



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

MARCELO SANTANA

**Variabilidades espaço-temporais e
interdependências hídricas em uma grande bacia
hidrográfica: relações entre precipitação, balanço
hídrico e uso e ocupação do solo na bacia
hidrográfica do Complexo Hidrelétrico Urubupungá**

CAMPINAS

2024

MARCELO SANTANA

**Variabilidades espaço-temporais e
interdependências hídricas em uma grande bacia
hidrográfica: relações entre precipitação, balanço
hídrico e uso e ocupação do solo na bacia
hidrográfica do Complexo Hidrelétrico Urubupungá**

Tese de Doutorado apresentada a Faculdade
de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
da Unicamp, para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Civil na área de
Recursos Hídricos, Energéticos e
Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. José Anderson do Nascimento Batista

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELO ALUNO MARCELO SANTANA E
ORIENTADO PELO PROF. DR. JOSÉ ANDERSON DO
NASCIMENTO BATISTA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS

2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Santana, Marcelo, 1992-
Sa59v Variabilidades espaço-temporais e interdependências hídricas em uma grande bacia hidrográfica : relações entre precipitação, balanço hídrico e uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Complexo Hidrelétrico Urubupungá / Marcelo Santana. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: José Anderson do Nascimento Batista.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP),
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Métodos temporais. 2. Ocupação do solo. 3. Bacias hidrográficas. 4. Recursos hídricos. I. Batista, José Anderson do Nascimento, 1977-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Spatiotemporal variabilities and water interdependencies in a large watershed : relationships among precipitation, water budget and land use and occupation in the Urubupungá Hydroelectric Complex watershed

Palavras-chave em inglês:

Temporal methods

Land occupation

Watersheds

Water resources

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora:

José Anderson do Nascimento Batista [Orientador]

Eduardo Mario Mendonça

Jurandir Zullo Junior

Paulo Tarso Sanches de Oliveira

José Roberto Guimarães

Data de defesa: 28-05-2024

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-8045-4413>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/2232575487413458>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO

**Variabilidades espaço-temporais e interdependências
hídricas em uma grande bacia hidrográfica: relações entre
precipitação, balanço hídrico e uso e ocupação do solo na
bacia hidrográfica do Complexo Hidrelétrico Urubupungá**

Marcelo Santana

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. José Anderson do Nascimento Batista
Presidente/FECFAU/UNICAMP

Prof. Dr. Eduardo Mario Mendiando
Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior
REIT/UNICAMP

Prof. Dr. Paulo Tarso Sanches de Oliveira
Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. José Roberto Guimarães
FECFAU/UNICAMP

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no
SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da
Unidade.

Campinas, 28 de maio de 2024

AGRADECIMENTOS

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

Primeiramente, gostaria de agradecer a meu orientador, Professor Dr. José Anderson do Nascimento Batista. Onipresente em todos os momentos desta jornada, sua sabedoria, sua compreensão e sua disposição em extrair meu melhor foram vitais para que eu pudesse concluir esta tese de doutorado. Gostaria de agradecer à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP por todo o suporte acadêmico em meu período como aluno regular. Agradeço aos professores Eduardo Mario Mendiando e José Roberto Guimarães pelas contribuições dadas no Exame de Qualificação de Doutorado.

Agradeço a meus amigos, Raphael Capuzi e Guilherme Avino, por toda a ajuda no início desta caminhada. Gostaria de agradecer à minha esposa, Luana, pela inesgotável paciência e apoio incondicional. Gostaria de agradecer a meus pais, Lourival e Silvia e a meus sogros, Gilson e Ana, pelo apoio dado.

E, pelo privilégio de mais um dia, agradeço a Deus.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo propósito debaixo do céu: há tempo de nascer e tempo de morrer; há tempo de plantar e tempo de arrancar o que se plantou”

(Eclesiastes, 3:1-2)

RESUMO

O planejamento das atividades econômicas impactantes nos recursos hídricos é imprescindível para a efetividade do planejamento dos recursos hídricos propriamente ditos. O conhecimento dos efeitos dos fatores locais e globais nos sistemas hídricos exige o isolamento dos efeitos decorrentes das diversas escalas espaço-temporais locais e sub-anuais até globais e plurianuais. A área de drenagem do Complexo Hidrelétrico Urubupungá, constituído pelas hidrelétricas de Ilha Solteira, Jupiá e Três Irmãos, ocupa significativa parcela da região alta da bacia hidrográfica do Rio Paraná. Este trabalho examina as influências de duas diferentes escalas espaciais, a de usos e ocupações do solo e a de fenômenos atmosféricos de larga escala, sobre o comportamento de precipitações e balanço hídrico na bacia hidrográfica do Complexo Hidrelétrico Urubupungá. O comportamento espaço-temporal das precipitações e o relacionamento destas com fenômenos atmosféricos de larga escala foi examinado através da análise multivariada de dados e análise composta. Interdependências hídricas foram avaliadas através de correlações e de modelagem hidrológica. As relações entre precipitações e usos e ocupações do solo e os *lags* entre suas séries históricas foram avaliados a partir da análise de correlações cruzadas. Os padrões espaço-temporais identificados para o período seco apresentaram significância em toda a área de estudo, e apresentou ligações mais intensas com o El Niño e oscilações provenientes do continente antártico. A observação das interdependências hídricas e balanço hídrico permite apontar uma relação de substituição de pastagens por usos agrícolas, com predominância da cana-de-açúcar. A redução no escoamento superficial, observada em grande parte da área de estudo, associada às substituições na cobertura do solo, evidencia que tais substituições levaram a uma diminuição na oferta hídrica na bacia hidrográfica. O exame de relações entre séries históricas de precipitações e usos e ocupações do solo permitiu o entendimento de relações não observadas na análise de padrões espaço-temporais de precipitações, como a observação de comportamentos destas para o período úmido, principalmente para o verão. Também, foi possível analisar as precipitações em uma menor escala de tempo, com três meses, e em menor escala espacial, visto que a análise permitiu a averiguação em escala municipal.

Palavras-chaves: Padrões espaço-temporais; Análise composta; Interdependências; usos e ocupações do solo; Correlações cruzadas;

ABSTRACT

Planning economic activities that impact water resources is essential for the effectiveness of planning water resources themselves. Knowledge of the effects of local and global factors on water systems requires the isolation of effects arising from different local and sub-annual to global and multi-annual spatiotemporal scales. The drainage area of the Urubupungá Hydroelectric Complex, made up of the Ilha Solteira, Jupiá and Três Irmãos hydroelectric plants, occupies a significant portion of the upper region of the Paraná River basin. This work examines the influences of two different spatial scales, that of land uses and occupations and that of large-scale atmospheric phenomena, on the behavior of precipitation and water balance in the Urubupungá Hydroelectric Complex watershed. The spatiotemporal behavior of precipitation and its relationship with large-scale atmospheric phenomena was examined through multivariate data analysis and composite analysis. Water interdependencies were assessed through correlations and hydrological modeling. The relationships between precipitation and land use and occupation and the lags between their historical series were evaluated using cross-correlation analysis. The spatiotemporal patterns identified for the dry period were significant throughout the whole study area, and showed to be more intense links with El Niño and oscillations from the Antarctic continent. The observation of water interdependencies and water balance allows us to point out a relationship between pastures being replaced by agricultural uses, with sugarcane predominance. The reduction in surface runoff, observed in a large part of the study area, associated with replacements in soil cover, shows that such replacements led to a decrease in water supply in the river basin. The relationships examined between historical series of standardized precipitations and land use allowed the understanding of relationships not observed in the analysis of spatio-temporal precipitation patterns, such as the observation of their behavior during the humid period, mainly in summer. It was also possible to analyze rainfall on a shorter time scale, three months, and on a smaller spatial scale, as the analysis allowed investigation on a municipal scale.

Keywords: Spatiotemporal patterns; Composite analysis; Interdependencies; land use; Cross-correlations;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Bacia hidrográfica do rio Paraná	51
Figura 2. a) Malha hidrográfica dos principais cursos d'água do CHURB; b) Principais cursos d'água na região do exutório da bacia hidrográfica do CHURB.....	53
Figura 3. Altimetria da bacia hidrográfica do CHURB.....	54
Figura 4. Usos e ocupações do solo para o ano de 1985 na bacia hidrográfica do CHURB	55
Figura 5. Usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica do CHURB para o ano de 2017.	56
Figura 6. Postos pluviométricos dispostos na área de influência deste trabalho.....	58
Figura 7. Esquema metodológico da análise de precipitações e seu racionamento com sistemas atmosféricos de larga escala.....	60
Figura 8. Esquema metodológico da análise de impactos de mudanças de usos e ocupações no solo no balanço hídrico	63
Figura 9. Esquema metodológico de análise do relacionamento entre precipitações de usos e ocupações do solo.	67
Figura 10. a) Área de estudo para o SPI; b) Área do CHURB evidenciada.....	68
Figura 11. Precipitação a) Média mensal para a área de estudo na série histórica (1976-2017), b) Média anual espacializada para os seis meses mais secos, c) Média anual espacializada para os seis meses mais úmidos d) Média anual espacializada para o ano hidrológico.....	69
Figura 12. REOF significantes para os três períodos. Na coluna da esquerda, as cinco REOF relevantes para o Semestre Seco. Na coluna direita, as três REOF relevantes para o Semestre Úmido e as duas REOF relevantes para o Ano Hidrológico.	72
Figura 13. Cinco padrões dominantes RPC (REOF1 a REOF5) do período seco (SPI6D): a) Sul, b) Leste, c) Norte, d) Central, e) Sudoeste.....	73
Figura 14. Espacialização da magnitude das tendências (em SPI/10 anos) de cada posto pluviométrico para o semestre seco (SPI6D). As tendências negativas não-significantes foram representadas pelos quadrados cianos, tendências positivas não-significantes foram representadas por quadrados pretos.....	74
Figura 15. Espectro de potência das CWT para os padrões temporais a) RPC1, b) RPC2, c) RPC3, d) RPC4 e e) RPC5. O contorno negro define o nível de 5% de	

significância, cujo interior não é afetado por ruído vermelho. A região sombreada fora do cone de influência representa áreas em que ocorrem efeitos de borda.....	76
Figura 16. Espectro de potência das ondaletas cruzadas (XWT) entre os cinco padrões temporais dominantes (RPC1, RPC2, RPC3, RPC4 e RPC5) e os índices atmosféricos de larga escala SOI (a), TPI (b), NAO (c) e SAM (d). O contorno negro define o nível de 5% de significância, cujo interior não é afetado por ruído vermelho. A região sombreada fora do cone de influência representa áreas em que ocorrem efeitos de borda.....	77
Figura 17. Compostos das teleconexões dos índices AMO, NAO, PDO, SAM, SOI e TPI. A teleconexão de cada índice foi plotada para compostos positivos e negativos, os quais estão dispostos da cor azul quando acima de zero e em vermelho quando abaixo de zero.....	80
Figura 18. Interpolação média de SPI6D para a) SOI(+); b) SOI(-); c) TPI(+); d) TPI(-); e) NAO(+); f) NAO(-); g) SAM(+); h) SAM(-); i) PDO(+); j) PDO(-); AMO(+); AMO(-).	81
Figura 19. Sub-bacias hidrográficas que compõem a área de estudo.....	83
Figura 20. Divisão de sub-bacias na bacia hidrográfica do rio Grande	86
Figura 21. Postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Grande.....	87
Figura 22. SSI12 de cada posto fluviométrico na bacia hidrográfica do rio Grande para a) UHE de Água Vermelha; b) UHE de Marimbondo; c) UHE de Mascarenhas de Moraes; d) Clube de Regatas; e) UHE de Funil; f) UHE de Furnas – Rio Verde; g) UHE de Marimbondo – Porto Ferreira	88
Figura 23. Correlação entre uso-ocupação do solo e SSI na bacia hidrográfica do rio Grande para a) Formação florestal; b) Formação savânica; c) Formação campestre; d) Floresta plantada; e) Pastagens; f) Cana-de-açúcar; g) Agricultura; h) Área urbana; i) Solo descoberto.	89
Figura 24. Correlação entre uso da água e SSI para a) Abastecimento humano; b) Industrial; c) Irrigação agrícola; d) Dessedentação animal; e) Mineração na bacia hidrográfica do rio Grande.....	92
Figura 25. Correlações entre usos da água e usos e ocupações do solo para: a) Dessedentação animal contra cana-de-açúcar; b) Dessedentação animal contra pastagem; c) Irrigação agrícola contra cana-de-açúcar; d) Irrigação agrícola contra pastagens para a bacia hidrográfica do rio Grande.....	93

Figura 26. Vazões observadas e vazões simuladas no processo de calibração para o exutório da bacia hidrográfica do rio Grande (UHE de Água Vermelha).	98
Figura 27. Comparativo entre vazões observadas e simuladas para a bacia hidrográfica do rio Grande.....	98
Figura 28. Comparativo de vazões simuladas para uso constante (1985) e uso dinâmico para a bacia hidrográfica do rio Grande	100
Figura 29. Diferença percentual entre escoamento superficial para o uso constante (1985) e para uso dinâmico na bacia hidrográfica do rio Grande.....	100
Figura 30. Parcela de usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica do rio Grande.	102
Figura 31. Série histórica dos usos da água na bacia hidrográfica do rio Grande..	103
Figura 32. Divisão de subbacias na bacia hidrográfica do rio Paranaíba	105
Figura 33. Postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Paranaíba	106
Figura 34. SSI12 de cada posto fluviométrico para a) Maurilândia b) Fazenda Santa Maria; c) UHE Corumbá I; d) Fazenda São Domingos; e) Ponte Meia Ponte ; f) UHE Itumbiara; g) UHE Emborcação; h) UHE Miranda; i) UHE São Simão, na bacia hidrográfica do rio Paranaíba	107
Figura 35. Correlações entre uso e ocupação do solo e SSI12 para a) Formação florestal; b) Formação savânica; c) Formação campestre; d) Floresta plantada; e) Pastagens; f) Cana-de-açúcar; g) Agricultura; h) Área urbana; i) Solo descoberto para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba.....	108
Figura 36. Correlação entre uso da água e SSI na bacia hidrográfica do rio Paranaíba para a) Abastecimento humano; b) Industrial; c) Irrigação agrícola; d) Dessedentação animal; e) Mineração, na bacia hidrográfica do rio Paranaíba	110
Figura 37. Correlações entre usos da água e usos e ocupações do solo para: a) Dessedentação animal contra agricultura geral para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba; b) Dessedentação animal contra pastagem; c) Irrigação agrícola contra agricultura geral; d) Irrigação agrícola contra pastagens;	111
Figura 38. Comparativo de vazões observadas e vazões simuladas para uso constante (1985) e uso dinâmico na bacia hidrográfica do rio Paranaíba	115
Figura 39. Comparativo entre vazões observadas e simuladas para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba	116
Figura 40. Comparativo de vazões simuladas para uso constante (1985), uso dinâmico, e diferença percentual entre as mesmas.	117

Figura 41. Diferença percentual entre escoamento superficial para o uso constante (1985) e para uso dinâmico para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba.	117
Figura 42. Parcela de usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica do rio Paranaíba.....	119
Figura 43. Séries históricas de usos da água na bacia hidrográfica do rio Paranaíba	120
Figura 44. Divisão de subbacias na bacia hidrográfica do rio Tietê.....	121
Figura 45. Postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Tietê.....	122
Figura 46. SSI12 de cada posto fluviométrico na área de estudo para a) UHE Três irmãos, b) UHE de Nova Avanhandava, c) UHE Promissão, d) UHE Ibitinga, e) UHE A, S, Lima, f) UHE Barra Bonita, g) Artemis na bacia hidrográfica do rio Tietê	123
Figura 47. Correlação entre uso-ocupação do solo e SSI para a) Formação florestal; b) Formação savânica c) Formação campestre; d) Floresta plantada; e) Pastagens; f) Cana-de-açúcar; g) Agricultura; h) Área urbana; i) Solo descoberto, na bacia hidrográfica do rio Tietê.....	124
Figura 48. Correlação entre uso da água e SSI para Abastecimento humano a); Industrial b); Irrigação agrícola c); Dessedentação animal d); Mineração e) na bacia hidrográfica do rio Tietê.....	126
Figura 49. Correlações entre usos da água e usos e ocupações do solo para: a) Dessedentação animal contra cana-de-açúcar; b) Dessedentação animal contra pastagem; c) Irrigação agrícola contra cana-de-açúcar; d) Irrigação agrícola contra pastagens na bacia hidrográfica do rio Tietê.....	127
Figura 50. Comparações entre vazões simuladas e vazões observadas na bacia hidrográfica do rio Tietê.....	130
Figura 51. Comparativo entre vazões observadas e simuladas para a bacia hidrográfica do rio Tietê.....	131
Figura 52. Comparativo de vazões simuladas para uso constante (1985), uso dinâmico, e diferença percentual entre as mesmas para a bacia hidrográfica do rio Tietê	132
Figura 53. Diferença percentual entre escoamento superficial para o uso constante (1985) e para uso dinâmico para a bacia hidrográfica do rio Tietê.....	132
Figura 54. Parcela de usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica do rio Tietê	134
Figura 55. Séries históricas de usos da água na bacia hidrográfica do rio Tietê....	135

Figura 56. Divisão em subbacias na bacia hidrográfica Complementar	136
Figura 57. Postos fluviométricos da bacia hidrográfica Complementar	137
Figura 58. SSI12 de cada posto fluviométrico na área de estudo para a) Campo Alegre; b) UHE Caçu; c) Canastra; d) UHE Eng. Jose Muller Montante Itaguaçu; e) UHE Salto do Rio Verdinho; f) Itajá; g) Ponte São Domingos; h) Porto Galeano; i) UHE Ilha Solteira; j) UHE Jupia na bacia hidrográfica Complementar.....	138
Figura 59. Correlação entre uso-ocupação do solo e SSI para a) Formação florestal; b) Formação savânica c) Formação campestre; d) Silvicultura; e) Pastagens; f) Cana-de-açúcar; g) Agricultura; h) Área urbana; i) Solo descoberto na bacia hidrográfica Complementar.....	139
Figura 60. Correlação entre uso da água e SSI para a) Abastecimento humano; b) Industrial; c) Irrigação agrícola; d) Dessedentação animal; e) Mineração.....	141
Figura 61. Correlações entre usos da água e usos e ocupações do solo para: a) Dessedentação animal contra cana-de-açúcar; b) Dessedentação animal contra pastagem; c) Irrigação agrícola contra cana-de-açúcar d); Irrigação agrícola contra pastagens, para a bacia hidrográfica Complementar.	142
Figura 62. Usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica Complementar	144
Figura 63. Usos da água em atividades econômicas na bacia Complementar	145
Figura 64. Correlação cruzada positiva entre SPI3 da Primavera e usos e ocupações do solo. <i>Lags</i> negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. <i>Lags</i> positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações	148
Figura 65. Correlação cruzada positiva entre SPI3 do Verão e usos e ocupações. <i>Lags</i> negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. <i>Lags</i> positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações.	149
Figura 66. Correlação cruzada positiva entre SPI3 do Outono e usos e ocupações do solo. <i>Lags</i> negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. <i>Lags</i> positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações.....	150
Figura 67. Correlação cruzada positiva entre SPI3 do Inverno e usos e ocupações do solo. <i>Lags</i> negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. <i>Lags</i> positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações.....	152

Figura 68. Correlação cruzada negativa entre SPI3 da Primavera e usos e ocupações. <i>Lags</i> negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. <i>Lags</i> positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações	153
Figura 69. Correlação cruzada negativa entre SPI3 do Verão e usos e ocupações. <i>Lags</i> negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. <i>Lags</i> positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações.	154
Figura 70. Correlação cruzada negativa entre SPI3 do Outono e usos e ocupações do solo. <i>Lags</i> negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. <i>Lags</i> positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações.	156
Figura 71. Correlação cruzada negativa entre SPI3 do Inverno e usos e ocupações. <i>Lags</i> negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. <i>Lags</i> positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações.	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Métricas utilizadas e a qualificação de seus intervalos	65
Tabela 2. Variância explicada das REOF retidas para cada período (%)	70
Tabela 3. Siglas para os respectivos usos e ocupações do solo na bacia do CHURB	84
Tabela 4. Intervalo dos parâmetros iniciais de calibração	85
Tabela 5. Postos fluviométricos na bacia do rio Grande	87
Tabela 6. Métricas de cada posto fluviométrico para a calibração do modelo hidrológico na bacia hidrográfica do rio Grande	96
Tabela 7. Métricas cada posto fluviométrico na validação do modelo na bacia hidrográfica do rio Grande	96
Tabela 8. Parâmetros calibrados e validados para o modelo hidrológico da bacia hidrográfica do rio Grande	97
Tabela 9. Postos fluviométricos utilizados para avaliação da bacia hidrográfica do rio Paranaíba	106
Tabela 10. Métricas de cada posto fluviométrico para a calibração do modelo na bacia hidrográfica do rio Grande	113
Tabela 11. Métricas de cada posto fluviométrico na validação do modelo na bacia hidrográfica do rio Paranaíba	114
Tabela 12. Parâmetros calibrados e validados para bacia hidrográfica do rio Paranaíba	114
Tabela 13. Postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Tietê	122
Tabela 14. Métricas de cada posto fluviométrico da bacia hidrográfica do Tietê na etapa de calibração	128
Tabela 15. Métricas de cada posto fluviométrico da bacia hidrográfica do Tietê na etapa de validação	129
Tabela 16. Parâmetros calibrados e validados para a bacia hidrográfica do rio Tietê	129
Tabela 17. Postos fluviométricos na bacia do rio Grande	137
Tabela 18. Métricas de cada posto fluviométrico na calibração do modelo hidrológico da bacia Complementar	143

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Constantes utilizadas no equacionamento do SPI.....	30
Quadro 2. Classificação de intensidade do SPI.....	31

