCA, B.; SFÎCĂ, L.; BANDOC, G.; TISCOVSCHI, A.; PATRICHE, C. Spatio-temporal changes of the climatic water balance in Romania as a response to precipitation and reference evapotranspiration trends during 1961–2013. **CATENA**, v. 172, p. 295-312, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.028>.

SHARIFI, A. Trade-offs and conflicts between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 122813, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122813>.

SWAIN, D. L.; SINGH, D.; TOUMA, D.; DIFFENBAUGH, N. S. Attributing extreme events to climate change: A new frontier in a warming world. **One Earth**, v. 2, n. 6, p. 522-527, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.011>.

TADESE, M.; KUMAR, L.; KOECH, R. Long-Term Variability in Potential Evapotranspiration, Water Availability and Drought under Climate Change Scenarios in the Awash River Basin, Ethiopia. **Atmosphere**, v. 11, p. 8833, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos1109088>.

- TUCCI, C. E. M. Urbanization and water resources. In: BICUDO, C. E. M.; TUNDISI, J. G.; Scheuenstuhl, M. C. B. (eds), **Waters of Brazil**, Cham, Springer: 2017. p. 89-104. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41372-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41372-3_7).
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Rbrh: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126231>.
- TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003.
- TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos avançados**, v. 22, p. 7-16, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200002>.
- TUNDISI, J. G. Governança da água. **Revista UFMG**, v. 20, n. 2, p. 222-235, 2013. DOI: <https://doi.org/10.35699/2316-770X.2013.2698>.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Science, technology, innovation and water resources: Opportunities for the future. In: BICUDO, C. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. (eds). **Waters of Brazil**. Springer, Cham: 2017. p. 149–169. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41372-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41372-3_11).
- WILLIAMS, J. J.; NEWBOLD, T. Local climatic changes affect biodiversity responses to land use: A review. **Diversity and Distributions**, v. 26, n. 1, p. 76-92, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/ddi.12999>.
- WOODCOCK, C. E.; LOVELAND, T. R.; HEROLD, M.; BAUER, M. E. Transitioning from change detection to monitoring with remote sensing: A paradigm shift. **Remote Sensing of Environment**, v. 238, p. 111558, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111558>.
- YANG, D.; YANG, Y.; XIA, J. Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. **Geography and Sustainability**, v. 2, n. 2, p. 115-122, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>.

## 5 CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DA MUDANÇA NO USO E COBERTURA DA TERRA DA APA DE ITUPARARANGA<sup>1</sup>

### 5.1 Introdução

A crescente pressão sobre os recursos naturais tem gerado respostas governamentais e da sociedade para a proteção e conservação de áreas de relevante interesse ambiental. Áreas ambientalmente protegidas são importantes dentro desse contexto, sobretudo para a conservação da biodiversidade (Coelho Júnior *et al.*, 2020). No Brasil, a Lei nº 9.985, promulgada em 18 de julho de 2000, institui o SNUC. Ela foi criada para orientar a criação, implementação e gestão de Unidades de Conservação (UC) no país (Brasil, 2000).

O SNUC tem por objetivo proteger os recursos naturais, inclusive os necessários para a subsistência de populações tradicionais, proteger os ecossistemas naturais, proteger a fauna e a flora, recuperar e restaurar ecossistemas, promover o uso sustentável dos recursos naturais, incentivar a pesquisa científica e o monitoramento ambiental (Brasil, 2000).

As modificações antrópicas no meio terrestre fragilizam os biomas brasileiros, de modo que a adoção de medidas legislativas é indispensável para regular tais modificações e garantir a manutenção dos ecossistemas e a prestação de seus serviços ambientais. Além disso, é um dos meios para assegurar que todos tenham o direito ao meio ambiente saudável, conforme previsto no Art. 255 da Constituição Brasileira, sendo responsabilidade do Poder Público e da sociedade defender e preservar o meio ambiente para a atual e para as futuras gerações (Brasil, 1988).

A Mata Atlântica se trata de um *hotspot* prioritário para proteção, em virtude de sua biodiversidade, de seu elevado endemismo e de sua situação crítica em termos das intensas modificações promovidas no território (Lira; Portela; Tambosi, 2021). Para que haja mais força política para conservá-la, a Mata Atlântica possui uma lei de proteção exclusiva, a Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006, que regula a utilização e a proteção da vegetação nativa do bioma (Brasil, 2006), além de ser amparada por outras leis de proteção à natureza, à fauna e à flora nas diferentes esferas dos três níveis de governo: federal, estadual e municipal.

---

<sup>1</sup> Parte desse capítulo foi publicado na revista *Journal of Environmental Studies and Sciences*:

NERY, L. M.; TONIOLO, B. P.; SANTOS, A. P.; MARTINS, A. C. G.; SILVA, D. C. C. Challenge of political integration in the territorial management of a protected area based on the analysis of land use and land cover change. **Journal of Environmental Studies and Sciences**, v. 15, p. 1-16, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13412-024-00990-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13412-024-00990-6>. Acesso em: 24 out. 2024.

Porém, há uma falsa impressão de que a Mata Atlântica se encontra em um estágio avançado de conservação, enquanto na verdade ainda há perda de floresta, alta fragmentação e regeneração desigual ao longo dos limites do bioma (Carlucci; Marcillio-Silva; Torezan, 2021). É indispensável que haja compatibilidade entre as legislações locais e àquelas que regulam as UC (Lima; Ranieri, 2018), pois a conservação das áreas naturais é dependente de como ocorrem as transformações no uso do solo em seu entorno.

Essa compatibilidade pode ser fonte de confusão, a ponto de se dispersarem e possuírem pouca efetividade na prática, de modo que o conflito em áreas ambientalmente protegidas é inevitável (Soliku; Schraml, 2018). Esse conflito é um fenômeno global que possui seus efeitos mais intensamente sentidos à nível local (Soliku; Schraml, 2018), pois a gestão territorial é orientada por demandas de partes interessadas e instituições, que se refletem em uma alteração da paisagem (Ellis; Pascual; Mertz, 2019) que pouco considera as características das comunidades presentes nos limites das UC.

Entre os maiores desafios no gerenciamento de UC da Mata Atlântica está o estabelecimento de zonas de amortecimento e o gerenciamento do UCT. Lima e Ranieri (2018) ao analisarem Planos de Manejo de UC e Planos Diretores Municipais das cidades integrantes dessas áreas de proteção, verificaram que o não estabelecimento claro de regras nos referidos planos, dificultam a organização do território voltada para a conservação ambiental.

Ao realizar uma análise multitemporal do UCT em um Parque Estadual na Mata Atlântica, em conjunto com uma análise da percepção de partes interessadas envolvidas na gestão da UC, Coelho Júnior *et al.* (2020) verificaram que dentre as pressões exercidas sobre o parque, as mais bem percebidas foram: a ocupação urbana; a prática de atear fogo por parte de pecuaristas para expandir pastagens; e o desmatamento.

Um planejamento deficiente do ordenamento territorial favorece a degradação do meio ambiente, comprometendo aos serviços ambientais prestados pelos ecossistemas (Menzori; Sousa; Gonçalves, 2021; Peter; Yang, 2019), o que reforça a necessidade do desenvolvimento de estratégias que considerem características locais (Soliku; Schraml, 2018).

Monitorar a dinâmica e mudança do UCT é essencial para uma variedade de propósitos científicos e estratégias políticas, o que consequentemente leva a uma gestão mais eficiente dos recursos naturais (Neves *et al.*, 2020), principalmente no contexto das UC, pois compreende-se que as mudanças no UCT são desafios quanto à tomada de decisão e a formulação de políticas públicas para assegurar o uso sustentável dos ecossistemas.

Sendo assim, compreende-se que as mudanças no UCT sugerem um desafio quanto à tomada de decisão e a formulação de políticas públicas, principalmente quando consideramos os objetivos da Agenda 2030, a fim de assegurar o uso sustentável dos ecossistemas. Consequentemente, é compreensível que a divulgação de informações referentes a UC é uma ferramenta importante para que a comunidade entenda os impactos das modificações nas áreas ambientais, não só no contexto ecológico, mas também no âmbito socioeconômico.

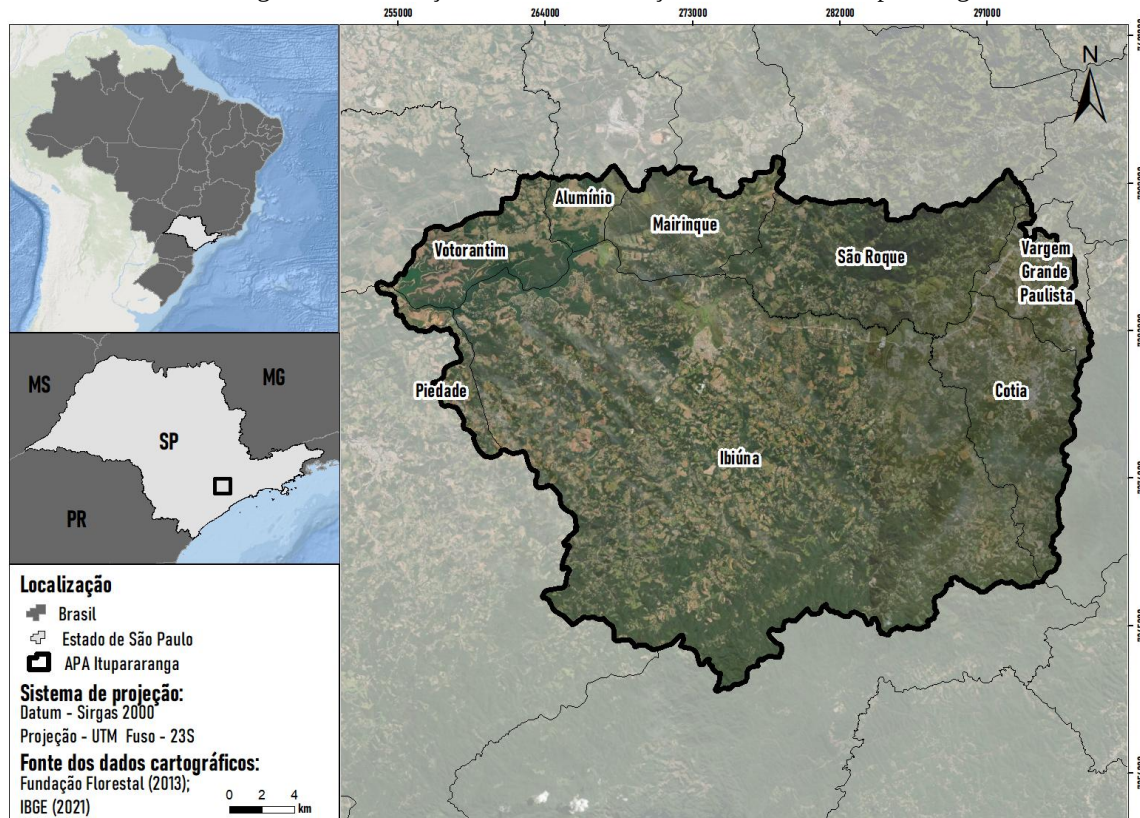
Portanto, como segundo capítulo dessa tese e a primeira parte deste estudo, procurou-se analisar as alterações no UCT da Área de Proteção Ambiental (APA) de Itupararanga. Uma série histórica ao longo de 35 anos (de 1986 a 2021) foi construída utilizando dados disponíveis do Programa MapBiomass. Identificaram-se as principais mudanças que ocorreram neste período para incentivar a discussão sobre a mudança do UCT na APA e seus efeitos, além da construção do banco de dados necessário para as posteriores etapas desta pesquisa.

## **5.2 Material e métodos**

### **5.2.1 Área de estudo**

A APA de Itupararanga, representada na Figura 1, está localizada a aproximadamente 40 km da capital paulista, entre as coordenadas 278.157 E; 7.393.604N ao norte; 280.248E; 7.365.690N ao sul; 257.094E; 7.379.573N ao oeste; e 296.556E; 7.380.194N ao leste (Datum – Sirgas 2000 / Projeção UTM – Fuso 23S). Ela foi instituída em 1998 através da Lei Estadual nº 10.100. Inicialmente, os municípios integrantes da UC eram: São Roque; Mairinque; Votorantim; Ibiúna; e Piedade, mas a referida Lei foi alterada em 2003, através da Lei Estadual nº 11.579, integrando também: Alumínio; Cotia; e Vargem Grande Paulista (Fundação Florestal, 2010).

Figura 1: Localização da Área de Proteção Ambiental de Itupararanga.

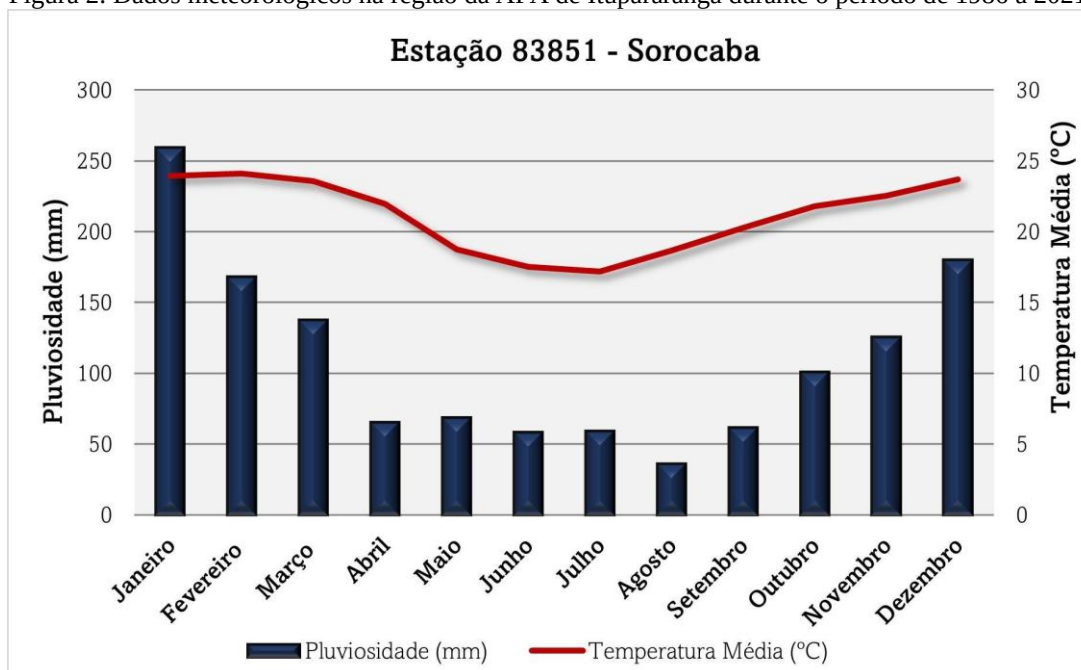


Fonte: Elaborada pela autora.

Geomorfologicamente, a APA se encontra na região de Mares de Morros e apresenta estruturas geológicas com o período de datação desde o Proterozóico Médio-Superior até o Quaternário (Fundação Florestal, 2010). Os solos na região se distinguem em três principais tipos: Argissolos; Cambissolos; e Latossolos, enquanto a fitofisionomia da vegetação natural da UC se refere às Florestas Ombrófilas Densas (Fundação Florestal, 2010). Mas, essa cobertura vegetal foi removida de forma significativa, sendo a vegetação local composta principalmente por remanescentes vegetais (Fundação Florestal, 2010).

O clima regional é classificado como Cwa, caracterizado por Köppen-Geiger, com inverno seco e verão quente (Kottek *et al.*, 2006; Barbosa *et al.*, 2021). Dados de pluviosidade e temperatura do ar, de uma estação monitorada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foram coletados e representados na Figura 2. Essa estação está localizada a aproximadamente 14 km da extremidade norte da APA de Itupararanga, constituindo a fonte de dados meteorológicos mais próxima que possui registros de 1986 até 2021 (período de análise dessa pesquisa).

Figura 2: Dados meteorológicos na região da APA de Itupararanga durante o período de 1986 a 2021.



Fonte: Elaborada pela autora a partir de INMET (2023).

Contudo, observou-se a inoperância da estação entre junho de 1991 a janeiro de 1998. Portanto, de acordo com os dados disponíveis, verificou-se que a temperatura média anual da APA de Itupararanga foi de 21,17 °C durante o período de 1986 a 2021, com uma estação seca e outra chuvosa, em concordância com sua classificação climática.

A estação seca ocorre de abril a setembro, com precipitação média mínima de 36,14 mm em agosto e precipitação média máxima de 68,75 mm em maio. Já a estação chuvosa é observada de outubro a março, com precipitação média mínima de 100,78 mm em setembro e precipitação média máxima de 259,22 mm em janeiro. A média anual de precipitação foi de 1321,64 mm durante o período de 1986 a 2021.

A APA é estratégica do ponto de vista do gerenciamento e conservação dos recursos hídricos, pois a Represa de Itupararanga encontra-se dentro dos seus limites. A referida represa possui aproximadamente 936 km<sup>2</sup> e uma capacidade aproximada de 355.000 m<sup>3</sup> (Fundação Florestal, 2010). O reservatório abastece aproximadamente 1 milhão de pessoas (Barbosa *et al.*, 2021) que vivem nos municípios de Sorocaba, Votorantim, Ibiúna e São Roque, além de gerar 150 GWh de energia utilizada pela empresa Votorantim (Fundação Florestal, 2010).

A criação da APA foi justificada pela necessidade de minimizar as pressões exercidas em seus recursos ambientais, principalmente devido a expansão de loteamentos em áreas de alta fragilidade ambiental, do uso intenso do solo para agricultura e do uso indiscriminado



de agrotóxicos (Fundação Florestal, 2010). Os principais cursos d'água presentes na UC são os rios Una, Sorocabaçu e Sorocamirim.

O plano de manejo, ilustrado na Figura 3, da APA foi aprovado em 2010, através da deliberação do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) nº 16, e divide a UC em duas grandes áreas: de conservação e de ocupação dirigida (CONSEMA, 2010). A área de conservação é composta por duas zonas (CONSEMA, 2010):

I – Zona de conservação da biodiversidade (ZCB): que inclui áreas de vegetação nativa, remanescentes florestais e áreas em regeneração, com o intuito de proteger a biodiversidade e os recursos hídricos;

II – Zona de conservação dos recursos hídricos (ZCRH): inclui áreas que possuem nascentes, córregos e os rios principais que convergem para a Represa de Itupararanga, portanto essa zona tem por objetivo preservar os recursos hídricos, matas ciliares, o solo, recuperar várzeas e garantir a regulação do microclima.

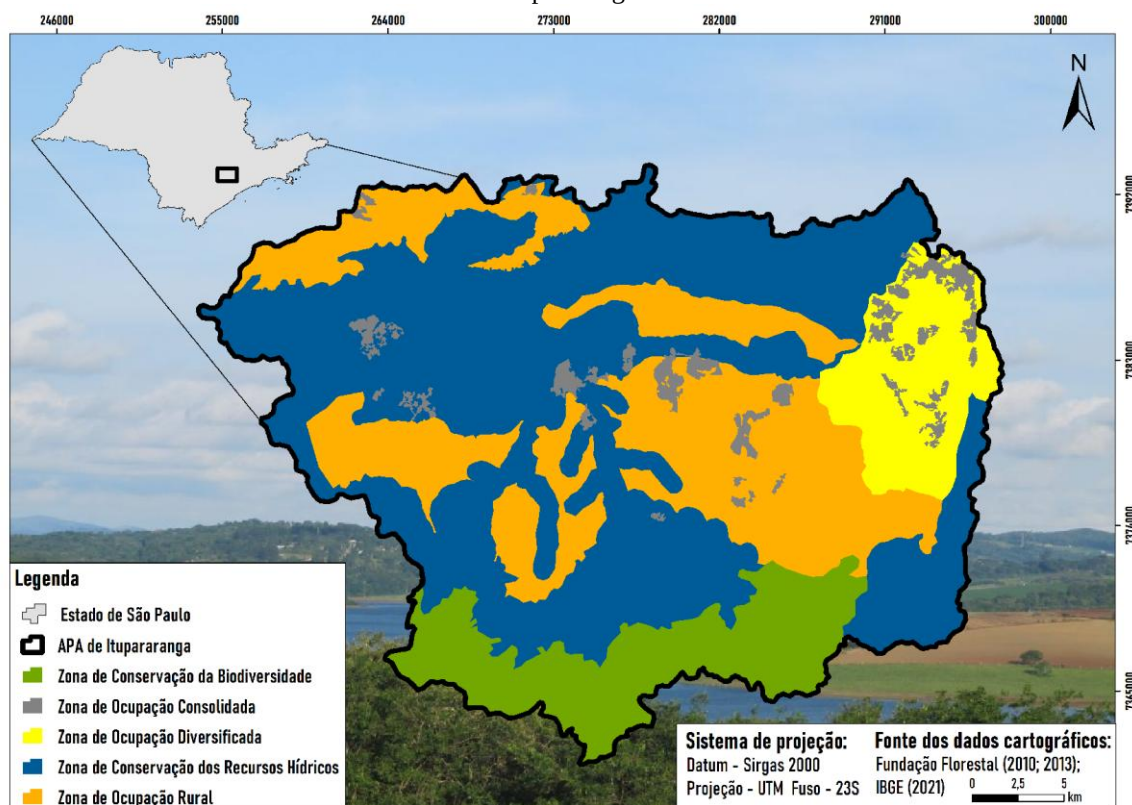
Já a área de ocupação dirigida é dividida em três zonas, sendo elas (CONSEMA, 2010):

I – Zona de ocupação diversificada (ZOD): zona em expansão urbana com diversidade em termos de produção econômica. Tem por objetivo orientar o ordenamento territorial, conservar remanescentes florestais, promover a sustentabilidade nas atividades do primeiro setor e do ecoturismo;

II – Zona de ocupação rural (ZOR): zona predominantemente rural, que tem por finalidade promover o desenvolvimento das atividades agrárias de forma sustentável;

III – Zona de ocupação consolidada (ZOC): inclui a região urbanizada da APA, e tem por intuito disciplinar a ocupação urbana através da adequação do parcelamento do solo.

Figura 3: Zoneamento ambiental de acordo com o plano de manejo da Área de Proteção Ambiental de Itupararanga.



Fonte: Elaborada pela autora.

### 5.2.2 Material

Foram utilizados dados da oitava coleção do projeto MapBiomas, em uma série histórica compreendendo os anos de 1986, 1994, 2001, 2007, 2014 e 2021. O MapBiomas compõe um robusto banco de dados de monitoramento e mapeamento dos biomas brasileiros, justificando a sua escolha para utilização nessa pesquisa.

O projeto possui uma rede de especialistas em SR, computação, ciência de dados e biomas, o que permitiu reconstruir a classificação anual do UCT utilizando algoritmos de processamento de imagens, convertidas para a refletância do topo da atmosfera (TOA) (Souza Júnior *et al.*, 2020). A classificação é feita de forma homogênea utilizando os sensores: Landsat Thematic Mapper (TM); Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+); e Operational Land Imager (OLI), a bordo dos satélites Landsat 5, Landsat 7 e Landsat 8, respectivamente, desde 1985 (Souza Júnior *et al.*, 2020).

A classificação das imagens é realizada através do algoritmo *Random Forest*, sendo conduzida em diferentes níveis conforme orientações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), de

modo que, para a Mata Atlântica, a acurácia geral da classificação no nível 2 da oitava coleção foi de 83,1% (Souza Júnior *et al.*, 2020; MapBiomias, 2024a).

### 5.2.3 Métodos

Os procedimentos descritos foram realizados no *software* ArcGIS 10.8, de modo que, primeiramente os dados referentes ao UCT foram recortados para os limites da APA de Itupararanga, utilizando a ferramenta *Extract by Mask*, e reprojetados para a projeção UTM (*Universal Transversa de Mercator*), zona 23S e Datum SIRGAS 2000 utilizando a ferramenta *Project*. Posteriormente, os dados que são disponibilizados pelo MapBiomias no formato matricial, foram convertidos para vetor para calcular a extensão de cada classe de UCT, utilizando *Raster to Polygon*.

Após o processo de vetorização, inúmeros polígonos foram gerados, sendo aplicado o *Dissolve* para simplificar as feições pertencentes a uma mesma classe de UCT. As classes foram renomeadas observando os critérios estabelecidos pelo “Manual Técnico de Uso da Terra” do IBGE (IBGE, 2013) e análise visual de imagens de satélite da região em estudo, com auxílio da série temporal do *Google Earth Pro*. As seguintes classes foram adotadas:

I – Área florestal: correspondente a classe “Formação florestal” do MapBiomias e se referem a áreas com formação arbórea;

II – Silvicultura: correspondente a mesma classe do MapBiomias;

III – Área campestre: correspondente à classe “Campo alagado e área pantanosa” do MapBiomias, pois de acordo com o manual anteriormente citado, nessa categoria considera-se as formações não-arbóreas, com fitofisionomia diversa e diferente das áreas florestais, com um estrato predominantemente arbustivo e gramíneo-lenhoso, de modo que entre as tipologias incluídas nessa classe está as formações vegetais que sofrem influência fluvial e/ou lacustre arbustiva e herbácea, coincidente com a descrição dessa classe para a Mata Atlântica pelo MapBiomias (2024b);

IV – Pastagem: correspondente aos usos “Pastagem” e “Mosaico agricultura e pastagem” do MapBiomias, pois de acordo com a descrição de Souza Júnior *et al.* (2020), nessas áreas ocorre o uso agropecuário da terra, não sendo possível distinguir entre pastagem e agricultura, e por análise visual, optou-se por reclassificar essas classes como “Pastagem”;

V - Áreas urbanizadas: correspondente aos usos “Área urbanizada” e “Outras áreas não vegetadas”, pois de acordo com o MapBiomias (2024b) e Souza Júnior *et al.* (2020), essa

última classe se refere a superfícies não permeáveis como: infraestrutura; expansão urbana; ou mineração não mapeadas em suas respectivas classes;

VI – Águas continentais: correspondente ao uso “Rios, lagos e oceanos” do MapBiomias;

VII – Culturas temporárias: correspondente as classes “Outras lavouras temporárias”, “Cana” e “Soja”;

VIII – Culturas permanentes: correspondentes as classes “Outras lavouras perenes” e “Café”.

