

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de 15/02/2026.



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

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^ª. Dr^ª. 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 ²) e proporção (%).	45
Tabela 2: Análise da expansão e diminuição dos usos e cobertura da terra da APA de Itupararanga expressos em área (km ²) e proporção (%).	46
Tabela 3: Tabela cruzada para a comparação entre cada classe de uso e cobertura da terra expressos em área (km ²).	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 λ 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

ET₂₄ – Evapotranspiração Real Diária

ET_p – Evapotranspiração Potencial

ET_r – Evapotranspiração Real

ET_o – 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_{APA} – 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

α – Albedo

α_{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

ε_a – Emissividade atmosférica

ε_{NB} – Emissividade da superfície no comprimento 10,4 a 12,5 μm

ε_0 – Emissividade da superfície no comprimento 6 a 14 μm

G_{sc} – Constante solar

h – Hora

km – Quilômetro

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_λ – 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

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

π – Número Pi

% – Porcentagem

ρ_λ – Refletância espectral para cada banda

ρ_{ar} – Massa específica do ar

ρ_w – Massa específica da água

σ – 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 θ – 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

τ_{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

ω_λ – Coeficiente de ponderação para cálculo do albedo superficial

ω_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

λ – Calor latente de vaporização da água

Λ – Coeficiente para cálculo do SAVI

δ – Ângulo da declinação solar

φ – Latitude

Λ – Fração de evaporação

ϖ_{est} – Coeficiente de ponderação da velocidade do vento na estação meteorológica

ϖ_{APA} – Coeficiente de ponderação da velocidade do vento na APA de Itupararanga

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

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	18
1.1	Referências bibliográficas	20
2	HIPÓTESE	22
3	OBJETIVOS	22
3.1	Objetivo geral	22
3.2	Objetivos específicos	22
4	CAPÍTULO 1 - REFERENCIAL TEÓRICO	23
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
5	CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DA MUDANÇA NO USO E COBERTURA DA TERRA DA APA DE ITUPARARANGA	33
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
6	CAPÍTULO 3 - ANÁLISE ESPACIAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA APA DE ITUPARARANGA	59
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

6.4 Conclusão	83
6.5 Referências bibliográficas	83
 7 CAPÍTULO 4 - ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO REDE NEURAL ARTIFICIAL	 88
7.1 Introdução	88
7.2 Material e métodos	90
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
7.3 Resultados e discussão	96
7.3.1 Modelos obtidos	96
7.3.2 Análise da acurácia dos melhores modelos obtidos	98
7.4 Conclusão	103
7.5 Referência bibliográficas	104
 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	 108

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_p), 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_r), 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_o), 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. 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>.

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.