ABREVIATURAS

AAO: *Antarctic Oscillation*

ANA: Agência Nacional de Águas e Abastecimento

AMO: *Atlantic Multidecenal Oscillation*

ASTGTM v002: ASTER Global Digital Elevation Model) Versão 2, Coleção Terra Aster, sensor ASTER

CAPES: Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal de Nível Superior

CFSR: *Climate Forecast System Analysis*

CHIRPS: *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station Data*

CHURB: Complexo Hidrelétrico Urubupungá

CPRM: Serviço Geológico do Brasil

CWT: *Continuous Wavelet Transform*

DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo

ECOMAG: *Ecological model for Applied Geophysics*

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ENSO: *El-Niño Southern Oscillation*

EOF: Empirical Orthogonal Function

FECFAU: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

HBV: *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* Model

HRU: *Hydrological Response Units*

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGAM: Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

KGE: eficiência de Klinge-Gupta

LLJ: *Low-Level Jet*

Mac-PDM.09: *Macro-Scale Probability-Distributed Moisture model.09*

MAPBIOMAS: Plataforma MapBiomass

MK: Teste de Mann-Kendall

MMK: Teste de Mann-Kendall Modificado

NAO: *North Atlantic Oscillation*

NCEP: *National Centers for Environmental Prediction*

NDVI: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada

NOAA: *National Oceanic Atmospheric Administration*

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico

NSE: Eficiência Nash-Sutcliffe

PBIAS: Percentual Bias

PCA: *Principal Component Analysis*

PDM: *Probability-Distributed Model ou Macro-Scale Probability-Distributed Moisture model.09 (Mac-PDM.09)*

PDO: *Pacific Decadal Oscillation*

PDSI: Índice Palmer de Severidade de Seca

REOF: *Empirical Orthogonal Function* rotacionadas

SACZ: *South Atlantic Convergence Zone*

SAM: *Southern Annular Mode*

SEN: Estimador de Theil-Sen

SNIRH: Sistema Nacional de informações sobre Recursos Hídricos

SOI: *Southern Oscillation Index*

SPEI: *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*

SPI: *Standardized Precipitation Index*

SSI: *Standardized Streamflow Index*

SWAT: *Soil and Water Assessment Tool*

SWIM: *Soil and Water Integrated Model*

TPI: *Trans-Polar Index*

UHE: Usina Hidrelétrica

USGS: *United States Geological Survey*

VIC: *Variable Infiltration Capacity*

XWT: *Cross-Wavelet Transform*

ZACS: Zonas de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
2. OBJETIVOS	26
2.1. Objetivo geral	26
2.2. Objetivos específicos	26
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
3.1. Precipitações e sistemas atmosféricos de larga escala	27
3.1.1. Padronização de precipitações.....	27
3.1.2. Detecção de padrões em regimes de precipitações	31
3.1.3. Tendências em séries históricas de precipitação	34
3.1.4. Intensidade de modificações em séries históricas.....	36
3.1.5. Mudanças de regime em séries históricas de precipitação	37
3.1.6. Análise de frequência em séries históricas de precipitação	39
3.1.7. Índices atmosféricos de larga escala.....	40
3.2. Usos e ocupações do solo, usos da água e balanço hídrico.....	44
3.2.1. Modelagem hidrológica através do <i>Soil & Water Assessment Tool</i> (SWAT)	47
3.2.2. Avaliação de usos e ocupações do solo, usos da água e balanço hídrico por correlacionamento de variáveis	48
3.3. Relação temporal entre precipitações e usos e ocupações do solo.....	49
4. ÁREA DE ESTUDO	51
5. MATERIAIS E MÉTODOS	57
5.1. Banco de dados	57
5.2. Estudo de precipitações e seu relacionamento com sistemas atmosféricos de larga escala	59
5.2.1. Indexação de precipitações	60
5.2.2. Identificação de padrões espaço-temporais de precipitação	61

5.2.3.	Identificação de tendências em séries históricas.....	62
5.2.4.	Detecção de períodos secos e úmidos.....	62
5.2.5.	Avaliação de influência de sistemas atmosféricos de larga escala sobre regimes de precipitações	62
5.3.	Impactos de modificações de usos e ocupações do solo e usos da água no balanço hídrico	63
5.3.1.	Modelagem hidrológica.....	64
5.3.2.	Correlações entre usos e ocupações do solo, usos da água e disponibilidade hídrica.....	65
5.4.	Relacionamento entre totais precipitados e modificações no uso e ocupação do solo	66
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
6.1.	Variabilidades espaço-temporais de precipitações	68
6.1.1.	Avaliação de padrões espaço-temporais de precipitação.....	70
6.1.2.	Espacialização das tendências na área de estudo para o período seco	74
6.1.3.	Análise de periodicidades em padrões temporais	75
6.1.4.	Teleconexões entre fenômenos atmosféricos de larga escala e regimes de precipitação.....	79
6.2.	Evidências de impactos do uso e ocupação do solo no balanço hídrico.....	82
6.2.1.	Bacia hidrográfica do Rio Grande.....	85
6.2.1.1.	Interdependências entre usos e ocupações do solo, usos da água e disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Grande	85
6.2.1.2.	Impactos do uso e ocupação do solo na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Grande	95
6.2.1.3.	Séries temporais de uso e ocupação do solo e de usos da água na bacia do rio Grande	101
6.2.2.	Bacia hidrográfica do Rio Paranaíba	104

6.2.2.1.	Interdependências entre usos e ocupações do solo, usos da água e disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Paranaíba.....	104
6.2.2.2.	Impactos do uso e ocupação do solo na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Paranaíba.....	113
6.2.2.3.	Séries temporais de uso e ocupação do solo e de usos da água na bacia hidrográfica do rio Paranaíba.....	118
6.2.3.	Bacia hidrográfica do Rio Tietê.....	121
6.2.3.1.	Interdependências entre usos e ocupações do solo, usos da água e disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Tietê	121
6.2.3.2.	Impactos do uso e ocupação do solo na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Tietê	128
6.2.3.3.	Séries temporais de uso e ocupação do solo e de usos da água na bacia hidrográfica do rio Tietê	133
6.2.4.	Bacia hidrográfica Complementar.....	135
6.2.4.1.	Interdependências entre usos e ocupações do solo, usos da água e disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica Complementar.....	138
6.2.4.2.	Impactos do uso e ocupação do solo na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica Complementar	143
6.2.4.3.	Séries temporais de uso e ocupação do solo e de usos da água na bacia hidrográfica Complementar	144
6.3.	Integração de precipitações e usos e ocupações do solo	146
6.3.1.	Correlações positivas	147
6.3.2.	Correlações negativas	153
7.	CONCLUSÕES	158
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160

1. INTRODUÇÃO

Em todo mundo, os avanços tecnológicos e o gradativo crescimento demográfico têm forçado nações e organismos internacionais a buscar alternativas para manter o desenvolvimento econômico e tecnológico sem aumentar a agressividade do uso de recursos naturais. Em termos de recursos naturais, o desenvolvimento sustentável exige que as gerações posteriores não enfrentem maiores restrições na utilização dos recursos do que a geração atual (JOWSEY, 2012). Dentre os recursos naturais utilizados, os recursos hídricos têm destaque por seu papel na sociedade, com presença desde a diária dessedentação humana até o diversificado uso econômico como matéria-prima em produções de larga-escala. De acordo com Nguyen, Nguyen e Nguyen (2023) e Trinh (2018), em um contexto de crescentes mudanças climáticas, o gerenciamento dos recursos hídricos tem sido desafiador para as agências governamentais. Logo, a garantia de segurança hídrica para os usuários em uma bacia hidrográfica torna-se cada vez mais incerta.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2023) apontou que o uso consuntivo da água tem aumentado gradativamente, passando de uma estimativa de 509 m³/s em 1985 para uma estimativa de 1196 m³/s em 2022. No ano de 2023, foi observado que a região hidrográfica da bacia do Paraná concentrou as maiores vazões de retirada (30%) e consumo de água (23%) do país. As mudanças no uso e ocupação do solo no Brasil também merecem atenção. De acordo com a Plataforma MapBiomas (MAPBIOMAS, 2023), o uso do solo brasileiro para atividades econômicas passou de 22% em 1985 para 33% em 2022. Ainda, de acordo com este levantamento, tais mudanças são provenientes, principalmente, de diversas atividades agropecuárias, as quais, desde o início da série histórica, representam mais de 90% do uso e ocupação do solo para atividades econômicas. De acordo com Seo e Mendelsohn (2008) e Zhang et al. (2022a), a economia dos países sul-americanos está fortemente ligada ao setor agrícola.

No contexto dos recursos hídricos, a precipitação é uma variável de destaque, visto que a disponibilidade hídrica em um determinado sistema está ligada às alturas pluviométricas que chegam à superfície terrestre em uma determinada escala temporal. Por tratar-se de um fenômeno físico que varia no espaço e no tempo, a análise espaço-temporal de precipitações apresenta-se como uma alternativa estratégica para descrever padrões e comportamentos da mesma. A indexação de precipitações é fartamente observada na literatura como procedimento auxiliar às análises mais aprofundadas dos

dados pluviométricos da bacia estudada. No entanto, de acordo com Wu et al. (2020), é uma tarefa árdua entender os comportamentos espaço-temporais de precipitações apenas por processos mais simples, como a indexação de séries históricas. A dimensão espacial da bacia também pode ser um fator complicador para tais análises simplificadas. De acordo com Carvalho, Jones e Liebmann (2004), uma característica marcante das precipitações na América do Sul é a grande variabilidade no espaço e no tempo. Nesse sentido, a investigação espaço-temporal de precipitações por meio de análises multivariadas de dados se mostra um processo relevante em bacias hidrográficas de grande porte.

Para além dos padrões espaço-temporais de precipitações, é interessante avaliar fatores externos que podem afetar os regimes de precipitações em uma bacia hidrográfica, com tais relacionamentos sendo denominados teleconexões. Eventos atmosféricos de larga-escala, como o El-Niño-Oscilação Sul (ENSO – do inglês *El-Niño Southern Oscillation*) e oscilações oceânicas têm sido amplamente analisados como fatores influentes em regimes de precipitações (MASON; GODDARD, 2001; SHIMIZU; AMBRIZZI, 2016). Os fenômenos atmosféricos de larga escala, com frequência, são associados às mudanças climáticas analisadas em escala global (SUN et al., 2017). Nessa circunstância, o entendimento das teleconexões nas bacias hidrográficas é importante na identificação de evidências de como as mudanças climáticas de característica global afetam uma região hidrográfica específica.

A modificação plural do solo, tal como as precipitações, também é considerada uma variável de interesse dentro do gerenciamento dos recursos hídricos. De acordo com Lathuillière, Coe e Johnson (2016) e Levy et al. (2018), no continente sul-americano, o Brasil foi o país que mais foi impactado pelo processo de desmatamento, tendo esse processo ocorrido nas fronteiras agropecuárias do país. No Brasil, as fronteiras agropecuárias têm tido forte expansão na região Centro-Oeste e na região Norte (AHMADI-SANI; RAZAGHNIA; PUKKALA, 2022). Adicionalmente, as áreas agrícolas da região Sudeste têm passado por transformações, com a substituição de áreas de pastagem por áreas de cana-de-açúcar, conforme apontado por Youlton al. (2016). Seja pela inserção de sistemas irrigantes em culturas agrícolas, seja pela alteração da infiltração no solo por conta da mudança em sua cobertura, o balanço hídrico na bacia hidrográfica acaba sendo diretamente afetado.

As diversas demandas de recursos hídricos para utilização em atividades econômicas também dependem da disponibilidade hídrica vigente na bacia hidrográfica. Na agricultura, com a inserção da irrigação no processo agrícola e com o aumento das áreas

para essa atividade, as vazões demandadas foram aumentando progressivamente com o tempo (BELLEZONI et al., 2018). A indústria, por vezes ligada ao setor agrícola, é elemento forte na economia brasileira sendo um setor que exige não só uma destacada demanda por vazões, mas, também, um direcionamento para o lançamento de seus efluentes líquidos em cursos d'água. Entender o comportamento das séries históricas de cada uso e ocupação do solo, bem como seu impacto na disponibilidade hídrica, pode melhorar a capacidade de planejamento do uso da água, bem como auxiliar na previsão de impactos de cada ação.

Este trabalho examina as influências de duas diferentes escalas espaciais, a de usos e ocupações do solo e a de fenômenos atmosféricos de larga escala, sobre o comportamento de precipitações e balanço hídrico na Bacia Hidrográfica do Complexo Hidrelétrico Urubupungá. A compreensão das interdependências hídricas entre precipitações, mudanças no uso e ocupação do solo tem potencial para contribuir para a qualidade do gerenciamento de recursos hídricos e no entendimento do balanço hídrico. Também é importante considerar a influência de fenômenos atmosféricos de larga escala no ciclo hidrológico local. Com o acesso às séries históricas das variáveis citadas, é possível identificar se há atraso ou adiantamento (*lags*) entre precipitações e usos e ocupações do solo, gerando evidências de efeitos de uma variável sobre a outra. Diante de tal quadro, também se abre a possibilidade da espacialização das relações entre séries históricas de precipitações e usos e ocupações do solo. Esta espacialização pode contribuir para a identificação de situações localizadas, bem como sua incorporação no planejamento de uso dos recursos hídricos, pois o balanço hídrico é diretamente afetado por este relacionamento.

Dados os diversos horizontes abertos ao se estudar a parte alta da bacia hidrográfica do rio Paraná, a complexidade econômica, o número de habitantes e as mudanças no uso e ocupação do solo nessa área, é fundamental investigar os processos que podem afetar a disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica. Apontar as eficiências e as perturbações deste sistema servirá de base para estudos em outras bacias que possuam complexidades encontradas nesta bacia hidrográfica. Para avaliação das relações entre estas variáveis, as quais são caras ao ciclo hidrológico, serão investigados os comportamentos espaço-temporais das precipitações, suas tendências e a relação de periodicidades entre as mesmas para com fenômenos atmosféricos de larga escala. Para o uso e ocupação do solo, seus impactos no balanço hídrico serão avaliados a partir da modelagem hidrológica do escoamento superficial e, posteriormente, a comparação entre

o cenário de modificações dinâmicas na cobertura vegetal e um cenário de estabilidade. Por fim, as relações entre séries históricas de precipitações e usos e ocupações do solo serão avaliadas, buscando detectar a existência de *lags* entre as séries históricas, bem como a distribuição espacial destes *lags*.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Examinar regimes de precipitações, avaliar consequências dos impactos de usos e ocupações do solo no balanço hídrico e identificar evidências de relacionamento direto entre precipitações e usos e ocupações do solo.

2.2. Objetivos específicos

- Identificar padrões espaço-temporais em séries históricas de dados de precipitação indexados para distintas janelas históricas, bem como suas relações com fenômenos atmosféricos de larga escala;
- Investigar interdependências hídricas e efeitos de mudanças e ocupações do solo no balanço hídrico;
- Relacionar séries históricas de precipitação e de usos e ocupações do solo a partir da possível existência de *lags* entre estas variáveis;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Precipitações e sistemas atmosféricos de larga escala

As precipitações podem ser consideradas produtos da condensação de vapor d'água na atmosfera e que, em algum momento, tocam a superfície terrestre. Sua ocorrência é parte fundamental do ciclo hidrológico, e sua mensuração é indispensável para a garantia da segurança hídrica de bacias hidrográficas. Comumente, a aferição da precipitação se dá em escala temporal diária, podendo ser feita de forma exclusiva, por meio de estações pluviométricas, ou junto à aferição de outras variáveis, como a temperatura, em estações meteorológicas.

3.1.1. Padronização de precipitações

A fim de se obter a melhor função de probabilidade para séries históricas em diferentes escalas, bem como facilitar o cômputo dos dados de precipitação, lança-se mão da indexação das séries históricas. De acordo com Guttman (1999), inicialmente, as primeiras indexações eram efetuadas através do Índice Palmer de Severidade de Seca (PDSI – do inglês *Palmer Drought Severity Index*), a fim de se identificar secas meteorológicas. Posteriormente, McKee, Doesken e Kleist (1993) desenvolveram o índice de precipitação padronizada (SPI – do inglês *Standardized Precipitation Index*), objetivando melhorar a forma de identificar períodos secos e úmidos através de séries históricas. Buscando entender de maneira aprofundada períodos úmidos e de estiagem, Vicente-Serrano, Begueria e Lopez-Moreno (2010) acoplaram séries históricas de dados de temperatura e de evapotranspiração potencial (ETP) ao cálculo do SPI, formulando, então, o Índice de SPEI. Ao comparar índices para monitoramento de secas, Vicente-Serrano (2012) observou que, ao abrigar dados de ETP, o SPEI teve performance melhor. No entanto, o índice é sensível ao cálculo/aferição da ETP e, nesse contexto, se faz necessária uma boa distribuição de estações meteorológicas na área estudada.

No Brasil, a malha pluviométrica é consideravelmente mais bem distribuída do que a malha de dados climáticos de temperatura, pressão, velocidade do vento e radiação solar. Logo, a utilização de dados de ETP ou de temperatura dependeria de dados

sintéticos, como os fornecidos pelo CFSR (FUKA et al., 2014). No entanto, em modelagem hidrológica em uma bacia de pequeno porte, Bressiani et al. (2015) concluíram que os dados observados produzem uma melhor qualidade em relação à malha de dados sintéticos. Logo, para a investigação de precipitações, a opção da utilização apenas do SPI torna-se mais adequada.

A utilização do SPI tem sido amplamente documentada na literatura. Sua função principal tem sido a de, através da indexação de séries históricas de precipitações, auxiliar análises estatísticas aprofundadas de fenômenos de estiagem ou de umidade em escalas temporais diversas. Xu et al. (2015) utilizaram o SPI como auxílio a análises espaço-temporais de fenômenos de seca na China, enquanto Wang et al. (2021) utilizou o índice para monitorar a forma como que uma estiagem meteorológica se propaga para uma estiagem hidrológica na bacia hidrológica do rio Huaihe, China. De acordo com a *World Meteorological Organization* (WMO) (2017), a escala temporal de três meses (SPI3) é adequada para avaliar as condições de umidade do solo e sazonalidades nas precipitações. A escala temporal de 6 meses (SPI6) permite a avaliação de tendências sazonais de médio prazo na série histórica. Escalas temporais maiores ou superiores a 12 meses refletem comportamentos de longo prazo em séries históricas. A utilização de escalas temporais pode se dar de maneira individual, como o SPI3 por Fu et al. (2018), ou de maneira simultânea, como o uso do SPI3, SPI6, SPI18 e SPI24 por Mohammadi (2023). Ainda de acordo com a WMO, para uma análise adequada de séries históricas a partir do SPI, é ideal que o comprimento de série histórica seja maior ou igual a 30 anos.

Para o cálculo deste índice, é necessário que se determine a função densidade de probabilidade para cada posto pluviométrico. Primeiramente, a precipitação é convertida em uma função log-normal de valor U , dado pela Equação 1 e, na sequência, é utilizado o fator de forma β e o fator de escala α , dados pela Equação 2 e Equação 3, respectivamente.

$$U = \ln(\bar{X}) - \frac{\ln(X)}{N} \quad \text{Equação 1}$$

$$\beta = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4U}{3}}}{4U} \quad \text{Equação 2}$$

$$\alpha = \frac{\bar{X}}{\beta}$$

Equação 3

X é o valor de precipitação, $\bar{X}$ é precipitação média e N é o número de observações.

A função densidade de probabilidade Gama é dada pela Equação 4.

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

Equação 4

em x é o dado de precipitação e $\Gamma(\alpha)$ é a função Gama.

A função *Gamma* não tem definição para $x=0$, portanto, a probabilidade cumulativa é dada pela Equação 5.

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

Equação 5

Sendo q a probabilidade do valor precipitado ser zero.

Portanto, a função cumulativa $H(x)$ é transformada em uma variável aleatória padrão com média zero e variância igual a um. Os valores de Z são apresentados de acordo com as Equação 6 e 7.

$$Z = SPI = -(t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3})$$

Equação 6

Para $0 < H(x) \leq 0,5$.

$$Z = SPI = +(t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3})$$

Equação 7

Para $0,5 < H(x) \leq 1$.

Com relação à variável t , esta é descrita na Equação 8 e na Equação 9.

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{H(x)^2}\right)}$$
Equação 8

Para $0 < H(x) \leq 0,5$.

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)}$$
Equação 9

Para $0,5 < H(x) \leq 1$.

Com relação às constantes das Equações 8 e 9, as mesmas devem ser encontradas a partir da distribuição de probabilidade que melhor se adequa aos dados de precipitação. Neste trabalho, foi utilizada a distribuição *Gamma*, por se tratar de uma escolha amplamente utilizada. (SVENSSON; HANNAFORD; PROSDOCIMI, 2017; WU, 2022)

Com relação às constantes da Equação 8 e 9, estas foram estimadas por Abramowitz e Stegun (1974), e estão identificadas no Quadro 1.

Quadro 1. Constantes utilizadas no equacionamento do SPI

Constante	Valor
c₀	2,515517
c₁	0,802853
c₂	0,010328
d₁	1,432788
d₂	0,189269
d₃	0,001308

As faixas de intensidade do SPI podem assumir valores positivos ou negativos, dependendo da pluviosidade. O SPI é classificado de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2. Classificação de intensidade do SPI

Fonte: WMO (2012)

CLASSES DE SPI	
Extremo Úmido	+2,00 ou mais
Severo Úmido	+1,50 a +1,99
Moderado úmido	+1,00 a +1,49
Normal	-0,99 a +0,99
Moderado Seco	-1,00 a -1,49
Severo Seco	-1,50 a -1,99
Extremo Seco	-2,00 ou menos

3.1.2. Detecção de padrões em regimes de precipitações

A presença de mais de um posto pluviométrico é fato observado em bacias hidrográficas de pequeno porte. A disposição de postos pluviométricos em partes distintas de uma bacia hidrográfica implica em distintos totais precipitados aferidos. Conforme a dimensão da bacia aumenta, é possível que regiões geograficamente distantes apresentem séries históricas com comportamentos diferentes. Nesse sentido, a utilização de modelos geoestatísticos aplicados a dados de precipitação se apresenta como alternativa interessante para avaliar características espaço-temporais de séries históricas de precipitações.