Para a quantificação da mudança, calculou-se a diferença das áreas em quilômetros, através da Equação 1, e em porcentagem (%), através da Equação 2. Após o cálculo da extensão de cada classe de UCT para os anos de 1986, 1994, 2001, 2007 e 2021, utilizou-se a ferramenta *Tabulate Areas*, para a tabulação cruzada entre dois planos de informações, o ano anterior e o posterior, sendo possível comparar e calcular áreas coincidentes ou não entre os anos analisados (Chatewutthiprapa; Chotpantararat; Yumuang, 2020).

$$\text{Mudança UCT}(km^2) = \text{área do ano final} - \text{área do ano inicial} \quad (1)$$

$$\text{Mudança UCT}(\%) = \left( \frac{\text{área do ano final}}{\text{área total}} - \frac{\text{área do ano inicial}}{\text{área total}} \right) * 100 \quad (2)$$

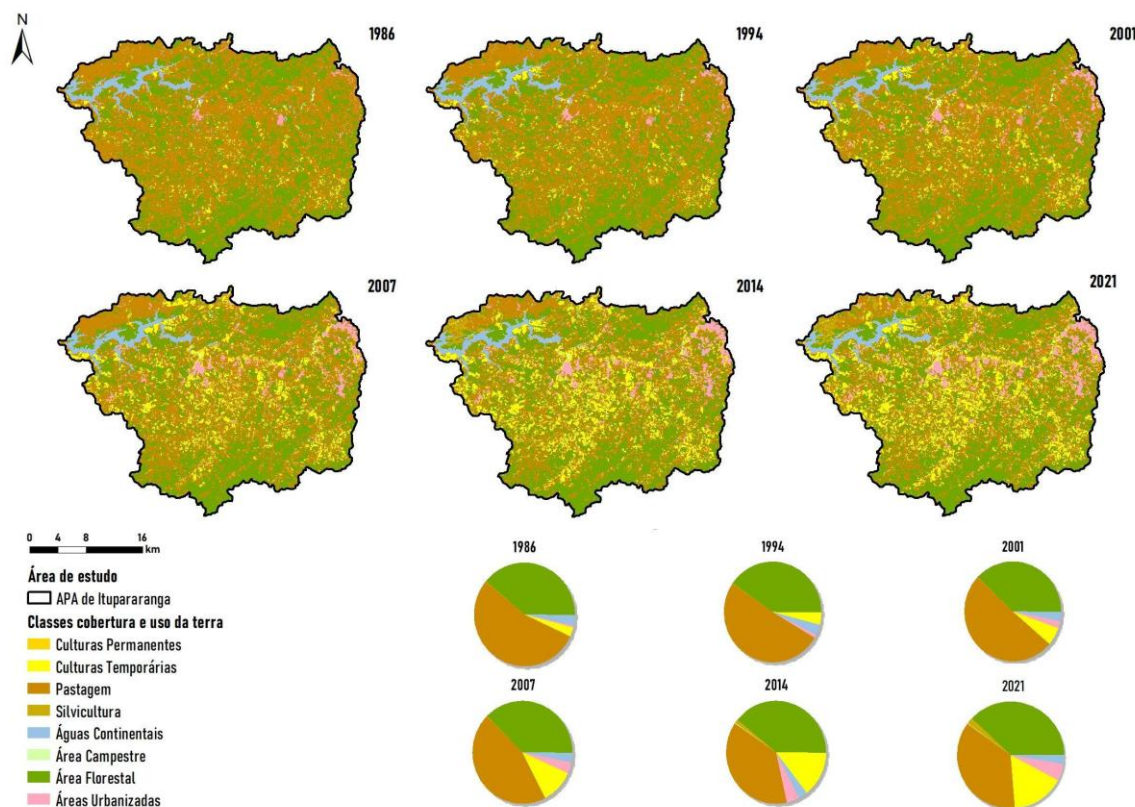
### 5.3 Resultados e discussão

Observa-se que em 1986 a região já se encontrava com sua vegetação natural significativamente alterada, de modo que as pastagens ocupavam uma área superior à área florestal, conforme observado em Figura 4. Essa observação é coerente com a característica da vasta degradação da Mata Atlântica, em decorrência dos diversos períodos produtivos e econômicos do Brasil, desde a sua colonização (Carlucci; Marcillio-Silva; Torezan, 2021), que exploraram e utilizaram de forma intensa os recursos naturais do bioma, alterando significativamente sua cobertura original.

Em 1985, a Mata Atlântica apresentava uma área total de 110,66 Mha e possuía 36,14% do seu território coberto por pastagens e 29,74% por mata nativa (Silveira *et al.*, 2022; Lira; Portela; Tambosi, 2021). A presença de pastagens como principal uso do solo antrópico também é observada na APA de Itupararanga entre o período de 1986 a 2000, como pode ser observado na Figura 4. Lira, Portela e Tambosi (2021) destacam que a

ocupação majoritária de pastagens no bioma, é resultado do histórico da ocupação antrópica que contribuiu para a sua fragmentação massiva.

Figura 4: Distribuição espacial do uso e cobertura da terra na APA de Itupararanga entre 1986 e 2021.



Fonte: Elaborada pela autora.

A expansão agrícola, destacada em amarelo na Figura 4, ocorreu principalmente no município de Ibiúna, região centro-sul da APA de Itupararanga, que compõe mais de 60% da área em estudo. De acordo com o Levantamento Censitário das Unidades de Produção Agropecuária (LUPA) do Estado de São Paulo, ano safra 2016/2017, Ibiúna possui 1.264 unidades de produção agropecuária (UPA), das quais 1.084 possuem cultura temporária (São Paulo, 2019).

A produção hortifrutigranjeira é a principal atividade socioeconômica do município, com mais de 31.000 cabeças de aves e destaque na produção de alface, braquiara, repolho, olerícolas, milho e brócolis (São Paulo, 2019). Portanto, considera-se que o desenvolvimento agrícola na região contribuiu para que houvesse expansão das culturas temporárias na APA de Itupararanga.

Quanto as áreas florestais, verifica-se que elas oscilam em aumento e diminuição de sua extensão, mas apesar dessa oscilação não foi observada uma tendência clara de sua

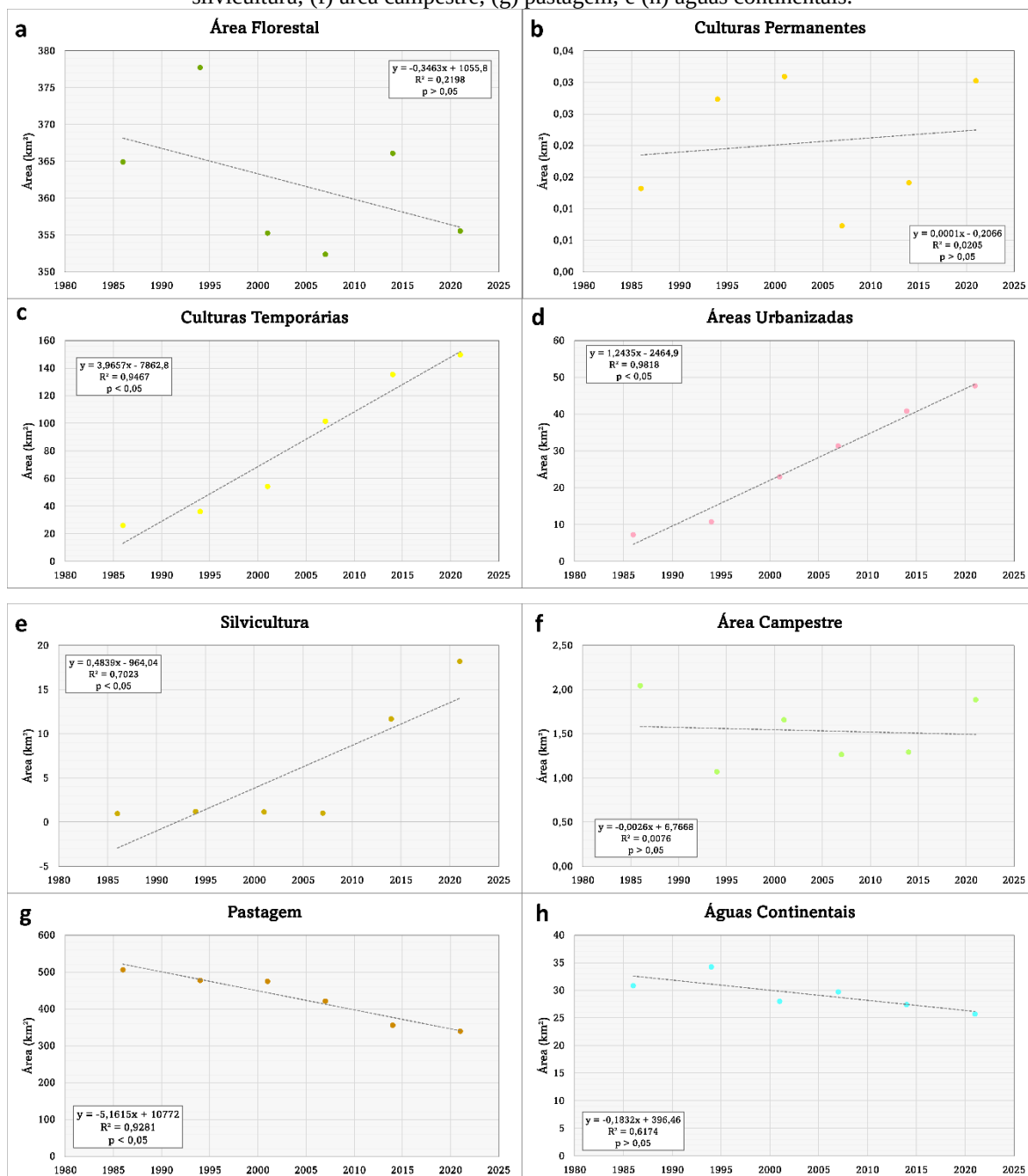
expansão ou de sua perda, como pode ser observado na Figura 5a. Silveira *et al.* (2022) também verificaram uma oscilação na área de mata nativa em toda a extensão do bioma entre os anos de 1985 e 2020, com valores médios de 31 Mha, porém sem identificar uma linha de tendência, assim como observaram uma redução das áreas de pastagem.

A diminuição das áreas de pastagens, retratada na Figura 5a, e a estabilidade no quantitativo de áreas florestais, retratada na Figura 5g, pode gerar uma sensação de sucesso na conservação dos recursos naturais do bioma. Contudo, a produção pecuária não diminuiu, pelo contrário, houve um aumento no número de cabeças de gado por áreas de pastagem (Silveira *et al.*, 2022). Ao alocar mais animais em áreas menores de pastagem, deve-se chamar a atenção quanto à capacidade do uso da terra, pois o uso intenso dessas pastagens contribui para a depreciação dessas áreas, para a baixa produtividade animal e para o aumento das perdas de matéria orgânica do solo (Santos *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2020).

As áreas urbanizadas apresentam tendência de expansão, conforme observa-se na Figura 5d, e praticamente dobram sua ocupação ao longo desses 35 anos. Considerando a proximidade dos municípios de Vargem Grande Paulista e Cotia com a Região Metropolitana de São Paulo, ressalta-se a importância do planejamento estratégico do uso urbano do solo para que a pressão sobre os recursos naturais protegidos pela APA seja minimizada.

Para tal, políticas públicas que orientem o desenvolvimento e crescimento urbano são necessárias para apoiar a elaboração e implementação dos planos diretores dos referidos municípios, assim como são necessárias leis específicas capazes de analisar e avaliar a efetividade de tal implementação (Peter; Yang, 2019), pois essas ações não apenas otimizam o uso da infraestrutura urbana, mas também mitigam os impactos produzidos pela ocupação de áreas ambientalmente frágeis (Menzori; Sousa; Gonçalves, 2021).

Figura 5: Análise da tendência de mudança do uso e cobertura da terra na APA de Itupararanga, para: (a) área florestal; (b) culturas permanentes; (c) culturas temporárias; (d) áreas urbanizadas; (e) silvicultura; (f) área campestre; (g) pastagem; e (h) águas continentais.



Fonte: Elaborada pela autora.

De acordo com a Tabela 1, é possível verificar que de 1986 a 2021, as culturas temporárias incrementaram mais de 120 km<sup>2</sup> de área, apresentando uma tendência crescente de sua expansão, conforme observado na Figura 5c. Essa expansão pode ser compreendida como efeito das políticas de incentivo à produção agrícola em contraposição as dificuldades da produção pecuária (Silveira *et al.*, 2022).

Tabela 1: Extensão do uso e cobertura da terra na APA de Itupararanga ao longo de 1986 a 2021 expressos em área (km<sup>2</sup>) e proporção (%).

| Classe cobertura e uso da terra | 1986            |       | 1994            |       | 2001            |       | 2007            |       | 2014            |       | 2021            |       |
|---------------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
|                                 | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     |
| Águas continentais              | 30,85           | 3,29  | 34,25           | 3,65  | 28,02           | 2,99  | 29,72           | 3,17  | 27,42           | 2,92  | 25,7            | 2,74  |
| Área campestre                  | 2,04            | 0,22  | 1,07            | 0,11  | 1,66            | 0,18  | 1,27            | 0,13  | 1,29            | 0,14  | 1,89            | 0,20  |
| Área florestal                  | 364,92          | 38,89 | 377,74          | 40,26 | 355,25          | 37,86 | 352,37          | 37,56 | 366,08          | 39,02 | 355,53          | 37,89 |
| Áreas urbanizadas               | 7,23            | 0,77  | 10,78           | 1,15  | 22,96           | 2,45  | 31,36           | 3,34  | 40,83           | 4,35  | 47,69           | 5,08  |
| Culturas permanentes            | 0,01            | 0,00  | 0,03            | 0,00  | 0,03            | 0,00  | 0,01            | 0,00  | 0,01            | 0,00  | 0,03            | 0,00  |
| Culturas temporárias            | 26,02           | 2,77  | 36,1            | 3,85  | 54,32           | 5,79  | 101,52          | 10,82 | 135,41          | 14,43 | 149,68          | 15,95 |
| Pastagem                        | 506,21          | 53,95 | 477,08          | 50,85 | 474,85          | 50,61 | 420,96          | 44,87 | 355,5           | 37,89 | 339,52          | 36,19 |
| Silvicultura                    | 0,96            | 0,10  | 1,2             | 0,13  | 1,15            | 0,12  | 1,03            | 0,11  | 11,68           | 1,25  | 18,20           | 1,94  |

Fonte: Elaborada pela autora.

As áreas utilizadas para a silvicultura também apresentam tendência crescente (Figura 5e), com uma expansão de 0,96 km<sup>2</sup> em 1986 para 18,20 km<sup>2</sup> em 2021 (Tabela 1). Do ponto de vista de Lira, Portela e Tambosi (2021), a expansão recente das atividades agrícolas e florestais está relacionada com intensa mecanização e o mercado internacional de commodities.

Em 1986 a APA era composta predominantemente por pastagens (53,95%), e em 2021 a UC passa a ser majoritariamente composta pela floresta (37,89%), porém, somando-se todos os usos antrópicos da terra, atualmente (2021) 59,16% da área em estudo é utilizada para a produção agropecuária e uso urbano. Em 1986, essas atividades 57,95% da área da APA.

As mudanças ocorridas ao longo do tempo na Mata Atlântica brasileira somada às atuais alterações, submetem esse bioma a uma condição delicada em termos de conservação e manutenção dos serviços ecossistêmicos, em decorrência de sua cobertura florestal ser constituída basicamente de pequenos e isolados fragmentos em diferentes níveis de degradação (Lira; Portela; Tambosi, 2021).

De acordo com os dados organizados na Tabela 2, é possível verificar que a maior perda da vegetação nativa ocorreu entre os anos de 1994 e 2001, e posteriormente entre 2014 e 2021. O avanço das culturas temporárias ocorreu principalmente entre os anos de 2001 e 2014, aumentando significativamente no intervalo de 2001 a 2007.



Tabela 2: Análise da expansão e diminuição dos usos e cobertura da terra da APA de Itupararanga expressos em área (km<sup>2</sup>) e proporção (%).

| Classe de cobertura e uso da terra | 1986 -1994      |       | 1994-2001       |       | 2001-2007       |       | 2007-2014       |        | 2014-2021       |       |
|------------------------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|--------|-----------------|-------|
|                                    | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %     | km <sup>2</sup> | %      | km <sup>2</sup> | %     |
| Águas continentais                 | 3,39            | 0,36  | -6,23           | -0,66 | 1,70            | 0,18  | -2,30           | -0,06  | -1,72           | -0,18 |
| Área campestre                     | -0,97           | -0,10 | 0,59            | 0,06  | -0,39           | -0,04 | 0,03            | -0,04  | 0,59            | 0,06  |
| Área florestal                     | 12,82           | 1,37  | -22,49          | -2,40 | -2,88           | -0,31 | 13,71           | 1,15   | -10,56          | -1,13 |
| Áreas urbanizadas                  | 3,55            | 0,38  | 12,18           | 1,30  | 8,40            | 0,90  | 9,47            | 1,90   | 6,86            | 0,73  |
| Culturas permanentes               | 0,01            | 0,00  | 0,00            | 0,00  | -0,02           | 0,00  | 0,01            | 0,00   | 0,02            | 0,00  |
| Culturas temporárias               | 10,08           | 1,07  | 18,22           | 1,94  | 47,21           | 5,03  | 33,88           | 8,64   | 14,27           | 1,52  |
| Pastagem                           | -29,14          | -3,10 | -2,23           | -0,24 | -53,89          | -5,74 | -65,46          | -12,72 | -15,98          | -1,70 |
| Silvicultura                       | 0,24            | 0,03  | -0,05           | -0,01 | -0,12           | -0,01 | 10,65           | 1,12   | 6,51            | 0,69  |

Fonte: Elaborada pela autora.

De forma semelhante, observa-se o aumento da produção de floresta plantada, com seu ápice entre 2007 e 2014. Já as pastagens apresentam constante queda, sendo o menor valor de perda de pastagem compreendido entre 1994 e 2001. As águas continentais têm uma perda mais significativa de sua área de 1994 a 2001, o que pode estar correlacionada com a variabilidade dos limites da represa em função da sazonalidade climática (períodos de cheia e seca).

A fim de melhor compreender as alterações ocorridas no território da APA, uma tabela cruzada foi sintetizada para identificar as substituições ocorridas ao longo do tempo em cada classe de UCT. A Tabela 3 organiza os dados obtidos através do cruzamento dos dados do ano anterior e posterior.

Constata-se que a área florestal é convertida em pastagens em todos os anos, mas há um aumento na conversão da vegetação natural pelas culturas temporárias ao longo do tempo, com os maiores valores nos anos de 2007 a 2021. Também se observa uma substituição de áreas de pastagens por florestas, mas a mudança ocorre, principalmente, entre pastagem e culturas temporárias, justamente durante o período de expansão das lavouras a partir de 2011 (Tabela 2 e Tabela 3).

Tabela 3: Tabela cruzada para a comparação entre cada classe de uso e cobertura da terra expressos em área (km²).

| 1994 |                          |                |              |                |          |                   |                    |                      |                      |
|------|--------------------------|----------------|--------------|----------------|----------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
|      | Uso e cobertura da terra | Área florestal | Silvicultura | Área campestre | Pastagem | Áreas urbanizadas | Águas continentais | Culturas temporárias | Culturas permanentes |
| 1986 | Área florestal           | 335,93         | 0,48         | 0,00           | 27,28    | 0,17              | 0,95               | 1,36                 | 0,00                 |
|      | Silvicultura             | 0,49           | 0,41         | 0,00           | 0,07     | 0,00              | 0,00               | 0,05                 | 0,00                 |
|      | Área campestre           | 0,03           | 0,00         | 0,90           | 0,76     | 0,00              | 0,15               | 0,12                 | 0,00                 |
|      | Pastagem                 | 39,94          | 0,36         | 0,25           | 432,66   | 6,10              | 3,13               | 23,45                | 0,02                 |
|      | Áreas urbanizadas        | 0,00           | 0,00         | 0,00           | 1,97     | 4,50              | 0,34               | 0,08                 | 0,00                 |
|      | Águas continentais       | 0,56           | 0,00         | 0,00           | 1,04     | 0,02              | 29,57              | 0,00                 | 0,00                 |
|      | Culturas temporárias     | 0,49           | 0,02         | 0,00           | 12,73    | 0,08              | 0,41               | 11,17                | 0,00                 |
|      | Culturas permanentes     | 0,00           | 0,00         | 0,00           | 0,03     | 0,00              | 0,00               | 0,00                 | 0,00                 |
| 2001 |                          |                |              |                |          |                   |                    |                      |                      |
|      | Uso e cobertura da terra | Área florestal | Silvicultura | Área campestre | Pastagem | Áreas urbanizadas | Águas continentais | Culturas temporárias | Culturas permanentes |
| 1994 | Área florestal           | 338,02         | 0,39         | 0,00           | 36,71    | 0,32              | 0,29               | 1,73                 | 0,00                 |
|      | Silvicultura             | 0,34           | 0,58         | 0,00           | 0,25     | 0,00              | 0,00               | 0,08                 | 0,00                 |
|      | Área campestre           | 0,02           | 0,00         | 0,97           | 0,10     | 0,00              | 0,02               | 0,05                 | 0,00                 |
|      | Pastagem                 | 15,04          | 0,20         | 0,41           | 419,20   | 11,30             | 0,78               | 29,60                | 0,00                 |
|      | Áreas urbanizadas        | 0,00           | 0,00         | 0,00           | 0,65     | 10,16             | 0,00               | 0,07                 | 0,00                 |
|      | Águas continentais       | 1,72           | 0,02         | 0,29           | 4,37     | 0,54              | 26,95              | 0,66                 | 0,00                 |
|      | Culturas temporárias     | 0,44           | 0,05         | 0,05           | 13,17    | 0,17              | 0,02               | 22,33                | 0,00                 |
|      | Culturas permanentes     | 0,00           | 0,00         | 0,00           | 0,02     | 0,00              | 0,00               | 0,00                 | 0,00                 |
| 2007 |                          |                |              |                |          |                   |                    |                      |                      |
|      | Uso e cobertura da terra | Área florestal | Silvicultura | Área campestre | Pastagem | Áreas urbanizadas | Águas continentais | Culturas temporárias | Culturas permanentes |
| 2001 | Área florestal           | 332,92         | 0,17         | 0,02           | 19,83    | 0,29              | 0,26               | 2,16                 | 0,00                 |
|      | Silvicultura             | 0,20           | 0,75         | 0,00           | 0,19     | 0,00              | 0,00               | 0,02                 | 0,00                 |
|      | Área campestre           | 0,02           | 0,00         | 1,14           | 0,17     | 0,00              | 0,00               | 0,46                 | 0,00                 |
|      | Pastagem                 | 18,99          | 0,14         | 0,12           | 387,56   | 9,17              | 1,87               | 57,10                | 0,00                 |
|      | Áreas urbanizadas        | 0,00           | 0,00         | 0,00           | 0,78     | 21,20             | 0,41               | 0,24                 | 0,00                 |
|      | Águas continentais       | 0,51           | 0,00         | 0,10           | 0,63     | 0,02              | 26,48              | 0,14                 | 0,00                 |
|      | Culturas temporárias     | 0,14           | 0,03         | 0,02           | 11,51    | 0,73              | 0,49               | 41,25                | 0,00                 |
|      | Culturas permanentes     | 0,00           | 0,00         | 0,00           | 0,00     | 0,00              | 0,00               | 0,00                 | 0,00                 |
| 2014 |                          |                |              |                |          |                   |                    |                      |                      |
|      | Uso e cobertura da terra | Área florestal | Silvicultura | Área campestre | Pastagem | Áreas urbanizadas | Águas continentais | Culturas temporárias | Culturas permanentes |
| 2007 | Área florestal           | 334,67         | 0,78         | 0,00           | 13,45    | 0,75              | 0,41               | 2,72                 | 0,00                 |
|      | Silvicultura             | 0,20           | 0,73         | 0,00           | 0,12     | 0,03              | 0,00               | 0,00                 | 0,00                 |
|      | Área campestre           | 0,00           | 0,00         | 0,97           | 0,17     | 0,00              | 0,00               | 0,26                 | 0,00                 |

|             |                                 |                       |                     |                       |                 |                          |                           |                             |                             |
|-------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|             | Pastagem                        | 28,57                 | 9,13                | 0,14                  | 316,82          | 8,49                     | 0,58                      | 56,91                       | 0,02                        |
|             | Áreas urbanizadas               | 0,02                  | 0,00                | 0,00                  | 1,21            | 29,84                    | 0,02                      | 0,32                        | 0,00                        |
|             | Águas continentais              | 0,56                  | 0,00                | 0,05                  | 1,72            | 0,03                     | 26,14                     | 1,00                        | 0,00                        |
|             | Culturas temporárias            | 1,45                  | 1,16                | 0,22                  | 22,67           | 1,65                     | 0,10                      | 74,12                       | 0,00                        |
|             | Culturas permanentes            | 0,00                  | 0,00                | 0,00                  | 0,00            | 0,00                     | 0,00                      | 0,00                        | 0,00                        |
| <b>2021</b> |                                 |                       |                     |                       |                 |                          |                           |                             |                             |
| <b>2014</b> | <b>Uso e cobertura da terra</b> | <b>Área florestal</b> | <b>Silvicultura</b> | <b>Área campestre</b> | <b>Pastagem</b> | <b>Áreas urbanizadas</b> | <b>Águas continentais</b> | <b>Culturas temporárias</b> | <b>Culturas permanentes</b> |
|             | Área florestal                  | 335,50                | 0,65                | 0,03                  | 25,47           | 0,53                     | 0,15                      | 3,15                        | 0,00                        |
|             | Silvicultura                    | 0,29                  | 10,66               | 0,00                  | 0,78            | 0,00                     | 0,00                      | 0,09                        | 0,00                        |
|             | Área campestre                  | 0,00                  | 0,00                | 1,07                  | 0,07            | 0,00                     | 0,00                      | 0,24                        | 0,00                        |
|             | Pastagem                        | 16,41                 | 6,75                | 0,32                  | 284,05          | 5,58                     | 0,44                      | 42,60                       | 0,00                        |
|             | Áreas urbanizadas               | 0,05                  | 0,00                | 0,00                  | 1,33            | 38,80                    | 0,03                      | 0,58                        | 0,00                        |
|             | Águas continentais              | 0,41                  | 0,02                | 0,03                  | 1,09            | 0,29                     | 24,57                     | 0,83                        | 0,00                        |
|             | Culturas temporárias            | 1,63                  | 0,31                | 0,37                  | 30,91           | 2,18                     | 0,17                      | 99,73                       | 0,02                        |
|             | Culturas permanentes            | 0,00                  | 0,00                | 0,00                  | 0,00            | 0,00                     | 0,00                      | 0,00                        | 0,00                        |

Fonte: Elaborada pela autora.

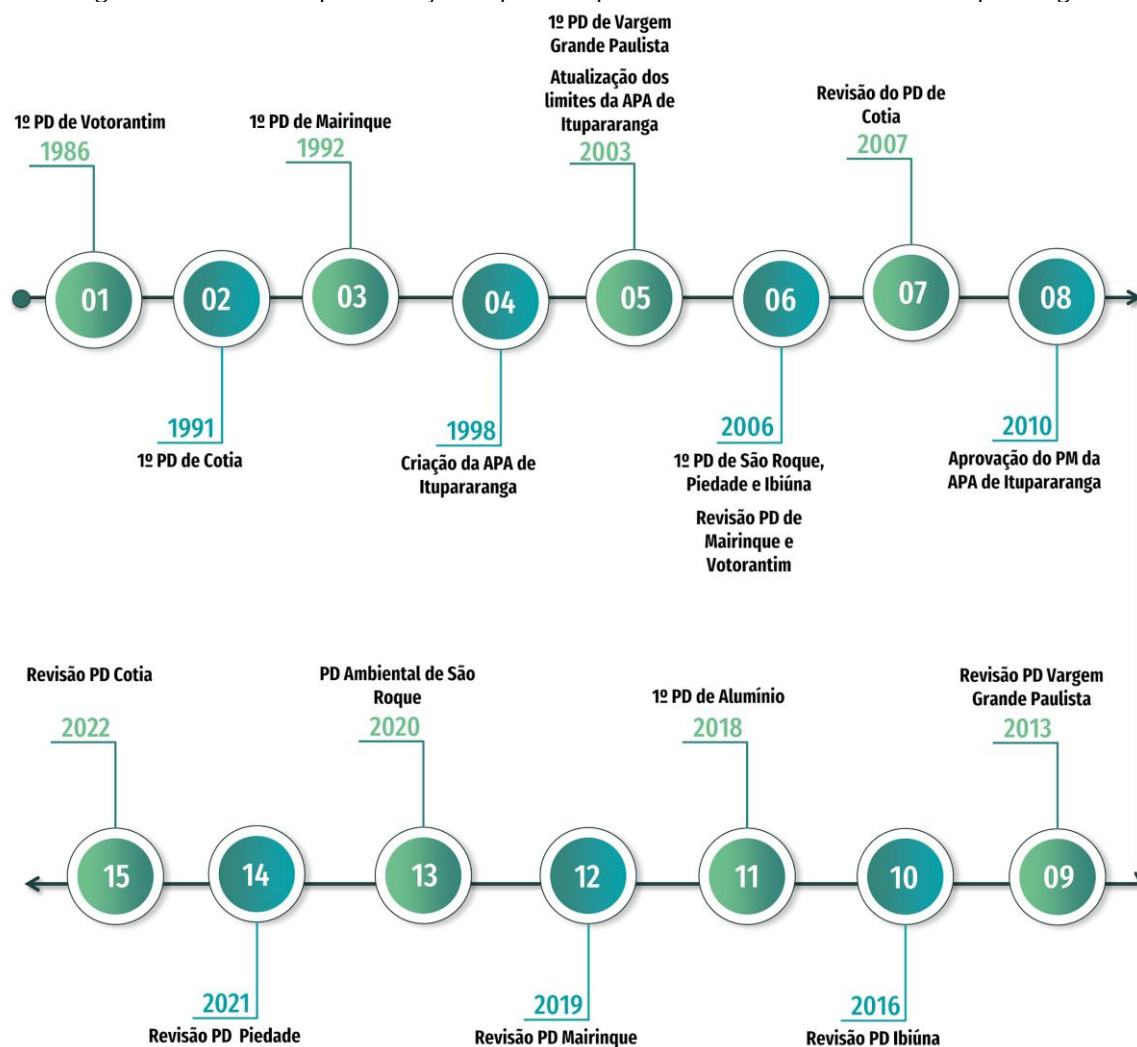
A partir de 2014, ocorre também a substituição das pastagens pela floresta plantada, assim como verifica-se que as áreas urbanizadas ocorrem principalmente em substituição às áreas de pastagem e de lavouras temporárias, sendo possível inferir que essas mudanças ocorreram principalmente em áreas já antropizadas em virtude do estabelecimento dos planos diretores e de manejo da APA.

A instituição dos planos diretores em municípios com mais de 20 mil habitantes está previsto no Estatuto das Cidades, Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001, como instrumento básico da política de desenvolvimento urbano e planejamento municipal, devendo ser revisado pelo menos a cada 10 anos (Brasil, 2001). Conforme pode ser observado na Figura 6, Votorantim, Cotia e Mairinque já possuíam seus respectivos planos diretores antes da criação da APA de Itupararanga e do Estatuto da Cidade (Votorantim, 1986; Cotia, 1991; Mairinque, 1992).

Contudo não havia quaisquer citações referentes ao zoneamento de áreas de interesse ambiental, sendo constituídos de documentos simples e pouco orientativos. Apesar da ausência de políticas públicas que regulamentassem o uso do solo, se observarmos os dados expostos anteriormente, é possível constatar que até 1994 a vegetação natural cresceu, principalmente através da conversão de pastagens. Entretanto, esse cenário torna-se desfavorável entre 1994 e 2007, com uma perda de mais de 20 km<sup>2</sup> de floresta, o que pode

ser compreendido como um reflexo da ausência de políticas públicas, pois uma característica comum dos planos diretores brasileiros é a estratégia de utilizar a regularização, por meio do estabelecimento de zonas, para conservar ou recuperar áreas de vegetação (Daunt; Inostroza; Hersperger, 2021).

Figura 6: Linha do tempo da criação de políticas públicas no contexto da APA de Itupararanga.



Fonte: Elaborada pela autora. Legenda: PD = Plano diretor; 1º = Primeiro; PM = Plano de Manejo; APA = Área de Proteção Ambiental.

Posteriormente, em 2003 a APA de Itupararanga teve seus limites alterados e passa a incluir Vargem Grande Paulista como integrante da UC. Nesse mesmo ano, o município institui seu primeiro plano diretor, que apesar de não citar a APA, define áreas de preservação ambiental no município (Vargem Grande Paulista, 2003). Já em 2006, os outros municípios, com exceção de Alumínio devido ao seu número de habitantes, formularam seus respectivos planos diretores, provavelmente em exigência ao Art. 42 do Estatuto da Cidade (Brasil, 2001).

Votorantim e Cotia ao revisarem seus respectivos planos citam áreas específicas para a conservação e proteção ambiental (Votorantim, 2006; Cotia, 2007), enquanto Mairinque faz menção direta a APA de Itupararanga em seu Art. 11, criando o Zoneamento de Conservação Ambiental de Itupararanga e do Monjolinho, para assegurar a proteção de mananciais, mantendo o desenvolvimento de atividades agrícolas, mas proibindo o parcelamento do solo para novos loteamentos urbanos (Mairinque, 2006).

O período após instituição e revisão dos novos planos diretores para os municípios citados, coincide com o período em que a floresta nativa diminuiu a sua perda e voltou a expandir. Considerando que a governança é uma ferramenta potencializadora do desenvolvimento sustentável das cidades (Lima *et al.*, 2020), desenvolver planos robustos e passíveis de serem analisados do ponto de vista da eficácia de sua implementação, torna-se uma estratégia relevante para a conservação de áreas naturais.

Após a aprovação do plano de manejo da APA, Vargem Grande Paulista e Ibiúna renovam seus planos, de modo que não são observadas grandes mudanças quanto à citação de áreas específicas para a proteção ambiental no plano de Vargem Grande Paulista em 2013 (Vargem Grande Paulista, 2013). Quanto a Ibiúna, anteriormente seu plano não citava a APA de Itupararanga de modo direto em algum tipo de zoneamento, apenas descrevia que o uso do solo nas áreas contidas na UC deveria seguir seu plano de manejo (Ibiúna, 2006).

Já em 2016, é descrito que a Macrozona de Destinação Urbana, localizada ao norte da cidade, está integralmente na APA (Ibiúna, 2016). Observa-se que o novo plano traz à tona uma visão mais atenta quanto à garantia da sustentabilidade e o respeito aos recursos e patrimônio natural do município, mas Bernardi *et al.* (2022) alertam que Ibiúna é o município com maior número de conflitos de ocupação em relação ao plano de manejo da APA, pois há sobreposição de áreas destinadas para o uso do solo industrial com as Zonas de Proteção de Recursos Hídricos e de Ocupação Rural.

Dessa forma, apesar de ser verificado uma expansão agrícola na região do município, conforme os dados anteriormente expostos, uma possível expansão industrial e urbana não bem planejada também pode acarretar consequências ambientais, uma vez que o período de 2014 a 2021 foi o segundo período como maior índice de perda de florestas.

Além disso, Bernardi *et al.* (2022) destacam que a estratégia de classificar o território de Vargem Grande Paulista no plano de manejo como Zona de Ocupação Dirigida, gera uma falsa segurança em virtude da inexistência de conflitos entre plano diretor, plano de manejo e ocupação do solo, pois há de se considerar que o município gera grande pressão aos recursos hídricos a serem protegidos pela APA, pois Vargem Grande Paulista fica na

cabeceira dos rios formadores do Reservatório de Itupararanga e é um dos principais causadores de poluição desses recursos devido à ausência e ineficiência no tratamento de esgoto sanitário.

Portanto, considerando que o principal objetivo da APA de Itupararanga é a manutenção da qualidade de água de seu reservatório, as áreas de cabeceiras requerem maiores limitações de ocupação. Exemplificando Alumínio, que ao elaborar seu primeiro plano diretor instituiu a Macrozona de Proteção Ambiental da Represa de Itupararanga, proibindo o parcelamento do solo para uso urbano, a fim de controlar a expansão urbana estabelecendo um raio de 2,5 km a partir das margens da represa para exploração do turismo sustentável e reflorestamento (Alumínio, 2022).

Nos anos subsequentes, Mairinque, Piedade e Cotia atualizam seus respectivos planos. Piedade destaca a necessidade do uso do solo nos limites da APA seguir seu plano de manejo (Piedade, 2021), enquanto Cotia não cita diretamente a APA, mas institui Zonas Especiais de Interesse Ambiental, onde estão inseridos remanescentes florestais, áreas de fundo de vale dos córregos e rios, as áreas de proteção permanente e protegidas por lei (Cotia, 2022).

Por outro lado, Mairinque destaca que uma porção da Bacia Hidrográfica de Itupararanga está inserida na denominada Zona de Proteção aos Mananciais, que tem por diretriz manter atividades rurais com manejo adequado, restringir o uso residencial de baixíssima densidade, preservar o patrimônio natural e mananciais (Mairinque, 2019).

São Roque inova ao ser o primeiro município integrante da APA de Itupararanga a elaborar um plano diretor ambiental, para promover o planejamento urbano e rural sustentável, com um baixo impacto ambiental, ampliar AP e incentivar a política de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), entre outros objetivos (São Roque, 2020). De acordo com o plano, uma porção da APA de Itupararanga está inserida na Zona Prioritária a Proteção dos Recursos Hídricos, que tem por intuito disciplinar a expansão urbana e o parcelamento do solo para novos loteamentos.

Observa-se que as ações tomadas pelo poder público ao longo do tempo foram essenciais para orientar a ocupação do território na APA de Itupararanga, sendo perceptível a concordância entre a evolução e a criação das legislações com a mudança do UCT entre 1986 e 2014. Contudo, a perda florestal em 2021 requer atenção, sugerindo uma maior participação dos diferentes atores envolvidos no manejo das áreas naturais. Dentre as categorias de UC, a APA é a menos restritiva e é uma das mais carentes em termos de

disponibilidade de recursos para orientar o ordenamento territorial (Pinto; Hirota, 2020), o que pode contribuir para os avanços do desmatamento e degradação dos ecossistemas.

Outros mecanismos legais podem ser adotados pelos municípios integrantes da APA de Itupararanga a fim de fortalecer a conservação ambiental, entre eles a criação de Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN), que apesar de dependerem do ato voluntário do proprietário da área a ser transformada em RPPN, constitui uma das principais ferramentas de proteção da Mata Atlântica, ajudando a conservar 235 mil hectares do bioma (Pinto; Hirota, 2000). Assim como a criação de UC municipais, componentes importantes para regular conflitos socioeconômicos e proporcionar benefícios à sociedade, e a criação de programas voltadas para PSA (Pinto; Hirota, 2000), esse último já previsto por lei em São Roque.

Do ponto de vista do fortalecimento da governança municipal, atualmente o governo federal disponibiliza o projeto Áreas Protegidas Locais, que produz publicações técnicas para gestores ambientais municipais e desenvolve ações com os municípios para a divulgação dos benefícios das UC municipais e de outras medidas voltadas para a conservação (Pinto; Hirota, 2000).

Além disso, a Lei da Mata Atlântica trata de um fundo para beneficiar municípios que atuem na conservação e recuperação da vegetação do bioma, através do Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica (PMMA) (Brasil, 2006), porém, dos municípios inseridos na APA, somente Votorantim e Ibiúna possuem PMMA elaborados.

Contudo, Votorantim não apresenta com clareza em seu PMMA como irá atuar sobre os principais vetores de degradação, tão pouco estabelece um planejamento estratégico para a conservação. Faltam metas, prazos e responsáveis, abrindo margem para existência do PMMA somente no papel (Votorantim, 2018). Enquanto Ibiúna não cita o avanço da agricultura como um possível vetor de pressão, o que deveria ser considerado, já que o mesmo é citado no PMMA como um uso indiscriminado da terra (Ibiúna, s.d.).

Portanto, são necessárias ações para integrar e coordenar a participação dos diferentes atores no processo de gestão das áreas naturais, como o uso de grupos de ação local e associações (Cordente-Rodriguez; Villanueva-Alvaro; Mondejar-Jimenez, 2022). Também ressalta-se que o planejamento do UCT é muitas vezes realizado de forma apenas discriminatória e que os planos instituídos são desenvolvidos de cima para baixo (Peter; Yang, 2019), o que pode contribuir para uma implementação pouco eficiente, pois não consideram-se os problemas locais e a ineficiência na participação de todos os agentes públicos envolvidos e da sociedade civil, para expor suas demandas, dificuldades e propor

soluções coparticipativas, a fim de reduzir conflitos e proporcionar uma proteção e conservação dos recursos naturais mais efetiva.

#### 5.4 Conclusão

É possível inferir que em 1986 a APA de Itupararanga já se encontrava significativamente modificada, e após a sua criação, as mudanças ocorreram principalmente na conversão de áreas já antropizadas. Todavia, nos últimos anos (2014-2021) identificou-se a maior perda floresta, um possível reflexo do modo em que os planos diretores foram desenvolvidos e implementados e da ausência de políticas mais proativas de conservação, como a ausência de PMMA.

Além disso, os planos diretores e os PMMA existentes concentram-se seus esforços em orientar a expansão urbana e coibir ou mitigar o parcelamento do solo para esse fim em regiões estratégicas da APA, favorecendo, muitas vezes, a expansão agropecuária. Vale ressaltar que entre os objetivos da criação da APA está o controle dessa expansão devido aos seus impactos, requerendo atenção dos gestores quanto à esse item.

Do mais, ao não citar claramente a APA em seus respectivos planos diretores, os municípios fragilizam a capacidade regulatória e fiscalizatória do plano diretor, uma ferramenta que deveria ser utilizada de forma estratégica na conservação de áreas naturais e concordância com plano de manejo da APA de Itupararanga.

É recomendável que estudos posteriores identifiquem os conflitos existentes entre as delimitações dos planos diretores e dos planos de manejo, bem como os quantifiquem para facilitar a gestão integrativa do ordenamento territorial e monitoramento da mudança do UCT na APA de Itupararanga.

#### 5.5 Referências bibliográficas

ALUMÍNIO. **Lei nº 2.221, de 30 de junho de 2022.** Dispõe sobre a criação de um conselho municipal de preservação do patrimônio histórico, cultural e ambiental da cidade de Alumínio. Disponível em: <https://pmaluminio.smarapd.com.br:3000/>. Acesso em: 23 out. 2022.

BARBOSA, C. C.; CALIJURI, M. C.; SANTOS, A. C. A.; LADWIG, R.; OLIVEIRA, L. F.mA.; BUARQUE, A. C. S. Future projections of water level and thermal regime changes of a multipurpose subtropical reservoir (Sao Paulo, Brazil). **Science of the Total Environment**, v. 770, p. 144741, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144741>.

BERNARDI, I.; SILVA, L. R. D.; FALCO, P. D.; PIRES, J. S. R.; SANTOS, A. C. A. D. Comparative analysis of management tools: Management Plan of Itupararanga's



environmental protection area and Municipal Master Plans. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 72-87, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-3z6541>.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9985.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm). Acesso em: 08 de fev. 2023.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Disponível em [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm). Acesso em: 08 fev. de 2023.

BRASIL. **Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm). Acesso em: 08 fev. 2023.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001**. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/l10257.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm). Acesso em: 08 fev. 2023.

CARLUCCI, M. B.; MARCILLIO-SILVA, V.; TOREZAN, J. M. The Southern Atlantic Forest: Use, degradation, and perspectives for conservation. In: MARQUES, M. C. M.; GRELLE, C. E. V. (Eds.). **The Atlantic Forest: History, biodiversity, threats and opportunities of the mega-diverse forest**. Springer Nature, Switzerland, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-55322-7>.

CHATEWUTTHIPRAPA, C.; CHOTPANTARAT, S.; YUMUANG, S. Land Use and Land Cover Change of Chanthaburi Watershed Following 1999, 2006 and 2013 Floods. In: MONPRAPUSSORN, S.; LIN, S.; SITTHI, A.; WETCHAYONT, P. (Eds.)

**Geoinformatics for sustainable development in Asian cities**. Cham, Switzerland: Springer Geography, 2020. p. 21-31. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33900-5>.

COELHO JUNIOR, M. G.; BIJU, B. P.; DA SILVA NETO, E. C.; DE OLIVEIRA, A. L.; DE OLIVEIRA TAVARES, A. A.; BASSO, V.; TURETTA, A. P. D.; CARVALHO, A. G.; SANSEVERO, J. B. B. Improving the management effectiveness and decision-making by stakeholders' perspectives: A case study in a protected area from the Brazilian Atlantic Forest. **Journal of Environmental Management**, v. 272, p. 111083, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111083>.

CONSEMA. Conselho Estadual do Meio Ambiente. **Deliberação Consema 16/2010, de 21 de julho de 2010**. Manifesta-se favoravelmente sobre o Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental de Itupararanga. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/fundacaoflorestal/planos-de-manejo/planos-de-manejo-planos-concluidos/plano-de-manejo-apa-itupararanga/>. Acesso em: 08 ago. 2022.

CORDENTE-RODRIGUEZ, M.; VILLANUEVA-ALVARO, J. J.; MONDEJAR-JIMENEZ, J. A. Sustainable management of natural areas: The role of population to support the protection categories. **Journal of Hospitality & Tourism Research**, v. 46, n. 7, p. 1274-1297, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1177/1096348020988309>.

COTIA. **Lei complementar nº 01, de 11 de setembro de 1991**. Dispõe sobre o plano diretor do município de Cotia para o período de 1991/1995 e dá outras providências.

Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/sp/cotia>. Acesso em: 05 de jul. 2022.

COTIA. **Lei complementar nº 72, de 02 de janeiro de 2007**. Institui o plano diretor de desenvolvimento urbano, econômico e social do município de Cotia e dá outras providências. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/sp/cotia>. Acesso em: 05 de jul. 2022.

COTIA. **Lei complementar nº 325, de 16 de março de 2022**. Dispõe sobre o plano diretor de desenvolvimento urbano, econômico e social do município de Cotia. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/sp/cotia>. Acesso em: 05 de jul. 2022.

DAUNT, A. B. P.; INOSTROZA, L.; HERSPERGER, A. M. The role of spatial planning in land change: An assessment of urban planning and nature conservation efficiency at the southeastern coast of Brazil. **Land Use Policy**, v. 111, p. 105771, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105771>.

ELLIS, E. C.; PASCUAL, U.; MERTZ, O. Ecosystem services and nature's contribution to people: negotiating diverse values and trade-offs in land systems. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 38, p. 86-94, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.05.001>

FUNDAÇÃO FLORESTAL. **Plano de Manejo da APA de Itupararanga**. São Paulo. 2010. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/fundacaoflorestal/planos-de-manejo/planos-de-manejo-planos-concluidos/plano-de-manejo-apa-itupararanga/>. Acesso em: 10 ago. 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2013.

IBIÚNA. **Lei nº 1236, de 13 de dezembro de 2006**. Institui o plano diretor da Estância Turística de Ibiúna. Disponível em: <https://sapl.ibiuna.sp.leg.br/norma/pesquisar>. Acesso em: 28 set. 2022.

IBIÚNA. **Lei nº 2129, de 01 de dezembro de 2016**. Institui a revisão e os subsídios para o plano diretor da Estância Turística de Ibiúna. Disponível em: <https://sapl.ibiuna.sp.leg.br/norma/pesquisar>. Acesso em: 28 set. 2022.

IBIÚNA. **Plano municipal de conservação e recuperação da Mata Atlântica de Ibiúna – São Paulo**. s/d. Disponível em: <https://pmma.etc.br/observatorio/>. Acesso em: 15 jan. 2023.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos do INMET - 2023**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/#>. Acesso em: 26 set. 2023.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v.15, n.3, p. 259-263, 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.

LIMA, E. A. C. F.; RANIERI, V. E. L. Land use planning around protected areas: Case studies in four state parks in the Atlantic Forest region of southeastern Brazil. **Land Use Policy**, v. 71, p. 453-458, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.12.020>.

LIMA, E. G.; CHINELLI, C. K.; GUEDES, A. L. A.; VAZQUEZ, E. G.; HAMMAD, A. W.; HADDAD, A. N.; SOARES, C. A. P. Smart and sustainable cities: The main guidelines of city statute for increasing the intelligence of Brazilian cities. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1025, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/su12031025>.

LIRA, P. K.; PORTELA, R. C. Q.; TAMBOSI, L. R. Land-cover changes and an uncertain future: Will the Brazilian Atlantic forest lose the chance to become a hopespot?. In: MARQUES, M. C. M.; GRELLE, C. E. V. (Eds.). **The Atlantic Forest: History, biodiversity, threats and opportunities of the mega-diverse forest**. Springer Nature, Switzerland, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-55322-7>.

MAIRINQUE. **Lei nº 1.725, de 14 de agosto de 1992**. Dispõe sobre o plano diretor de desenvolvimento integrado do município de Mairinque para o período 1991/1998 e dá outras providências. Disponível em: <http://www.camaramairinque.sp.gov.br/atividade-legislativa/legislacao-municipal/leis>. Acesso em: 05 set. 2022.

MAIRINQUE. **Lei nº 2.671, de 10 de outubro de 2006**. Institui o plano diretor do município de Mairinque. Disponível em: <http://www.camaramairinque.sp.gov.br/atividade-legislativa/legislacao-municipal/leis>. Acesso em: 05 set. 2022.

MAIRINQUE. **Lei nº 3.727, de 11 de outubro de 2019**. Institui o plano diretor do município de Mairinque e dá outras providências. Disponível em: <http://www.camaramairinque.sp.gov.br/atividade-legislativa/legislacao-municipal/leis>. Acesso em: 05 set. 2022.

MAPBIOMAS. **Análise de acurácia**. 2024a. Disponível em: <https://mapbiomas.org/analise-de-acuracia>. Acesso em: 08 fev. 2023.

MAPBIOMAS. **Códigos de legenda**. 2024b. Disponível em: <https://mapbiomas.org/codigos-de-legenda>. Acesso em: 08 fev 2023.

MENZORI, I. D.; SOUSA, I. C. N.; GONÇALVES, L. M. Urban growth management and territorial governance approaches: A master plans conformance analysis. **Land Use Policy**, v. 105, p. 105436, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105436>.

NEVES, A. K.; KÖRTING, T. S.; FONSECA, L. M. G.; ESCADA, M. I. S. Assessment of TerraClass and MapBiomias data on legend and map agreement for the Brazilian Amazon biome. **Acta Amazonica**, v. 50, p. 170-182, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201900981>.

PETER, L. L.; YANG, Y. Urban planning historical review of master plans and the way towards a sustainable city: Dar es Salaam, Tanzania. **Frontiers of Architectural Research**, v. 8, n. 3, p. 359-377, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.01.008>.

PIEDADE. **Lei nº 4.716, de 04 de novembro de 2021**. Dispõe sobre a revisão do plano diretor implantado pela lei nº 3.740, de 09 de outubro de 2006, na forma que especifica e dá outras providências. Disponível em: [https://www.piedade.sp.gov.br/portal/leis\\_decretos](https://www.piedade.sp.gov.br/portal/leis_decretos). Acesso em: 8 out. 2022.

PINTO, L. P.; HIROTA, M. (Org.). **30 anos de conservação do hotspot de biodiversidade da Mata Atlântica: desafios, avanços e um olha para o futuro**. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica, 2020.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Instituto de Economia Agrícola. Coordenadoria de Desenvolvimento Rural Sustentável. **Projeto LUPA 2016/17: Censo Agropecuário do Estado de São Paulo**. São Paulo, SP: SAA: IEA: CDRS, 2019.

SÃO ROQUE. **Lei complementar nº 103, de 8 de junho de 2020**. Institui o Plano Diretor Ambiental da Estância Turística de São Roque. Disponível em: <https://www.legislacaodigital.com.br/SaoRoque-SP>. Acesso em: 09 out. 2022.

SANTOS, C. B.; COSTA, K. A. P.; SOUZA, W. F.; SILVA, A. G.; SILVA, V. C.; OLIVEIRA, I. P.; BRANDSTETTE, E. V. Intercropping of sorghum with Paiaguas palisadegrass in a crop-livestock integration system for pasture recovery. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 7, p. 1072-1080, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.07.p2216>.

SILVA, J. T.; COSTA, K. A. P.; SILVA, V. C.; SOUZA, W. F.; TEIXEIRA, D. A. A.; SEVERIANO, E. C. Morphogenesis, structure, and dynamics of paiaguas palisadegrass tillering after intercropping with sorghum for the recovery of pasture in different forage systems. **Bioscience Journal**, v. 36, n. 5, p. 1663-1675, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14393/BJ-v36n5a2020-47747>.

SILVEIRA, J. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; CANTO, A. C. B.; LEITE, F. F. G. D.; CORDEIRO, F. R.; ASSAD, L. T.; SILVA, G. C. C.; MARQUES, R. O.; DALARME, M. S. L.; FERREIRA, I. G. M.; CONCEIÇÃO, M. C. G.; RODRIGUES, R. A. R. Land Use, Land Cover Change and Sustainable Intensification of Agriculture and Livestock in the Amazon and the Atlantic Forest in Brazil. **Sustainability**, v. 14, p. 2563, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14052563>.

SOLIKU, O.; SCHRAML, U. Making sense of protected area conflicts and management approaches: A review of causes, contexts and conflict management strategies. **Biological Conservation**, v. 222, p. 136-145, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.011>

SOUZA JÚNIOR, C. M. Z.; SHIMBO, J.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; A. ALENCAR, A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M. G.; FERREIRA, L.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; OLIVEIRA, S. W.; ROCHA, W. F.; FONSECA, A. V.; MARQUES, C. B.; DINIZ, C. G.; COSTA, D.; MONTEIRO, D.; ROSA, E. R.; VÉLEZ-MARTIN, E.; WEBER, E. J.; LENTI, F. E. B.; PATERNOST, F. F.; PAREYN, F. G. C.; SIQUEIRA, J. V.; VIERA, J. L.; NETO, L. C. F.; SARAIVA, M. M.; SALES, M. H.; SALGADO, M. P. G.; VASCONCELOS, R.; GALANO, S.; MESQUITA, V. V.; AZEVEDO, T. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.

VARGEM GRANDE PAULISTA. **Lei complementar nº 14, de 12 de dezembro de 2003**. Dispõe sobre a instituição do plano diretor do município de Vargem Grande Paulista - PDVGP e dá outras providências. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/sp/vargemgrandepaulista/>. Acesso em: 27 set. 2022.

VARGEM GRANDE PAULISTA. **Lei complementar nº 67, de 16 de dezembro de 2013**. Dispõe sobre a revisão do plano diretor do município de Vargem Grande Paulista conforme determina o artigo 59 da Lei Complementar nº 14/03 e dá outras providências. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/prefeitura/sp/vargemgrandepaulista/>. Acesso em: 27 set. 2022.