Um levantamento sobre abordagens geoestatísticas que levassem em conta as precipitações foi efetuado por Kyriakidis e Journel (1999). Neste estudo, os autores apontam que as análises multivariadas podem focar na abordagem de séries históricas espacialmente distintas. Entre as análises multivariadas utilizadas para avaliação de comportamentos de séries históricas de precipitação, destacam-se a análise de cluster e a análise de componentes principais (PANT et al., 2020; SANTOS et al., 2021). A análise de cluster permite o agrupamento de dados homogêneos, levando em consideração, à priori, a massa completa de dados (JOLLIFFE, 2011). Ao avaliar as estações pluviométricas provenientes do CEMADEN dispostas no Brasil, Lemos et al. (2023) lançaram mão da clusterização para avaliar características espaço-temporais. Neste estudo, os autores

identificaram que o tempo mínimo entre eventos de precipitação maior que 1 mm influencia fortemente as propriedades espaço-temporais das precipitações, e tais eventos ocorreram, majoritariamente, na parte litorânea da região Nordeste. No estudo de Gomes e Lima (2021), a análise de cluster foi utilizada para subdividir a região Nordeste, Brasil, de acordo com a climatologia pluviométrica mensal. No entanto, dentro da massa de dados, com frequência, há uma parcela que não contribui para o estabelecimento de relações no espaço e no tempo. De acordo com Jolliffe (2011), a redução de dimensionalidade proporcionada pela Análise de Componentes Principais (PCA – do inglês *Principal Component Analysis*) é uma das formas de extração de informações de um banco de dados de grande porte. Quando aplicada ao campo das análises hidrometeorológicas, se faz necessário levar em conta tanto o contexto temporal como o contexto espacial. Nesse sentido, as funções ortogonais empíricas (EOF – do inglês *Empirical Orthogonal Function*) se tornam interessantes, pois elas têm como característica a redução de informações e a análise de variabilidades tanto no espaço como no tempo, sendo, muitas vezes, tomadas como a PCA aplicada a dados meteorológicos/climáticos (AUBREY, 1979; HOUSER et al., 2022; JOLLIFFE, 2011). Para aplicação da EOF, a forma e a disposição da bacia hidrográfica são variáveis relevantes. De acordo com Jolliffe (2011), a qualidade da análise EOF está atrelada à uniformidade da distribuição das estações meteorológicas que contém os dados de precipitação. Ainda de acordo com o autor, a situação ideal para aplicação das EOF se daria em uma distribuição regular de postos hidrometeorológicos. No entanto, tal situação é, virtualmente, impossível. Para tanto, é recorrente na bibliografia o uso de dados globais estimados em alta resolução, como os dados climáticos estimados pelo GPCC, CRU, CFSR, e APHRODITE (EINI et al., 2019; LIU; CAO; LI, 2024; TORSRI et al., 2022). No entanto, as estimativas de precipitações por parte de dados sintéticos tendem a ser subestimadas quando comparadas com dados observados (GOODARZI; POOLADI; NIAZKAR, 2022). Nesse sentido, a utilização de dados pluviométricos observados se faz interessante, caso exista uma distribuição uniforme de postos pluviométricos.

A aplicação da EOF para avaliação espaço-temporal de precipitações e para examinar variabilidades em dinâmicas atmosféricas tem ampla aceitação na literatura. Ao aplicar a EOF para encontrar a padrões de precipitações globais para cenários futuro, Lu et al. (2019) identificaram que, para os diversos cenários futuros, há tendência de redução nos totais precipitados em regiões do continente sul-americano, África e Oceania. No Brasil, a aplicação da EOF ocorreu com a utilização de dados sintéticos (DE LIMA; ANDREOLI; KAYANO, 2018; LAUREANTI et al., 2024; RAMIREZ GUTIERREZ et al., 2009), não

havendo utilização da EOF para avaliação de padrões espaço-temporais de precipitação em dados de precipitação observados. Devido à boa aceitação da metodologia, à importância das atividades econômicas localizadas na parte alta da bacia do rio Paraná e para o entendimento dos padrões espaço-temporais de precipitação através de dados observados, a aplicação da EOF sobre séries históricas de estações terrestres se torna ferramenta interessante.

Com os dados pluviométricos e suas localizações temporais disponíveis, aplica-se o método EOF através da decomposição de valores singulares SVD (do inglês *Singular Value Decomposition*) (JOLLIFFE, 2011). Partindo de uma matriz Z $n \times m$, que contém valores de SPIs de diferentes escalas temporais, a mesma é decomposta em submatrizes, como observado na Equação 10.

$$Z_{(x,y,t)} = \sum_{k=1}^n PC_{(t)} EOF_{(x,y)} \quad \text{Equação 10}$$

A matriz Z está em função do tempo t e da localização geográfica x e y . A componente espacial PC (componente principal) está em função do tempo t , enquanto a componente espacial EOF está em função da localização do posto pluviométrico (x,y) . O número de padrões espaço-temporais relevantes a serem analisados, é determinado através da Regra de Ouro de North (NORTH et al., 1982). Cada padrão espaço-temporal é ortogonal em relação ao outro (JOLLIFFE, 2011). Para maximizar a quantidade de informações nos padrões mais relevantes e reduzir a quantidade de informações nos padrões menos relevantes, retira-se a restrição de ortogonalidade ao aplicar rotações sobre as componentes principais. Tal rotação é feita através da técnica *varimax* (KAISER, 1958). Para relaxamento das condições de ortogonalidade e aumento na variância entre as EOFs consideradas significantes pela regra de ouro de North, é possível rotacionar as componentes com *varimax* nos padrões espaciais, tal como apresentado por Jolliffe, (2011). A técnica *varimax* tem sido utilizada com frequência junto à aplicação da EOF para rotacionar os padrões que mais acumulam informações, como em Lian e Chen (2012) na análise de padrões espaço-temporais de precipitações em regiões áridas da China. Também na China, a técnica *varimax* foi aplicada para análise de precipitações na bacia hidrográfica do Lago Poyang.

3.1.3. Tendências em séries históricas de precipitação

Para a avaliação de precipitações em uma área de estudo, também se leva em consideração as tendências em séries históricas de seus postos pluviométricos. Para tanto, é possível a análise por métodos paramétricos ou não-paramétricos. De acordo com Gopakali et al. (2023), entre os métodos paramétricos e não paramétricos conhecidos, destacam-se a regressão linear múltipla e o método dos mínimos quadrados (métodos paramétricos), teste de Mann-Kendall (MK) (KENDALL, 1948; MANN, 1945) e Coeficiente de correlação Spearman (métodos não-paramétricos). De acordo com Chen et al., (2023) e Serago e Vogel (2018), as regressões lineares múltiplas podem identificar tendências com maior acurácia do que métodos não-paramétricos. A qualidade das regressões lineares e dos mínimos quadrados foi comparada à qualidade da análise de Mann-Kendall por Muhlbauer, Spichtinger e Lohmann (2009), identificando que as regressões lineares tem um desempenho tão bom quanto o método não-paramétrico de Mann-Kendall, e superior ao método dos mínimos quadrados. De acordo com Gocic e Trajkovic (2013), os métodos paramétricos exigem independência e normalidade no conjunto de dados, enquanto métodos não-paramétricos exigem apenas a independência dos dados. Logo, a utilização dos métodos não-paramétricos mostra-se como mais viável em relação aos métodos paramétricos. Embora exista a aplicação em conjunto dos métodos não-paramétricos Mann-Kendall e coeficiente de Spearman, como em Goswami e Prasad (2023). No entanto, com relação aos métodos não-paramétricos para análise de tendências, a utilização do Teste de Mann-Kendall para detecção de tendências em séries históricas ocorre de forma superior à utilização do coeficiente de Spearman.

A larga aplicação no campo das ciências meteorológicas faz com que o MK seja interessante para detecção de tendências em séries históricas de dados pluviométricos. O levantamento de hipóteses a respeito da utilização MK sobre séries históricas de dados hidrológicos foi efetuado por (HAMED, 2008). A versatilidade do MK em áreas de tamanhos distintas também é notável. Ao aplicar o MK em séries históricas de dados de precipitações sintéticos provenientes da malha global de precipitações do CGCM, Westra, Alexander and Zwiers (2013) detectaram que dois terços das estações sintéticas globais mostraram tendência de incremento dos totais precipitados. Em escala continental, Jin et al. (2019) utilizaram o MK a fim de avaliar as características de períodos secos em regiões altas da Mongólia.

O teste para avaliação de tendências inicia-se pela Equação 11.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad \text{Equação 11}$$

em que, para um determinado número de observações n , x corresponde ao valor de cada observação nos postos pluviométricos. A função sinal para o teste de Mann-Kendall resume seu valor de acordo com a Equação 12.

$$\text{sgn} = \begin{cases} 1, \text{ se } x_j - x_i > 0 \\ 0, \text{ se } x_j - x_i = 0 \\ -1, \text{ se } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad \text{Equação 12}$$

Para o cálculo da variância da variável estatística S , a qual obedece a uma distribuição normal com média igual a 0, temos a Equação 13.

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18} \quad \text{Equação 13}$$

em que, n é o número de observações e t é o número de observações de valor igual no grupo. Nesse contexto, a estatística do teste é dada pela Equação 14.

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma}, & (S > 0) \\ 0, & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sigma}, & (S < 0) \end{cases} \quad \text{Equação 14}$$

Para um determinado nível de significância α , as tendências das séries originais terão tendência de crescimento ou decrescimento caso $Z_c \geq Z_{1-\alpha/2}$ ou $Z_c \leq Z_{1-\alpha/2}$ ocorra dentro do intervalo citado.

Conforme já mencionado acima, o Teste de Mann-Kendall é um teste não-paramétrico, e a condição para aplicação do teste é que a série de dados seja independente. Para tanto, Hamed e Ramachandra Rao (1998), objetivando eliminar os

efeitos da autocorrelação, desenvolveram um fator de correção embutido ao teste de Mann-Kendall original, originando o Teste de Mann-Kendall Modificado (MMK, do inglês *Modified Mann-Kendall Test*). O uso do MMK é recente na literatura, tendo sido utilizado por Nawaz, Iqbal e Mahmood (2021) aplicaram o MMK sobre dados sintéticos de precipitação do banco de dados do *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station Data* (CHIRPS) para avaliar tendências no Paquistão entre os anos de 1981 e 2018. Na parcela brasileira da bacia do rio Paraná Abou Rafee et al. (2020) observou tendências significativas em séries históricas de precipitações para cada uma das estações do ano.

A aplicação do MMK também encontra uso quando aplicado a séries históricas de SPI em diversas escalas temporais. Analisando padrões de seca em épocas de monções a partir de precipitações padronizadas, para escalas temporais anuais, Aon e Biswas (2023) não detectaram tendências significantivas nos meses de monções em regiões semiáridas da parte alta da bacia hidrográfica do rio Kangsabati, Índia. Ao avaliar precipitações na região do Asir, Arábia Saudita, Alsubih et al. (2021) que utilizaram o MMK sobre séries históricas de SPI para escalas semestrais em uma janela histórica entre 1970 e 2017, e detectaram que, na maior parte das estações analisadas, houve um crescimento das estiagens. De maneira geral, há uma escassez de estudos de tendências em séries históricas de dados observados, em virtude da concentração de estudos envolvendo séries históricas sintéticas. Nesse sentido, a aplicação do MMK se faz interessante, principalmente em áreas de grande porte e de alta relevância econômica, como, por exemplo, a parte alta da bacia hidrográfica do rio Paraná.

3.1.4. Intensidade de modificações em séries históricas

Atrelada à identificação de tendências, a mensuração da intensidade/magnitude tem sido considerada importante na avaliação de precipitações em bacias hidrográficas. Para tanto, buscou-se estabelecer uma métrica para avaliar o quão intensa é a tendência na série histórica de dados. O Estimador de Theil-Sen (SEN, 1968; THEIL, 1992) tem sido utilizado com frequência em associação com a análise de tendência a partir do MK e do MMK, objetivando complementá-las. Ao analisar tendências anuais e sazonais em séries históricas de precipitações observadas no delta do rio Yang-Tzé, China, Wang et al. (2020) utilizaram o estimador de Theil-Sen junto ao MK. Em Malik e Kumar (2020), o Estimador de Theil-Sen foi utilizado em conjunto ao MMK para avaliação da espaço-temporalidade de

tendências no estado de Uttarakhand, Índia. No Brasil, a aplicação do estimador de Theil-Sen em séries históricas de precipitação em associação com a análise de tendências se deu em Sobral et al. (2019), no qual os autores avaliaram a distribuição e a intensidade de tendências no estado do Rio de Janeiro.

O estimador de Theil-Sen determina o coeficiente angular do comportamento de tendência da amostra. A utilização do Estimador de Theil-Sen (β) se dá de acordo com a Equação 15.

$$\beta = \text{mediana}\left(\frac{x_j - x_k}{j - k}\right), \text{ sendo } k < j < n \quad \text{Equação 15}$$

em que x_j e x_k são valores observados e k e j são as ordens relativas à variável do tempo na série temporal.

3.1.5. Mudanças de regime em séries históricas de precipitação

A identificação de pontos de interesse em séries históricas de precipitações, pode colaborar para a associação da mesma com eventos externos. Entre os pontos de interesse, está o ponto de quebra de regime. Dentre as formas de se analisar as quebras de tendências em regimes de precipitação, o Teste de Pettitt (PETTITT, 1979) tem ampla aceitação na literatura. A detecção de quebras de regime em séries históricas foi efetuada em estudo de Mallakpour e Villarini (2016). Ao monitorar períodos secos e úmidos na China, Yang e Xing (2022) utilizaram o teste de Pettitt para avaliação de quebras de regime em variabilidades de precipitações anuais. Nesse sentido, o teste de Pettitt pode complementar as análises de tendências executadas através do MMK e do Theil-Sen. A utilização destes métodos em conjunto pode ser observada em diversas partes do globo, como em Bhuyan et al. (2023) em aplicação na província de Meghalaya, Índia, ou como em avaliação de tendências de precipitação feita por Yacoub e Tayfur (2019) na região de Trarza, Mauritânia. No Brasil, tanto Sobral et al. (2019) como Fonseca da Silva et al. (2023) aplicaram as técnicas mencionadas ao estudar regimes de precipitação no estado do Rio de Janeiro, Brasil.

Sua utilização como identificador de pontos de quebra de regime em séries históricas de precipitação parte da consideração da verificação da hipótese nula, na qual não existe ponto de quebra de regime. Na consideração desta hipótese, a relação entre os pontos na série histórica entre X_1 e X_t pode ser determinada por uma função F_1 , a qual também determina a relação entre os pontos X_{t+1} e X_T . Para a hipótese não-nula, a função F_1 não determina a relação entre os pontos X_{t+1} e X_T , sendo esta relação determinada por uma função distinta (F_2). Logo, ao testar a hipótese, tem-se, a Equação 16.

$$D_{i,j} = \text{sgn}(X_i - X_j) \begin{cases} -1, & (X_i - X_j) < 0 \\ 0, & (X_i - X_j) = 0 \\ +1, & (X_i - X_j) > 0 \end{cases} \quad \text{Equação 16}$$

O teste estatístico $U_{t,T}$ depende do somatório de $D_{i,j}$, o qual está apresentado na Equação 17.

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^T D_{i,j} \quad \text{Equação 17}$$

Nesse sentido, o ponto t com maior chance de ser aquele em que há mudança de regime na série histórica (K) é aquele com maior valor de $U_{t,T}$.

$$K = \max_{1 < t < T} |U_{t,T}| \quad \text{Equação 18}$$

A significância p do teste está representada na Equação 19.

$$p = 2\exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^2 + T^3}\right) \quad \text{Equação 19}$$

3.1.6. Análise de frequência em séries históricas de precipitação

Avaliar séries históricas de precipitações no domínio das frequências e do tempo é ferramenta interessante para detectar sinais nas mesmas. As diversas formas de detecção de sinais não-estacionários no domínio da frequência e do tempo em dados hidrometeorológicos foram levantadas por Khaliq et al. (2006). Os autores do citado estudo observam que a avaliação por meio de ondaletas tem potencial de auxiliar a exploração de análises multivariadas. De acordo com Fu et al. (2018), as funções ondaletas mais utilizadas são a Mexican Hat, Haar e Morlet. Dentre as três funções ondaletas apontadas, a função ondaleta de Morlet tem presença constante na literatura quando associada a estudos de séries históricas de dados hidrometeorológicos por meio de ondaletas. A utilização de ondaletas de Morlet em séries históricas foi descrita por Torrence e Compo (1998) e, neste estudo, os autores apresentam três tipos de ondaletas de Morlet: Ondaleta contínua de Morlet (CWT), Ondaleta Cruzada de Morlet (XWT) e Ondaleta Coerência de Morlet (WTC). A CWT tem por característica a identificação de sinais/periodicidades em séries históricas isoladas. De acordo com Wang et al. (2022), as XWT podem destacar a relação comum entre séries históricas nos campos da frequência e de fases entre séries históricas. A utilização da WTC se dá para o destacamento à intensidade da covariância entre os sinais não-estacionários emitidos pelo relacionamento entre duas séries históricas.

A aplicabilidade das citadas análises por ondaletas sobre dados geofísicos foi observada, primeiramente, por Grinsted, Moore e Jevrejeva (2004). Posteriormente, as aplicações das ondaletas sobre dados geofísicos e hidrometeorológicos ganharam notoriedade na literatura, principalmente na aplicação conjunta da CWT e XWT (ADAMOWSKI; ADAMOWSKI; PROKOPH, 2013; BAGHANAM; NOROUZI; NOURANI, 2022).

A aplicação das ondaletas em dados de precipitações pode se dar diretamente nas séries históricas de dados consistidos (YANG; XING, 2021). Nas séries históricas de dados de precipitação padronizados (WANG et al., 2022; ZHANG et al., 2022b), as ondaletas podem ser aplicadas a padrões temporais determinados por análises multivariadas de dados como, por exemplo, a EOF (WANG et al., 2020a; ZHOU; LIU, 2018). Em regiões de áreas de maior porte, a existência de padrões comportamentais de precipitação distintos é mais provável. Logo, a aplicação das ondaletas em padrões temporais de precipitação em distintas regiões de uma área de estudo é interessante na

busca do entendimento sobre o comportamento geral das precipitações em uma bacia hidrográfica. A aplicação em conjunto da CWT e XWT em padrões temporais de precipitação tem, por parte da aplicação da CWT, objetivo de encontrar sinais não-estacionários nos padrões temporais de precipitação, enquanto, por parte da aplicação da XWT, a busca é por associar os padrões temporais a variáveis que podem afetar o regime de precipitação da área de estudo. A utilização da CWT e da XWT para também pode ser aplicada para avaliar os efeitos de índices atmosféricos de larga escala. Na China, tal associação entre precipitações e índices atmosféricos de larga escala foi efetuada por Fang et al. (2021) para a bacia hidrográfica do rio Huaihe, e por Wang et al. (2022) para a bacia hidrográfica do rio Taihu. Na literatura, a análise de ondaletas também auxilia a análise de teleconexões tendo sido aplicada na China por Zhang et al. (2022b) por Asong et al. (2018) no Canadá e por Tomkratoke e Sirisup (2022) na Tailândia. No Brasil, a utilização das ondaletas para avaliação de teleconexões se deu por Muraja et al. (2023), no estado do Paraná.

A aplicação da ondaleta de Morlet pode ser definida como um produto de uma onda exponencial complexa, conforme apresentado na Equação 20.

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-0,25} e^{i\omega_0\eta} e^{-0,5\eta^2} \quad \text{Equação 20}$$

em que $\psi_0(\eta)$ é o valor da wavelet no tempo adimensional η e ω_0 é a frequência adimensional, devendo satisfazer a condição de admissibilidade, que é ter média igual a zero e ser localizada no espaço e no tempo, sendo admitida como uma ondaleta.

3.1.7. Índices atmosféricos de larga escala

Na literatura, há vastas evidências de índices atmosféricos de larga-escala que podem afetar, diretamente ou indiretamente, os regimes de precipitação em uma bacia hidrográfica (ROBERTSON; MECHOSO, 1998). As ligações entre padrões atmosféricos e anomalias climáticas a partir de grandes distâncias são denominadas “teleconexões” (REBOITA et al., 2021). Entre os padrões atmosféricos, temos os índices atmosféricos de larga escala e, entre estes, podemos destacar: *Southern Oscillation Index* (SOI), *Trans*

Polar Index (TPI), *Southern Annular Model (SAM)*, *North Atlantic Oscillation (NAO)*, *Pacific Decadal Oscillation (PDO)* e o *Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO)*. O SOI, associado ao ENSO, refere-se às flutuações no diferencial de pressão entre Tahiti, no Oceano Pacífico e Darwin, no Oceano Índico). Na América do Sul, dois sistemas de monções atuam no continente sul-americano: o jato de baixa pressão (LLJ – do inglês *Low Level Jet*) e a Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZACS) (LAUREANTI et al., 2024). O jato de baixa pressão representa um fortalecimento do fluxo norte de baixo nível ao longo das encostas orientais da Cordilheira dos Andes, o qual atinge intensidades máximas sobre a Bolívia e o norte do Paraguai (MARENGO et al., 2004; MONTINI; JONES; CARVALHO, 2019). Com relação à ZACS, Carvalho, Jones e Liebmann (2004) observaram que a mesma incide sobre o continente sul-americano durante a estação do verão no hemisfério Sul e, no Brasil, influencia desde a parte ocidental da Amazônia brasileira até a região Sudeste brasileira. Os autores também apontam que o ENSO pode modular as ZACS, principalmente para o estado de São Paulo. Para a bacia hidrográfica da Amazônia e para a bacia hidrográfica do Prata, ambas localizadas na América do Sul, Zanin e Satyamurty (2020) desenvolveram um amplo estudo a respeito dos efeitos de diversos fatores atmosféricos de larga-escala e fenômenos de monções no continente, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul e o Jato de Baixo Nível. Neste estudo, os autores identificaram vínculo forte entre as bacias amazônicas e do Prata e os citados efeitos de monções na América do Sul.