VOTORANTIM. **Lei nº 585, de 18 de dezembro de 1986**. Dispõe sobre a aprovação do plano diretor de desenvolvimento integrado do município de Votorantim – PDDI, e dá outras providências. Disponível em: [https://www.votorantim.sp.gov.br/portal/leis\\_decretos](https://www.votorantim.sp.gov.br/portal/leis_decretos). Acesso em: 28 jul. 2022.

VOTORANTIM. **Lei nº 1907, de 10 de outubro de 2006**. Dispõe sobre o plano diretor de desenvolvimento integrado do município de Votorantim. Disponível em: [https://www.votorantim.sp.gov.br/portal/leis\\_decretos](https://www.votorantim.sp.gov.br/portal/leis_decretos). Acesso em 28 jul. 2022.

VOTORANTIM. **Plano municipal de conservação e recuperação da mata atlântica: Votorantim – versão preliminar**. 2018. Disponível em: <https://pmma.etc.br/observatorio/>. Acesso em: 15 jan. 2023.

## 6 CAPÍTULO 3 - ANÁLISE ESPACIAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA APA DE ITUPARARANGA<sup>2, 3</sup>

### 6.1 Introdução

A utilização de SR para o cálculo da ET tem se mostrado uma abordagem eficiente, especialmente em regiões extensas e em áreas onde os dados meteorológicos são escassos ou inexistentes (Ghaderi *et al.*, 2020; Wang; Zhang; Chang, 2020). Nesse contexto, destaca-se o algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), desenvolvido por Bastiaanssen *et al.* (1998), que utiliza dados de SR para estimar fluxos de energia na superfície terrestre, permitindo o cálculo da ET de forma robusta e escalável.

O algoritmo calcula a ET através de uma série de etapas utilizando dados de radiância e refletância obtidos por meio de imagens de satélite, exemplificado através do fluxograma na Figura 7, sendo amplamente utilizado devido a sua aplicabilidade e seus resultados prudentes na estimativa da ET (Liu; Hu, 2019; Gao *et al.*, 2020; Ghaderi *et al.*, 2020). O SEBAL foi desenvolvido baseando-se no balanço energético instantâneo na superfície de cada pixel de uma imagem de satélite (Bastiaanssen *et al.*, 1998; Waters *et al.*, 2002).

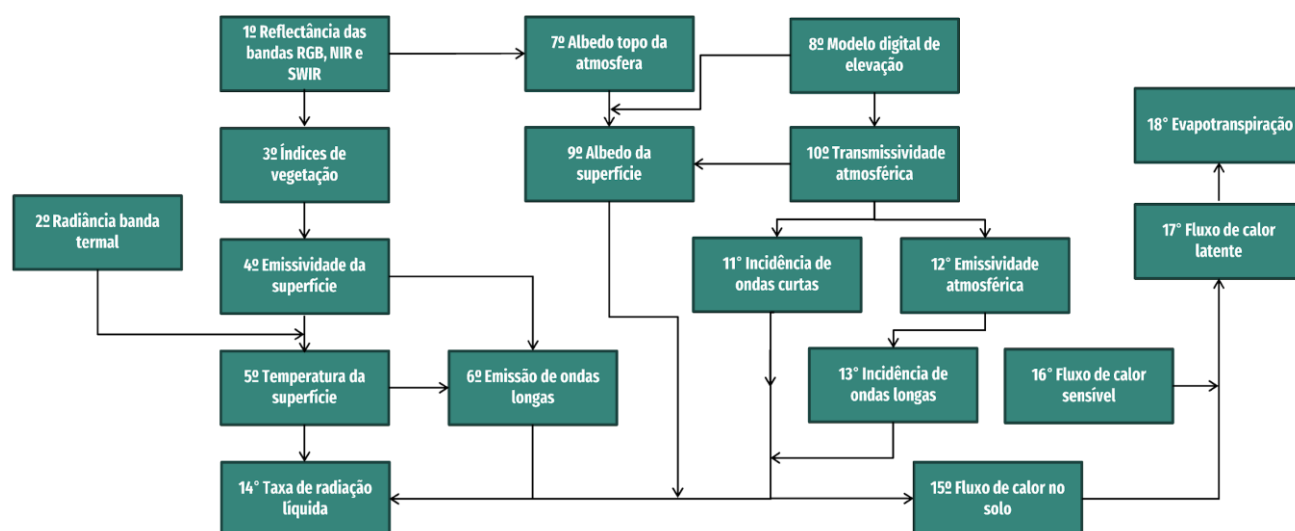
---

<sup>2</sup> O método para calcular o índice SAVI, descrito nesse capítulo, foi publicado na revista *Modeling Earth Systems and Environment*:

NERY, L. M.; GOMES, G.; MOURA, A. T.; SANTOS, A. P.; TONIOLO, B. P.; SILVA, D. C. C. Adaptation of SAVI to estimate the Leaf Area Index considering different land covers in a Brazilian Atlantic Forest area. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 11, p. 1-10, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-025-02300-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40808-025-02300-7>. Acesso em: 24 jan. 2025.

<sup>3</sup> Parte desse capítulo foi submetido à revista *Southern Forests: a Journal of Forest Science*.

Figura 7: Fluxograma de aplicação do algoritmo SEBAL para cálculo da evapotranspiração.



Fonte: Adaptado de Waters *et al.* (2002).

A obtenção de dados de ET *in loco* requer equipamentos onerosos e cuidados com a sua operação, com a sua calibração e com o tipo de UCT no entorno do equipamento (Bastiaanssen *et al.*, 2005). A principal vantagem em utilizar SR para estimar a ET, é a obtenção de informações em grande escala através de mapas temáticos (Gomide; Boratto, 2014) através de equações tradicionais de equilíbrio energético. Além disso, o algoritmo permite uma variabilidade de uso de dados obtidos por diferentes sensores (Ning; Gao; Xu, 2017; Wang; Zhang; Chang, 2020), substanciando uma vantagem notável em se utilizar o SEBAL.

A ET é obtida a partir da compreensão da quantidade de calor latente (LE) necessária para que ela ocorra. Já o H está relacionado à transferência de calor por meio de processos de condução e convecção, e representa a energia térmica trocada entre a superfície e a atmosfera, portanto, se refere ao calor utilizado para aquecer o ar próximo à superfície (Karimi; Bastiaanssen, 2015).

A energia térmica armazenada e transferida no solo (G) é resultante da diferença entre a radiação solar absorvida e emitida pelo solo. A energia absorvida aquece a superfície, sendo transferida para camadas mais profundas por condução térmica (Karimi; Bastiaanssen, 2015). Nesse contexto, há uma relação direta entre a temperatura superficial ( $T_s$ ), a evapotranspiração (ET), os fluxos de calor sensível (H) e o calor no solo (G). Um aumento da  $T_s$  eleva os fluxos de H e G, enquanto o resfriamento provocado pela ET reduz esses fluxos, resultando em uma  $T_s$  mais baixa (Karimi; Bastiaanssen, 2015).

No Brasil, estudos têm empregado o algoritmo SEBAL para avaliar os impactos das

mudanças na cobertura terrestre sobre o balanço energético (Machado *et al.*, 2020; Miranda *et al.*, 2022), estimar a ET (Gomide; Boratto, 2014; Silva *et al.*, 2015) e calcular a produtividade hídrica (Teixeira *et al.*, 2009; Laipelt *et al.*, 2020). Contudo, Caballero, Ruhoff e Biggs (2022) destacam a escassez de pesquisas focadas nos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra (UCT) sobre variáveis hidrológicas na Mata Atlântica. Esse cenário reforça a necessidade de investigar biomas antropizados, como o bioma atlântico brasileiro, para compreender melhor as interações entre superfície e atmosfera.

A análise espaço-temporal da ET, além de aprimorar a precisão de algoritmos como o SEBAL, permite entender o esgotamento evapotranspirativo em relação ao UCT, oferecendo subsídios para estratégias de gestão de recursos hídricos (Bastiaanssen *et al.*, 2005). Compreender os valores de ET de uma área é fundamental para desenvolver estudos sobre demandas de água, cada vez mais urgentes diante da competição pelo uso desse recurso para fins domésticos, industriais e agrícolas (Gomide; Boratto, 2014).

Sendo assim, esse capítulo discute os resultados obtidos através da estimativa da ET real para a APA de Itupararanga de 1986 a 2021, através do algoritmo SEBAL. Procurou-se discutir a tendência de mudança da ET ao longo do tempo, correlacionando-a com a mudança do UCT observada no capítulo anterior.

## 6.2 Material e método

Não foi possível obter imagens para o inverno de 1993 e 2000 (de junho a agosto), o que caracterizaria um intervalo exato de sete anos entre cada uma das imagens, em virtude da área de estudo estar coberta por nuvens. Considerando os efeitos da sazonalidade e da pluviosidade sobre a estimativa da ET, as melhores imagens foram obtidas nas datas descritas na Tabela 4.

Foram utilizadas imagens da Coleção 2 – Nível 1 dos satélites Landsat 5 e 8 (Tabela 4), obtidas através do *USGS EarthExplorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), considerando a ausência de nuvens para a região em estudo. Elas foram pré-processadas para obter a refletância no topo da atmosfera (TOA), conforme recomendado por Waters *et al.* (2002). A correção foi realizada utilizando o plugin SCP (*Semi-Automatic Classification Plugin*), que utiliza as informações dos metadados das imagens e equações recomendadas pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) (Congedo, 2020).

Os valores de radiância da banda termal são requeridos para o uso do algoritmo SEBAL (Waters *et al.*, 2002), portanto a Equação 3 foi utilizada conforme recomendações



da USGS (*United States Geological Survey*) (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>).

Tabela 4: Características das imagens utilizadas.

| Satélite  | Ponto/Órbita | Data       |
|-----------|--------------|------------|
| Landsat 5 | 219/76       | 06/08/1986 |
| Landsat 5 | 219/77       | 06/08/1986 |
| Landsat 5 | 219/76       | 27/07/1994 |
| Landsat 5 | 219/76       | 15/08/2001 |
| Landsat 5 | 219/76       | 16/08/2007 |
| Landsat 8 | 219/76       | 03/08/2014 |
| Landsat 8 | 219/76       | 22/08/2021 |

Fonte: Elaborado pela autora.

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (3)$$

Sendo:

$L_{\lambda}$  é a radiância em TOA (W/m<sup>2</sup>/sr/μm);

$M_L$  é o fator de dimensionamento multiplicativo específico para cada banda, sendo disponibilizado nos metadados como: RADIANCE\_MULT\_BAND;

$Q_{cal}$  é o valor do número digital (*DN ou digital number*) dos pixels da banda;

$A_L$  é o fator de redimensionamento aditivo específico para cada banda, sendo disponibilizado nos metadados como: RADIANCE\_ADD\_BAND.

### 6.2.1 Albedo

Para o cálculo do albedo no topo da atmosfera ( $\alpha_{toa}$ ) utilizou-se a refletância das bandas (Equação 4), onde  $\omega_{\lambda}$  corresponde ao coeficiente de cada banda (Tabela 5) e  $\rho_{\lambda}$  corresponde à refletividade. Para obter o  $\omega_{\lambda}$  para as imagens Landsat 5 foi utilizado a Equação 5, conforme Waters *et al.* (2002), onde ESUN se refere às irradiâncias espectrais exoatmosféricas solares disponibilizadas pela USGS (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>). Quanto às imagens Landsat 8, os valores utilizados foram os sugeridos por Silva *et al.* (2016).

$$\alpha_{toa} = \sum(\omega_{\lambda} \rho_{\lambda}) \quad (4)$$

$$\omega_{\lambda} = \frac{ESUN_{\lambda}}{\sum ESUN_{\lambda}} \quad (5)$$

Tabela 5: Valores de  $\omega_\lambda$  para as bandas espectrais dos satélites Landsat 5 e Landsat 8.

| Banda espectral ( $\lambda$ ) | Landsat 5 | Landsat 8 |
|-------------------------------|-----------|-----------|
| 1                             | 0,294     | -         |
| 2                             | 0,274     | 0,300     |
| 3                             | 0,233     | 0,277     |
| 4                             | 0,155     | 0,233     |
| 5                             | 0,032     | 0,143     |
| 6                             | -         | 0,036     |
| 7                             | 0,012     | 0,012     |

Fonte: Elaborado pela autora.

A transmissividade atmosférica ( $\tau_{sw}$ ), que se refere à quantidade de energia solar incidente e refletida que foi transmitida na atmosfera até chegar à superfície após os efeitos de absorção e reflexão, foi obtida por meio da Equação 6. Por fim, para o cálculo do albedo na superfície ( $\alpha$ ), utilizou-se a Equação 7 (Waters *et al.*, 2002).

$$\tau_{sw} = 0,75 + 0,00002 * MDE \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - 0,03}{\tau_{sw}^2} \quad (7)$$

Sendo:

MDE é o modelo digital de elevação NASADEM com resolução espacial de 30 metros.

### 6.2.2 Temperatura superficial

A determinação da  $T_s$  envolve o cálculo de índices de vegetação (IV) e do Índice de Área Foliar (IAF) (Waters *et al.*, 2002). Assim, considerando as características locais da APA de Itupararanga, principalmente pelas mudanças observadas no UCT da região ao longo do tempo, o método proposto por Waters *et al.* (2002) foi adaptado.

Primeiramente, para determinar o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI) (Equação 8), considerou-se valores do fator de correção L do SAVI ( $L_{SAVI}$ ) (Tabela 6) a partir da análise da estatística zonal do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) (Equação 9) em função do UCT da APA de Itupararanga, pra isso, avaliou-se a média e  $\pm 2$  desvios padrão do NDVI de cada classe de UCT (Tabela 7).

$$SAVI_{APA} = \frac{(1+L_{PI})(\rho_{nir}-\rho_{red})}{(L_{PI}+\rho_{nir}+\rho_{red})} \quad (8)$$

$$NDVI = \frac{(\rho_{nir}-\rho_{red})}{(\rho_{nir}+\rho_{red})} \quad (9)$$

Sendo:

$\rho_{nir}$  é a refletância na banda do infravermelho próximo;

$\rho_{red}$  é a recfletância na banda do vermelho visível;

$L_{PI}$  é o plano de informação referente ao valor de  $L_{SAVI}$  obtido para cada ano avaliado, dependendo do UCT analisada por meio de estatística do NDVI.

Tabela 6: Determinação do coeficiente de correção  $L_{SAVI}$  do índice SAVI a partir da análise estatística do NDVI.

|      |          | Sem cobertura | Baixa cobertura | Média a alta cobertura |
|------|----------|---------------|-----------------|------------------------|
| 1986 | L (SAVI) | 0             | 1               | 0,5                    |
|      | NDVI     | -0,52 a 0,44  | 0,44 a 0,56     | 0,56 a 0,84            |
| 1994 | L (SAVI) | 0             | 1               | 0,5                    |
|      | NDVI     | -0,51 a 0,44  | 0,44 a 0,56     | 0,56 a 0,85            |
| 2001 | L (SAVI) | 0             | 1               | 0,5                    |
|      | NDVI     | -0,78 a 0,37  | 0,37 a 0,62     | 0,62 a 1               |
| 2007 | L (SAVI) | 0             | 1               | 0,5                    |
|      | NDVI     | -0,77 a 0,32  | 0,32 a 0,68     | 0,68 a 1               |
| 2014 | L (SAVI) | 0             | 1               | 0,5                    |
|      | NDVI     | -1 a 0,37     | 0,37 a 0,56     | 0,56 a 0,89            |
| 2021 | L (SAVI) | 0             | 1               | 0,5                    |
|      | NDVI     | -0,41 a 0,27  | 0,27 a 0,69     | 0,69 a 0,87            |

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 7: Análise da estatística zonal do NDVI em relação ao uso e cobertura da terra da APA de Itupararanga.

|      |       | Águas Continentais | Área Campestre | Área Florestal | Áreas Urbanizadas | Culturas Permanentes | Culturas Temporárias | Pastagem | Silvicultura |
|------|-------|--------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------|--------------|
| 1986 | Média | -0,04              | 0,51           | 0,60           | 0,22              | 0,55                 | 0,32                 | 0,43     | 0,62         |
|      | DP    | 0,28               | 0,12           | 0,09           | 0,11              | 0,07                 | 0,16                 | 0,12     | 0,06         |
|      | 2DP + | 0,51               | 0,75           | 0,78           | 0,43              | 0,70                 | 0,65                 | 0,67     | 0,74         |
|      | 2DP - | -0,60              | 0,28           | 0,42           | 0,01              | 0,41                 | -0,01                | 0,18     | 0,50         |
| 1994 | Média | -0,13              | 0,36           | 0,51           | 0,19              | 0,41                 | 0,30                 | 0,35     | 0,63         |
|      | DP    | 0,28               | 0,26           | 0,10           | 0,09              | 0,05                 | 0,15                 | 0,12     | 0,07         |
|      | 2DP + | 0,42               | 0,88           | 0,71           | 0,37              | 0,51                 | 0,59                 | 0,58     | 0,78         |
|      | 2DP - | -0,69              | -0,17          | 0,31           | 0,02              | 0,30                 | 0,00                 | 0,12     | 0,48         |
| 2001 | Média | -0,13              | 0,62           | 0,61           | 0,26              | 0,46                 | 0,39                 | 0,46     | 0,67         |
|      | DP    | 0,26               | 0,10           | 0,08           | 0,11              | 0,04                 | 0,17                 | 0,12     | 0,11         |
|      | 2DP + | 0,39               | 0,83           | 0,77           | 0,49              | 0,55                 | 0,72                 | 0,69     | 0,88         |

|      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |
|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
|      | 2DP - | -0,65 | 0,41 | 0,44 | 0,04 | 0,37 | 0,06 | 0,23 | 0,45 |
| 2007 | Média | -0,05 | 0,61 | 0,63 | 0,29 | 0,46 | 0,41 | 0,46 | 0,67 |
|      | DP    | 0,23  | 0,09 | 0,08 | 0,11 | 0,03 | 0,15 | 0,11 | 0,11 |
|      | 2DP + | 0,41  | 0,79 | 0,79 | 0,51 | 0,52 | 0,71 | 0,69 | 0,89 |
|      | 2DP - | -0,51 | 0,43 | 0,46 | 0,07 | 0,41 | 0,12 | 0,23 | 0,46 |
| 2014 | Média | -0,21 | 0,64 | 0,70 | 0,34 | 0,68 | 0,50 | 0,56 | 0,78 |
|      | DP    | 0,34  | 0,09 | 0,08 | 0,14 | 0,07 | 0,17 | 0,12 | 0,06 |
|      | 2DP + | 0,48  | 0,82 | 0,86 | 0,62 | 0,82 | 0,83 | 0,80 | 0,91 |
|      | 2DP - | -0,89 | 0,45 | 0,54 | 0,05 | 0,54 | 0,17 | 0,31 | 0,66 |
| 2021 | Média | -0,16 | 0,35 | 0,62 | 0,28 | 0,54 | 0,38 | 0,44 | 0,56 |
|      | DP    | 0,30  | 0,11 | 0,09 | 0,11 | 0,10 | 0,15 | 0,13 | 0,19 |
|      | 2DP + | 0,44  | 0,56 | 0,80 | 0,51 | 0,73 | 0,67 | 0,70 | 0,93 |
|      | 2DP - | -0,27 | 0,67 | 1,18 | 0,53 | 1,02 | 0,71 | 0,82 | 1,01 |

Fonte: Elaborado pela autora. Legenda: DP- Desvio padrão.

Considerando que a relação entre o SAVI e IAF varia de acordo com a localização, o valor máximo de IAF corresponderá um valor máximo de SAVI, pois em virtude da saturação do pixel o SAVI máximo não responde significativamente as mudanças no IAF (Waters *et al.*, 2002).

Portanto, optou-se por correlacionar o valor máximo de SAVI de cada ano, descritos na Tabela 8, para obter o IAF (Equação 10), de acordo com orientações de Waters *et al.* (2002), pois verificou-se respostas espectrais diferentes aos IV para a região estudada ao longo do tempo.

Consideram-se dois motivos para essa diferença: as mudanças ocorridas no UCT da APA de Itupararanga ao longo do tempo; e a capacidade dos sensores satélites utilizados em registrar a informação espectral, visto que os sensores do Landsat 8 são mais aperfeiçoados do que os sensores do Landsat 5.

$$IAF_{APA} = - \frac{\ln\left(\frac{\lambda - SAVI_{APA}}{0,59}\right)}{0,91} \quad (10)$$

Sendo:

$IAF_{APA}$  é o índice de área foliar obtido para a APA de Itupararanga em cada um dos anos avaliados;

$\lambda$  é o valor da variável obtida após avaliação do valor máximo de SAVI para cada ano na APA de Itupararanga, conforme organizado na Tabela 8.

Tabela 8: Evolução do coeficiente  $\lambda$  em relação ao SAVI máximo para a APA de Itupararanga (1986-2021).

| Ano  | $\lambda$ | SAVI MÁX |
|------|-----------|----------|
| 1986 | 0,7000    | 0,6917   |
| 1994 | 0,6800    | 0,6767   |
| 2001 | 0,7100    | 0,7075   |
| 2007 | 0,7200    | 0,7122   |
| 2014 | 0,7900    | 0,7811   |
| 2021 | 0,7800    | 0,7651   |

Fonte: Elaborado pela autora.

O cálculo da emissividade da superfície é um componente da equação para o cálculo da  $T_s$  (Equação 11) e considera os valores dos índices obtidos anteriormente, sendo necessário obter dois valores de emissividades de superfície.

O primeiro ( $\varepsilon_{NB}$ ) é calculado considerando uma faixa relativamente estreita do espectro da banda termal do Landsat (10,4 a 12,5  $\mu\text{m}$ ), sendo este aplicado no cálculo da  $T_s$ , enquanto o segundo ( $\varepsilon_0$ ) é calculado para a emissão térmica no amplo espectro térmico da banda termal (6 a 14  $\mu\text{m}$ ), sendo posteriormente utilizado para calcular a emissão total de radiação de onda longa proveniente da superfície (Waters *et al.*, 2002).

Portanto, para valores de NDVI maiores que 0 e valores de IAF menores que 3, utilizou-se a Equação 12 e a Equação 13 (Waters *et al.*, 2002). Para valores de NDVI inferiores a 0 adotou-se o valor de  $\varepsilon_{NB}$  igual a 0,99 e  $\varepsilon_0$  igual a 0,985, quando verificado valores de IAF superiores ou iguais a 3, adotou-se o valor de  $\varepsilon_{NB}$  e  $\varepsilon_0$  igual a 0,98 (Waters *et al.*, 2002).

$$T_s = \left( \frac{k_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} k_1}{L_\lambda}\right) + 1} \right) \quad (11)$$

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 * IAF \quad (12)$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 * IAF \quad (13)$$

Sendo:

$k_1$  e  $k_2$  são constantes de calibração da radiância da banda termal disponibilizados nos metadados como: K1\_CONSTANT\_BAND e K2\_CONSTANT\_BAND;

$L_\lambda$  é a radiância espectral da banda termal ( $\text{W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$ ).

### 6.2.3 Fluxo de radiação líquida

O fluxo de radiação líquida ( $R_n$ ) é compreendido como o saldo de energia disponível na superfície que é convertido em calor: latente, sensível e no solo.  $R_n$  é calculado subtraindo todos os fluxos de energia radiante que entram e saem da superfície terrestre (Equação 14).

Sendo assim, inicialmente foram empregadas expressões matemáticas para determinar a radiação solar de ondas curtas incidente na superfície ( $R_S \downarrow$ ) (Equação 15), a radiação de ondas longas emitida pela superfície ( $R_L \downarrow$ ) (Equação 16) e a radiação de ondas longas refletida pela superfície terrestre ( $R_L \uparrow$ ) (Equação 17).

$$R_n = (1 - \alpha)R_S \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow - (1 - \varepsilon_0)R_L \downarrow \quad (14)$$

$$R_S \downarrow = G_{sc} \cdot \sin\theta \cdot d_r^2 \cdot \tau_{sw} \quad (15)$$

$$R_L \downarrow = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (16)$$

$$R_L \uparrow = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (17)$$

Sendo:

$\alpha$  é o albedo da superfície;

$G_{sc}$  é a constante solar igual (1367 W/m<sup>2</sup>);

$\sin\theta$  é o seno do ângulo da incidência solar disponibilizado nos metadados como: SUN\_ELEVATION;

$d_r$  é o inverso da distância relativa Terra-Sol disponibilizado nos metadados como: EARTH\_DISTANCE;

$\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica;

$\varepsilon_a$  é a emissividade atmosférica;

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann (5,67 × 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup> /K<sup>4</sup>);

$T_a$  é a temperatura do ar (K);

$\varepsilon_0$  é a emissividade termal da superfície;

$T_s$  é a temperatura da superfície (K).

Em virtude da necessidade de se obter dados da temperatura do ar na data de passagem do satélite e da escassez de dados meteorológicos para a região onde está inserida

a APA de Itupararanga, optou-se por interpolar os dados de temperatura de 67 estações localizadas ao longo do Estado de São Paulo por meio da Interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância (IDW) (Equação 18), considerando a extensão da região em estudo. Para isso, foram utilizadas informações disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (<https://bdmep.inmet.gov.br/#>) e pelo Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) (<http://ciiagro.sp.gov.br/>).

$$T_{aAPA} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{D_i^2} T_{ai} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{D_i^2} \right)} \quad (18)$$

Sendo:

$T_{aAPA}$  é a temperatura do ar interpolada para a APA de Itupararanga;

$T_{ai}$  é o valor da temperatura do ar da i-ésima localidade vizinha;

$D_i$  é a distância euclidiana entre o i-ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado.

## 6.2.4 Calor no solo

A taxa de calor armazenado no solo e na vegetação em virtude do transporte de energia por meio da condução é obtida através da razão  $\frac{G}{R_n}$  (Equação 19) (Waters *et al.*, 2002). De acordo com Waters *et al.* (2002) a relação da  $G$  e  $R_n$  em lagos profundos ocorre de forma diferente de outras coberturas terrestres.

A radiação de ondas curtas é absorvida em diferentes profundidades pelos corpos hídricos dependendo da sua profundidade e turbidez, de modo que corpos d'água turvos ou rasos, possui uma relação  $\frac{G}{R_n}$  inferior a 0,5 devido à absorção da radiação de ondas curtas perto da superfície da água (Waters *et al.*, 2002).

Considerando a presença da Represa de Itupararanga na área em estudo e os valores obtidos de NDVI para água (Tabela 6 e Tabela 7), assumiu-se a condicional sugerida por Waters *et al.* (2002): para pixels com NDVI menores que 0, deve-se adotar a relação  $\frac{G}{R_n}$  igual a 0,5. A Tabela 9 contém os valores médios de  $\frac{G}{R_n}$  para a cada classe de UCT na APA de Itupararanga em cada ano estudado.

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha(0,0038\alpha+0,0074\alpha^2)(1-0,98NDVI^4)} \quad (19)$$

Sendo:

$\alpha$  é o albedo da superfície;

$R_n$  é o fluxo de radiação líquida (W/m<sup>2</sup>);

$T_s$  é a temperatura da superfície (°C);

NDVI é o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada.