Para avaliar oscilações de característica multidecadal no oceano Pacífico, destaca-se a utilização do PDO. O PDO é, frequentemente, descrito como um padrão de variabilidade de temperaturas de longa duração do oceano Pacífico. O relacionamento entre PDO e as precipitações permite entender como os fenômenos climatológicos de longo prazo no oceano Pacífico afetam os totais precipitados. Ao avaliar a relação entre índices atmosféricos de larga escala e precipitações/vazões em diversas partes do globo, conclui-se que as oscilações multidecais provenientes do oceano Pacífico impactam a variabilidade de precipitações na Europa, na Ásia, na América do Norte e na América do Sul. Em estudo focado na América do Sul, Andreoli e Kayano (2005) observaram vinculações possíveis entre o ENSO, as fases frias e quentes do PDO e as séries históricas mensais de precipitação. Neste estudo, os autores observaram que tanto as fases frias como as fases quentes do PDO colaboram para entender as relações do ENSO para com precipitações no continente sul-americano a longo prazo. Em estudo aplicado na região leste do estado do Paraná, De Bodas Terassi et al. (2023) examinaram as relações entre anomalias de precipitações e, ao agrupar as precipitações em grupos homogêneos, os

autores observaram que a maior parte dos grupos tinha alguma ligação com o ENSO – neste caso, representado pelo SOI – e com o PDO.

A proximidade geográfica entre a Antártida e a América do Sul abre espaço para a busca de evidências de que oscilações climáticas ocorridas naquele continente influenciem neste. Rosso et al. (2018) detectou teleconexões entre oscilações de pressão no continente antártico (AAO, do inglês *Antarctic Oscillation*) e a ZACS na América do Sul. No entanto, para o TPI e para o SAM, os estudos são menos frequentes. O TPI é definido como o diferencial de pressão entre Hobart e Stanley, ambas localizadas na Antártica. O SAM é identificado como o diferencial de pressão média entre pontos localizados entre a latitude 40°S e a latitude 65°S do globo (de <https://www.noaa.gov/>). Com relação ao TPI, Jones, Salinger e Mullan (1999), observaram que a variabilidade do índice tem correlação com as variações de temperatura na região sul da América do Sul durante o verão no Hemisfério Sul. O índice SAM tem sido utilizado com uma frequência maior que o TPI. As variabilidades do SAM também foram analisada por Schneider, Okumura e Deser (2012), em que os autores apontam que as anomalias nas temperaturas do oceano Pacífico correlação significativa com anomalias na costa da Antártica Oriental. Ao analisar efeitos das fases positivas e negativas do SAM sobre as regiões mais próximas da Antártida, como a parte sul da Nova Zelândia e da América do Sul, Gillet, Kell e Jones (2006) observaram que a fase positiva do SAM está associada a condições anormalmente secas no continente sul-americano. No entanto, a influência as oscilações identificadas na Antártida não se restringem às áreas mais próximas deste continente. De acordo com Reboita et al. (2021), há evidências do relacionamento entre sinais positivos fracos do SAM e anomalias negativas de precipitação na região sudeste da América do Sul.

A influência dos oceanos em regimes de precipitação tem sido mapeada em todo o globo (TRENBERTH; STEPANIAK; CARON, 2000; ZHANG, 2013). A América do Sul é banhada pelo oceano Atlântico em sua costa oriental e pelo oceano Pacífico em sua costa ocidental. Suas atuações, tanto em conjunto como separadamente, tem contribuição importante no regime de precipitações o citado continente. Com relação ao oceano Atlântico, a NAO e a AMO têm destaque como índices utilizados para avaliar suas teleconexões com as precipitações (HODSON et al., 2010), detectando padrões de variabilidade climática. A NAO, embora se trate de uma oscilação ocorrida no hemisfério norte, é, com frequência, associada a precipitações na América do Sul, sendo identificada como diferencial de pressão na superfície do mar entre zonas de alto subtropical e baixas subpolar. Apesar de Paegle e Mo (2002) tenham observado que a NAO tem uma influência

limitadas sobre o Brasil, há evidências de que existam correlações negativas entre a NAO e as precipitações na América do Sul (ZHANG et al., 2022a). A AMO refere-se a oscilações de longa duração nas temperaturas do oceano Atlântico. Os estudos envolvendo a AMO como ferramenta de geração de evidências de influência do oceano Atlântico nas precipitações tem sido recorrentes na bibliografia. Ao observar a relação entre as oscilações de temperatura na parcelas sul do oceano atlântico e precipitações na América do Sul, Wainer e Venegas (2012) observaram evidências de que as oscilações AMO são moduladas pelas precipitações do continente. Por outro lado, ao analisar simultaneamente a relação entre a ENSO e da AMO para com as precipitações na América do Sul, Kayano e Capistrano (2014) apontam que, de maneira geral, a influência do ENSO contrasta com a influência da AMO. Em tal contraste, os eventos El Niño (La Niña), em sua fase fria (quente) da AMO são, em geral, mais fortes do que quando a AMO está em fase quente. A influência das oscilações do oceano Atlântico nas monções da América do Sul, como o LLJ e a ZACS, não são frequentes, bem como são recentes. Em estudo local de precipitações na região de Curitiba, no estado brasileiro do Paraná, os autores observaram ações da ZACS e sinais da AMO em conjunto, mostrando que a NAO pode ter sua influência reduzida na região Sul brasileira. Posteriormente, Sulca et al. (2022) analisou os efeitos das oscilações oceânicas na região central do Andes através da PCA, detectando modos de variabilidade ligados a fenômenos climáticos em toda América do Sul, desde a região oeste da Amazônia até o sul argentino.

As formas de se avaliar as teleconexões entre índices atmosféricos de larga escala e regimes de precipitação são diversificadas. De Bodas Terassi et al. (2023) utilizaram o modelo vetor autoregressivo em sua avaliação de precipitações na região oeste do estado do Paraná, Brasil. Sulca et al. (2022) utilizaram a PCA para a avaliação das teleconexões entre precipitações e índices atmosféricos de larga escala na Cordilheira dos Andes. Para além das ondaletas, a análise composta torna-se alternativa viável para avaliação de teleconexões, tendo a mesma sido proposta por Lenters (1997). De acordo com este autor, a análise composta permite entender a relação entre séries históricas através da identificação de anomalia em uma delas. Para aplicação deste método em duas séries históricas, ocorre o mapeamento das anomalias uma delas e, a partir deste mapeamento, observa-se o comportamento, no mesmo período, da série histórica a ser comparada. Tal processo foi aplicado por Cazes-Boezio, Robertson e Mechoso (2003) ao estudar o relacionamento sazonal entre precipitações na região sudeste da América do Sul e no Uruguai para com o ENSO. No Brasil, a análise composta foi aplicada por Prado et al.,

(2021) para avaliação de teleconexões entre precipitações e oscilações no oceano Pacífico (ENSO e PDO). Nesse sentido, a aplicação das técnicas de ondaletas junto à aplicação da análise composta pode maximizar a geração de evidências de teleconexões entre precipitações e regiões da bacia do rio Paraná.

3.2. Usos e ocupações do solo, usos da água e balanço hídrico

As modificações antropogênicas também devem ser levadas em consideração no ciclo hidrológico de bacias hidrográficas. Entre modificações no uso e ocupação do solo, pode-se citar, como exemplo, as modificações efetuadas por atividades econômicas (CÂNDIDO et al., 2014) (LEE et al., 2018) e a inserção de barragens ao longo do curso d'água (MITTAL et al., 2016). Dentro da literatura, são expressivas as evidências de que alterações na cobertura vegetal do solo podem afetar o escoamento superficial em bacias hidrográficas. (DIAS et al., 2015; LI et al., 2009; SHAO et al., 2018). As alterações de uso e ocupação do solo podem afetar tanto o escoamento superficial como o escoamento subterrâneo. Conforme estudo de Oliveira et al. (2017) na vegetação de cerrado brasileira, a recarga de aquíferos e lençóis freáticos está relacionada a parâmetros como profundidade das raízes da vegetação existente, capacidade de carga do solo, tipo de solo existente e tipo de cobertura vegetal, e esta está relacionada à taxa de evapotranspiração. Com relação ao escoamento superficial, Andrade e Cavalcanti (2018) avaliaram impactos de uso e ocupação do solo no escoamento superficial na bacia hidrográfica do Rio de Janeiro através do modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). No estudo citado, os autores observaram que a supressão de áreas florestais intensificou condições de seca e de vazões mínimas.

No estado de São Paulo, a cana-de-açúcar foi a atividade que mais se desenvolveu em termos de área cultivada desde o início do Século XXI, substituindo, principalmente, as áreas de pastagens, e café, enquanto as culturas mais consistentes tradicionais como arroz e feijão tiveram reduções significativas (CALDARELLI; GILIO, 2018). A falta de proteção do solo também tem consequências na estrutura do mesmo. Cândido et al. (2014) investigaram os efeitos da precipitação sobre diferentes tipos de solos próximos ao Complexo Hidrelétrico Urubupungá (CHURB), no estado do Mato Grosso do Sul, avaliando desde solos descobertos até solos com floresta nativa, passando por

plantações de eucalipto, e concluiu que os solos desprotegidos deixam de ganhar água com a saída de floresta nativa, pois quanto menor a densidade da vegetação no solo, menor a infiltração de água e maior o escoamento superficial.

Na parte alta da bacia hidrográfica do rio Paraná, Abou Rafee et al. (2021a)) avaliaram as mudanças de uso e ocupação do solo a partir da definição de dois cenários: cenário de uso e ocupação do solo para o ano de 1985 para o ano de 2015, os dois cenários foram gerados por classificação de imagens pelo algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado Máquina de Vetores de Suporte. Neste estudo, os autores observaram que a mudança do uso e ocupação do solo provocou um aumento de 4,2% nas vazões para a escala anual (outubro-setembro), de 1,1% para o semestre úmido (abril-agosto) e uma redução de 2,2% nas vazões de um semestre. Com relação ao impacto de tais mudanças no escoamento superficial, Lee et al. 2018) observaram que, para a bacia do rio Paraná, houve uma mudança na sazonalidade da série histórica dos picos de vazão.

A avaliação dinâmica de usos e ocupações do solo se faz interessante a fim de se compreender como mudanças de usos e ocupação do solo em janelas temporais definidas podem impactar a disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica ao longo do tempo. Na bacia hidrográfica do rio Dongjiang, China, Zhu et al. (2022) examinaram a disponibilidade de recursos hídricos para a série histórica entre 1971 e 2020, com intervalos de uso e ocupação do solo variando a cada dez anos. Os autores conseguiram discutir como as modificações entre um intervalo e outro afetaram a série histórica de recursos hídricos disponíveis na bacia hidrográfica.

Em termos de uso da água na bacia, é preciso levar em consideração os principais empregos da água para uma nação, que é o abastecimento populacional e a produção de alimentos (EMBIID; LIBER, 2017). O uso da água nessa relação tem um papel de destaque em bacias hidrográficas de grande porte, como a bacia hidrográfica do Nilo (Egito), do rio Colorado (EUA) e do rio Amarelo (China), pelo fato de que estas bacias estão com seu escoamento superficial próximos ao limite de uso renovável (GLEICK; PALANIAPPAN, 2010). O uso da água também está relacionado a outras formas de produção de energia, como, por exemplo, as refinarias de açúcar. No estado de São Paulo, por exemplo, a cana-de-açúcar é a atividade agrícola hegemônica e, vinculada à essa predominância, está a implantação de usinas sucroalcooleiras, as quais, além de produzir açúcar refinado, fabricam etanol e, em alguns casos, geram energia elétrica a partir da queima do bagaço da cana. Essa atividade industrial também tem efeitos significativos sobre o uso da água, visto que, de acordo com o DAEE (2018), as usinas sucroalcooleiras

tem papel de destaque na obtenção de outorgas de água, por conta das elevadas quantidades de água demandadas.

Nesse sentido, é recorrente na literatura a tentativa de entendimentos dos impactos de mudanças antropogênicas no uso e ocupação do solo. Para tanto, os autores, com frequência, aplicaram modelos hidrológicos sobre áreas de interesse e de correlações sobre variáveis pertinentes. Os modelos hidrológicos podem ser divididos entre modelos de aplicação global e modelos de aplicação regional. Os modelos de aplicação global, de maneira geral, utilizam dados sintéticos gerados hidrometeorológicos gerados por sistemas de reanálises, como o CFSR, por exemplo. No caso de análises mais distantes do objeto de estudo, tal aplicação para entendimento de impactos do uso e ocupação do solo no escoamento superficial pode ser interessante. Entre modelos hidrológicos de característica global, temos o H08, (HANASAKI et al., 2008), o modelo *Macro-Scale – Probability-Distributed Moisture model.09 (Mac-PDM.09)* (GOSLING; ARNELL, 2011) e o *Variable Infiltration Capacity (VIC)* (LIANG et al., 1994), por exemplo.

Com relação a modelos de aplicação regional, os mesmos têm a vantagem de poder serem utilizados com dados mais próximos da situação real, como: dados hidrometeorológicos observados, dados de usos e ocupações da terra com resoluções espaciais menores, e melhor especificação do tipo de solo a ser utilizado. (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012). Para modelos de aplicação regional, Krysanova et al. (2017) apresentaram um compilado, os quais foram aplicados em diversas partes do mundo. Entre os diversos modelos a serem utilizados, os autores citam o ECOMAG (MOTOVILOV et al., 1999), o SWIM (KRYSANOVA; MÜLLER-WOHLFEIL; BECKER, 1998) utilizados em diversas partes do planeta, podemos destacar o SWAT (G. ARNOLD et al., 2012, 2012; P. W. GASSMAN et al., 2007) e o modelo hidrológico HBV (BERGSTRÖM, 1992; LINDSTRÖM et al., 1997). Dentro os citados, aqueles que aparecem com maior frequência na literatura são o SWAT e o HBV, com o modelo SWAT tendo uma presença maior do que o HBV. Avaliando a performance de diversos modelos hidrológicos para uma mesma situação, incluindo aí o HBV e o SWAT, Moriasi et al. (2007) apontam o destaque do modelo SWAT no processo de estimativa de vazões em uma bacia hidrográfica. A presença destacada do modelo SWAT em estudos hidrológicos o coloca como candidato a auxiliar investigações de sistemas hídricos em bacias hidrográficas.

3.2.1. Modelagem hidrológica através do *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT)

O modelo SWAT é um modelo semi-distribuído, que permite a simulação de diversos processos hidrológicos simultaneamente, como escoamento superficial, carga de sedimentos, nutrientes e poluentes na água, utilizando dados diários como inputs ao modelo. Seu desenvolvimento teórico foi apresentado por (G. ARNOLD et al., 2012; P. W. GASSMAN et al., 2007). Mittal et al. (2016) analisaram o escoamento superficial partindo de dados de precipitação e temperatura do ar na bacia, além dos efeitos da ação antropogênica por meio da inserção de uma barragem na bacia do Kangsabati, e o modelo apontou que a sinergia entre as mudanças climáticas e a inserção de uma barragem neste curso d'água foi significativamente maior do que quando analisados separadamente. De acordo com Abbaspour et al. (2015), a metodologia e a abordagem através do modelo SWAT pode ser aplicada a bacias hidrográficas de grande porte, independentemente da região em que a área de estudo esteja no globo.

Com as informações de variáveis meteorológicas diárias disponíveis, é possível gerar dados de escoamento superficial a partir do modelo SWAT. Apesar dos dados de precipitação serem mais abundantes, é fundamental o uso de dados de escoamento superficial, para que as vazões observadas possam ser comparadas às vazões simuladas. O uso do SWAT para simulações de escoamento superficial a partir de dados de precipitação, evapotranspiração, velocidade dos ventos, radiação solar, e escoamento superficial foi realizado por Markovic e Koch (2015), em que os autores simularam o escoamento superficial na bacia do rio Strigies, que é uma sub-bacia do Rio Elba, Alemanha, e compararam as propriedades espectrais e a influência do fenômeno de *Hurst* no ciclo hidrológico na bacia citada. No Brasil, o modelo hidrológico SWAT foi utilizado por Siqueira et al. (2021) para auxiliar as análises de efeitos simultâneos de modificações climáticas e mudanças no uso e ocupação do solo em regiões de cerrado na área de drenagem da UHE Três Marias, Minas Gerais.

O comportamento da precipitação, com suas variações, tendências e frequências, será avaliado na simulação do escoamento superficial na bacia e, para calibração e validação do escoamento superficial, faz-se necessário inserir no modelo outras variáveis relacionadas ao ciclo hidrológico da bacia, como dados temperatura, de evapotranspiração total, umidade, velocidades dos ventos e irradiação solar. Conforme estudo de Neitsch et al. (2009), a análise do ciclo hidrológico em sua fase terrestre pelo

modelo SWAT compreende diversas variáveis hidrológicas, as quais estão incluídas na Equação 21.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Equação 21}$$

em que SW é o conteúdo de água no solo, t é o tempo em dias, SW_0 é umidade no solo no i-ésimo dia (mm), R_{day} é a quantidade de precipitação no i-ésimo dia (mm), Q_{surf} é a quantidade por área de escoamento superficial no i-ésimo dia (mm), E_a é a quantidade de evapotranspiração i-ésimo dia (mm), W_{seep} é a quantidade de água que entra na zona de aeração do perfil do solo no i-ésimo dia (mm), e Q_{gw} é a quantidade de retorno do fluxo no i-ésimo dia (mm).

Os usos e ocupações do solo que passam por processos de retirada e crescimento, como silvicultura, cana-de-açúcar, agricultura geral e pastagens, foram tratados como culturas permanentes. Logo, as dinâmicas de colheita e crescimento ao longo da série histórica não foram consideradas neste estudo. Da mesma forma, a modelagem hidrológica não considerou as dinâmicas de reservatórios e de controles de vazões para os corpos hídricos presentes nas bacias hidrográficas.

3.2.2. Avaliação de usos e ocupações do solo, usos da água e balanço hídrico por correlacionamento de variáveis

Para além do emprego de modelos hidrológicos, o coeficiente de correlação de Pearson tem sido amplamente utilizado em análises que envolvem dados hidrometeorológicos. A análise de correlações foi efetuada por Yasar Korkanc (2018) para avaliar os impactos as mudanças de uso e ocupação do solo no escoamento superficial em solo turco. No Brasil, as correlações de Pearson foram utilizadas em estudo aplicado na bacia do rio Doce por Jesus et al. (2020) para identificação dos impactos de eventos meteorológicos em eventos hidrológicos. Na grande massa de estudos publicados envolvendo a aplicação das correlações de Pearson em estudos hidrológicos, a aplicação se dá de maneira direta, com séries de uso e ocupação do solo sendo analisadas junto a

séries históricas de precipitações ou de escoamento superficial. No entanto, a aplicação de diversas variáveis sobre uma mesma variável permite, indiretamente, o surgimento de pontos de vista diferentes. A título de exemplo, a identificação de correlações entre uso e ocupação do solo e disponibilidade hídrica e a identificação de precipitações e disponibilidade hídrica permite que, indiretamente, entenda-se como o uso e ocupação do solo e precipitações influenciam uma à outra. Nesse sentido, por meio das correlações de Pearson, abre-se a possibilidade de avaliação indireta dos efeitos de uma variável sobre outra, o que pode complementar a análise de correlações efetuada diretamente.

3.3. Relação temporal entre precipitações e usos e ocupações do solo

O relacionamento entre precipitações e usos e ocupações do solo tem sido amplamente estudado, visto que ambas as variáveis têm impacto no escoamento superficial das bacias hidrográficas. Dentre as metodologias utilizadas para tal prática, é possível destacar o uso de modelagens e a avaliação por meio de correlações de séries históricas. O próprio modelo SWAT tem sido, com frequência, utilizado para identificar as relações entre precipitações e usos do solo (ABBASPOUR et al., 2015; DE OLIVEIRA et al., 2017; FICKLIN; STEWART; MAURER, 2013; MARKOVIC; KOCH, 2015). No entanto, os fenômenos ocorridos na cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica podem não ser captados de maneira imediata pelo modelo em questão. Nesse sentido, novas técnicas para identificação de atrasos ou adiantamentos de uma série histórica em relação a outra, tratados como *lags*, tornam-se alternativa interessante.

Na literatura, entre as técnicas de observação de *lag time*, destacam-se as técnicas de aplicação do coeficiente de correlação de Pearson e a correlação cruzada. A correlação entre séries históricas também encontra embasamento na literatura na avaliação entre as séries históricas de variáveis dentro do ciclo hidrológico. Através de correlações, atrasos ou adiantamentos das precipitações em relação aos usos e ocupações do solo foram estudados por Wang et al. (2023) em bacias hidrográficas na China. Os autores observaram modificações na resposta da vegetação conforme a seca se intensificava, sendo essa resposta uma alteração na taxa de crescimento da vegetação. No entanto, a técnica de correlação de Pearson pode ser custosa computacionalmente quando aplicada a janelas temporais diversificadas, além de ser, majoritariamente, aplicada às séries históricas de comprimento igual. Para tal fim, a literatura aponta, de maneira mais frequente, a aplicação das correlações cruzadas.