Tabela 9: Relação de G/Rn para as várias classes de uso e cobertura da terra na APA de Itupararanga.

|             | Área Florestal | Silvicultura | Área Campestre | Pastagens | Culturas Temporárias | Áreas Urbanizadas | Águas Continentais | Culturas Permanentes |
|-------------|----------------|--------------|----------------|-----------|----------------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| <b>1986</b> | 0,08           | 0,08         | 0,08           | 0,10      | 0,10                 | 0,12              | 0,34               | 0,11                 |
| <b>1994</b> | 0,07           | 0,07         | 0,14           | 0,09      | 0,09                 | 0,10              | 0,38               | 0,10                 |
| <b>2001</b> | 0,08           | 0,07         | 0,08           | 0,10      | 0,11                 | 0,12              | 0,39               | 0,12                 |
| <b>2007</b> | 0,08           | 0,08         | 0,09           | 0,11      | 0,11                 | 0,12              | 0,40               | 0,12                 |
| <b>2014</b> | 0,08           | 0,06         | 0,09           | 0,10      | 0,11                 | 0,12              | 0,40               | 0,10                 |
| <b>2021</b> | 0,10           | 0,11         | 0,13           | 0,12      | 0,13                 | 0,14              | 0,38               | 0,12                 |

Fonte: Elaborado pela autora.

### 6.2.5 Calor sensível

A taxa de calor que aquece o ar por meio da transferência de energia por convecção e condução da superfície para o ar (H), foi obtida através da Equação 20, que envolve a diferença da temperatura entre o ar e a superfície, a variabilidade da rugosidade da cobertura terrestre, que oferecem maior ou menor resistência ao transporte do calor, e a velocidade do vento (Waters *et al.*, 2002).

$$H = \frac{\rho_{ar} \cdot c_p \cdot dT}{r_{ah}} \quad (20)$$

Sendo:

$\rho_{ar}$  é a massa específica do ar (kg/m<sup>3</sup>) calculada conforme Guahy (2019);

$c_p$  é o calor específico do ar (1004 J/kg/K);

$dT$  é a diferença de temperatura entre duas alturas verticais ( $z_1 = 0,1m$  e  $z_2 = 2m$ );

$r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s/m).



Para obter  $H$ , inicialmente deve-se considerar uma condição de estabilidade neutra na atmosfera, sendo requeridos a velocidade do vento proveniente de estação meteorológica ( $u_{est}$ ), sua altura de medição ( $z_{est}$ ), o comprimento da rugosidade da superfície onde localiza-se a estação ( $z_{0met}$ ), a velocidade de fricção ( $u_{est}$ ) e a do vento a 200m de altura ( $u_{200}$ ) (Waters *et al.*, 2002).

Assim como para a  $T_a$ , optou-se por interpolar os dados de velocidade do vento de 67 estações localizadas ao longo do Estado de São Paulo, todas com  $z_{est}$  igual a 10m, por meio da interpolação IDW (Equação 21), considerando a extensão da região em estudo e as informações disponibilizados pelo INMET e CIIAGRO. Em seguida, calculou-se  $u_{est}$  (Equação 22) e  $u_{200}$  (Equação 23) adaptando-se as fórmulas propostas por Waters *et al.* (2002) conforme Gomes (2025).

$$u_{est} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{D_i^2} \cdot u_{esti} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{D_i^2} \right)} \quad (21)$$

$$u_{est} = \frac{k u_{méd}}{\ln \ln \frac{z_{est}}{z_{0met}}} \quad (22)$$

$$u_{200} = u_{est} \left( \frac{\ln \frac{200}{z_{0met}}}{k} \right) \quad (23)$$

Sendo:

$u_{est}$  é a velocidade do vento a 10m interpolada para a APA de Itupararanga;

$D_i$  é a distância euclidiana entre o  $i$ -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado;

$u_{esti}$  é o valor da velocidade do vento em cada estação meteorológica da  $i$ -ésima localidade vizinha;

$u_{méd}$  é a velocidade média do vento para a APA de Itupararanga obtida após a interpolação pela Equação 21;

$u_{est}$  é a velocidade de fricção para a estação meteorológica calculada por Gomes (2025).

$k$  é a constante de von Karman (0,41);

$z_{0met}$  é a rugosidade da superfície na estação meteorológica calculada por Gomes (2025).

Contudo, considerando a variação do relevo ao longo do Estado de São Paulo e as recomendações de Waters *et al.* (2002) em relação a influência da altitude sobre  $u_{200}$ , adaptou-se o método proposto pelos autores calculando o coeficiente de ponderação da velocidade do vento para cada estação ( $\varpi_{est}$ ) (Equação 24).

Em seguida, por meio da Equação 25, obteve-se um único valor do coeficiente de ponderação da velocidade do vento para a APA de Itupararanga ( $\varpi_{APA}$ ), conforme sugerido por Gomes (2025), o qual foi multiplicado com o valor médio de  $u_{200}$  para obter o valor da velocidade média do vento a 200m para a APA de Itupararanga ( $u_{200APA}$ ).

$$\varpi_{est} = 1 + 0,1((MDE - Elevação_{est})/1000) \quad (24)$$

$$\omega_{apa} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{di_{est}}{\sum di_{est}} \times \omega_{est} \right) \quad (25)$$

Sendo:

$MDE$  é o modelo digital de elevação NASADEM com resolução espacial de 30 metros;

$Elevação_{est}$  é a elevação de cada estação, obtida por meio do *Google Earth Pro*;

$D_{iAPA}$  é a distância das estações em relação ao centroide da APA de Itupararanga.

Em seguida, a velocidade de fricção ( $u_{APA}$ ) para cada pixel da imagem considerando  $u_{200APA}$  foi calculada (Equação 26), assim como a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $r_{ahAPA}$ ) (Equação 27). Para a estimativa de H, um processo iterativo é necessário. Esse processo considera a definição de dois pixels de referência, que de acordo com Waters *et al.* (2002) devem estar localizados em áreas homogêneas.

Originalmente, ao desenvolver o algoritmo SEBAL, Bastiaanssen (2000) recomendou que o pixel frio (*cold pixel*), que representa uma área onde a conversão de energia está sendo majoritariamente utilizada para a evaporação e consequentemente possui uma  $T_s$  menor, seja selecionado em um corpo d'água presumindo que  $H = 0$ .

Situação contrária é válida para o pixel quente (*hot pixel*), onde a ET não está ocorrendo e  $T_s$  é maior, pois a energia disponível está sendo convertida majoritariamente como H. O pixel quente deve ser escolhido em uma área seca e sem vegetação, evitando-se áreas construídas e asfaltos (Waters *et al.*, 2002). É recomendado que o *hot pixel* tenha  $\alpha$

semelhante a outros campos secos e sem vegetação na área de interesse, com um baixo IAF (0 a 0,4) (Waters *et al.*, 2002).

$$u_{APA} = \frac{ku_{200APA}}{\ln \ln \frac{200}{z_{0mAPA}}} \quad (26)$$

$$rah_{APA} = \frac{\ln \ln \left( \frac{2}{0,1} \right)}{u_{APA} * k} \quad (27)$$

Sendo:

$u_{APA}$  é a velocidade de fricção para a APA de Itupararanga;

$u_{200APA}$  é o valor da velocidade média do vento a 200m para a APA de Itupararanga;

$rah_{APA}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte do calor para a APA de Itupararanga;

$k$  é a constante de von Karman (0,41);

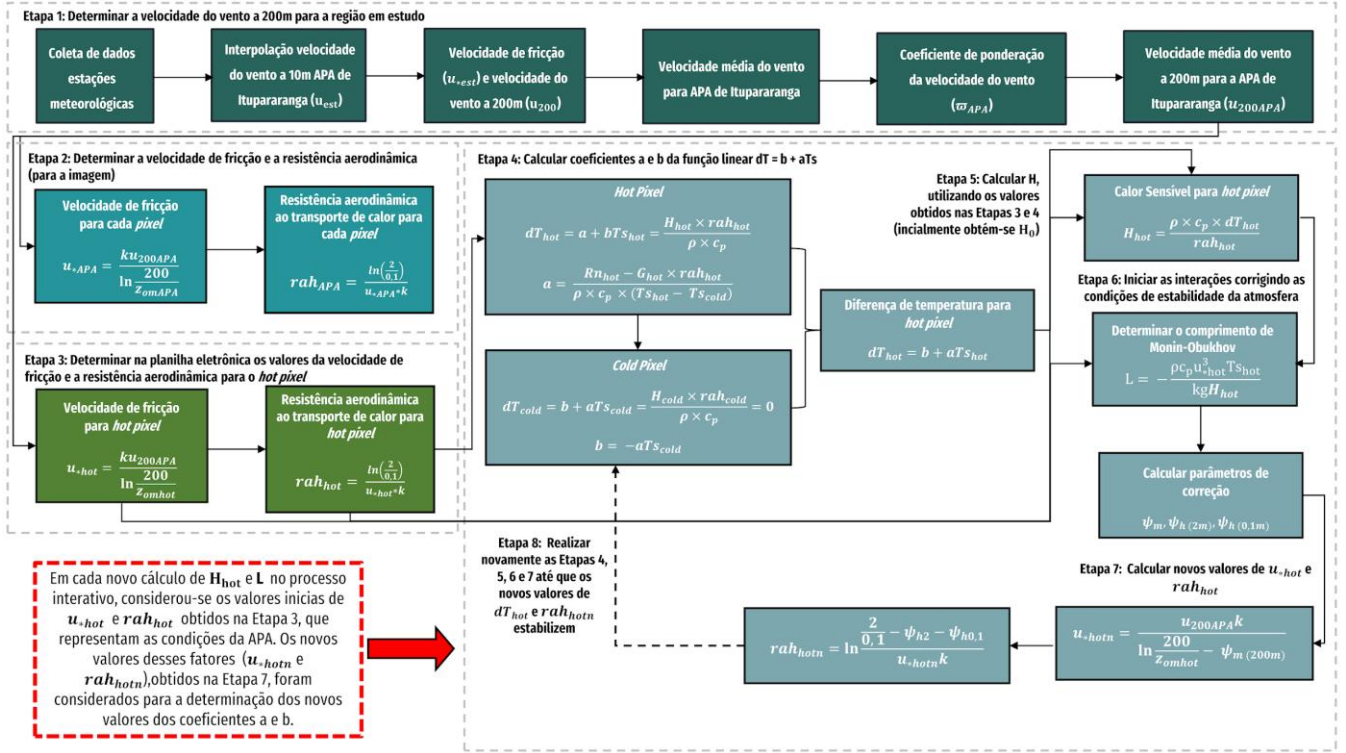
$z_{0mAPA}$  é a rugosidade da superfície na APA de Itupararanga calculada por Gomes (2025).

O algoritmo SEBAL considera uma relação linear entre a diferença vertical de temperatura ( $dT$ ) e  $T_s$  (Bastiaanssen *et al.*, 2000; Waters *et al.*, 2002 Bastiaanssen *et al.*, 2005), de modo que os coeficientes  $a$  e  $b$  da Equação 28 podem ser obtidos após a escolha dos pixels de referência.

$$dT = b + aT_s \quad (28)$$

Ao considerar que  $dT = 0$  para o *cold pixel* escolhido, um processo iterativo, explicado através da Figura 8, foi realizado em planilha eletrônica até a estabilização dos valores de diferença de temperatura ( $dT_{hot}$ ) e da resistência aerodinâmica ao transporte do calor para o *hot pixel* ( $rah_{hot}$ ). O fluxograma do processo iterativo pode ser observado na Figura 8.

Figura 8: Processo iterativo para a determinação o calor sensível.



Fonte: Gomes (2025).

Condições de estabilidade da atmosfera em virtude de sua influência sobre  $rah$  é um item solicitado no SEBAL, portanto, considerando o comprimento de Monin-Obukhov para determinar tais condições de estabilidade,  $rah$  foi corrigido até sua estabilidade, e dessa forma poder determinar H.

## 6.2.6 Calor latente e evapotranspiração

LE é obtido como o resíduo do balanço de energia, definido pela Equação 29, sendo utilizado para obter a ET instantânea, ou seja, a ET durante a passagem do satélite (Bastiaanssen 1998; 2000; Bastiaanssen *et al.*, 2005). Para fins hidrológicos, obter a ET instantânea pode não ser interessante, sendo necessário o uso de informações em uma escala mínima diária, nesse sentido a relação entre  $R_n$  e G pode ter escala temporal diferente, de modo que para escalas diárias ou maiores, os valores de G podem ser ignorados, sendo possível obter ET real em 24h de acordo com a Equação 30 (Bastiaanssen, 2000; Bastiaanssen *et al.*, 2005).

$$LE = Rn - G - H \quad (29)$$

$$ET_{24} = \frac{864000}{\lambda \rho_w} \Lambda R_{n24} \quad (30)$$

$$\Lambda = \frac{LE}{Rn-G} = \frac{LE}{LE+H} = \frac{Rn-G-H}{Rn-G} \quad (31)$$

Sendo:

LE é o calor latente (W/m<sup>2</sup>);

$R_n$  é o fluxo de radiação líquida (W/m<sup>2</sup>);

G é o fluxo de calor no solo (W/m<sup>2</sup>);

H é o fluxo de calor sensível (W/m<sup>2</sup>);

ET<sub>24</sub> é a evapotranspiração real diária (mm/dia);

$\lambda$  é o calor latente de vaporização da água, obtido conforme Allen, Tasumi e Trezza (2007);

$\rho_w$  é a massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>);

$\Lambda$  é a fração de evaporação obtida pela Equação 31;

$R_{n24}$  é o valor médio do fluxo da radiação líquida diária (W/m<sup>2</sup>).

De acordo com a Equação 31, verifica-se que a fração de evaporação ( $\Lambda$ ) representa a proporção de energia que será utilizada para realizar a ET. De acordo com o SEBAL, a  $\Lambda$  pode ser compreendida como constante ao longo do dia, por esse motivo ela é considerada na Equação 30 (Bastiaanssen *et al.*, 2005).

Devido à escassez de informações por meio das estações meteorológicas, utilizou-se a ferramenta *Solar Analyst* do software ArcGIS 10.8 (Mahmoud; Alazba, 2016) para estimar o valor médio de radiação recebida na APA de Itupararanga durante 24 horas ( $R_a$ ). Essa ferramenta permite calcular a quantidade de radiação solar global recebida em uma área ou em um ponto, considerando um MDE, a latitude da área estudada e o período que se deseja obter a quantidade de radiação em Watt hora por metro quadrado (Wh/m<sup>2</sup>) (Fu; Rich, 1999).

Após obtido o valor da radiação solar global para APA de Itupararanga em Wh/m<sup>2</sup>, o valor médio foi convertido para W/m<sup>2</sup> e aplicada na fórmula de De Bruin (1987), Equação 32, em conjunto com a radiação extraterrestre ( $R_{aex}$ ), sendo essa última obtida por meio da Equação 33 proposta por Allen *et al.* (1998) e convertida para W/m<sup>2</sup>.

$$R_{aex} = \frac{1440}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) + \sin(\omega_s)) \quad (32)$$

$$R_{n24} = (1 - \alpha)R_a - \frac{110R_a}{R_{aex}} \quad (33)$$

Sendo:

$\pi$  é o Número Pi;

$G_{sc}$  é a constante solar (0,082 MJ/m<sup>2</sup>min);

$d_r$  é o inverso da distância relativa Terra-Sol;

$\omega_s$  é o ângulo horário do pôr-do-sol (rad);

$\varphi$  é a latitude (rad);

$\delta$  é o ângulo da declinação solar (rad);

$\alpha$  é o albedo da superfície.

### 6.2.7 Validação dos valores de evapotranspiração obtidos pelo algoritmo SEBAL

A validação dos dados de ET obtidos pelo método SEBAL foi realizada na comparação de duas fontes distintas: dados diários obtidos através do modelo SSEBop (*Simplified Surface Energy Balance Operational*), disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (<https://ssebop.users.earthengine.app/view/ssebop-br-v101>), e os dados meteorológicos anuais interpolados por Xavier *et al.* (2022) (<https://sites.google.com/site/alexandrecaidoxavierufes/brazilian-daily-weather-gridded-data>).

O SSEBop é amplamente utilizado para estimativas de ET, empregando, assim como o SEBAL, o balanço de energia de superfície (ANA, 2020). Já os dados disponibilizados por Xavier *et al.* (2022), fornecem uma série temporal de dados meteorológicos interpolados, incluindo temperatura do ar, evapotranspiração potencial, umidade e outros parâmetros, para todo o território nacional. O processo de validação incluiu a comparação dos valores estimados pelo SEBAL com os dados observados, utilizando métricas estatísticas como erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e índice de Willmott (d).

### 6.2.8 Análise estatística da relação entre o uso e cobertura da terra com evapotranspiração

A análise da relação entre UCT e ET<sub>24</sub> foi realizada em cada ano estudado por meio de estatística zonal, de modo que foram verificados os valores médios de ET<sub>24</sub> para cada classe de UCT utilizando os vetores das classes de UCT descritas na Seção “5.2.3

Metodologia” do capítulo “Análise da mudança no uso e cobertura da terra da APA de Itupararanga”. Ao obter-se a estatística descritiva anual, foi possível verificar a existência da influência da mudança espaço temporal da vegetação na região sobre a  $ET_{24}$ , uma vez que foi avaliada uma série de dados para um período de 35 anos.

### 6.3 Resultados e discussão

#### 6.3.1 Validação dos valores de evapotranspiração obtidos através do SEBAL

A média observada de ET anual por Xavier *et al.* (2022) em 2014 foi de 817,98 mm, enquanto a média projetada pelo modelo alcançou 1082,48 mm, resultando em um MAE de 264,50 mm e RMSE de 276,53 mm (Tabela 10). Esses indicadores sugerem que, apesar da boa correspondência entre os dados observados e os projetados, ainda existe uma discrepância considerável entre o modelo, que está superestimado, e o observado. Contudo, o Índice d (0,9543) indica uma boa concordância entre as medições observadas e as estimativas do modelo, refletindo que as previsões têm uma aceitação razoável, mas que melhorias são necessárias para reduzir a discrepância quando maximizada a estimativa diária para anual.

Para os dados diários, a média observada foi de 2,24 mm, com a média projetada em 1,99 mm (Tabela 10). O MAE foi de -0,25 mm, e o RMSE alcançou 0,49 mm, demonstrando uma precisão considerável nas estimativas diárias, com o Índice d atingindo 1 (Tabela 10), o que sugere uma excelente correspondência entre os dados observados e projetados. Essa alta precisão nos dados diários pode ser atribuída a uma maior capacidade do SEBAL em capturar a variabilidade de curto prazo da evapotranspiração, de forma que dados diários foram posteriormente utilizados para treinamento da RNA.

Tabela 10: Análise estatística dos valores obtidos de evapotranspiração por meio do modelo SEBAL.

|                        | Dados anuais | Dados diários |
|------------------------|--------------|---------------|
| <b>Média Observado</b> | 817,979      | 2,241         |
| <b>Média Projetado</b> | 1082,478     | 1,988         |
| <b>MAE</b>             | 264,500      | -0,253        |
| <b>RMSE</b>            | 276,529      | 0,489         |
| <b>Índice D</b>        | 0,954        | 1,000         |

Fonte: Elaborado pela autora.

#### 6.3.2 Estimativa da evapotranspiração na APA de Itupararanga

Os maiores valores de  $ET_{24}$  se referem à Represa de Itupararanga, ao noroeste da APA, bem como em áreas mais vegetadas, na ZCB, onde há a ocorrência de remanescentes

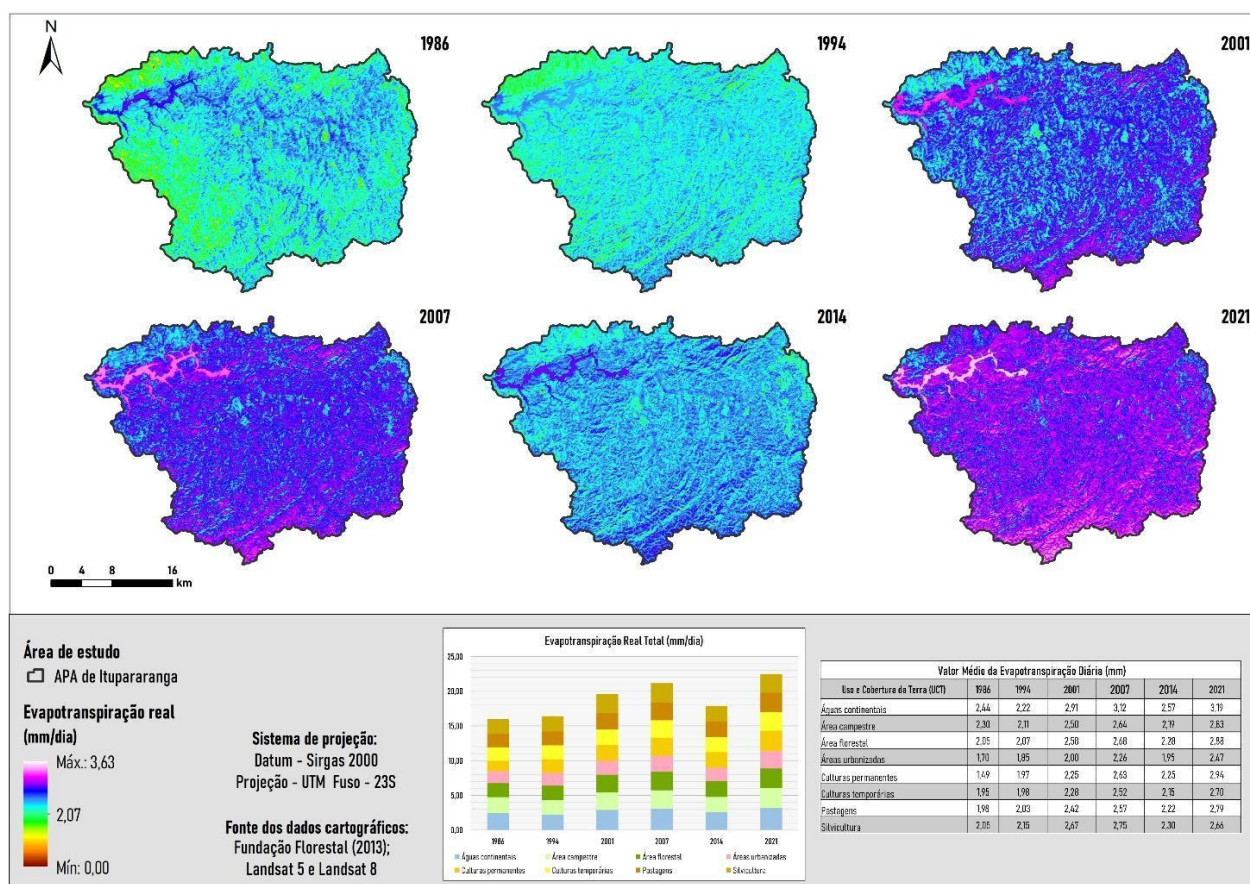
florestais e áreas em regeneração (Fundação Florestal, 2010), áreas que variam de azul escuro, violeta e branco na Figura 9. As áreas com menos  $ET_{24}$  se referem às regiões de ocupação humana, como os centros urbanos localizados em Cotia e Vargem Grande Paulista, à nordeste, bem como nas ocupações humanas por meio de condomínios e chácaras às margens da Represa de Itupararanga, áreas em azul claro e verde na Figura 9.

A  $ET_{24}$  na APA de Itupararanga ao longo de período estudado variou de 0,00 mm/dia a 3,63 mm/dia, conforme gráficos organizados na Figura 9, com valores médios gerais de  $ET_{24}$  variando de 1,99 mm/dia em 1986 e 2,81 mm/dia em 2021. Se tais valores médios forem extrapolados para um período de 365 dias (um ano não bissexto), os resultados corroboram com valor de ET real estimados por outros pesquisadores.

Apesar de utilizarem métodos diferentes do aqui proposto para obter a ET real, Oliveira *et al.* (2016) verificaram médias anuais de ET entre 1.220,40 mm e 1.275, 20 mm em fragmentos florestais de Mata Atlântica na região sudeste do Estado de São Paulo, Loureço *et al.* (2011) estimaram uma ET mensal de 896 mm na Bacia Hidrográfica Alto Sorocaba e Médio Tietê, região onde a APA de Itupararanga está localizada, enquanto Abreu e Tonello (2015) estimaram a ET real da Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba entre 979 e 977 mm/ano.



Figura 9: Distribuição espaço-temporal da evapotranspiração real diária para as diferentes classes de uso e cobertura da terra na APA de Itupararanga.



Fonte: Elaborado pela autora.

Já na região litorânea da Mata Atlântica, valores de ET entre 5 mm/dia a 7 mm/dia foram estimados por Galvêncio, Silva e Popescu (2014). Guauque-Mellado *et al.* (2022) estimaram a ET em 1,53 mm/dia (estação seca) a 5,1 mm/dia (estação chuvosa) na Serra da Mantiqueira, com uma média de 3,26 mm/dia. Em uma região de vegetação semidecídua e de ecótono, característica semelhante a APA de Itupararanga, Pinheiro *et al.* (2022) estimaram valores de ET entre 3,4 mm/dia utilizando o algoritmo SEBAL.

Os maiores valores de desvio padrão (DP) foram observados para o UCT silvicultura, maiores valores observados em 1986 (0,38 mm/dia), 2000 (0,36 mm/dia), 2007 (0,31 mm/dia) e 2021 (0,39 mm/dia) (Tabela 11). Já os menores valores de DP foram observados para o UCT área campestre em todos os anos (Tabela 11).