Nesta técnica, ocorre o “deslizamento” da série histórica de uma variável sobre a série histórica de outra variável, comparando a potência do sinal emitido para cada *lag*. A potência deste sinal identifica se uma variável está atrasada, em linha ou adiantada em relação à outra. Tal método foi aplicado por Seo et al. (2019) a fim de reproduzir os *lags* temporais entre séries históricas de precipitações e temperaturas na bacia do rio Haw, no estado da Carolina do Norte, Estados Unidos. A aplicação do método permitiu simular os impactos destes *lags* em outras variáveis hidrológicas com menor variabilidade interna, como escoamento subterrâneo, e profundidade de lençóis freáticos, que são mais susceptíveis à modificações nos *lags* entre precipitação e temperatura. Para o relacionamento entre precipitações e uso e ocupação do solo, Chen et al. (2022) examinaram a existência de *lags* mensais entre os totais precipitados e o NDVI para a região central e região sudoeste da China. Neste estudo, os *lags* encontrados a partir de correlações cruzadas permitiram identificar ligações entre a umidade presente na área de estudo, o NDVI e as precipitações. No Brasil, Gomes e Lima (2021) utilizaram a correlação cruzada para analisar o relacionamento entre precipitações e volumes de reservatórios na região Nordeste.

A aplicação da correlação cruzada se dá entre os sinais $x(n)$ e $y(n)$ das séries históricas, estando apresentada na Equação 22.

$$R_{xy}(m) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(n) * y^{(n-m)} \quad \text{Equação 22}$$

De acordo com a Equação 22, o sinal $R_{xy}(m)$ representa a função correlação-cruzada, enquanto $x(n)$ e $y(n)$ são os sinais das séries históricas em questão. $y^{(n-m)}$ é o complexo conjugado do sinal $y(n)$ deslocado pelas amostras m , e a soma de todos os valores inteiros de n . m representa o *lag* de um sinal em relação ao outro.

4. ÁREA DE ESTUDO

Neste estudo, é considerada a parcela nordeste da parte brasileira da bacia do rio Paraná. A bacia do rio Paraná e a área de estudo estão representadas na Figura 1.

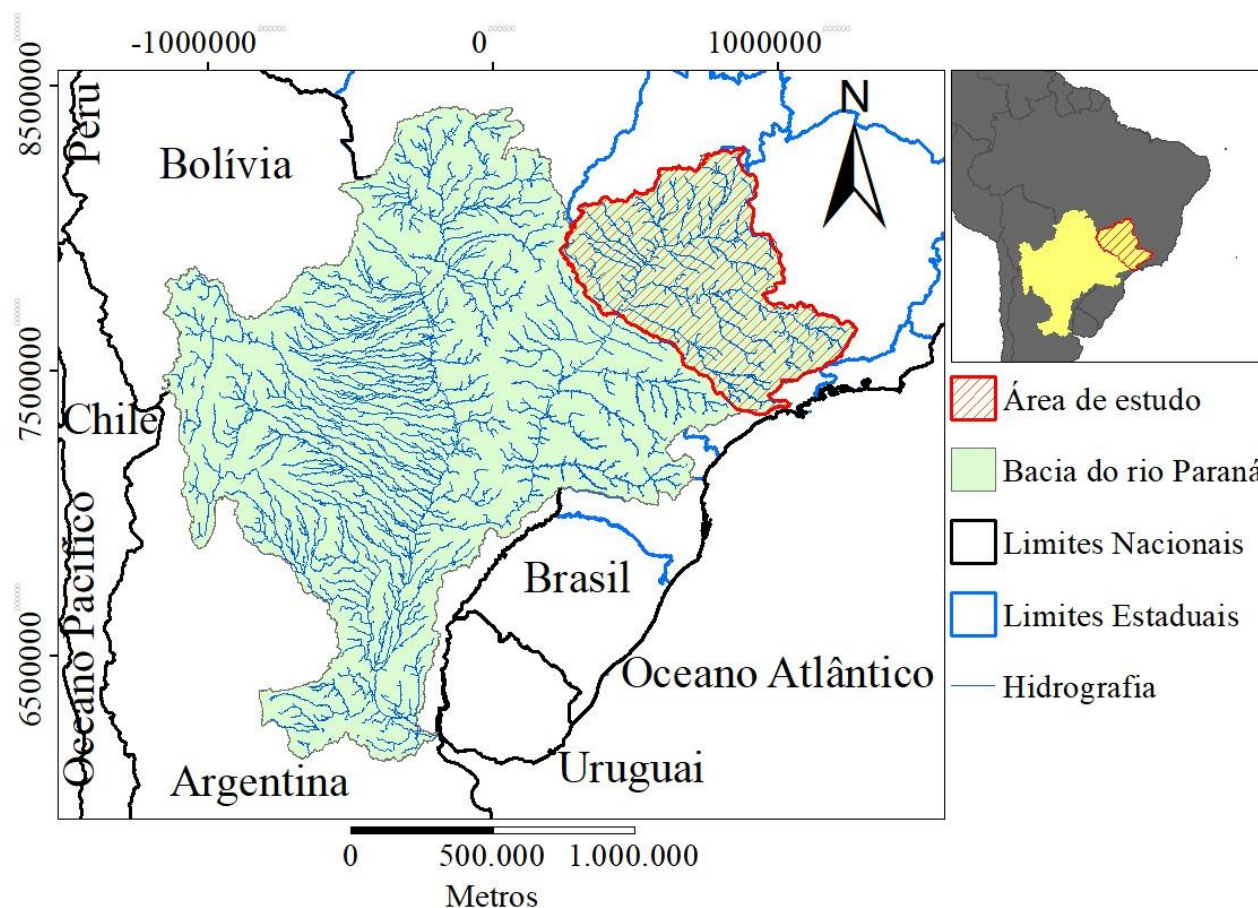


Figura 1. Bacia hidrográfica do rio Paraná

A bacia hidrográfica do rio Paraná, com uma área de drenagem de, aproximadamente, 1.500.000 km², é uma das principais bacias hidrográficas da América do Sul, estando disposta no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai. A parcela desta bacia presente no território brasileiro é de, aproximadamente, 800.000 km². A parte mais alta desta bacia hidrográfica concentra três bacias regionais de destaque: rio Grande, rio Paranaíba e rio Tietê. Nas áreas de drenagem destas bacias hidrográficas, observa-se regiões densamente povoadas e com a indústria de maior relevância nacional, como as

regiões metropolitanas de São Paulo e de Campinas. Por outro lado, esta região também abriga uma parcela da região Centro-Oeste brasileira, a qual tem tido grande relevância na agropecuária brasileira.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população brasileira passou de, aproximadamente, 59 milhões de habitantes pelo Censo de 1980 para, aproximadamente, 203 milhões de habitantes no Censo de 2023. Tais condições aumentaram a demanda por alimentos e de energia, o que, em termos físicos, indica pressão sobre as fronteiras agrícolas brasileiras e na busca por incrementar a energia hidráulica produzida através de usinas hidrelétricas (BORELLA et al., 2023).

Dada a extensão da bacia hidrográfica do rio Paraná, ela tem grande relevância no continente sul-americano. Sua complexidade e as diferenças regionais existentes nela tornam sua análise, de maneira total, um desafio considerável. Porém, a avaliação de uma parcela da bacia hidrográfica do rio Paraná, principalmente em áreas próximas às cabeceiras, pode contribuir para o entendimento geral de processos que ocorrem no seu interior.

A área de drenagem na bacia hidrográfica do CHURB está detalhada na Figura 2a). O detalhamento dos principais cursos d'água na região do exutório está dado na Figura 2b).

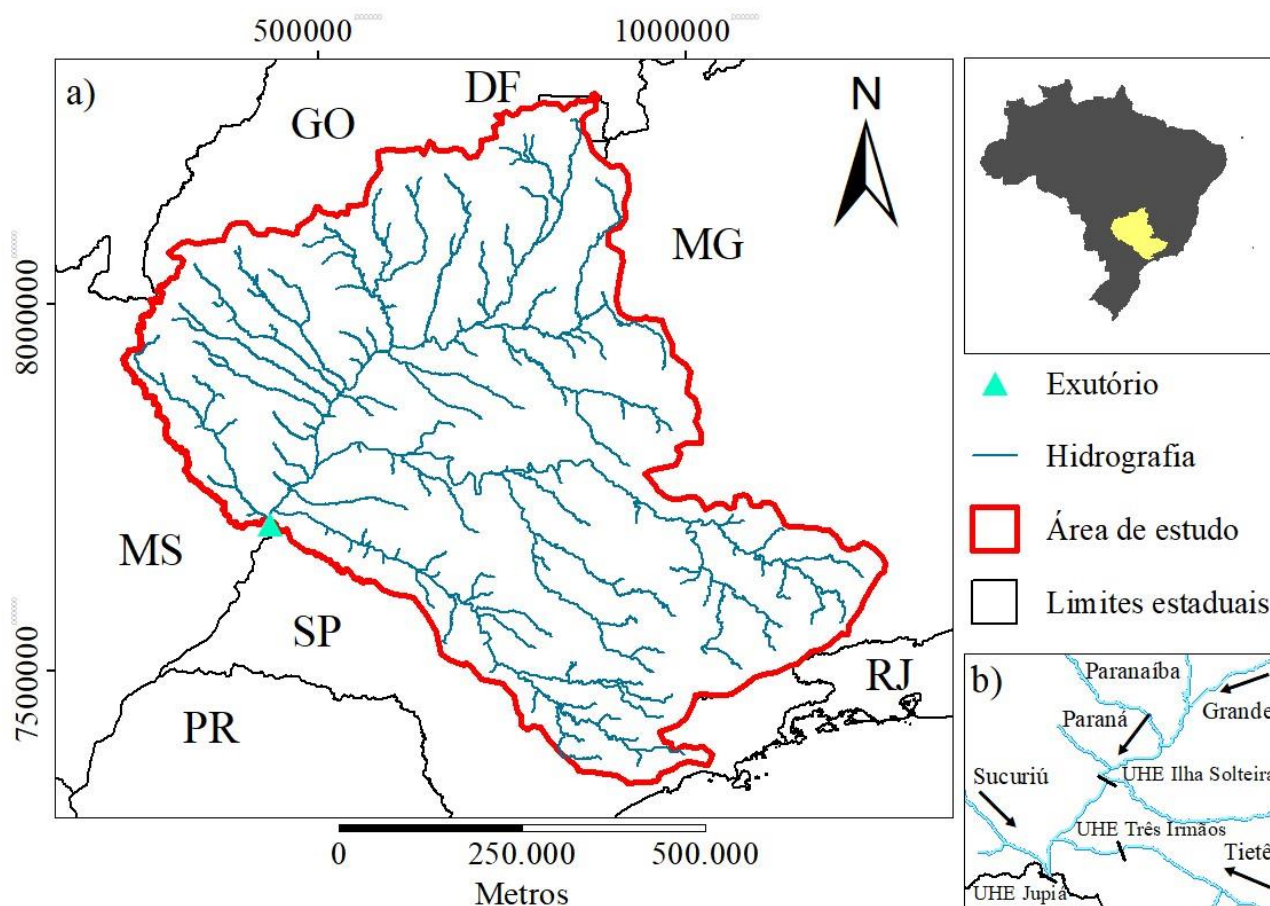


Figura 2. a) Malha hidrográfica dos principais cursos d'água do CHURB; b) Principais cursos d'água na região do exutório da bacia hidrográfica do CHURB

A bacia hidrográfica que compreende toda área de drenagem à montante do CHURB tem área de 478.824 km². O exutório da área de estudo se dá na UHE de Jupia. A escolha por este ponto como exutório se deu por conta da complexidade que a área de drenagem engloba. Seu exutório tem proximidade geográfica com a UHE Ilha Solteira e UHE Três irmãos, interligadas pelo rio Paraná e pelo canal de Pereira Barreto.

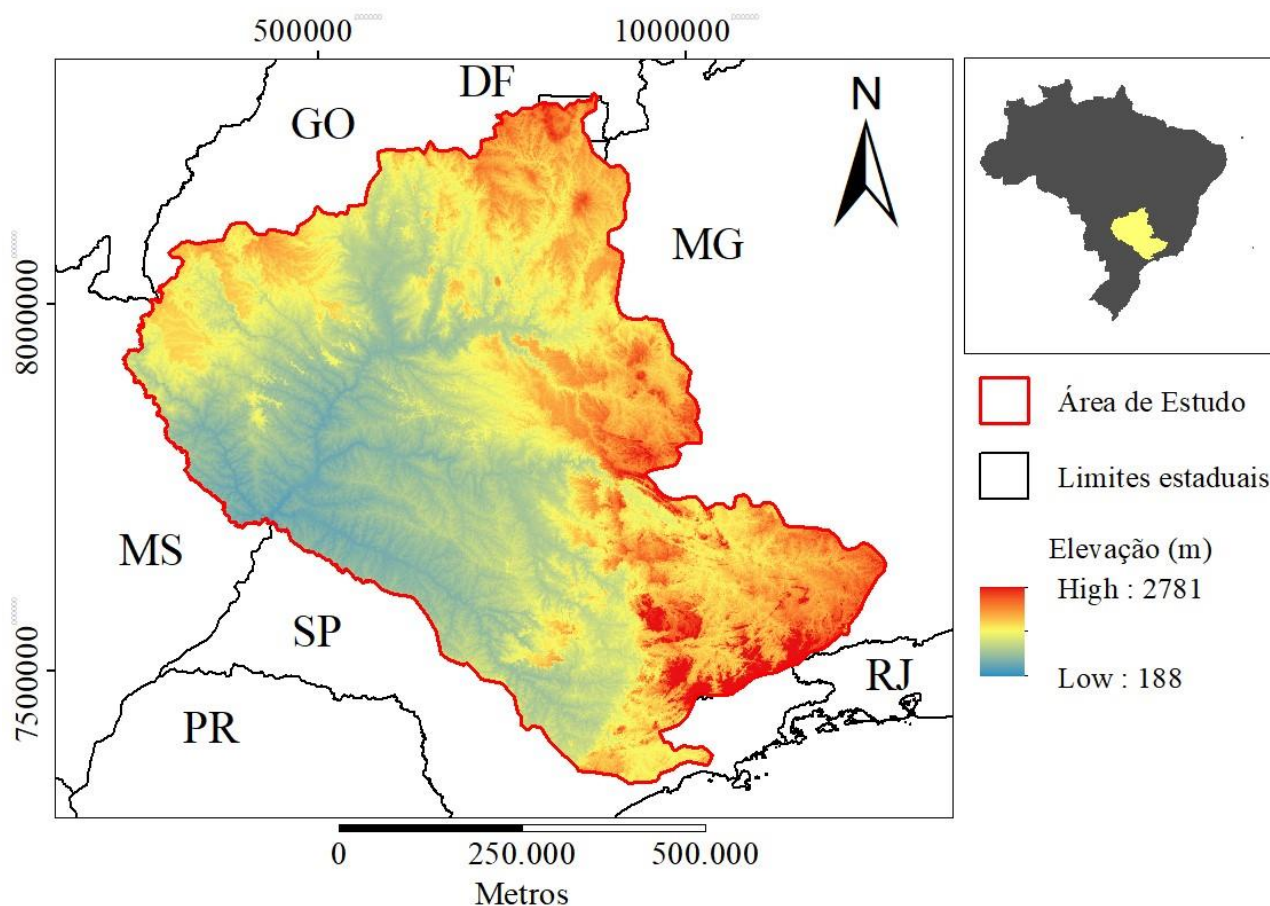


Figura 3. Altimetria da bacia hidrográfica do CHURB

Pelas altitudes máximas e mínimas apresentadas na Figura 3, calcula-se que o diferencial de altitude é de 2593 m. As áreas de topografias mais elevadas, localizadas na parte leste da área de estudo, compreendem a Serra do Mar e a Serra da Canastra. A parte mais baixa da área de estudo corresponde ao exutório, no qual está localizado o CHURB. O diferencial topográfico observado nas parcelas à jusante indica o potencial hidrelétrico de seus cursos d'água, enquanto as partes planas, as quais tem destacada proximidade com cursos d'água, apresentam potencial para exploração do solo por atividades agrícolas.

As modificações de uso e ocupação do solo na área de estudo também serão consideradas. Na Figura 4, está ilustrado o mapeamento de usos e ocupações do solo para o ano de 1985, que é o ano inicial das séries históricas da Plataforma Mapbiomas. Da mesma forma, a Plataforma Mapbiomas apresenta mapeamentos de uso e ocupações do solo mais recentes, como ilustrado para o ano de 2017 na Figura 5 abaixo.

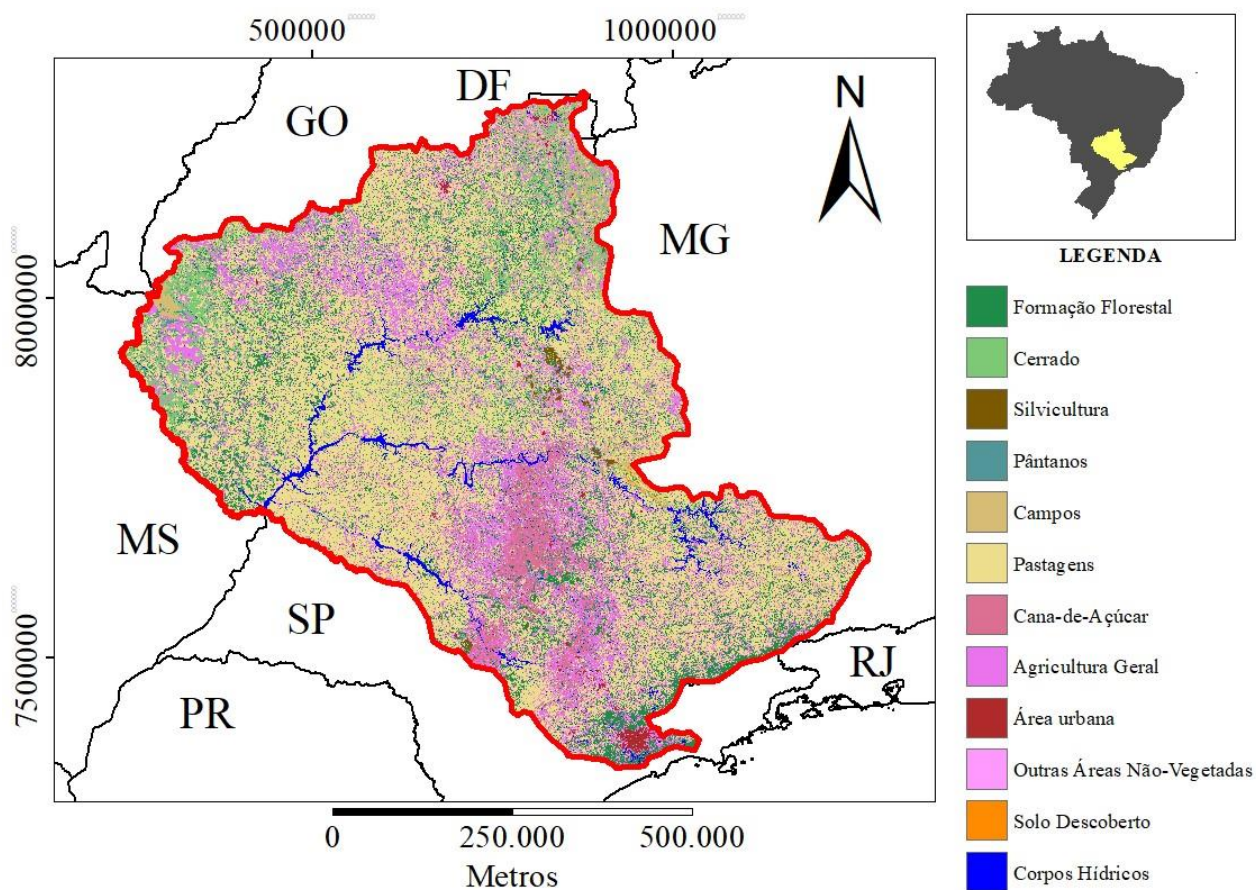


Figura 4. Usos e ocupações do solo para o ano de 1985 na bacia hidrográfica do CHURB

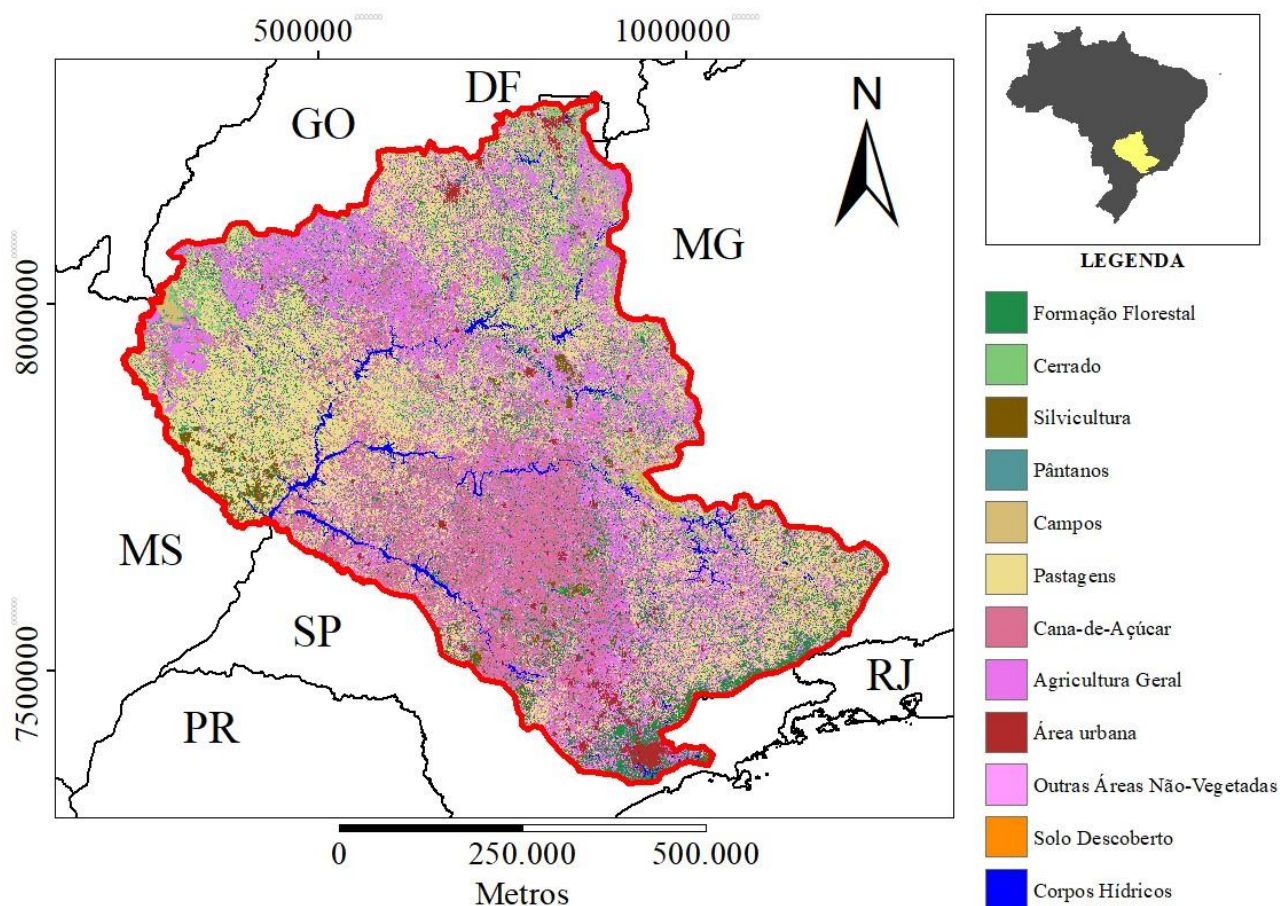


Figura 5. Usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica do CHURB para o ano de 2017.

Como observado na Figura 4 e 5, a área de estudo passou por modificações intensas no uso e ocupação do solo. Tais mudanças foram observadas por Abou Rafee et al. (2021b) em seu estudo sobre a parte brasileira da bacia hidrográfica do rio Paraná. Em uma comparação inicial entre a Figura 4 e a Figura 5, observa-se o amplo crescimento da agricultura geral na parcela norte da área de estudo e um amplo crescimento da cana-de-açúcar na região central e sul, bem como uma redução visível na área de pastagens. Também se observa, de maneira geral, um já esperado crescimento de áreas urbanas. Tais mudanças nos usos e ocupações do solo, bem como provável crescimento populacional, são fatores que podem afetar diretamente a disponibilidade hídrica. Nesse sentido, entender a disposição de padrões de precipitação, suas tendências e associações com fenômenos atmosféricos de larga escala é importante para o planejamento dos recursos hídricos ao longo da bacia hidrográfica do rio Paraná. Para o mesmo fim, também é interessante o entendimento dos impactos de usos e ocupações do solo na disponibilidade hídrica e seu relacionamento para com as precipitações ao longo da área de estudo.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Banco de dados

Neste trabalho, são utilizados dados diários meteorológicos, dados fluviométricos, dados de uso da água e dados de uso e ocupação do solo. Os dados pluviométricos diários estão, inicialmente, locados em plataformas do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). No entanto, tais dados estão armazenados na base de dados do Sistema Nacional de informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), pertencente à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Para uma série histórica compreendida de 1976 e 2017, foram utilizados 297 postos pluviométricos com séries históricas tendo 5% ou menos de dados faltantes. Os postos pluviométricos utilizados estão representados na Figura 6.

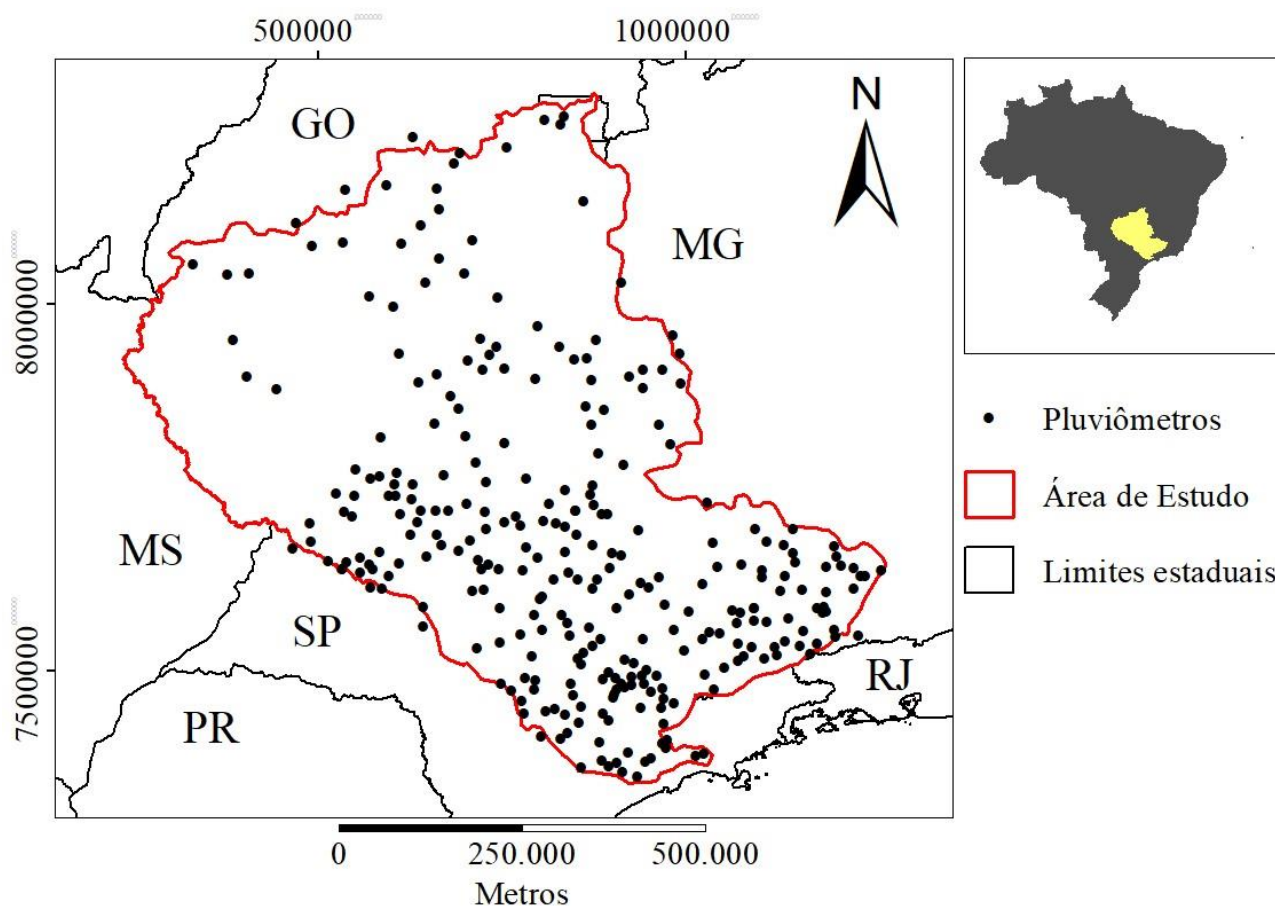


Figura 6. Postos pluviométricos dispostos na área de influência deste trabalho.

Os dados meteorológicos estão, em sua maioria, locados no domínio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). No entanto, devido ao fato de que, para séries históricas de comprimento decenal, os dados climáticos provenientes do INMET têm baixa disponibilidade, além de dados faltantes em sua série histórica, optou-se por dispor de dados climáticos sintéticos. Os dados de velocidade do vento (m/s), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), umidade relativa do ar (fração) e radiação solar (MJ/m²) foram obtidos na malha global sintética do *Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)*, o qual pertence ao *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* (DILE; SRINIVASAN, 2014). Estes dados estão dispostos em grade global, cuja resolução espacial é da ordem de 2,5° x 2,5°. Os dados observados de fluviometria foram obtidos na mesma fonte fornecedora dos dados de precipitação. Adicionalmente, são utilizados dados diários de vazões naturais, os quais provém do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2021).

A inserção de dados topográficos se deu utilizando modelos digitais de elevação (MDE) globais. O banco de dados utilizado para geração dos MDE que compuseram a modelagem hidrológica foi o *United States Geological Survey* (USGS) – disponível em (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). O banco de dados utilizado foi o ASTGTM v002 (*ASTER Global Digital Elevation Model*) Versão 2, Coleção Terra Aster, sensor ASTER. Os dados desta coleção têm resolução espacial horizontal de 30 m e a precisão altimétrica é de 17 m aproximadamente, com resolução radiométrica de 8 bits (256 tons de cinza). (TACHIKAWA et al. (2011).

Para além dos dados apresentados acima, as avaliações que dizem respeito à cobertura vegetal no solo também devem considerar os tipos de solo, dados de cobertura vegetal e de tipos de uso da água. Nesse contexto, os dados de usos e ocupações do solo foram retiradas da Plataforma MapBiomas (MAPBIOMAS, 2020), Coleções 6 e 7. Os dados de uso dados de uso da água foram obtidos através do domínio de dados abertos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), 2021). Os dados de solo, foram retirados do domínio público da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (2001).

Para a execução das análises, foi utilizado um notebook Avell com processador Inter® Core™ i7-8700K CPU @ 3.70 GHz, 3696 Mhz, 6 núcleos e 12 processadores lógicos. A memória RAM de 16 GB. A velocidade de leitura do disco é de 555 MB/s, enquanto a de gravação do disco é de 361 MB/s.

5.2. Estudo de precipitações e seu relacionamento com sistemas atmosféricos de larga escala

O curso do estudo de precipitações, bem como suas teleconexões com fenômenos atmosféricos de larga, se desenvolverá a partir do fluxograma apresentado na Figura 7.

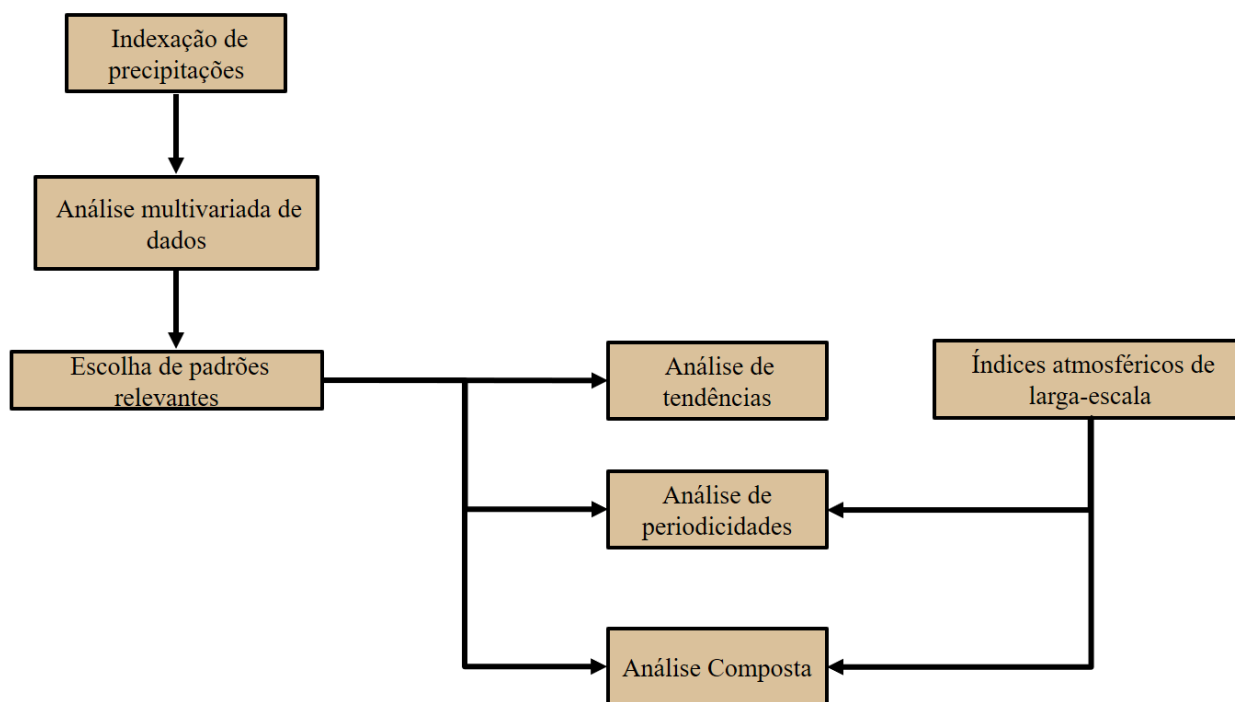


Figura 7. Esquema metodológico da análise de precipitações e seu racionamento com sistemas atmosféricos de larga escala

Na investigação de dados pluviométricos, é necessário extrair informações de postos com diferentes comprimentos de séries históricas e, para entender o comportamento da precipitação, faz-se necessária a avaliação simultânea no espaço e no tempo. De acordo com Hair Jr et al. (2010), a análise simultânea de duas ou mais variáveis já configura uma análise multivariada. Motivada pela extensa gama de dados existentes, a redução na quantidade de informações pode ser interessante antes de encontrar as relações de interdependência entre estes postos, pois facilita a investigação de padrões tanto em termos de espaço como em termos de tempo (JOLLIFFE, 2002). A limpeza, diagramação, tratamento e análise de dados foram executadas com auxílio do RStudio. Os mapas foram confeccionados com auxílio do software ArcGIS, versão 10.7.

5.2.1. Indexação de precipitações

Por tratar-se de um índice de precipitação padronizado superior ao PDSI, e por não depender de dados climáticos de observados, como o SPEI, fez-se a opção pelo SPI. Ao avaliar padrões espaço-temporais de precipitação, é interessante detectar a existência e como se dispõem estes padrões nas escalas semestral e anual. Nesse contexto, foram

escolhidos o SPI6 para o semestre mais seco, o SPI6 para o semestre mais úmido e o SPI12 para a escala anual, a qual é representante do ano hidrológico. Para indexação, foram buscadas séries históricas com dados faltantes (*missing data*) menores ou iguais a 5%. Partindo dessa premissa, buscou-se um equilíbrio entre a obtenção do comprimento máximo de séries históricas e o bom cobertura da área de estudo por parte destas séries históricas. Desta forma, após minuciosa avaliação do banco de dados de estações hidrológicas de domínio público, ANA (2021), buscou-se um equilíbrio entre comprimento de série histórica e disponibilidade de dados. Para tanto, o comprimento ótimo de série histórica para a área de estudo é de 42 anos (504 meses), contabilizados entre 1976 e 2017.

5.2.2. Identificação de padrões espaço-temporais de precipitação

Para avaliação de padrões espaço-temporais em séries históricas de precipitação, utilizou-se a metodologia EOF. A aplicação da EOF deu-se em um banco de dados de precipitações indexadas para o Semestre Seco, Semestre Úmido e Ano Hidrológico. As séries históricas indexadas passaram pelo processo de “*detrend*” antes da aplicação do Método EOF, a fim de que a existência de tendências não levasse a uma distribuição de padrões espaço-temporais enviesada. Na aplicação da técnica, foram identificadas as EOF com maiores variâncias. Para os padrões espaço-temporais identificados, é aplicada a técnica *varimax*, a qual permite maximizar a variância nos padrões com variância mais alta e reduzir variância nos padrões com variância menor, bem como retirará as restrições de ortogonalidade entre os mesmos. Após a aplicação desta técnica, a Regra de Ouro de North auxiliará na detecção dos padrões espaço-temporais fisicamente significantes. Após a separação dos padrões espaço-temporais significantes, é aplicado um valor limitante ao coeficiente de cada padrão espacial, a fim de que se observe a significância física de cada um deles. A espacialização dos valores de coeficientes em cada estação pluviométrica ocorrerá com auxílio do método de interpolação de Shepard (SHEPARD, 1968). São calculados padrões espaço-temporais de dados de precipitação indexados para o Semestre Seco, o Semestre Úmido e para o Ano Hidrológico para postos pluviométricos na bacia hidrográfica do CHURB.

5.2.3. Identificação de tendências em séries históricas

A identificação de tendências se dará em séries históricas de precipitações de postos pluviométricos individualmente e em padrões temporais significantes. Para tanto, são considerados séries históricas de postos pluviométricos e padrões temporais de períodos que tenham apresentado significância em toda área de estudo. Para a detecção de tendências nas variáveis citadas, é utilizado o Teste de Mann-Kendall Modificado (MMK). A mensuração da intensidade das séries históricas dos dados é efetuada pelo Estimador de Theil-Sen, enquanto a identificação de quebras de tendências em regimes de precipitação se dará através do Teste de Pettitt.

5.2.4. Detecção de períodos secos e úmidos

A identificação de periodicidades se dará em duas etapas. Inicialmente, a avaliação espaço-temporal de precipitações é considerada. São avaliadas periodicidades em padrões temporais cuja significância se dê em toda área de estudo. A avaliação de periodicidades ocorrerá através da aplicação da técnica *Continuous Wavelet Transform* (CWT) na série histórica de cada padrão temporal. Para avaliação do relacionamento entre padrões espaço-temporais significantes e índices atmosféricos de larga escala, é utilizado o método da *Cross-Wavelet Transform* (XWT). Os índices atmosféricos de larga-escala a serem utilizados nesta avaliação são o SOI (representando a ENSO), o TPI e o SAM, representando efeitos de oscilações provenientes da Antártida, a NAO, a AMO e a PDO, representando as oscilações oceânicas advindas dos oceanos Atlântico e do Pacífico respectivamente.

5.2.5. Avaliação de influência de sistemas atmosféricos de larga escala sobre regimes de precipitações

A análise composta é utilizada para entender o comportamento de uma série histórica perante as anomalias apresentadas na outra. Para o estudo de caso em questão, são consideradas as anomalias nas séries históricas de índices atmosféricos de larga

escala. Identificados os pontos em que as anomalias aconteceram nas séries históricas de cada índice atmosférico de larga escala, o comportamento das precipitações padronizadas será avaliado neste mesmo ponto, promovendo, assim, uma interpolação entre os postos pluviométricos, sendo a mesma executada com auxílio do Método de Shepard (SHEPARD, 1968). A identificação de anomalias nos índices atmosféricos de larga escala é efetuada para os meses referentes às janelas temporais cujos padrões espaço-temporais se dão por toda área de estudo. Nesse sentido, os índices atmosféricos e as janelas temporais de precipitações indexadas a serem analisadas são os mesmos a serem avaliados na Seção 5.2.4.

5.3. Impactos de modificações de usos e ocupações do solo e usos da água no balanço hídrico

O relacionamento entre uso e ocupação do solo, uso da água e disponibilidade hídrica é avaliado em de duas frentes A modelagem hidrológica e o coeficiente de correlação de Pearson. Para tanto, o processo de modelagem hidrológica e de avaliação por correlações de Pearson na bacia hidrográfica do CHURB será efetuado em parcelas, sendo esta bacia hidrográfica fracionada em sub-bacias, de forma que a análise ganhe em termos de simplificação e verticalização. O curso da análise de impactos modificações de usos e ocupações do solo no balanço hídrico está ilustrada na Figura 8.

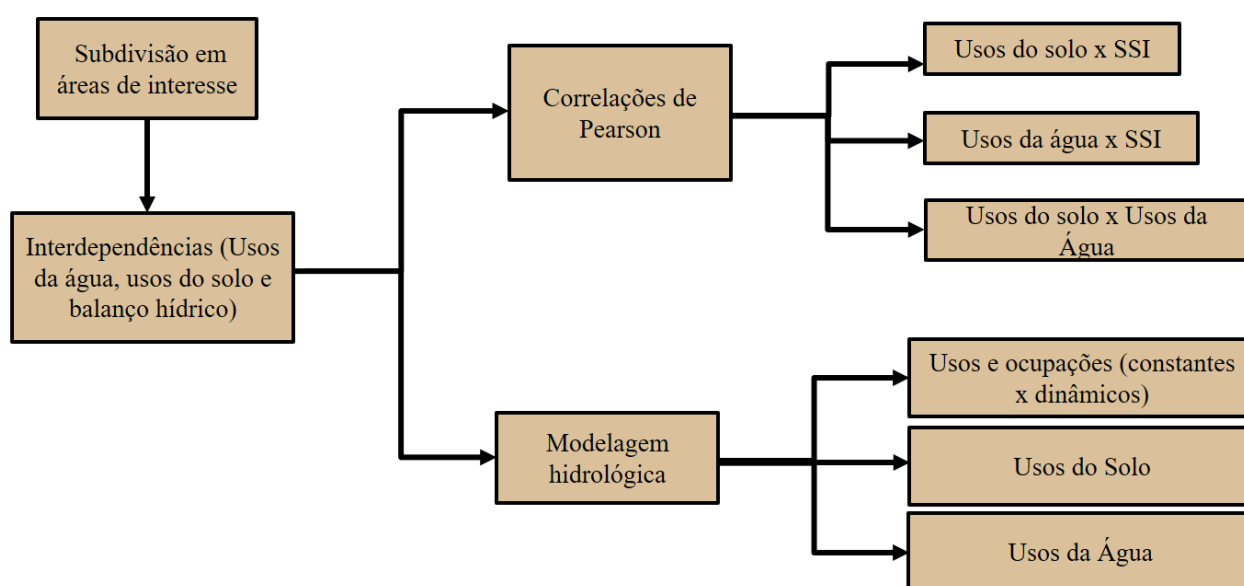


Figura 8. Esquema metodológico da análise de impactos de mudanças de usos e ocupações no solo no balanço hídrico

5.3.1. Modelagem hidrológica

A execução da modelagem hidrológica se dará através da utilização do modelo SWAT para eventos ocorridos entre 1985 e 2013. Como dados topográficos a serem imputados para cada bacia hidrográfica, são utilizados dados de modelos digitais de elevação (DEM – do inglês *Digital Elevation Model*) DEM. A bacia hidrográfica em pauta é fracionada em subbacias de, no máximo, 1000 km². A distribuição de postos fluviométricos de vazões observadas obedecerá a busca pela uniformidade espacial. Para a avaliação de cenários de usos e ocupações do solo, é considerada a série histórica de 29 anos entre 1985 e 2013. Tal série histórica é iniciada com o cenário de uso e ocupação do solo de 1985, e será atualizada a cada 5 anos. Logo, são utilizados os cenários de 1985, 1990, 1995, 2000, 2005 e 2010. Os tipos de solo existentes na bacia no cenário de 1985 permanecem inalterados ao longo da série histórica. Em cada subbacia, serão computados todos os usos e ocupações do solo e os tipos de solo com presença acima de 1%. Com relação à declividade do terreno, as mesmas serão levadas em conta quando presentes na subbacia com uma taxa igual ou maior que 5%. A atualização quinquenal do uso do solo foi feita a partir das unidades de resposta hidrológica (HRU do inglês – *Hydrological Response Units*). Os dados diários de precipitação utilizados são os mesmos que embasaram a aplicação na Seção 5.2.1. As grandezas climáticas diárias utilizadas para alimentação do modelo são os dados diários de temperatura média, umidade relativa do ar, velocidade média do vento e radiação solar. Para aquecimento do modelo, são utilizados os primeiros 8 anos da série histórica de dados climáticos (1985-1992). Para calibração do modelo, foram escolhidos os 15 anos posteriores ao intervalo utilizado para aquecimento do modelo, isto é, de 1993 a 2007. Para validação do mesmo, foram utilizados os últimos 6 anos da série histórica em questão, indo de 2008 a 2013. Uma vez que o modelo esteja calibrado e validado para usos e ocupações do solo com mudanças quinquenais, sua parametrização é utilizada para um cenário de usos e ocupações do solo inalterados. Como cenário de uso e ocupação do solo constante, é mantido aquele utilizado para o ano de 1985. Em termos comparativos, para além do diferencial na disponibilidade hídrica, são apresentadas as mudanças no uso e ocupação do solo, avaliados os acréscimos e os decréscimos dos principais usos e ocupações do solo, bem como o acréscimo ou o decréscimo dos principais usos da água. Tais análises, assim como a modelagem hidrológica ocorrem para cada uma das 4 bacias hidrográficas supracitadas.