Tabela 11: Estatística zonal e descritiva da evapotranspiração real diária.

|             |        | Águas<br>Continen-<br>tais | Área<br>Campestre | Área<br>Florestal | Áreas<br>Urbani-<br>zadas | Culturas<br>Permanentes | Culturas<br>Temporá-<br>rias | Pastagem | Silvicultura |
|-------------|--------|----------------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|----------|--------------|
| <b>1986</b> | Mínimo | 0,50                       | 1,84              | 0,00              | 0,14                      | 1,02                    | 0,39                         | 0,00     | 0,67         |
|             | Máximo | 3,05                       | 2,66              | 2,95              | 2,78                      | 1,77                    | 2,65                         | 2,85     | 2,65         |
|             | Média  | 2,44                       | 2,30              | 2,05              | 1,70                      | 1,49                    | 1,95                         | 1,98     | 2,05         |
|             | D.P.   | 0,24                       | 0,11              | 0,26              | 0,29                      | 0,22                    | 0,23                         | 0,27     | 0,33         |
| <b>1994</b> | Mínimo | 0,20                       | 1,90              | 0,53              | 0,08                      | 1,83                    | 1,29                         | 0,02     | 1,44         |
|             | Máximo | 2,80                       | 2,37              | 2,85              | 2,50                      | 2,08                    | 2,62                         | 2,79     | 2,73         |
|             | Média  | 2,22                       | 2,11              | 2,07              | 1,85                      | 1,97                    | 1,98                         | 2,03     | 2,15         |
|             | D.P.   | 0,14                       | 0,08              | 0,21              | 0,19                      | 0,06                    | 0,15                         | 0,18     | 0,20         |
| <b>2001</b> | Mínimo | 0,87                       | 1,99              | 0,91              | 0,00                      | 2,04                    | 0,89                         | 0,28     | 1,36         |
|             | Máximo | 3,53                       | 2,95              | 3,64              | 3,07                      | 2,56                    | 3,18                         | 3,37     | 3,37         |
|             | Média  | 2,91                       | 2,50              | 2,58              | 2,00                      | 2,25                    | 2,28                         | 2,42     | 2,67         |
|             | D.P.   | 0,27                       | 0,13              | 0,25              | 0,27                      | 0,15                    | 0,23                         | 0,26     | 0,32         |
| <b>2007</b> | Mínimo | 0,77                       | 2,20              | 0,75              | 0,22                      | 2,53                    | 1,00                         | 0,57     | 1,93         |
|             | Máximo | 3,61                       | 3,05              | 3,57              | 3,23                      | 2,70                    | 3,25                         | 3,36     | 3,36         |
|             | Média  | 3,12                       | 2,64              | 2,68              | 2,26                      | 2,63                    | 2,52                         | 2,57     | 2,75         |
|             | D.P.   | 0,22                       | 0,10              | 0,23              | 0,23                      | 0,06                    | 0,19                         | 0,22     | 0,29         |
| <b>2014</b> | Mínimo | 0,35                       | 1,77              | 0,59              | -0,18                     | 1,98                    | 0,06                         | -0,37    | 1,48         |
|             | Máximo | 3,13                       | 2,67              | 3,03              | 2,73                      | 2,50                    | 2,90                         | 2,99     | 2,93         |
|             | Média  | 2,57                       | 2,19              | 2,28              | 1,95                      | 2,25                    | 2,15                         | 2,22     | 2,30         |
|             | D.P.   | 0,24                       | 0,11              | 0,22              | 0,23                      | 0,17                    | 0,17                         | 0,20     | 0,16         |
| <b>2021</b> | Mínimo | 1,46                       | 2,27              | 1,16              | 0,21                      | 2,60                    | 0,18                         | 0,37     | 1,68         |
|             | Máximo | 3,72                       | 3,38              | 3,64              | 3,33                      | 3,17                    | 3,58                         | 3,62     | 3,56         |
|             | Média  | 3,19                       | 2,83              | 2,88              | 2,47                      | 2,94                    | 2,70                         | 2,79     | 2,66         |
|             | D.P.   | 0,36                       | 0,19              | 0,24              | 0,25                      | 0,12                    | 0,22                         | 0,24     | 0,36         |

Fonte: Elaborado pela autora. Legenda: DP: Desvio padrão.

Os valores de DP, em sua maioria, abaixo de 0,30, caracterizam a homogeneidade da distribuição espacial da ET na APA de Itupararanga. Apesar dos valores não se diferenciarem abruptamente entre as classes de UCT, a substituição da vegetação natural por superfícies impermeáveis é capaz de alterar significativamente as características radiativas, térmicas e higrométricas de uma região (Machado *et al.* 2020), o que requer atenção quanto ao planejamento e ordenamento do território.

Ressalta-se que os dados utilizados compreendem o período de inverno na APA de Itupararanga, período de menor pluviosidade e temperaturas, conforme pode ser observado na Figura 2 no Capítulo 2. A falta de umidade pode contribuir para que as estimativas de ET<sub>24</sub> sejam menos intensificadas (Pinheiro *et al.*, 2022), o que pode ter contribuído para os baixos valores de DP.

A partir da estatística zonal para cada classe de UCT, observaram-se em todos os anos os menores valores médios de ET<sub>24</sub> para áreas urbanizadas, sendo que o ano de 1994 apresentou o menor valor médio (1,85 mm/dia) e em 2021 o maior valor médio (2,47 mm/dia) (Tabela 11).

Pinheiro *et al.* (2022) também observaram os menores valores de ET em áreas urbanas no bioma Atlântico no Nordeste brasileiro, com valores inferiores a 1 mm/dia, destacando os efeitos da substituição da floresta nativa por áreas construídas sobre a mudança no clima local, através do aumento da temperatura e desequilíbrio na distribuição da pluviosidade.

Menores valores de  $ET_{24}$  são esperados em áreas urbanas, pois esse tipo de UCT armazena mais calor, em virtude de seus materiais constituintes, aumentando a emissão da radiação de ondas de calor e, portanto, aumentando os valores de  $T_s$  e  $G$  (Machado *et al.*, 2020; Pinheiro *et al.*, 2022). Nesse caso, a quantidade de  $R_n$  disponível é majoritariamente convertida em  $G$  para aquecer a superfície, e em  $H$  para aquecer o ar, de modo que não há disponibilidade energética para  $LE$  e  $ET$  (Machado *et al.*, 2020).

As pastagens apresentaram, de modo geral, valores superiores de ET do que culturas temporárias (Tabela 11). Autores têm relatado a diminuição da ET em florestas tropicais que foram substituídas por pastagem ou áreas construídas (Odongo *et al.*, 2019; Liou; Le; Chien, 2018; Pinheiro *et al.*, 2022).

Contudo, quanto maior foi a área de mudança, maior serão os efeitos sobre a ET, de modo que algumas mudanças de UCT podem impactar sobre a mesma (Odongo *et al.*, 2019). Dessa forma, infere-se que o avanço da agricultura contribuiu mais significativamente com a ET da APA de Itupararanga do que a permanência de áreas cobertas por pastagens.

A disponibilidade de energia para  $LE$  afeta diretamente a ET, de modo que as mudanças na superfície podem ser mais ou menos impactantes sobre o fluxo energético, de modo que algumas mudanças no UCT podem afetar drasticamente esse fluxo, em função da alteração da rugosidade, umidade e velocidade do vento (Odongo *et al.*, 2019).

Portanto, considerando que o particionamento energético é influenciado pela rugosidade da superfície e aerodinâmica, assim como pela densidade da cobertura foliar e da capacidade da vegetação em acessar a água disponível no solo, a intensificação das mudanças na ET ocorre tanto em função das mudanças no UCT, como em função do tipo de solo e do quantitativo de precipitação (Caballero; Ruhoff; Biggs, 2022).

Áreas florestais e de silvicultura apresentaram um comportamento muito semelhante (Tabela 11). A água contida no solo é retirada por meio das raízes das plantas e transferida das folhas, por meio dos estômatos, para a atmosfera (Perry *et al.*, 2009), portanto, características como, caducidade e a morfologia das folhas, influenciam a perda de água (Guauque-Mellado *et al.*, 2022). Dessa forma, coberturas vegetais semelhantes irão igualmente influenciar a ET, em virtude da relação solo-planta-água (Odongo *et al.*, 2019),

conforme observado nos grupos formados por pastagem-culturas temporárias-culturas permanentes e florestas-silvicultura.

Entre todas as classes de UCT, a água obteve as maiores médias em todos os anos (Tabela 11). As áreas campestres apresentaram valores superiores de  $ET_{24}$  do que as demais áreas vegetadas citadas anteriormente (Tabela 11). Contudo, ressalta-se que essas áreas são campos alagados, conforme caracterizado no Capítulo “Análise da Mudança no Uso e Cobertura da Terra da APA de Itupararanga”, portanto, é esperado que o comportamento evapotranspirativo seja semelhante ao da água. Maiores valores de  $R_n$  são observados em áreas irrigadas e em florestas (Gomide; Boratto, 2014), portanto, maiores valores de ET são esperados.

O menor valor médio de  $ET_{42}$  acumulado foi registrado em 1986 (15,96 mm/dia), enquanto o maior valor foi observado em 2021 (22,45 mm/dia) (Figura 9). Estudos anteriores, avaliando as alterações antrópicas na superfície sobre a ET, indicam que a extensão da conversão do UCT pode exercer diferentes níveis de impacto sobre a ET (Mahmoud; Alazba, 2016; Pinheiro *et al.*, 2022). Por exemplo, Pinheiro *et al.* (2022) relataram uma redução significativa do fluxo de LE e da ET, acompanhada pelo aumento do H, em função da expansão das áreas urbanas. Nesse estudo, os autores identificaram uma diminuição da ET de 3,42 mm/dia para cerca de 1,34 mm/dia ao longo do tempo.

Entretanto, essa tendência não foi observada na APA de Itupararanga, provavelmente porque a urbanização não ocorreu de maneira tão intensa em todo o território da APA. Além disso, a principal mudança de UCT foi a substituição de áreas de pastagem por culturas temporárias, conforme apresentado na Tabela 3.

Esse padrão de mudança parece ter contribuído para a manutenção relativamente homogênea dos valores de ET ao longo do tempo, com um aumento mais expressivo em 2021. Diferentes fatores influenciam a ET de uma região, principalmente em virtude das mudanças que ocorrem na superfície ao longo do tempo. Cada bioma irá responder de maneira diferente a essas alterações somadas às mudanças climáticas. Essas respostas podem diminuir, aumentar ou manter a ET (Guauque-Mellado *et al.*, 2022).

Florestas úmidas, por exemplo, são naturalmente mais vulneráveis a períodos de seca, sendo as propriedades do solo fatores determinantes para manter a ET mesmo em condições adversas (Guauque-Mellado *et al.*, 2022). Entre essas propriedades, destacam-se a capacidade de retenção de água e a taxa de infiltração, que influenciam diretamente a disponibilidade hídrica para a vegetação.

Na APA de Itupararanga, predominam os solos Argissolo e Latossolo (Simonetti *et al.*, 2021). Os Argissolos, caracterizados por uma infiltração de água mais lenta, favorecem o escoamento superficial e reduzem a infiltração no perfil do solo (Cunha; Guerra, 2012), o que pode limitar a ET em períodos de baixa precipitação. Em contrapartida, os Latossolos apresentam maior capacidade de retenção de água e melhor taxa de infiltração, favorecendo o armazenamento hídrico no solo e contribuindo para a manutenção da ET mesmo durante eventos de seca (Guauque-Mellado *et al.*, 2022). Assim, a distribuição e características dos solos na APA de Itupararanga também exercem papel fundamental na dinâmica da ET.

A variabilidade atmosférica e climática também influencia a dinâmica da ET. Geirinhas *et al.* (2021) ao avaliarem a evolução histórica de eventos de seca e ondas de calor no Sudeste brasileiro, verificaram a intensificação das condições de seca em conjunto com um bloqueio atmosférico, aumentando a incidência de radiação solar e da ET. Em um segundo momento, após o aumento da ET, na ausência de água para evaporação e da baixa umidade da água no solo, a superfície perde sua capacidade de atender à demanda atmosférica por água e começa a emitir radiação na forma de H ao invés de LE, por consequência, as temperaturas próximas da superfície aumentam (Geirinhas *et al.*, 2021).

Considerando que há uma tendência de aumento na  $T_s$  da APA de Itupararanga (Moura *et al.*, 2024), os maiores valores de ET em 2021 podem estar associados ao aumento da incidência de radiação solar e da temperatura, promovendo maior evaporação do solo/água e transpiração das plantas. O LE e ET podem ser positivamente correlacionados com  $R_n$  e negativamente correlacionados com  $T_s$  e G (Machado *et al.*, 2020), portanto, alterações na superfície terrestre que afetem esses fatores, e outros que os influenciem (como NDVI e  $\alpha$ ), irão impactar positivamente ou negativamente na ET.

Em 2014, Galvêncio, Silva e Popescu, verificaram que a Floresta Atlântica contribuía para o balanço hídrico e o clima com 8 litros/dia/m<sup>2</sup> de água por meio da ET. Considerando toda a área da Mata Atlântica na época, isso equivalia a 324.000.000.000 litros/dia de ET, destacando a importância da floresta no balanço hídrico e energético (Galvêncio; Silva; Popescu, 2014).

No entanto, o conhecimento da variabilidade espacial da ET ainda é pouco abordado na Mata Atlântica. A distribuição espacial das estações climáticas não é suficiente para determinar a caracterização espacial da ET em escala local, principalmente considerando as particularidades desse bioma, ora em algumas regiões mais bem preservado, ora em outras regiões mais antropizado, ora em outras mais agrícola, ora em outras mais urbanizados.

Diante dos resultados discutidos, entende-se que a precariedade da disponibilidade de dados para a região estudada foi em parte resolvida com dados de SR, fornecendo dados e informações que poderão posteriormente serem utilizadas para a determinação do balanço hídrico, por exemplo, subsidiando projetos e favorecendo à gestão hídrica e ambiental da APA de Itupararanga.

#### 6.4 Conclusão

A análise da distribuição espaço-temporal da ET na APA de Itupararanga revelou padrões distintos entre diferentes usos e coberturas do solo. Os resultados indicam que a Represa de Itupararanga e áreas vegetadas apresentam os maiores valores de ET, enquanto regiões urbanas e áreas de ocupação humana exibem menores taxas.

A variação da ET ao longo do período analisado reflete influências da ocupação da APA ao longo do tempo, pois foram verificados maiores valores de ET em 2021, onde verifica-se uma expansão considerável da agricultura na região, com diminuição das pastagens.

Os resultados sugerem uma intensificação da demanda atmosférica por água, possivelmente influenciada por mudanças climáticas e alterações no uso do solo. Esses achados ressaltam a importância crítica da conservação da vegetação nativa e da gestão sustentável do uso do solo na manutenção dos ciclos hidrológicos e energéticos em ambientes relevantes para a gestão hídrica como a APA de Itupararanga.

A comparação com estudos anteriores na região e em biomas semelhantes revela consistência nos resultados, validando o método utilizado. O estudo contribui para a compreensão da dinâmica hidrológica na APA de Itupararanga, preenchendo uma lacuna de dados espaciais e oferecendo subsídios para a gestão hídrica e ambiental.

#### 6.5 Referências bibliográficas

ABREU, M. C.; TONELLO, K. C. Estimativa do balanço hídrico climatológico da bacia hidrográfica do rio Sorocaba – São Paulo. **Ambiência**, v. 11, n. 3, p. 513 – 527, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5935/ambiencia.2015.03.01>.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56**. Rome: FAO, 1998.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized calibration (METRIC)—Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007. DOI: [https://doi.org/10.1061/ASCE\\_0733-9437\\_2007\\_133:4\\_380](https://doi.org/10.1061/ASCE_0733-9437_2007_133:4_380).

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento. **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. Brasília: ANA, 2020.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of hydrology**, v. 229, n. 1-2, p. 87-100, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4).

BASTIAANSEN, W. G.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. **Formulation**. **Journal of hydrology**, v. 212, p. 198-212, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4).

BASTIAANSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 131, n. 1, p. 85-93, 2005.

CABALLERO, C. B.; RUHOFF, A.; BIGGS, T. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. **Science of the Total Environment**, v. 808, p. 152134, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152134>.

CONGEDO, L. Semi-automatic classification plugin documentation. **Release 6.4.0.2**, 2020.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (org.). **Geomorfologia do Brasil**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: Bertrand, 2012.

DE BRUIN, H. A. R. From Penman to Makkink. In: HOOGHART, J.C. (ed.). **Proceedings and information: TNO committee on hydrological research**, v. 39. Netherlands: Gravenhage, 1987. p. 5-31.

FU, P.; RICH, P. M. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. In: **Proceedings of the nineteenth annual ESRI user conference**. USA: San Diego, 1999. p. 1-31.

FUNDAÇÃO FLORESTAL. **Plano de Manejo da APA de Itupararanga**. São Paulo. 2010. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/fundacaoflorestal/planos-de-manejo/planos-de-manejo-planos-concluidos/plano-de-manejo-apa-itupararanga/>. Acesso em: 10 ago. 2022.

GALVÍNCIO, J. D.; SILVA, H. A.; POPESCU, S. S. Analysis of influence of evapotranspiration on rainfall in an Atlantic Forest using remote sensing data. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 1, p. 17-33, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/1984-2295.20140006>.

GAO, X.; SUN, M.; LUAN, Q.; ZHAO, X.; WANG, J.; HE, G.; ZHAO, Y. The spatial and temporal evolution of the actual evapotranspiration based on the remote sensing method in the Loess Plateau. **Science of the Total Environment**, v. 708, p. 135111, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135111>.

GEIRINHAS, J. L.; RUSSO, A.; LIBONATI, R.; SOUSA, P. M.; MIRALLES, D. G.; TRIGO, R. M. Recent increasing frequency of compound summer drought and heatwaves in Southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 3, p. 034036, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe0eb>.

GOMIDE, R.; BORATTO, I. M. P. Evapotranspiration and energy balance components spatial distribution in the north region of Minas Gerais, Brazil, using the SEBAL model and Landsat 5 TM images. **Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVI. SPIE**, v. 9239, p. 205-218, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2067370>.

GUAHY, R. A. D. **Análise comparativa de metodologias para cálculos em efeito solo, empregando três configurações alares retangulares**. 2019. 180f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2019.

GUAUQUE-MELLADO, D.; RODRIGUES, A.; TERRA, M.; MANTOVANI, V.; YANAGI, S.; DIOTTO, A.; MELLO, C. Evapotranspiration under drought conditions: The case study of a seasonally dry Atlantic Forest. **Atmosphere**, v. 13, n. 6, p. 871, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13060871>.

GHADERI, A.; DASINEH, M.; SHOKRI, M.; ABRAHAM, J. Estimation of actual evapotranspiration using the remote sensing method and SEBAL algorithm: a case study in Ein Khosh Plain, Iran. **Hydrology**, v. 7, n. 2, p. 36, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology7020036>.

KARIMI, P.; BASTIAANSEN, W. G. M. Spatial evapotranspiration, rainfall and land use data in water accounting Part 1: Review of the accuracy of the remote sensing data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 507-532, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-19-507-2015>.

LAIPPELT, L.; RUHOFF, A. L.; FLEISCHMANN, A. S.; KAYSER, R. H. B.; KICH, E. D. M.; DA ROCHA, H. R.; NEALE, C. M. U. Assessment of an Automated Calibration of the SEBAL Algorithm to Estimate Dry-Season Surface-Energy Partitioning in a Forest–Savanna Transition in Brazil. **Remote Sensing**, v. 12, n. 7, p. 1108, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12071108>.

LIU, Yuei-An; LE, Mai Son; CHIEN, Hwa. Normalized difference latent heat index for remote sensing of land surface energy fluxes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 57, n. 3, p. 1423-1433, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2866555>.

LIU, M; HU, D. Response of wetland evapotranspiration to land use/cover change and climate change in Liaohe River Delta, China. **Water**, v. 11, p. 955, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11050955>.

LOURENÇO, R. W.; ROSA, A. H.; FRACETO, L. F.; CARLOS, V. M.; GUANDIQUE, M. E. G.; PEÇANHA, M. P.; FRANCO, A. J. Hydrological analysis of the High Watershed of Sorocaba and Middle Tietê Rivers, Brazil. In: BILIBIO, C.; HENSEL, O.; SELBACH, J. F. (org.). **Sustainable water management in the tropics and subtropics and case studies in Brazil**. vol. 2. Jaguarão: Fundação Universidade Federal do Pampa, UNIKASSEL, PGcult-UFMA, 2011. p. 425-444.

MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S.; ANGELINI, L. P.; QUERINO, C. A. S.; ANGELINI, P. C. B. Impact of changes in surface cover on energy balance in a tropical city by remote sensing: A study case in Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, p. 100373, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100373>.

MAHMOUD, S. H.; ALAZBA, A. A. A coupled remote sensing and the Surface Energy Balance based algorithms to estimate actual evapotranspiration over the western and



southern regions of Saudi Arabia. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 124, p. 269–283, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.05.012>.

MIRANDA, V. F. V. V.; PERES, L. F.; LUCENA, A. J.; FRANÇA, J. R. A.; LIBONATI, R. Urbanization-induced impacts on heat-energy fluxes in tropical South America from 1984 to 2020: The Metropolitan Area of Rio de Janeiro/Brazil. **Building and Environment**, v. 216, p. 109008, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109008>.

MOURA, A. T.; NERY, L. M.; GOMES, G.; NASCIMENTO, H. G.; PONZETTA, E. F.; SILVA, D. C. C. **Análise espaço-temporal da temperatura superficial da APA de Itupararanga**. Livro de Memórias do Sustentare & WIPIS, v. 1, p. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.29327/sustentare-wipis-2023-311985.751746>.

NING, J.; GAO, Z.; XU, F. Effects of land cover change on evapotranspiration in the Yellow River Delta analyzed with the SEBAL model. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 016009, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.016009>.

ODONGO, V. O.; VAN OEL, P. R.; VAN DER TOL, C.; SU, Z. Impact of land use and land cover transitions and climate on evapotranspiration in the Lake Naivasha Basin, Kenya. **Science of The Total Environment**, v. 682, p. 19-30, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.062>.

OLIVEIRA, G.; MORAES, E. C.; BRUNSELL, N. A.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAGÃO, L. E. O. C.; MATAVELI, G. A.; SANTOS, T. V. Analysis of precipitation and evapotranspiration in Atlantic Rainforest remnants in Southeastern Brazil from Remote Sensing Data. In: BLANCO, J. A.; CHANG, S. C.; LO, Y. H. (Eds.). **Tropical Forests: The challenges of maintaining ecosystem services while managing the landscape**. Croatia: InTech, 2016. p. 93-112.

PERRY, C.; STEDUTO, P.; ALLEN, R.; BURT, C. M. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1517-1524, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.05.005>.

PINHEIRO, J. R.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; PEDREIRA JÚNIOR, A. L.; SANTOS, L. O. F. Effect of urbanization on energy balance and evapotranspiration in an Amazon–cerrado transition region in Brazil. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 16, n. 4, p. 044516-1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.16.044516>.

SILVA, B. B. D.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M.; MONTENEGRO, S. M.; BARBOSA JUNIOR, B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 3-8, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8>.

SILVA, B. B.; WILCOX, B. P.; DA SILVA, V. D. P. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; OLIVEIRA, L. M. M. Changes to the energy budget and evapotranspiration following conversion of tropical savannas to agricultural lands in São Paulo State, Brazil. **Ecohydrology**, v. 8, n. 7, p. 1272-1283, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/eco.1580>.

SIMONETTI, V. C.; FRASCARELI, D.; GONTIJO, E. S. J.; MELO, D. S.; FIRESE, K.; SILVA, D. C. C.; ROSA, A. H. Water quality indices as a tool for evaluating water quality and effects of land use in a tropical catchment. **International Journal of River Basin Management**, v. 19, n. 2, p. 157-168, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1672706>.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 3–4, 11 2009, p 462-476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.09.016>.

WANG, Y.; ZHANG, S.; CHANG, X. Evapotranspiration estimation based on remote sensing and the SEBAL model in the Bosten Lake Basin of China. **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7293, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12187293>.

WATERS, R. ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSEN, W. **SEBAL - Surface energy balance algorithms for land: Advanced training and users manual**. The Idaho Department of Water Resources, 2002. Disponível em: <http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-479-Waters-et-al-SEBAL.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2022.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390– 8404, 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>.

## 7 CAPÍTULO 4 - ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO REDE NEURAL ARTIFICIAL<sup>4</sup>

### 7.1 Introdução

A dinâmica das mudanças no UCT tem sido reconhecida como um dos principais fatores de transformação global, impactando significativamente os processos que regulam as interações entre a superfície terrestre e a atmosfera, assim como os ciclos biogeoquímicos, a emissão de carbono, a produtividade biológica e a biodiversidade (Manuschevich; Sarricolea; Galle, 2019). Alterações no UCT são uma preocupação crescente tanto em escalas regionais quanto globais, devido aos impactos ambientais que elas promovem, especialmente no que se refere ao manejo dos recursos naturais e à sustentabilidade.

O mapeamento e a análise espacial das alterações no UCT são fundamentais para o monitoramento das dinâmicas ambientais. Isso permite a avaliação de mudanças espaciais e temporais em diferentes períodos, fornecendo dados essenciais para a gestão territorial e a formulação de políticas públicas (Koko *et al.*, 2020). Essas alterações ocorrem sob pressões naturais e antropogênicas, gerando impactos que variam conforme a escala espacial e temporal (Leta; Demissie; Tränckner, 2021). Tais pressões são globais, dado o vínculo intrínseco entre ecossistemas e a subsistência humana, com efeitos que se manifestam de forma não linear e resultam em complexas transformações da paisagem (Bunyangha *et al.*, 2021).

A ausência de um planejamento adequado do uso do solo leva a conflitos entre setores e à degradação dos recursos naturais, exigindo que decisões sobre o ordenamento territorial envolvam a comunidade e múltiplos atores sociais (Henríquez-Dole *et al.*, 2018), além de uma análise multidisciplinar dos ecossistemas naturais e antropizados. Como a cobertura terrestre é majoritariamente modificada por ações humanas, políticas públicas eficientes são essenciais para regulamentar atividades econômicas que afetam o meio ambiente (Manuschevich; Sarricolea; Galle, 2019).

Estudos voltados para a interpretação da ET, que consideram os efeitos das mudanças do UCT, são capazes de quantificar os impactos gerados pela influência antrópica no ciclo hidrológico, ajudando de maneira efetiva na gestão dos recursos hídricos (Li, G. *et al.*, 2017; Liu; Hu, 2019). Todavia, determinar a ET envolve a utilização de parâmetros climáticos obtidos por meio de estações meteorológicas, que nem sempre estão disponíveis devido à dificuldade na manutenção e existência de uma rede meteorológica ativa em muitos países.

---

<sup>4</sup> Parte desse capítulo foi submetido à *Revista Brasileira de Meteorologia*.

Nesse sentido, o SR é uma ferramenta capaz de fornecer dados de variáveis que interagem entre si, resultando na ET, de modo que o mapeamento desse importante componente do ciclo hidrológico em grandes escalas por meio dessa geotecnologia, é realizado de maneira eficiente e econômica (Zhang; Kimball; Running, 2016; Ghaderi *et al.*, 2020), uma vez que os sensores presentes em satélites são capazes de adquirir dados espectrais além dos comprimentos de onda da região visível do espectro eletromagnético, como comprimentos de onda do infravermelho e termal (Lechner; Foody; Boyd, 2020), como o algoritmo SEBAL.

Porém, apesar de seus benefícios, o emprego de diversas equações e procedimentos, ao depender dos níveis do conhecimento do operador, complexificam a construção do banco de dados necessário para o cálculo da ET. Nesse sentido, com os avanços das RNA que surgiram como um campo promissor no campo da inteligência artificial (IA) no final da década de 1940 (Mcculloch; Pitts, 1943), diversos estudos têm utilizado RNA para estimar a ET e projeções (Antonopoulos; Antonopoulos, 2017; Dezsí *et al.*, 2018; Ni; Ren; Lu, 2018; Dimitriadou; Nikolakopoulos, 2022), contudo, tais estudos são dependentes de séries meteorológicas.

Por serem classificadores de padrões genéricos, as RNA são extremamente versáteis por meio da combinação de diferentes tipos de dados em um único modelo (Mohan; Giridhar, 2022). As RNA são um tipo de IA que se baseiam na estrutura de uma célula neural e no modo em que as informações são transmitidas nessas células.

Um modelo de RNA de apenas uma camada neural consiste em: (1) receber dados de entrada; (2) multiplicá-los por pesos; (3) somar esses valores; (4) calcular a diferença das somas ponderadas das entradas e o limiar de ativação (*bias*); (5) gerar o dado de saída de acordo com uma função de ativação (Jain; Mao; Mohiuddin, 1996; Abiodun *et al.*, 2018).