Para qualificação dos processos de validação e calibração, são utilizadas métricas ressaltadas na bibliografia. Dentre as métricas possibilitadas pelo SWAT-CUP para mensuração da qualidade da calibração, são utilizados o coeficiente de determinação (R^2), a eficiência *Nash-Sutcliffe* (NSE), o percentual bias (PBIAS) e a eficiência de *Kling-Gupta* (KGE). O equacionamento de tais índices pode ser visto em Abou Rafee et al. (2019) e Cardoso de Salis et al. (2019). A qualificação das métricas está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Métricas utilizadas e a qualificação de seus intervalos

	Qualificação			
	Muito Bom	Bom	Satisfatório	Insatisfatório
R^2	$0,75 < R^2 \leq 1,00$	$0,65 < R^2 \leq 0,75$	$0,50 < R^2 \leq 0,65$	$R^2 \leq 0,50$
PBIAS	$PBIAS < \pm 10$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$	$PBIAS < \pm 25$
NSE	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$NSE \leq 0,50$
KGE	$0,90 \leq KGE < 1,00$	$0,75 \leq KGE < 0,90$	$0,50 \leq KGE < 0,65$	$KGE < 0,50$

5.3.2. Correlações entre usos e ocupações do solo, usos da água e disponibilidade hídrica

O coeficiente de correlação de Pearson é utilizado para avaliação do relacionamento entre usos e ocupações do solo de maneira interna e o relacionamento entre usos e ocupações do solo e disponibilidade hídrica. A série histórica a ser considerada tanto para uso e ocupação do solo, como para uso da água e para disponibilidade hídrica da bacia vai de 1985 a 2013 (42 anos). Para tanto, os usos e ocupações do solo e os usos da água são avaliados sob a perspectiva de seu correlacionamento com a disponibilidade hídrica. Em cada uma das quatro bacias supracitadas, as correlações são efetuadas no nível de subbacias, considerando os usos e ocupações do solo ali existentes, os usos da água e o SSI12 do posto fluviométrico à jusante do exutório de cada subbacia. São considerados os usos e ocupações do solo que aparecem em mais de 10% das subbacias. Tal método também é utilizado nas análises dos usos da água na bacia hidrográfica.

O relacionamento entre uso e ocupação do solo, uso da água e o balanço hídrico é avaliado de duas formas: através do coeficiente de correlação de Pearson entre séries

históricas, e por meio de modelagem hidrológica para usos e ocupações do solo dinâmicos. Para as correlações, as mesmas são efetuadas avaliando as séries históricas de uso e ocupação do solo, de usos da água e de escoamento superficial na área de estudo. As séries históricas de usos e ocupações do solo e de usos da água são inseridas na avaliação com a janela temporal anual, enquanto a série histórica de escoamento superficial é incorporada nas análises do índice padronizado de escoamento superficial (SSI, do inglês *Standardized Streamflow Index*). O cálculo do SSI segue as mesmas etapas do SPI, incluindo aí a distribuição escolhida (*Gamma*), conforme descrito desde a Equação 1 até a Equação 9. Para além das análises por correlações, a aplicação da modelagem hidrológica tem o papel de identificar como mudanças de característica dinâmica em trechos distintos da bacia hidrográfica podem impactar na disponibilidade hídrica na área de estudo.

5.4. Relacionamento entre totais precipitados e modificações no uso e ocupação do solo

Para avaliação das relações entre precipitações e usos e ocupação do solo, utiliza a técnica da correlação cruzada para avaliar a influência de uma variável sobre a outra. Para espacialização das precipitações e dos usos e ocupações do solo, primeiramente, utiliza-se o Método de Thiessen para separar as áreas de influência de cada posto pluviométrico. Posteriormente, leva em consideração o somatório de usos e ocupações do solo relevantes da Coleção 7 da Plataforma Mapbiomas dentro da área de influência de cada posto pluviométrico e, assim, aplica o método das correlações cruzadas. O curso da análise das relações entre precipitações e usos e ocupações do solo está ilustrado na Figura 9.

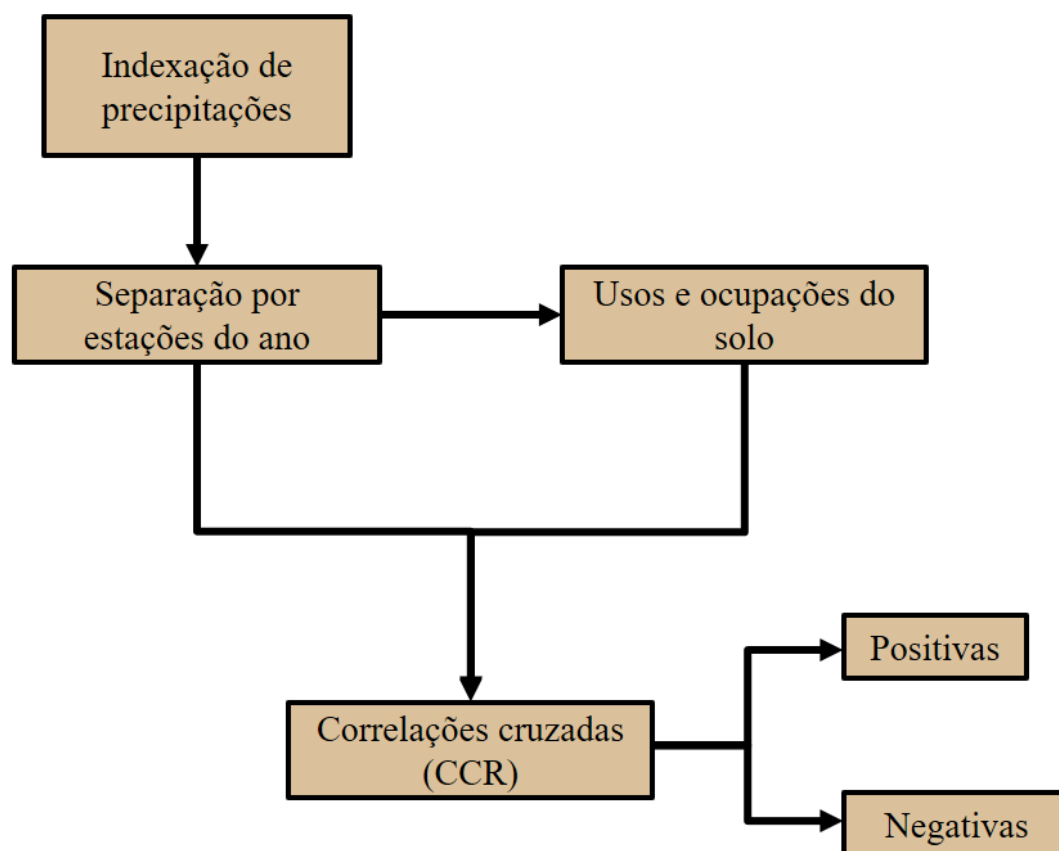


Figura 9. Esquema metodológico de análise do relacionamento entre precipitações de usos e ocupações do solo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Variabilidades espaço-temporais de precipitações

Foram investigados postos pluviométricos dispostos dentro da área de estudo e às margens da mesma com séries históricas maiores ou iguais a 42 anos. Para a seleção da janela considerada, levou-se em consideração o período que abrangia o maior número de postos pluviométricos e que tinha a melhor distribuição espacial na área de estudo, com, no mínimo, 10 km de distância umas das outras. Nesse sentido, o período escolhido foi o de 1976-2017, o qual compreendia 166 estações distribuídas de maneira homogênea na área de estudo, como apresentado na Figura 10.

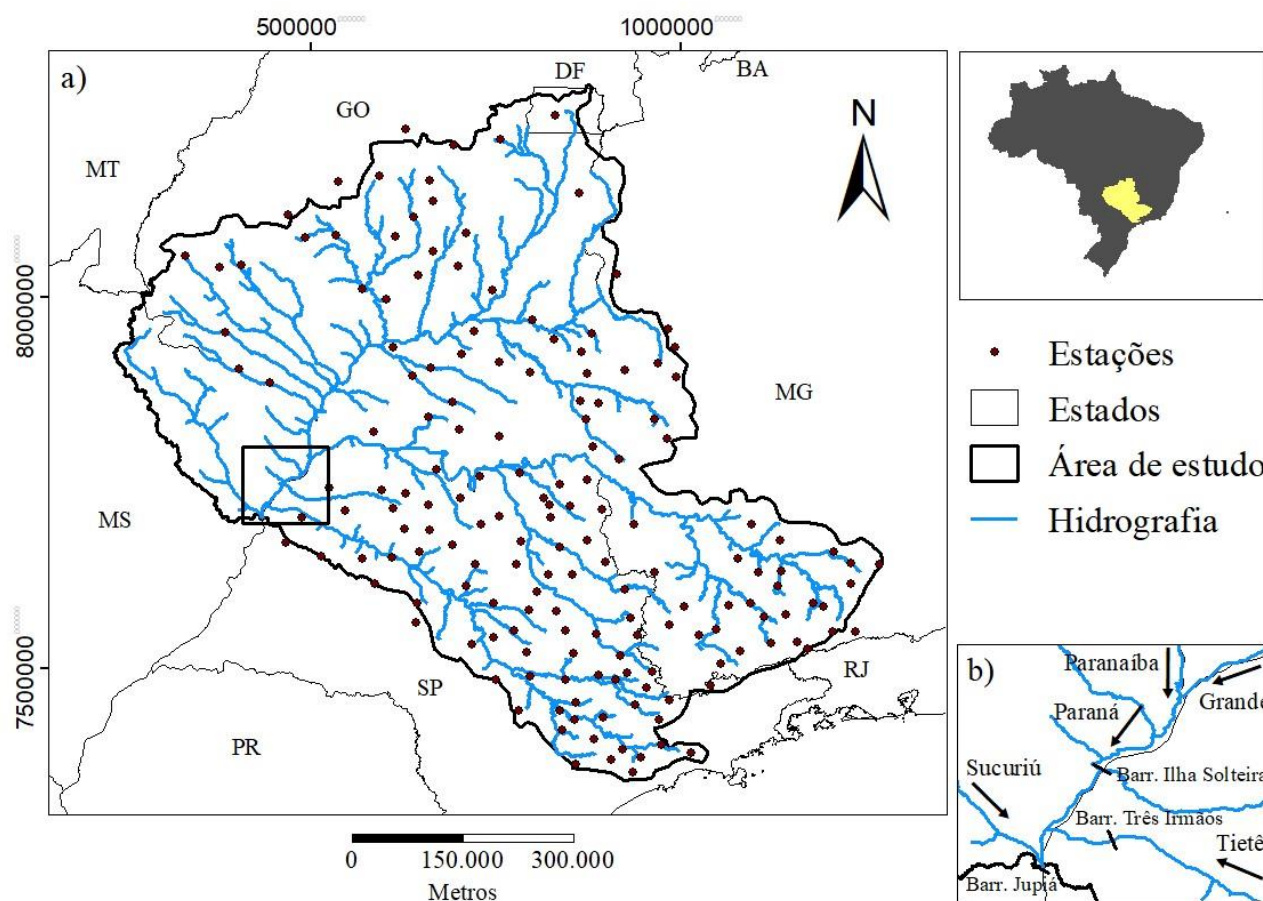


Figura 10. a) Área de estudo para o SPI; b) Área do CHURB evidenciada

Com auxílio do método de Thiessen, a delimitação do período de 6 a 12 meses referentes à indexação SPI6 e SPI12 foi feita a partir da distribuição anual das médias

mensais das 166 estações durante os 42 anos estipulados, conforme apresentado na Figura 11.

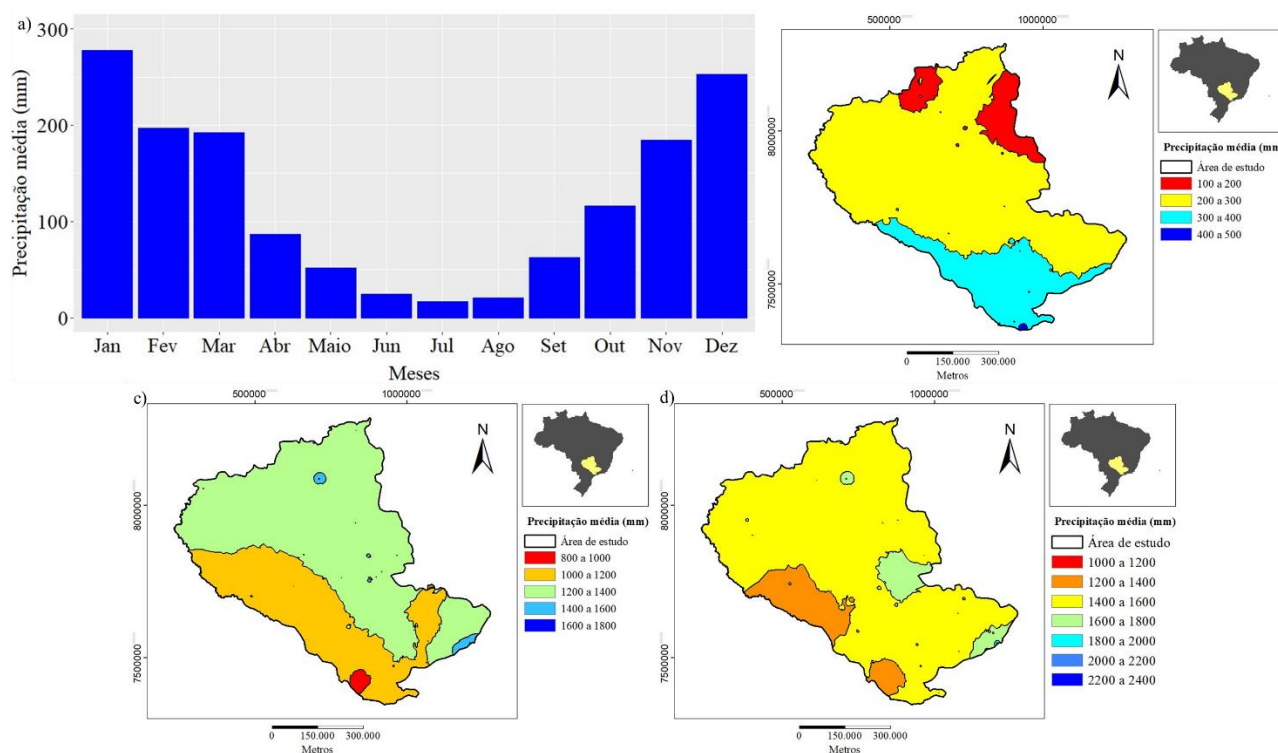


Figura 11. Precipitação a) Média mensal para a área de estudo na série histórica (1976-2017), b) Média anual espacializada para os seis meses mais secos, c) Média anual espacializada para os seis meses mais úmidos d) Média anual espacializada para o ano hidrológico.

Partindo das médias observadas na Figura 11a), foi feita uma média móvel de 6 meses, objetivando separar as estações no ano hidrológico e avaliar os eventos numa escala média de tempo. Nesse sentido, os seis meses mais secos estão entre abril e setembro, enquanto os seis meses mais úmidos estão entre outubro e março, com o ano hidrológico iniciando-se em outubro e encerrando-se em setembro. Na Figura 11b), observa-se que o acumulado de precipitações para o período seco está entre 100 a 500 mm, entre 800 e 1800 mm para o período úmido (Figura 11c), e o acumulado para o ano hidrológico está entre 1000 e 2400 mm. O estudo do SPI6 se fez necessário para avaliar separadamente o comportamento da precipitação na estação seca e na estação úmida, pois proporciona a avaliação de anomalias em escoamentos superficiais e níveis de reservatórios. Tais estruturas hidráulicas podem passar despercebidas na avaliação do SPI12 por conta da mudança do regime de chuvas entre estação chuvosa e estação seca.

O SPI para ambas as estações é denominado, respectivamente, SPI6D e SPI6W. Para complementação do estudo da estação seca e estação chuvosa, o SPI12 é determinado para identificação do padrão anual de precipitações na série e para avaliar a interação estação seca/estação úmida no ano hidrológico, em uma escala longa de tempo. O primeiro ano da série, 1976, foi utilizado para aquecimento do cálculo do SPI6 para o semestre úmido e para o SPI12. Nesse sentido, a identificação de padrões espaço-temporais é feita para 41 anos (1977 a 2017).

6.1.1. Avaliação de padrões espaço-temporais de precipitação

Para cada um dos semestres, foram avaliados os padrões espaço-temporais em cada um dos períodos envolvidos. Os padrões espaço-temporais foram avaliados via funções ortogonais empíricas (EOF – do inglês *Empirical Orthogonal Functions*). As condições de ortogonalidade entre as EOF foram relaxadas e a variância acumulada dos primeiros padrões espaço-temporais foram maximizadas através do método de rotação *Varimax*. A escolha do número de EOF avaliadas neste trabalho obedeceu a regra de ouro de North (NORTH et al., 1982). A aplicação da citada regra nas EOF rotacionadas (REOF) permitiu reter REOFs fisicamente significantes e com destacada variância, as quais estão identificados na Tabela 2.

Tabela 2. Variância explicada das REOF retidas para cada período (%)

Período	REOF1	REOF2	REOF3	REOF4	REOF5	Acumulação
SPI6D	23,41	14,53	13,01	10,33	10,19	71,47
SPI6W	18,54	13,84	13,33	-	-	45,71
SPI12	28,66	16,32	-	-	-	44,98

Como observado na Tabela 2, o semestre seco apresentou a maior variância explicada acumulada, bem como o maior número de REOFs fisicamente significantes. Tais resultados foram utilizados para validação de padrões espaço-temporais cujos

carregamentos apresentavam, um valor maior ou igual a 0,6. O limite de 0,6 nos carregamentos EOF salienta as regiões espacialmente representadas nos padrões temporais e, paralelamente, delineia sub-regiões na bacia hidrográfica estudada (GUO *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2020). Para geração do padrão espacial na área de estudo, os valores dos carregamentos dos postos pluviométricos foram interpolados pelo Método de Shepherd com auxílio do software ArcGIS 10.6. Os padrões espaciais de cada uma das REOF estão representados na Figura 12, estando numerados de acordo com sua respectiva REOF da Tabela 2.