Uma estrutura de uma RNA de múltiplas camadas pode ser dividida em: (1) camadas de entrada, (2) camadas ocultas e (3) camadas de saída. Na existência de mais de uma camada oculta, essas redes passam a integrar o denominado aprendizado profundo (*deep learning*). As interações que ocorrem entre as camadas são denominadas nós, que irão depender da quantidade de variáveis consideradas na introdução das camadas (Pham *et al.*, 2019), portanto, a quantidade de neurônios ocultos nas camadas ocultas depende da quantidade do conjunto de dados utilizados para o treinamento do modelo (Saputra; Lee, 2019).

Entre as RNA envolvidas no contexto do *deep learning* (DL), destaca-se a RNA-MLP (*Multilayer Perceptron*). A RNA – MLP é capaz de modelar várias transições ao mesmo tempo através do treinamento de amostras, onde cada pixel das camadas de entrada

é avaliado em termos de existência ou não de transições quando o treinamento está sendo executado, permitindo que a aprendizagem e as interações ocorram de forma dinâmica, até que se atinja um valor máximo de interações (Eastman, 2016).

As RNA têm atraído grande interesse na modelagem de processos ambientais devido à sua capacidade de identificar relações complexas entre entradas e saídas, sido amplamente aplicadas em estudos meteorológicos e hidrológicos (Rahimikhoob, 2010; Raihan 2023). A preparação de dados, análise espacial exploratória, treinamento de modelos, disseminação de resultados por meio de mapas interativos, são componentes intrínsecos das geotecnologias que apoiam a análise de dados (Raihan, 2023).

Por outro lado, os algoritmos de DL lidam com estruturas de dados complexas, proporcionando alta precisão, flexibilidade e capacidade de generalização, tornando a integração entre geotecnologia e DL, uma excelente ferramenta para o desenvolvimento de modelos que consideram variáveis geográficas complexas e dinâmicas, representando padrões espaciais com maior precisão (Raihan, 2023).

Diante do exposto, identifica-se uma oportunidade para explorar o uso das RNA na estimativa da ET de forma eficiente e acessível, visando reduzir barreiras tecnológicas e direcionar estudos futuros para o desenvolvimento de ferramentas práticas que beneficiem usuários não acadêmicos e científicos.

Considerando o objetivo principal desta tese, os bancos de dados de UCT e ET, elaborados e discutidos nos capítulos anteriores, serviram como base para a análise espaço-temporal desses fenômenos na APA de Itupararanga. Além disso, forneceram os insumos necessários para o treinamento do algoritmo RNA-MLP e a estimativa da ET, utilizando dados de UCT e bandas espectrais do satélite Landsat — foco da discussão apresentada neste capítulo.

## **7.2 Material e métodos**

### **7.2.1 Reclassificação da evapotranspiração e amostragem para o treinamento da rede neural artificial**

A ET calculada para o ano de 2021, utilizando o algoritmo SEBAL, foi reclassificada em dois intervalos principais: 1,00 e 0,5, conforme observado na Figura 10, para ser utilizada como a imagem de treinamento e classificação supervisionada. Essa decisão foi tomada com o intuito de simplificar o processo de estimativa por meio RNA-MLP.

A reclassificação dos dados em intervalos pré-definidos facilita a aprendizagem e o treinamento da RNA, devido à generalização, reduzindo a complexidade dos padrões a

serem reconhecidos pelo modelo, diminuindo a quantidade de variáveis de saída e contribuindo para um desempenho mais ágil devido ao menor tempo de processamento e sobrecarga computacional.

Também se justifica a reclassificação para reconhecimento da distribuição da quantidade de pixels em cada intervalo de ET, para realizar uma amostragem equilibrada entre as diferentes classes, evitando que uma classe seja mais representativa que a outra. Portanto, verificou a distribuição da quantidade de pixels em cada classe, conforme organizado na Tabela 12.

Posteriormente, calculou-se o número de amostras em cada classe, considerando que ao todo 5.000 pixels deveriam ser amostrados. A definição da quantidade de pixels mínimos foi realizada a partir da classe que apresentava a menor quantidade dos mesmos, a proporcionalidade da quantidade de pixels foi obtida de acordo com a Equação 34.

$$n = \left(\frac{N_p}{N}\right) * (5000 - (N_c * n_a)) \quad (34)$$

Sendo:

$n$  o tamanho da amostra;

$N_p$  a quantidade de pixels totais em cada classe;

$N$  tamanho da população = 1.037.436 pixels;

$N_c$  a quantidade de classes;

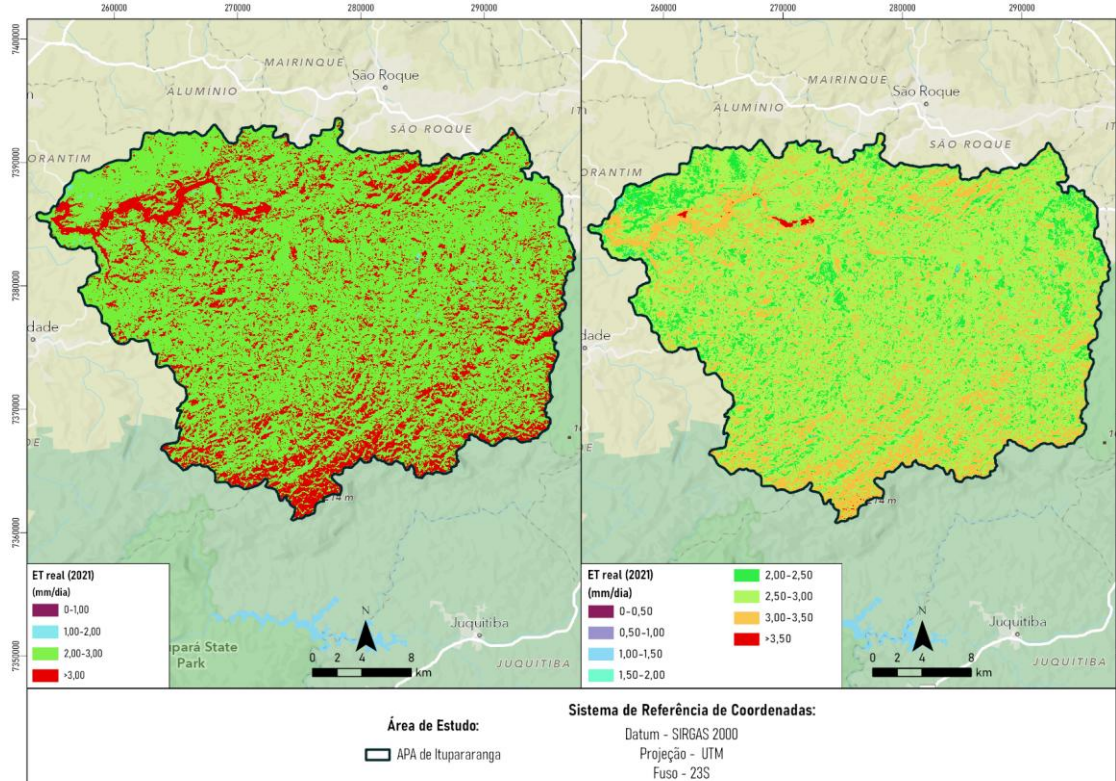
$n_a$  a quantidade mínima de pixel para amostragem.

Tabela 12: Descrição da quantidade de pixels a serem amostrados em cada imagem reclassificada.

| Classificação da ET a cada 1 mm/dia |               |                |                                  |                          |
|-------------------------------------|---------------|----------------|----------------------------------|--------------------------|
| Classe                              | Pixels totais | Pixels mínimos | Pixels adicionais (proporcional) | Pixels totais amostrados |
| 0,00–1,00                           | 119           | 100            | 1                                | 101                      |
| 1,00–2,00                           | 4.884         | 100            | 22                               | 122                      |
| 2,00–3,00                           | 798.663       | 100            | 3.541                            | 3.641                    |
| >3,00                               | 233.770       | 100            | 1.037                            | 1.137                    |
| Total                               | 1.037.436     |                |                                  | 5000                     |
| Classificação da ET a cada 1 mm/dia |               |                |                                  |                          |
| Classe                              | Pixels totais | Pixels mínimos | Pixels adicionais (proporcional) | Pixels totais amostrados |
| 0,00-0,50                           | 22            | 20             | 0                                | 20                       |
| 0,50-1,00                           | 97            | 20             | 0                                | 20                       |
| 1,00-1,50                           | 385           | 20             | 2                                | 22                       |
| 1,50-2,00                           | 4.499         | 20             | 21                               | 41                       |

|           |           |    |       |       |
|-----------|-----------|----|-------|-------|
| 2,00-2,50 | 132.610   | 20 | 619   | 639   |
| 2,50-3,00 | 666.053   | 20 | 3.107 | 3.127 |
| 3,00-3,50 | 231.867   | 20 | 1.082 | 1.102 |
| >3,50     | 1.903     | 20 | 9     | 29    |
| Total     | 1.037.436 |    |       | 5.000 |

Figura 10: Evapotranspiração real (mm/dia) de 2021 reclassificada.



Fonte: Elaborado pela autora.

## 7.2.2 Estrutura da rede neural artificial utilizada

Utilizou-se o modelo RNA-MLP do *software* TerrSet, tradicionalmente usado para classificação de imagens. Esse tipo de RNA é recomendada para modelagens não lineares e se destaca por sua capacidade de generalizar com precisão (Gardner; Dorling, 1998). Essa capacidade de generalização torna a RNA-MLP uma escolha popular em diversas áreas, incluindo as ciências atmosféricas, onde suas aplicações são variadas e eficazes (Gardner; Dorling, 1998).

A estrutura da RNA-MLP consiste em um sistema de neurônios interconectados por pesos, também conhecidos como nós, capazes de mapear as relações não lineares entre um vetor de entrada e de saída (Gardner; Dorling, 1998). Os sinais de saída de cada nó são determinados pela soma das entradas modificadas por uma função de transferência não linear, ou função de ativação (Gardner; Dorling, 1998).

Outra característica importante da RNA-MLP é o fato desse ser um algoritmo de retropropagação (*backpropagation*), propagando-se para frente e para trás para ajustar os pesos das conexões dos neurônios, o que permite a rede aprender com seus erros (Eastman, 2016). Portanto, nesse modelo, cada nó soma os sinais ponderados da camada anterior e uma função não linear é aplicada à soma ponderada antes de passar o sinal para a próxima camada (Clark Labs, 2020).

Após a passagem direta, a saída é comparada aos resultados esperados para identificar erros na rede, que são enviados de volta pela rede para ajustar os pesos, assim, o treinamento continua até que a rede aprenda a classificar dados desconhecidos com precisão (Clark Labs, 2020). Sendo assim, o processo de aprendizagem supervisionado, depende de informações conhecidas do que se pretende classificar.

O uso de RNA em estudos hidrológicos também é observado desde a década de 1990, inicialmente através de modelagens de precipitação-escoamento (Kumar; Raghuwanshi; Singh, 2011). Desde então, essas aplicações se expandiram para previsão de fluxo de córregos, modelagem de águas subterrâneas, qualidade da água, previsão de precipitação, operação de reservatórios e análise de séries temporais de processos hidrológicos, sendo o algoritmo de *backpropagation* o mais utilizado (Kumar; Raghuwanshi; Singh, 2011), justificando a escolha dessa estrutura para a estimativa da ET.

Portanto, considerando a quantidade total de pixels nas imagens de ET (1.037.436) e um grau de 95% de confiança, separou-se amostra de 385 pixels, dos quais 270 foram selecionados para treinamento e 115 para teste, de acordo com (35).

$$n = \frac{N * Z^2 * p * (1-p)}{e^2 * (N-1) + Z^2 * p * (1-p)} \quad (35)$$

Sendo:

n: tamanho da amostra;

N: tamanho da população = 1.037.436 pixels;

Z: valor crítico da distribuição normal padrão (95% de confiança  $\rightarrow Z = 1,96$ );

p: proporção esperada (0,5);

e: margem de erro (5%).

Os parâmetros de treinamento também foram ajustados, optando por realizar a modelagem com treinamento automático. O uso do treinamento automático significa que a



RNA-MLP pode reiniciar seu processo de aprendizado sozinha se encontrar problemas, promovendo a procura por soluções melhores, pois ao usar o treinamento automáticos, após as 100 primeiras iterações, se forem detectadas oscilações significativas no RMSE, as taxas de aprendizado são reduzidas pela metade e o processo é reiniciado, além de alterar os pesos novamente (Clark Labs, 2020).

Os nós da camada oculta são as unidades nas camadas intermediárias da rede neural que processam as informações e foram ajustados para comparação, verificando se o modelo apresentaria melhor desempenho com uma ou duas camadas ocultas, pois de acordo com as informações dos desenvolvedores do TerrSet, Clark Labs (2020), o número de nós da camada oculta é importante para o desempenho da rede e pode ser estimado pela Equação 36, sendo recomendável ter pelo menos dois nós para garantir que a rede possa aprender de forma eficaz.

Além disso, um número muito pequeno de nós pode afetar a capacidade de generalização do modelo e, embora mais camadas ocultas possam aumentar a capacidade do modelo, os ganhos de desempenho podem não justificar a complexidade adicional, reforçando a ideia de que um equilíbrio deve ser alcançado entre a complexidade e o desempenho do modelo (Walls *et al.*, 2020).

$$N_h = \sqrt{N_f \times N_i} \quad (36)$$

Sendo:

$N_h$  é a quantidade de nós na camada oculta, em número inteiro;

$N_f$  é a quantidade de nós na camada de saída;

$N_i$  é a quantidade de nós na camada de entrada.

O fator *momentum* necessita ser ajustado para obter melhor desempenho dos modelos, valores que dependem da quantidade das camadas ocultas e nós utilizados (Diamantopoulou; Papamichail; Antonopoulos, 2005). A Clark Labs (2020) recomenda valores de fator *momentum* 0,5 e 0,6, de forma que nos modelos testados, e como não existem diretrizes específicas para determinar a estrutura de uma RNA, sendo essa frequentemente otimizada por meio de regras empíricas combinadas com tentativas e erros (Rahimikhoob, 2010), nos modelos testados verificou-se melhor fator *momentum* igual a 0,5.

Esse é um componente crucial para ajudar a evitar problemas de oscilação durante a busca pelo valor mínimo local (Mallikarjuna; Jyothy; Reddy, 2012; Yassin; Alazba; Mattar, 2016), isso é particularmente importante em cenários complexos, nos quais os valores podem mudar rapidamente (Clark Labs, 2020). O fator *momentum* contribui para o processo de otimização e ajuda a suavizar as atualizações e fornece um caminho mais estável em direção à solução (Clark Labs, 2020).

Também foi necessário ajustar a função sigmóide, uma função matemática que desempenha um papel de ativação, de natureza não linear, que permite que as redes neurais aprendam padrões complexos nos dados, introduzindo a não linearidade no modelo (Clark Labs, 2020). Valores superiores a 1 contribui para que a função se comporte de forma mais linear, enquanto valores inferiores geram uma situação de não linearidade ao modelo. Nos modelos testados, o melhor valor de função sigmóide utilizado foi o de 0,8, pois, em conjunto com o valor do fator *momentum*, apresentou melhor ajuste na taxa de treinamento e mais rapidez na resposta desse ajuste.

Optou-se por utilizar as bandas espectrais (radiância e reflectância) das imagens Landsat 8, datadas de 22 de agosto de 2021, como entradas para a RNA-MLP, uma vez que este é o formato de dados utilizado no algoritmo SEBAL, o que viabiliza uma comparação direta entre os resultados obtidos pelos modelos RNA-MLP e SEBAL. Também se utilizou o UCT de 2021, uma vez que o aumento das culturas temporárias foi associado a um incremento da ET, conforme discutido no Capítulo 3.

Inicialmente, utilizou-se as Bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 10, em conjunto com UCT, em RNA distintas, uma com 1 camada oculta e outra com 2 camadas. Em seguida, variou-se a quantidade de entradas introduzidas nos modelos, após a avaliação das variáveis mais e menos influentes, realizando uma nova rodada de testes, com 1 e 2 camadas ocultas, excluindo as variáveis menos importantes.

### 7.2.3 Avaliação do modelo

Os modelos de ET gerados pela RNA foram analisadas considerando múltiplos critérios de avaliação disponibilizados pelo TerrSet, incluindo o *Kappa Index of Agreement (KIA)*, *Training RMS*, *Testing RMS*, *Accuracy Rate* e *Skill Measure*. Após a identificação dos melhores modelos, os mapas gerados pela classificação da RNA-MLP foram comparados aos obtidos pelo SEBAL para o mesmo período (2021), com o objetivo de verificar a acurácia do modelo.

A classificação realizada pela RNA-MLP foi avaliada pelo método do Índice Kappa no módulo *validate* do software TerrSet. Os componentes do Índice Kappa analisados foram: *Kappa index agreement for no information* (Kno), *Kappa index agreement for location* (Klocation), *Kappa index agreement for location stratification* (Klocationstrata) e *Kappa index agreement standard* (Kstandard).

### 7.3 Resultados e discussão

#### 7.3.1 Modelos obtidos

A Tabela 13 apresenta uma organização detalhada dos resultados de desempenho dos modelos desenvolvidos, incluindo as métricas de acurácia, raiz quadrada da média dos quadrados (RMS) e os inputs utilizados em cada um deles. Quanto a classificação da ET a cada 0,5 mm/dia, os Modelos 1 e 2, apresentaram acurácia superior quando comparados com os modelos em que tiveram a redução das variáveis, Modelos 3 e 4.

Ambos apresentam os mesmos valores de RMS para teste, ~0,24, e para RMS treino, ~0,24. A ligeira melhora no desempenho Modelo 2, que utiliza duas camadas, sugere que a adição de uma camada oculta auxilia na modelagem de variáveis mais complexa, pois a taxa de acurácia mede a capacidade do algoritmo de prever corretamente as classes de pixels de validação após cada iteração do treinamento da rede (Agudelo-Hz; Castillo-Barrera; Uriel, 2023).

Tabela 13: Análise dos modelos de RNA-MLP avaliados.

| Modelo | Intervalo ET (mm/dia) | Variáveis | Camadas Ocultas | Nós   | Acurácia (%) | RMS Teste | RMS Treino | Camadas menos influentes        |
|--------|-----------------------|-----------|-----------------|-------|--------------|-----------|------------|---------------------------------|
| 1      | 0,5                   | Banda 2   | 1               | 8     | 67,64        | 0,2390    | 0,2344     | Banda 2, Banda 5, Banda 3, UCT  |
|        |                       | Banda 3   |                 |       |              |           |            |                                 |
|        |                       | Banda 4   |                 |       |              |           |            |                                 |
|        |                       | Banda 5   |                 |       |              |           |            |                                 |
|        |                       | Banda 6   |                 |       |              |           |            |                                 |
|        |                       | Banda 7   |                 |       |              |           |            |                                 |
|        |                       | Banda 10  |                 |       |              |           |            |                                 |
|        |                       | UCT 2021  |                 |       |              |           |            |                                 |
| 2      | 0,5                   | Banda 2   | 2               | 4 e 8 | 68,18        | 0,2354    | 0,2306     | Banda 10, Banda 2, Banda 7, UCT |
|        |                       | Banda 3   |                 |       |              |           |            |                                 |
|        |                       | Banda 4   |                 |       |              |           |            |                                 |
|        |                       | Banda 5   |                 |       |              |           |            |                                 |
|        |                       | Banda 6   |                 |       |              |           |            |                                 |
|        |                       | Banda 7   |                 |       |              |           |            |                                 |
|        |                       | Banda 10  |                 |       |              |           |            |                                 |
|        |                       | UCT 2021  |                 |       |              |           |            |                                 |
| 3      | 0,5                   | Banda 3   | 2               | 3 e 6 | 65,78        | 0,2406    | 0,2354     | -                               |

|   |     |          |   |       |        |        |        |                                     |
|---|-----|----------|---|-------|--------|--------|--------|-------------------------------------|
|   |     | Banda 4  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 5  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 6  |   |       |        |        |        |                                     |
| 4 | 0,5 | Banda 4  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 6  | 1 | 6     | 65,85  | 0,2417 | 0,2421 | -                                   |
|   |     | Banda 7  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 10 |   |       |        |        |        |                                     |
| 5 | 1   | Banda 2  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 3  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 4  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 5  | 1 | 6     | 77,42  | 0,2775 | 0,2715 | Banda 4, UCT,<br>Banda 10, Banda 5  |
|   |     | Banda 6  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 7  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 10 |   |       |        |        |        |                                     |
| 6 | 1   | UCT 2021 |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 2  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 3  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 4  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 5  | 2 | 3 e 6 | 74,42  | 0,2991 | 0,3018 | Banda 6, Banda 10, Banda 2, Banda 5 |
|   |     | Banda 6  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 7  |   |       |        |        |        |                                     |
| 7 | 1   | Banda 10 |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | UCT 2021 |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 2  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 3  | 2 | 6     | 74,08  | 0,3091 | 0,3047 | -                                   |
| 8 | 1   | Banda 6  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 7  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 3  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | Banda 4  | 1 | 4     | 75,95% | 0,2880 | 0,2864 | -                                   |
|   |     | Banda 7  |   |       |        |        |        |                                     |
|   |     | UCT 2021 |   |       |        |        |        |                                     |

Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação a classificação da ET a cada 1,00 mm/dia, diferentemente do observado para a classificação a cada 0,5, os modelos de apenas 1 camada oculta, Modelo 5 e Modelo 8, apresentaram acurácia superior aos modelos com duas camadas ocultas, 77,42% e 75,95%, respectivamente. Valores de acurácia superiores a 70% indicam que o modelo possui um bom poder de previsão (Agudelo-Hz; Castilllo-Barrera; Uriel, 2023).

Apesar da maior acurácia indicar que intervalos maiores de ET facilitam a identificação de padrões, os valores de RMS para teste e treino foram mais altos, sugerindo maior erro médio. Além disso, conforme observado anteriormente, a redução das variáveis menos influentes não gerou maior acurácia. Todavia, todos os modelos apresentaram valores de *Skill Measure* superiores a 0,60, o que significa que, os resultados obtidos por meio das

previsões são melhores quando esses resultados são obtidos ao acaso (Agudelo-Hz; Castillo-Barrera; Uriel, 2023).

Em ambos os intervalos de ET, determinadas bandas e o UCT foram identificadas como menos influentes, mas mesmo após a sua remoção, não houve aumento de acurácia ou diminuição do erro. Isso sugere que, mesmo sendo variáveis de menor influência, elas ainda têm algum grau de correlação com o processo de ET, o que contribui para a modelagem de forma que sua remoção não impacta negativamente o desempenho do modelo.

Considerando que, as variáveis de entradas selecionadas desempenham um papel significativo na modelagem, de modo que as mesmas devem possuir qualidade e relevância (Walls *et al.*, 2020), remover as variáveis menos importantes sem melhorar a acurácia, indica que o modelo já está capturando adequadamente a relação entre as variáveis e a ET.

Valores menores de RMS sugerem uma maior estabilidade e menor variabilidade nas previsões, sugerindo que o modelo consegue manter uma alta precisão sem grandes oscilações nos erros (Khanal *et al.*, 2018; Hasan *et al.*, 2020). Apesar de não ser verificada uma diferença substancial dos valores de RMS para treino e teste, valores de RMS superiores no treino em relação ao teste, com exceção dos Modelos 4 e 6, caracteriza a presença *overfitting*, com destaque para o Modelo 5.

Este fenômeno ocorre quando o modelo se ajusta excessivamente aos dados de treinamento, capturando não apenas os padrões subjacentes, mas também o ruído presente nesses dados, conforme detalhado por Ying (2022), que aborda as implicações do *overfitting* e a importância de técnicas de validação e regularização para melhorar a robustez dos modelos preditivos. Como resultado, o modelo pode apresentar um desempenho superior nos dados de treino, mas sua capacidade de generalização para novos dados, ou seja, dados que não foram utilizados durante o treinamento, é pior (Bassi; Dertkigil; Cavalli, 2024).

Considerando os melhores desempenhos em termos de acurácia e menores valores de RMS, os Modelos 2 e 5 foram selecionados como os mais adequados para a modelagem da evapotranspiração utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA-MLP).

### 7.3.2 Análise da acurácia dos melhores modelos obtidos

Os valores de Kno avaliam o quão bem o mapa projetado concorda com o mapa de referência quando não há informações disponíveis para fazer a comparação (Hasan *et al.*, 2020; Koko *et al.*, 2020), ou seja, quão melhor é o modelo em relação ao acaso. Enquanto o Klocation indica a precisão espacial no cenário geral do mapa, levando em consideração as atribuições corretas em cada categoria entre o mapa simulado e o mapa de referência

(Hasan *et al.*, 2020; Koko *et al.*, 2020), portanto, indica a capacidade do modelo de acertar a localização correta das classes em um mapa.

O KlocationStrata quantifica a precisão espacial dentro de estratos pré-identificados e indica o quão bem os pixels estão situados dentro desses estratos (Hasan *et al.*, 2020; Koko *et al.*, 2020), portanto, indica a capacidade do modelo classificar corretamente os pixels em cada categoria. Por fim, o Kstandard compara as alocações incorretas feitas por acaso com as atribuições corretas no mapa, portanto, mede a concordância geral entre o modelo e os dados observados.

Os resultados apresentados na Tabela 14 indicam que o Modelo 5 apresenta um desempenho superior em termos do índice Kappa em comparação ao Modelo 2, quando observado especificamente o valor de Kstandard. Contudo, quando analisado isoladamente, ambos possuem Kstandard com baixa concordância.

Por outro lado, o Modelo 2 apresenta melhor desempenho em termos de concordância espacial (Klocation e Klocationstrata = 0,64), o que sugere maior precisão na identificação dos padrões de localização, mostrando que o Modelo 5 apresentou um desempenho global mais elevado na classificação geral (Kno = 0,79), mas teve maior dificuldade em capturar os padrões espaciais.

Tabela 14: Valores do índice Kappa para cada modelo avaliado.

| Modelo | Descrição                                         | Símbolo                     | Valor |
|--------|---------------------------------------------------|-----------------------------|-------|
| 2      | Kappa index agreement for no information          | K <sub>no</sub>             | 0,66  |
|        | Kappa index agreement for location                | K <sub>location</sub>       | 0,64  |
|        | Kappa index agreement for location stratification | K <sub>locationstrata</sub> | 0,64  |
|        | Kappa index agreement standard                    | K <sub>standard</sub>       | 0,29  |
| 5      | Kappa index agreement for no information          | K <sub>no</sub>             | 0,79  |
|        | Kappa index agreement for location                | K <sub>location</sub>       | 0,45  |
|        | Kappa index agreement for location stratification | K <sub>locationstrata</sub> | 0,45  |
|        | Kappa index agreement standard                    | K <sub>standard</sub>       | 0,32  |

Fonte: Elaborado pela autora.

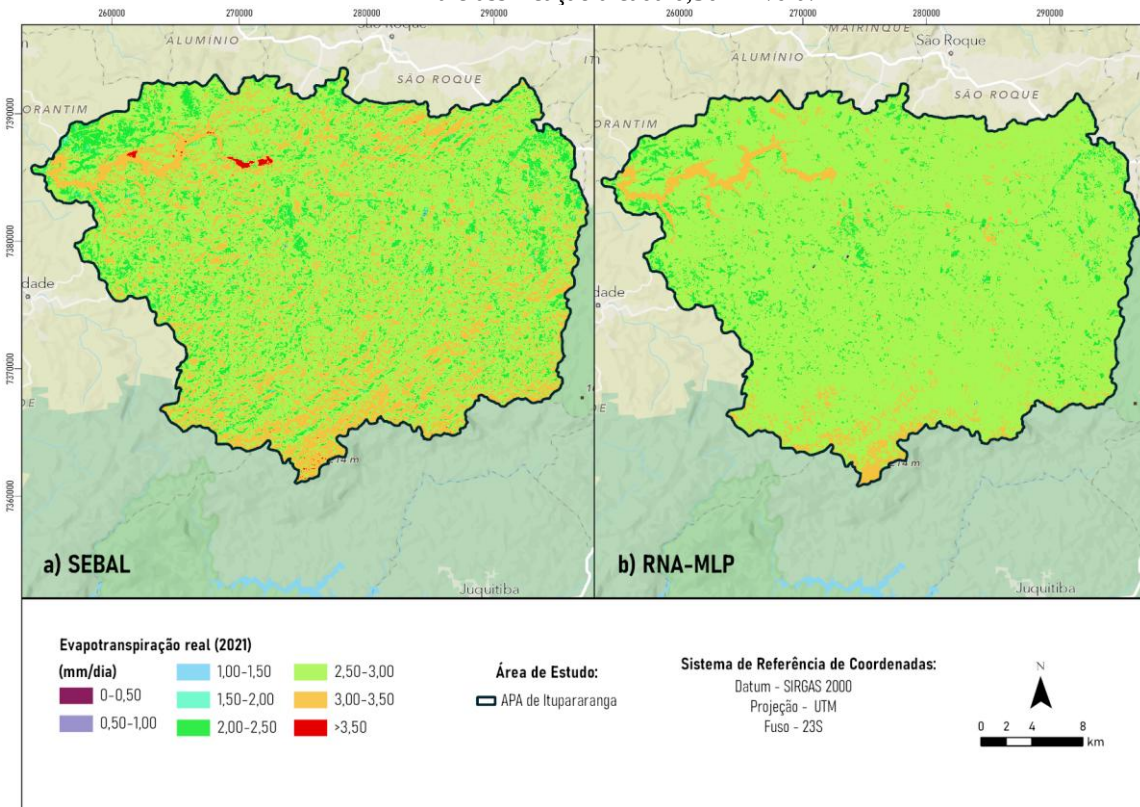
Todavia, apesar de balancear a amostragem, o Modelo 2 teve dificuldades em classificar dois intervalos de ET, de 1,00 – 1,50 e superior a 3,50 mm/dia, como pode ser observado na Tabela 15, revelando um desempenho mais instável, com falhas nessas classes. Contudo, para as classes classificadas, verifica-se certa concordância espacial, como a identificação de áreas com maior ET no Sul e na Represa de Itupararanga, conforme pode ser observado na Figura 11.

Tabela 15: Valores do Índice de Concordância Kappa (KIA) para cada classe do Modelo 2.

| Modelo 2  |       |
|-----------|-------|
| Classe    | KIA   |
| 0,00-0,50 | 0,54  |
| 0,50-1,00 | 0,38  |
| 1,00-1,50 | -     |
| 1,50-2,00 | -0,01 |
| 2,00-2,50 | 0,62  |
| 2,50-3,00 | 0,17  |
| 3,00-3,50 | 0,57  |
| >3,50     | -     |

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 11: Comparação da distribuição espacial da evapotranspiração real obtida por (a) SEBAL e (b) RNA-MLP na classificação a cada 0,50 mm/dia.



Fonte: Elaborado pela autora.

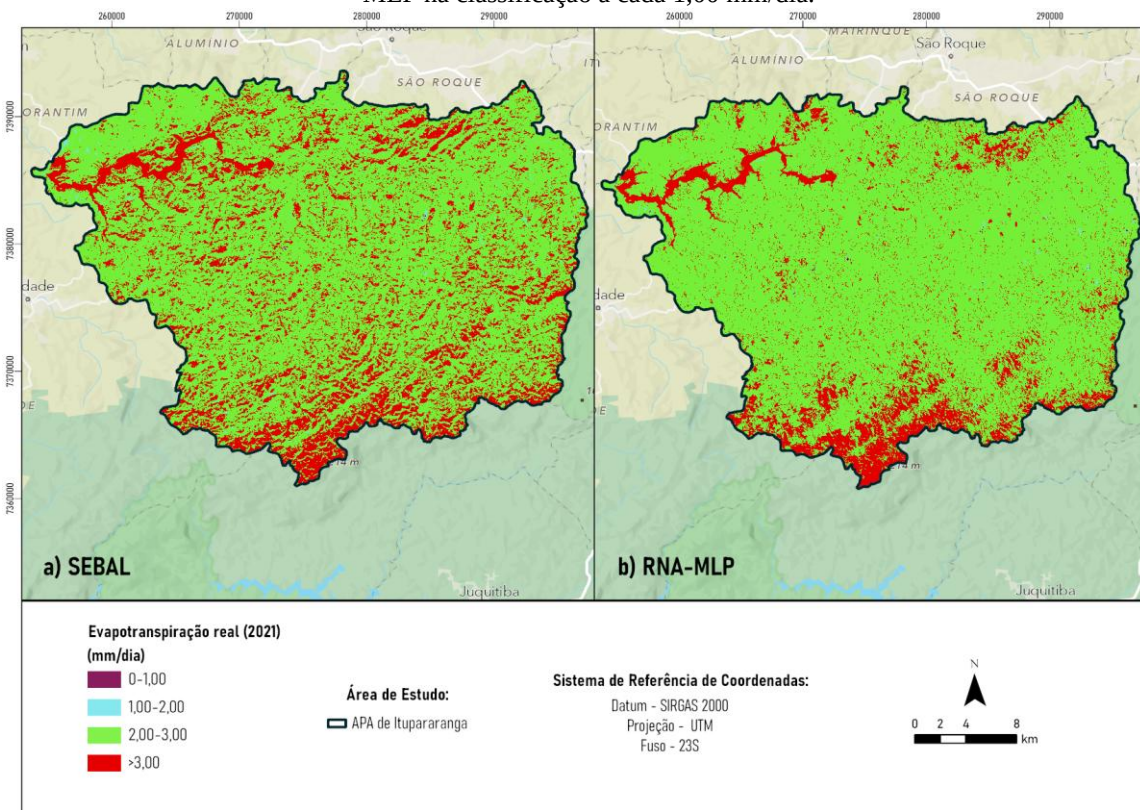
Em relação ao Modelo 5, verifica-se que, diferentemente do Modelo 2, as classes de ET de 0,00 até 2,00 apresentaram valores altos de KIA, conforme pode ser observado na Tabela 16, indicando uma alta concordância entre as previsões do modelo e os dados observados. Contudo, o desempenho é reduzido nas classes subsequentes, demonstrando que o Modelo 5 tem maior dificuldade em capturar padrões em valores mais altos de ET, conforme pode ser observado na espacialização dos valores de ET na Figura 12.

Tabela 16: Valores do Índice de Concordância Kappa (KIA) para cada classe do Modelo 5.

| Modelo 5  |      |
|-----------|------|
| Classe    | KIA  |
| 0,00-1,00 | 0,91 |
| 1,00-2,00 | 0,88 |
| 2-00-3,00 | 0,30 |
| >3,00     | 0,48 |

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12: Comparação da distribuição espacial da evapotranspiração real obtida por (a) SEBAL e (b) RNA-MLP na classificação a cada 1,00 mm/dia.



Fonte: Elaborado pela autora.

A análise da quantidade de pixels por classe de ET (Tabela 12), revela padrões que afetaram o Modelo 2, pois verificou-se os valores de ET concentram-se entre 2,00-3,00 mm/dia, o que dificulta a identificação de pixels entre 0,00-1,50 mm/dia pelo mesmo, que acabou por generalizar tais informações e agrupá-los em outras classes, que pode estar relacionado a capacidade da RNA-MLP em generalizar regiões de maior densidade de dados (Bassi; Dertkigil; Cavalli, 2024). Contudo, para o Modelo 5, verifica-se que o método escolhido para amostragem se mostrou adequado para evitar generalizações excessivas.

A comparação entre as Figuras 11 e 12, sugere que o modelo RNA-MLP conseguiu replicar certos padrões espaciais de ET, mas apresenta algumas discrepâncias quanto aos valores preditos. Embora as RNA sejam eficientes, sua abordagem não descreve



explicitamente as relações físicas entre os componentes do processo modelado, pois dependem de dados de entrada e saída para aprender o comportamento do processo (Kumar; Raghuwanshi; Singh, 2011)

Essas diferenças podem ser explicadas por limitações no ajuste da rede neural ou pela simplificação dos parâmetros de entrada no modelo de uma vez que ela trabalha de maneira automatizada e pode não capturar com precisão todas as variações espaciais sutis identificadas pelo SEBAL, como a variabilidade do fluxo energético, albedo, índices de vegetação e influência das condições meteorológicas, como a velocidade do vento e a temperatura do ar.

Além disso, um dos principais desafios das RNA é a falta de transferibilidade, onde um modelo treinado para uma localização específica geralmente não pode ser aplicado em outra sem novo treinamento local (Kumar; Raghuwanshi; Singh, 2011), o que também dificulta a comparação dos resultados.

Todavia, trabalhos que utilizaram RNA em conjunto com dados climáticos, mostram-se eficientes no cálculo da ETo e ETr (Zanetti *et al.*, 2007; Rahimikhoob, 2010; Laaboudi; Mouhouche; Draoui, 2012; Walls *et al.*, 2020). Zanetti *et al.* (2007) utilizaram uma RNA para estimar ETo com base nas temperaturas diárias máximas e mínimas do ar, com índices de desempenho variando de 0,76 a 0,85, indicando uma forte correlação com o método Penman-Monteith.

Rahimikhoob (2010) também estimou a ETo, com base nos dados de temperatura mínima e máxima do ar e de radiação extraterrestre, utilizando a RNA-MLP, encontrando valores de ETo com excelente concordância entre dados simulados e observados, com valores de  $R^2$  superiores a 0,90, assim como Walls *et al.* (2020) na determinação da ETr. Laaboudi, Mouhouche e Draoui (2012) destacam em seu estudo que RNA utilizada superou o modelo de regressão linear múltipla, em vários critérios de desempenho, incluindo MSE e RMSE, indicando sua precisão preditiva superior.

Embora esses estudos apresentem alta eficiência no cálculo da ET utilizando redes RNA, é fundamental ressaltar as diferenças metodológicas e de contexto entre esses trabalhos e o presente estudo. Os trabalhos mencionados utilizam dados meteorológicos/climáticos como variáveis de entrada, tais como temperatura do ar (mínima e máxima), radiação extraterrestre e outras informações atmosféricas. Esses dados, por sua natureza, apresentam relações diretas e bem estabelecidas com a evapotranspiração, facilitando a identificação de padrões pela RNA (Kumar; Raghuwanshi; Singh, 2011; Laaboudi; Mouhouche; Draoui, 2012).

Nos estudos citados, a saída da RNA é um único neurônio, o que simplifica o treinamento e a convergência do modelo, pois ele precisa estimar apenas um valor de ET, enquanto o presente estudo adota classes de ET como saídas, o que demanda uma classificação mais complexa e, portanto, maior esforço do modelo para diferenciar padrões entre as classes, pois as RNA podem não levar em conta adequadamente os aspectos espaciais, levando a uma modelagem e análise menos eficazes (Raihan, 2023), especialmente em regiões onde as transições de ET são mais sutis e a variabilidade espacial pode dificultar o desempenho.

A falta de transferibilidade torna-se ainda mais evidente no presente estudo. A utilização de dados espectrais e a modelagem espacial da ET intensificam ainda mais esse desafio, uma vez que os modelos devem lidar com a heterogeneidade espacial e interferências locais, como a cobertura do solo e uso da terra.

Por fim, as diferenças visuais destacam a necessidade de ajustes finos nos parâmetros do MLP para que ele se aproxime mais das estimativas do SEBAL, que foram anteriormente validados. Embora os estudos com dados climáticos demonstrem alta eficiência, a utilização de dados derivados de SR, destacados nesta tese, oferece vantagens práticas, como a possibilidade de estimar a ET em escalas espaciais maiores e com menor dependência de estações meteorológicas.

Nesse sentido, mesmo que a eficiência do modelo ainda possa ser aprimorada, o presente estudo representa uma abordagem inovadora e complementar ao uso de RNA na modelagem da ET, especialmente para áreas com baixa densidade de dados climáticos ou para aplicações que demandam informações espaciais, inclusive no Brasil.

## **7.4 Conclusão**

Os valores de acurácia, RMS e o comparativo da distribuição espacial dos valores estimados de ET pela RNA-MLP em relação ao modelo SEBAL evidenciam a necessidade de aprofundamento e ajustes no processo de modelagem. Os resultados indicam que as previsões ainda apresentam baixa precisão, sugerindo a necessidade de aprimoramentos nos seguintes aspectos: ajuste de parâmetros de treinamento, seleção de variáveis de entrada mais relevantes e refinamento do algoritmo para melhor captura das variações de ET.

Além disso, a reclassificação da ET impacta a resolução e a qualidade dos resultados. A classificação em intervalos de 0,50 mm/dia apresenta maior detalhamento, mas pode dificultar a identificação de padrões devido à heterogeneidade espacial sutil entre algumas classes, dada a quantidade de pixels em cada categoria. Por outro lado, a classificação em

1,00 mm/dia favorece uma melhor identificação de tendências globais, embora apresente maior erro médio.

Portanto, a seleção do modelo mais adequado deve considerar um equilíbrio entre a complexidade computacional e a precisão na representação espacial da ET. Estudos futuros devem priorizar a avaliação de novos métodos de pré-processamento, bem como a integração de técnicas que reduzam o erro de previsão e aumentem a robustez dos modelos de RNA-MLP.

## 7.5 Referência bibliográficas

ABIODUN, O. I.; JANTAN, A.; OMOLARA, A. E.; DADA, K. V.; MOHAMED, N. A.; ARSHAD, H. State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. **Heliyon**, v. 4, n. 11, p. e00938, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938>.

AGUDELO-HZ, W-J.; CASTILLO-BARRERA, N-C.; URIEL, M.-G. Scenarios of land use and land cover change in the Colombian Amazon to evaluate alternative post-conflict pathways. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29243-2>.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. Brasília: ANA, 2020.

ANTONOPOULOS, V. Z.; ANTONOPOULOS, A. V. Daily reference evapotranspiration estimates by artificial neural networks technique and empirical equations using limited input climate variables. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 132, p. 86–96, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.11.011>.

BASSI, P. R. A. S.; DERTKIGIL, S. S. J.; CAVALLI, A. Improving deep neural network generalization and robustness to background bias via layer-wise relevance propagation optimization. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 291, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44371-z>.

BUNYANGHA, J.; MAJALIWA, MWANJALOLO. J. G.; MUTHUMBI, Agnes. W.; GICHUKI, Nathan. N.; EGERU, A. Past and future land use/land cover changes from multi-temporal Landsat imagery in Mpologoma catchment, eastern Uganda. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 24, n. 3, p. 675–685, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.02.003>.

CLARK LABS. **TerrSet Help System**. 2020. Disponível em: <https://clarklabs.org/download/>. Acesso em: 28 nov. 2024.

DEZSI, S.; MÎNDRESCU, M.; PETREA, D.; RAI, P. K.; HAMANN, A.; NISTOR, M. M. High-resolution projections of evapotranspiration and water availability for Europe under climate change. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 10, p. 3832–3841, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5537>.

DIAMANTOPOULOU, M. J.; PAPAMICHAIL, D. M.; ANTONOPOULOS, V. Z. The use of a neural network technique for the prediction of water quality parameters. **Operational Research**, v. 5, n. 1, p. 115–125, 2005. <https://doi.org/10.1007/bf02944165>.

DIMITRIADOU, S.; NIKOLAKOPOULOS, K. G. Artificial neural networks for the prediction of the reference evapotranspiration of the Peloponnese Peninsula, Greece.

**Water**, v. 14, n. 13, p. 2027, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14132027>.

EASTMAN, J. R. **TerrSet Manual: geospatial monitoring and modeling system**. Clark Labs Clark University: Worcester, MA, USA, p. 470, 2016. Disponível em: <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/Terrset-Manual.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2022.

GARDNER, M. W.; DORLING, S. R. Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—A review of applications in the atmospheric sciences. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 14-15, p. 2627–2636, 1998. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(97\)00447-0](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(97)00447-0).

GHADERI, A.; DASINEH, M.; SHOKRI, M.; ABRAHAM, J. Estimation of actual evapotranspiration using the remote sensing method and SEBAL algorithm: A case study in Ein Khosh Plain, Iran. **Hydrology**, v. 7, n. 2, p. 36, 2020. <https://doi.org/10.3390/hydrology7020036>.

HASAN, S.; SHI, W.; ZHU, X.; ABBAS, S.; KHAN, H. U. A. future simulation of land use changes in rapidly urbanizing south China based on land change modeler and remote sensing data. **Sustainability**, v. 12, n. 11, p. 4350, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12114350>.

HENRÍQUEZ-DOLE, L.; USÓN, T. J.; VICUÑA, S.; HENRÍQUEZ, C.; GIRONÁS, J.; MEZA, F. Integrating strategic land use planning in the construction of future land use scenarios and its performance: The Maipo River Basin, Chile. **Land Use Policy**, v. 78, p. 353–366, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.06.045>.

JAIN, A. K.; MAO, J.; MOHIUDDIN, K. M. Artificial neural networks: a tutorial. **Computer**, v. 29, n. 3, p. 31–44, Jan. 1996. <https://doi.org/10.1109/2.485891>.

LAABOUDI, A.; MOUHOUCHE, B.; DRAOUI, B.. Neural network approach to reference evapotranspiration modeling from limited climatic data in arid regions. **International journal of biometeorology**, v. 56, n. 5, p. 831-841, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0485-7>.

KHANAL, S.; FULTON, J.; KLOPFENSTEIN, A.; DOURIDAS, N.; SHEARER, S. Integration of high resolution remotely sensed data and machine learning techniques for spatial prediction of soil properties and corn yield. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 153, p. 213–225, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.016>.

KOKO, A. F.; YUE, W.; ABUBAKAR, G. A.; HAMED, R.; ALABSI, A. A. N. Monitoring and predicting spatio-temporal land use/land cover changes in Zaria City, Nigeria, through an integrated Cellular Automata and Markov Chain Model (CA-Markov). **Sustainability**, v. 12, n. 24, p. 10452, 2020. <https://doi.org/10.3390/su122410452>.

KUMAR, M.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: a review. **Irrigation Science**, v. 29, n. 1, p. 11–25, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0230-8>.

LECHNER, A. M.; FOODY, G. M.; BOYD, D. S. Applications in remote sensing to forest ecology and management. **One Earth**, v. 2, n. 5, p. 405-412, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.001>.

LETA, M. K.; DEMISSIE, T. A.; TRÄNCKNER, J. Modeling and prediction of land use land cover change dynamics based on Land Change Modeler (LCM) in Nashe Watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Sustainability**, v. 13, n. 7, p. 3740, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13073740>.

- LI, G.; ZHANG, F.; JING, Y.; LIU, Y.; SUN, G. Response of evapotranspiration to changes in land use and land cover and climate in China during 2001–2013. **Science of The Total Environment**, v. 596–597, p. 256–265, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.080>.
- LIU, M.; HU, D. Response of wetland evapotranspiration to land use/cover change and climate change in Liaohe River Delta, China. **Water**, v. 11, n. 5, p. 955, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11050955>.
- MALLIKARJUNA P.; JYOTHY A. S.; REDDY K. C. Daily reference evapotranspiration estimation using linear regression and ANN models. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A**, v. 93, n. 4, p. 215–221, 2012. <https://doi.org/10.1007/s40030-013-0030-2>.
- MANUSCHEVICH, D.; SARRICOLEA, P.; GALLEGUILLOS, M. Integrating socio-ecological dynamics into land use policy outcomes: A spatial scenario approach for native forest conservation in south-central Chile. **Land Use Policy**, v. 84, p. 31–42, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.01.042>.
- MCCULLOCH, W.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **Bulletin of Mathematical Biology**, v. 52, n. 1-2, p. 99–115, 1943. [https://doi.org/10.1016/s0092-8240\(05\)80006-0](https://doi.org/10.1016/s0092-8240(05)80006-0).
- MOHAN, S.; M.V.S.S, G. A Brief review of recent developments in the integration of deep learning with GIS. **Geomatics and Environmental Engineering**, v. 16, n. 2, p. 21–38, 2022. <https://doi.org/10.7494/geom.2022.16.2.21>.
- NI, W.; REN, K.; LU, L. Evapotranspiration estimation and prediction for oasis transect in middle reach of Heihe River Basin based on METRIC and CA\_Markov model. **7th International Conference on Agro-geoinformatics (Agro-geoinformatics)**, IEEE, p. 1-6, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2018.8475997>.
- RAIHAN, N. A. A comprehensive review of the recent advancement in integrating deep learning with geographic information systems. **Research briefs on information & communication technology evolution**, v. 9, n. 6, p. 98–115, 2023. <https://doi.org/10.56801/re-bicte.v9i.160>.
- PHAM, B. T.; NGUYEN, M. D.; BUI, K.-T. T.; PRAKASH, I.; CHAPI, K.; BUI, D. T. A novel artificial intelligence approach based on multi-layer perceptron neural network and biogeography-based optimization for predicting coefficient of consolidation of soil. **CATENA**, v. 173, p. 302–311, Jan. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.004>.
- RAHIMIKHOOB, A. Estimation of evapotranspiration based on only air temperature data using artificial neural networks for a subtropical climate in Iran. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, n. 1-2, p. 83–91, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0204-z>.
- SAPUTRA, M. H.; LEE, H. S. Prediction of land use and land cover changes for north Sumatra, Indonesia, using an artificial-neural-network-based cellular automaton. **Sustainability**, v. 11, n. 11, p. 3024, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11113024>.
- WALLS, S.; BINNS, A. D.; LEVISON, J.; MACRITCHIE, S. Prediction of actual evapotranspiration by artificial neural network models using data from a Bowen ratio energy balance station. **Neural Computing and Applications**, v. 32, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04800-2>.
- YASSIN, M. A.; ALAZBA, A. A.; MATTAR, M. A. Artificial neural networks versus gene expression programming for estimating reference evapotranspiration in arid climate.

**Agricultural Water Management**, v. 163, p. 110–124, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.009>.

YING, X. An overview of overfitting and its solutions. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1168, n. 2, p. 022022, 2022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1168/2/022022>.

ZANETTI, S. S.; SOUSA, E. F.; OLIVEIRA, V. P.; ALMEIDA, F. T.; BERNARDO, S. Estimating evapotranspiration using artificial neural network and minimum climatological data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 2, p. 83–89, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2007\)133:2\(83\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:2(83)).

ZHANG, K.; KIMBALL, J. S.; RUNNING, S. W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. **Wires Water**, v. 3, n. 6, p. 834–853, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/wat2.1168>.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal desse trabalho é avaliar a possibilidade de se estimar a evapotranspiração utilizando Redes Neurais Artificiais por meio de dados de uso e cobertura da terra e bandas espectrais. Ao longo dos capítulos, foi possível estabelecer um panorama abrangente sobre a dinâmica do uso do solo na APA de Itupararanga, a fim de se verificar sua influência sobre a evapotranspiração

Portanto, no segundo capítulo, foi realizada uma análise das mudanças no uso e cobertura da terra na APA de Itupararanga, destacando os efeitos de políticas públicas sobre a tendência de mudança na região. Através da análise realizada, evidenciou-se a relação direta entre a conversão de áreas de pastagens para cultivos agrícolas, em maior abrangência, e, também, em zonas urbanas. Apesar de se observar uma mudança menos extensiva, verificou-se a existência da perda de áreas de formação florestal para outros usos antrópicos, o que ressalta a importância da monitorização contínua dessas alterações para a implementação de políticas de gestão ambiental eficazes.

No capítulo três, foi feita uma análise detalhada das variações na evapotranspiração ao longo do tempo, utilizando o algoritmo SEBAL. Ao serem comparados com outras duas fontes de dados, foi possível validar os resultados obtidos. A evapotranspiração na APA de Itupararanga apresenta um padrão atípico, pois seus valores são homogêneos em termos de distribuição espacial.

Essa homogeneidade pode ser atribuída pelo fato da APA ser majoritariamente uma região agrícola ainda em expansão urbana, o que também justifica os valores crescentes de evapotranspiração ao longo do tempo, que acompanham os avanços das culturas temporárias no município de Ibiúna, que compõe 60% da região do estudo.

O último capítulo focou na aplicação e na avaliação de Redes Neurais Artificiais para a estimativa espacial da evapotranspiração, demonstrando um desempenho mediano na obtenção da evapotranspiração por meio de dados brutos. A validação dos dados obtidos, mostrou que os inputs trabalhados são demasiadamente complexos para que a Rede Neural Artificial calcule de forma mais eficiente os valores de evapotranspiração, sendo recomendável a avaliação a análise de outros modelos.

Portanto, com base nos achados desta pesquisa, recomenda-se a continuidade do monitoramento da evapotranspiração e o teste de novas ferramentas de aprendizagem de máquina, para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras que possam auxiliar na gestão ambiental e na mitigação dos impactos na região.

Esta pesquisa não apenas elucida a importância da evapotranspiração no contexto da APA de Itupararanga, mas também traz à discussão a necessidade do desenvolvimento de um modelo mais simples na estimativa da evapotranspiração, que possa ser replicado em outras formas de comunicação, como softwares e aplicativos. Além disso, as considerações feitas ao longo dos capítulos demonstram que a integração de dados geoespaciais, métodos de aprendizado de máquina e análises de uso da terra é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de conservação mais eficazes.

As implicações dos resultados obtidos para políticas públicas são significativas, uma vez que enfatizam a necessidade de um planejamento sustentável que considere a proteção dos ecossistemas e a gestão dos recursos hídricos. Se for possível obter a evapotranspiração com essa qualidade de resolução espacial a partir de dados brutos, isso será um avanço significativo para os gestores públicos na tomada de decisão, especialmente aqueles envolvidos com a gestão dos recursos hídricos na APA de Itupararanga. Isso permitirá uma gestão mais eficiente do uso da água, garantindo a sustentabilidade para aproximadamente 1 milhão de pessoas que dependem do reservatório para abastecimento público.

Durante o período do doutorado, foram desenvolvidas diversas atividades científicas e acadêmicas que contribuíram significativamente para a disseminação dos resultados da pesquisa, bem como para a formação da pesquisadora. Foram publicados 2 artigos internacionais diretamente vinculados à pesquisa. Além disso, a participação em eventos científicos permitiu a publicação parcial dos resultados, ao longo do desenvolvimento da pesquisa, em anais de congresso, através de resumos expandido e trabalhos completos. Os resultados foram divulgados em congressos e seminários, com destaque para o Seminário Copernicus LAC – CMM da Universidade do Chile durante a mobilidade acadêmica da discente com subsídio fornecido pela Associação das Universidades do Grupo Montevideo - AUGM.