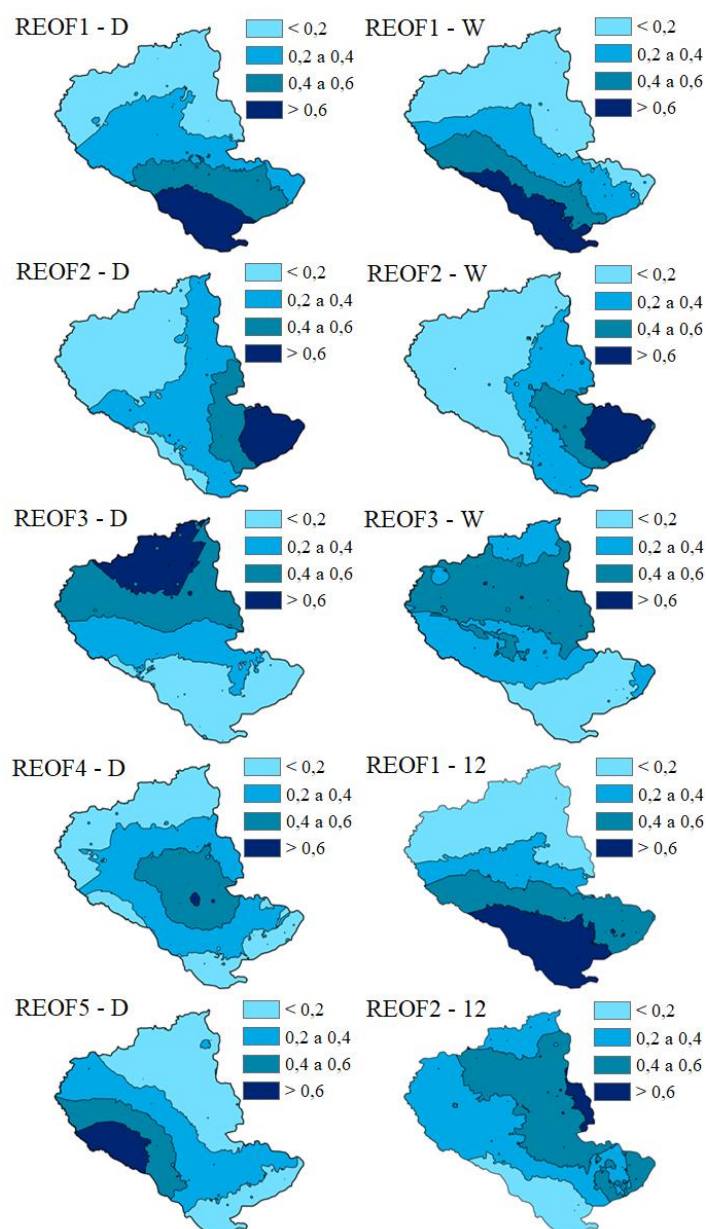


Figura 12. REOF significantes para os três períodos. Na coluna da esquerda, as cinco REOF relevantes para o Semestre Seco. Na coluna direita, as três REOF relevantes para o Semestre Úmido e as duas REOF relevantes para o Ano Hidrológico.

Na Figura 12, é possível observar padrões espaço-temporais significantes nas regiões Sul e Leste da bacia hidrográfica nos três períodos estudados, fato este indicado pela presença de regiões com valores de carregamento acima de 0,6. A Figura 9 indica que apenas o Semestre Seco apresentou REOFs significantes em toda área de estudo. Tal fato é corroborado pelo maior número REOFs significantes determinadas pelo critério de North e pela maior variância explicada acumulada (Tabela 2). Nesse contexto, a avaliação de tendências, de periodicidades e o relacionamento dos padrões temporais de precipitação e

os índices atmosféricos de larga escala ocorrerão apenas para os padrões espaço-temporais do Semestre Seco. As cinco regiões apresentadas na Figura 12 foram denominadas como Sul, Leste, Norte, Central e Sudoeste. Os padrões temporais de cada padrão espacial do período seco estão na Figura 13.

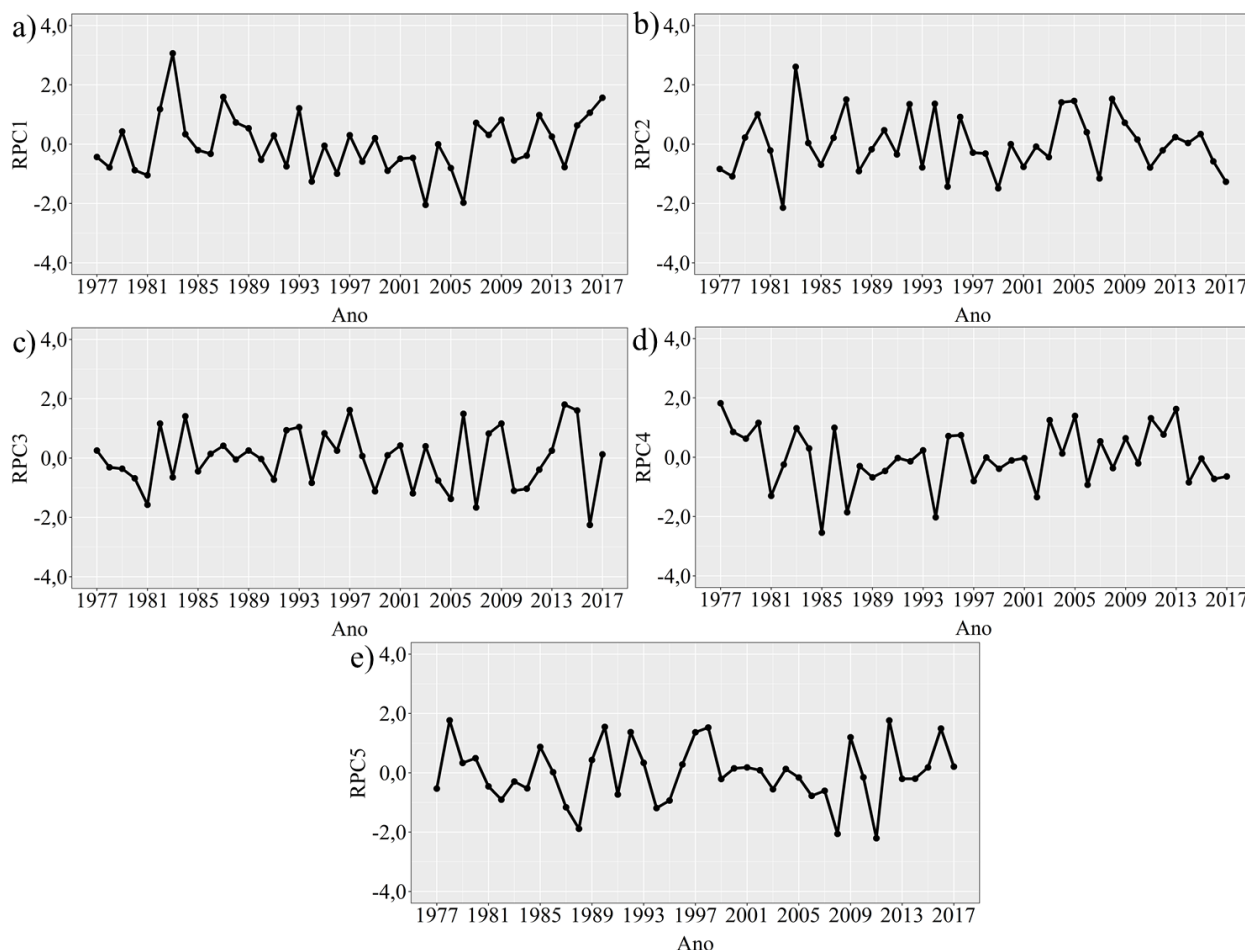


Figura 13. Cinco padrões dominantes RPC (REOF1 a REOF5) do período seco (SPI6D): a) Sul, b) Leste, c) Norte, d) Central, e) Sudoeste.

Comparando a Figura 12 com a Figura 13, é possível notar a presença de um pico entre os anos de 1982 e 1983 para as regiões Sul e Leste, indicando elevada pluviometria nestes anos. De Medeiros e De Oliveira (2021) apontam que a ocorrência de um evento El Niño de forte intensidade no ano de 1983, enquanto Fleischmann et al. (2020) relatam eventos de cheia em toda América do Sul para o referido ano. De acordo com Santos et al. (2021), o El Niño pode afetar significativamente a ZACS, tanto em intensidade

como em posicionamento. Nesse sentido, o intenso El Niño ocorrido em 1982 pode ter contribuído para o aumento dos totais precipitados na área de estudo. Grimm, Pal e Giogi (2007) e Kodama et al. (2012) apontam que o relevo montanhoso na região alta da bacia do rio Paraná exerce um efeito de “âncora” nas ZACS. Tal comportamento pode ter contribuído para o forte incremento de precipitação entre os anos de 1982 e 1983 nas regiões Sul e Leste da bacia hidrográfica do estudo.

6.1.2. Espacialização das tendências na área de estudo para o período seco

As séries históricas de precipitações padronizadas para o período seco tiveram suas tendências avaliadas através do MMK, enquanto a intensidade de tais tendências é avaliada pelo Estimador de Theil-Sen. A detecção de quebras de regime em modificações abruptas dentro das séries históricas foi efetuada através do Teste de Pettitt, estando representada na Figura 14.

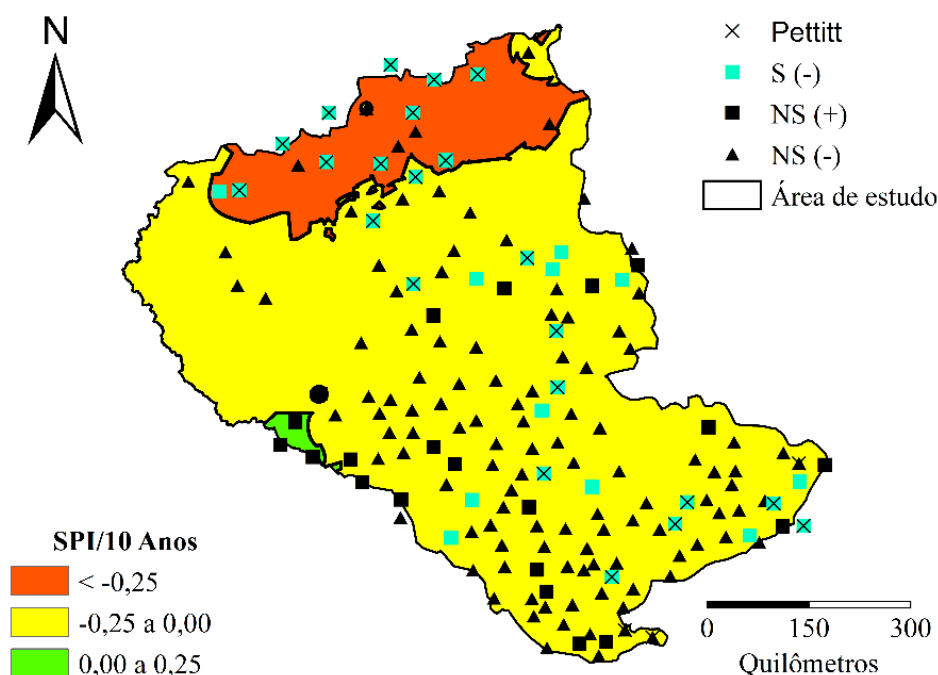


Figura 14. Espacialização da magnitude das tendências (em SPI/10 anos) de cada posto pluviométrico para o semestre seco (SPI6D). As tendências negativas não-significantes foram representadas pelos quadrados cianos, tendências positivas não-significantes foram representadas por quadrados pretos.

A observação da Figura 14 permite inferir que houve uma tendência não significativa de queda de precipitações nas regiões Sul, Leste e Central. Na região Norte da bacia hidrográfica, os postos pluviométricos apresentaram significantes tendências de decréscimo nos totais precipitados. A região Sudoeste da área de estudo mostrou tendências positivas não significantes. A distribuição de precipitações ilustrada na Figura 14 está alinhada com aquela identificada por Abou Rafee et al. (2020) em seu estudo de precipitações a bacia do rio Paraná. Na avaliação destes autores, foram identificados decréscimos significantes nos totais precipitados na região que, no estudo atual, é identificada como a região Norte durante o inverno (estação que se encontra no período seco deste trabalho). Adicionalmente, o estudo mencionado aponta a existência de significantes tendências de redução de precipitações durante o outono na área que corresponde à região centro sul deste trabalho.

A aplicação do teste de Pettitt nas séries históricas de SPI6D dos postos pluviométricos apontou que, na região Norte da área de estudo, um número destacado de estações experimentou uma redução abrupta nos totais precipitados. Em grande parte dos postos, tal mudança ocorreu nos biênios de 1997-1998 e 1998-1999. De acordo com Camilloni e Barros (2000) o El-Niño forte ocorrido em 1997-1998 não afetou pontualmente o regime de precipitações na parte alta da bacia do rio Paraná. No entanto, este evento pode ter evidenciado o início de uma mudança no regime hídrico, a qual estendeu-se até o final da série histórica deste trabalho.

6.1.3. Análise de periodicidades em padrões temporais

A avaliação de periodicidades nos padrões temporais de precipitação foi efetuada através da CWT. Tal análise está representada nos espectros de potência da Figura 15.

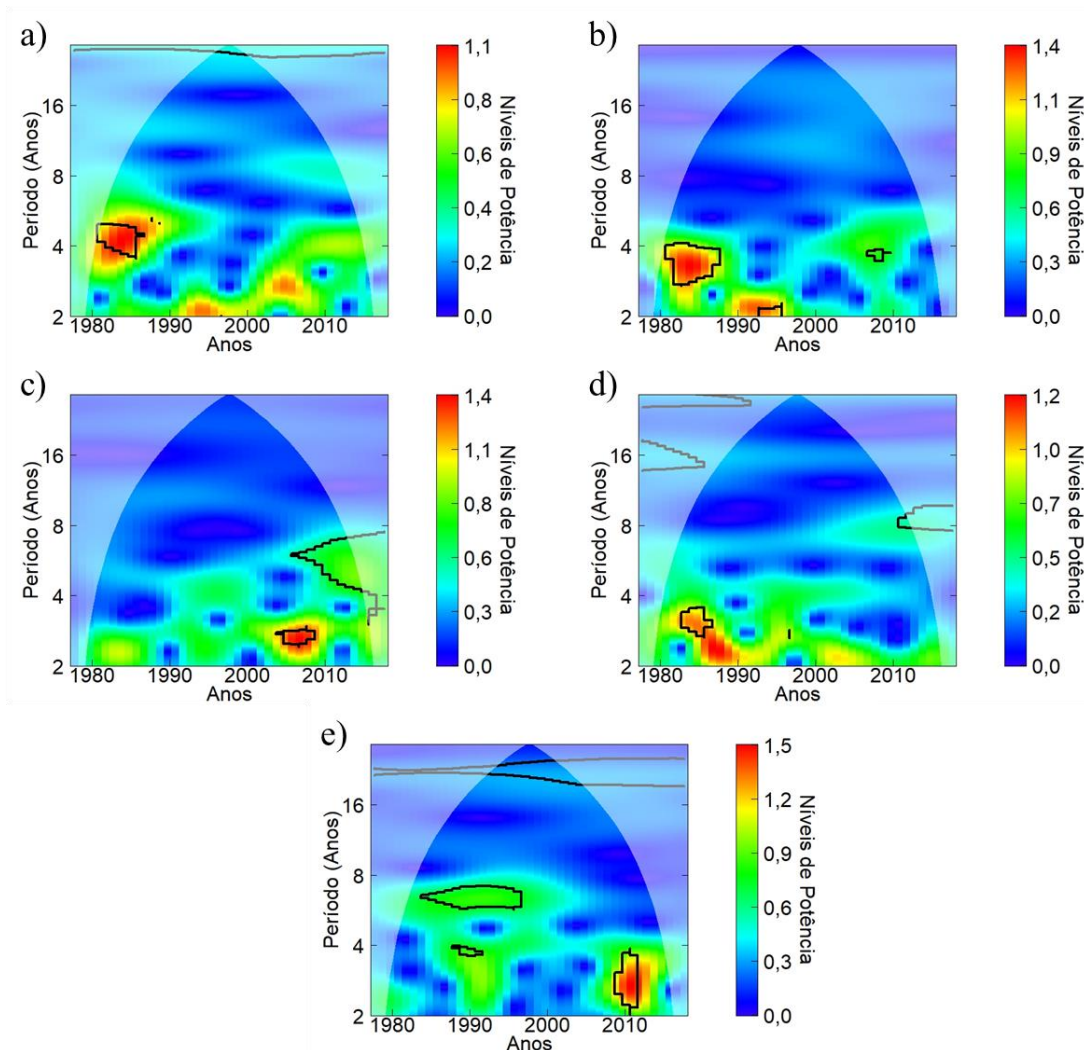


Figura 15. Espectro de potência das CWT para os padrões temporais a) RPC1, b) RPC2, c) RPC3, d) RPC4 e e) RPC5. O contorno negro define o nível de 5% de significância, cujo interior não é afetado por ruído vermelho. A região sombreada fora do cone de influência representa áreas em que ocorrem efeitos de borda

A observação da Figura 15 permite inferir que todas as periodicidades identificadas tiveram comportamento isolado. Para a RPC1, RPC2 e RPC4 (Figura 15a, Figura 15b e Figura 15d respectivamente), destaca-se a presença de regiões de alta potência entre os anos de 1981 a 1987, na banda de 4 anos (RPC1 e RPC2) e na banda de 2 anos (RPC4). Em termos de periodicidade, RPC1 e RPC2 estão centradas na banda de 4 anos, enquanto a RPC4 tem seu centro próxima à banda de 2 anos. A apresentação dos espectros de potência de RPC3 e RPC5 mostra que ambas têm as respectivas periodicidades centradas na banda de 3 anos, com comprimento na série histórica variando de 2008 a 2011.

As XWT foram utilizadas para investigar as relações entre os padrões temporais e os índices atmosféricos de larga escala. Os resultados da análise destas relações estão dispostos na Figura 16.

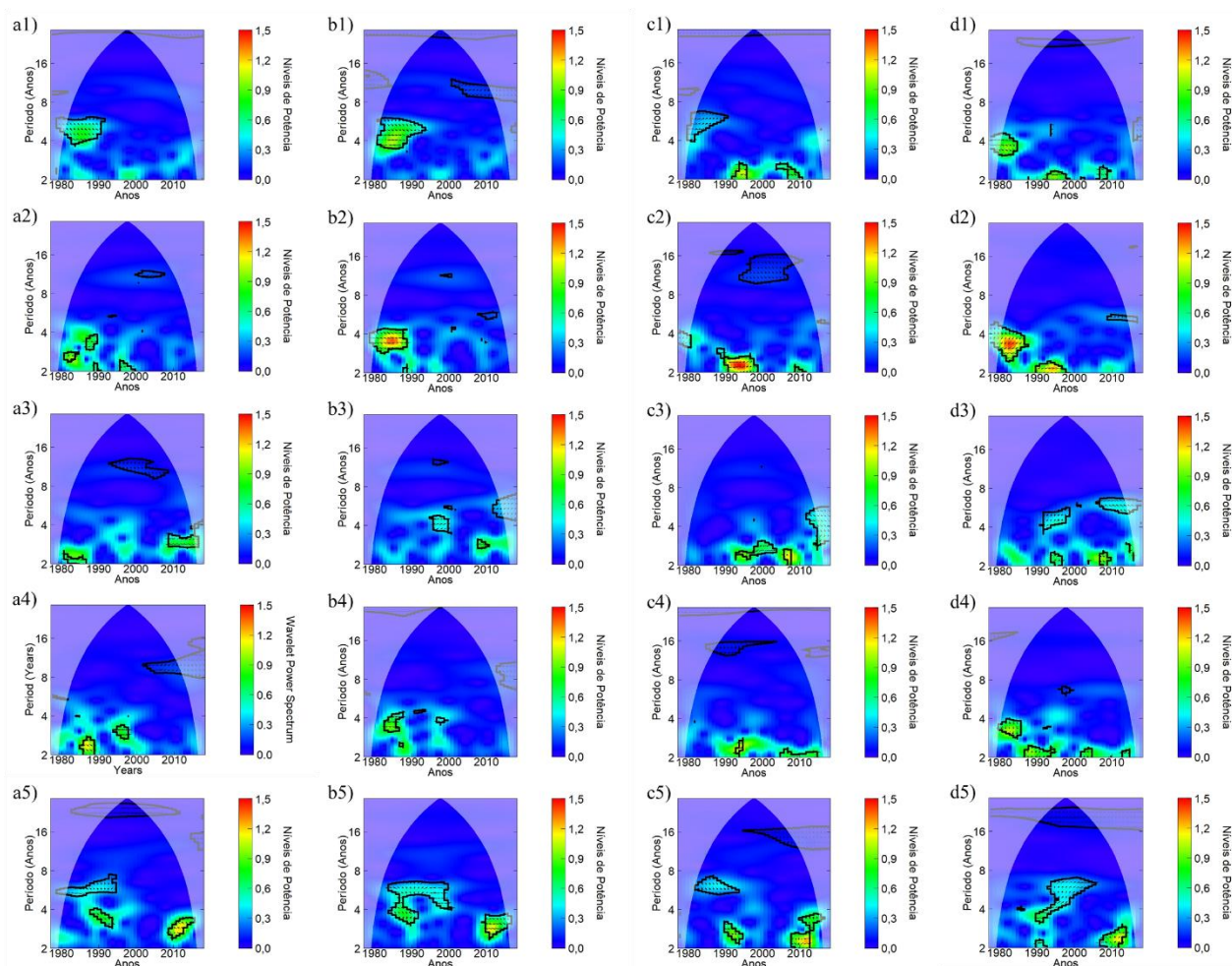


Figura 16. Espectro de potência das ondaletas cruzadas (XWT) entre os cinco padrões temporais dominantes (RPC1, RPC2, RPC3, RPC4 e RPC5) e os índices atmosféricos de larga escala SOI (a), TPI (b), NAO (c) e SAM (d). O contorno negro define o nível de 5% de significância, cujo interior não é afetado por ruído vermelho. A região sombreada fora do cone de influência representa áreas em que ocorrem efeitos de borda.

Na Figura 16, todas as regiões significantes têm característica isolada, repetindo o ocorrido na Figura 15 para as CWT dos padrões temporais. Os índices atmosféricos PDO e AMO não mostraram regiões significantes de alta potência no relacionamento com os padrões temporais dominantes. Nesse sentido, a análise XWT para ambos os padrões foi

excluída da discussão dos resultados. A avaliação da primeira coluna da Figura 16 aponta que todos os padrões temporais dominantes têm uma região significativa em comum com o SOI, estando essa região centrada no ano de 1983, variando entre as bandas de 2,5 a 6 anos. A exceção é a RPC5, cuja principal região de alta potência encontra-se centralizada no ano de 2010, com periodicidade centralizada em 2,5 anos. Com relação às flechas (as quais determinam as fases), observa-se que as das regiões comuns ao SOI diferenciam-se das regiões de outros índices, indicando que os padrões RPC1 e RPC2 estão em anti-fase com o SOI, ou seja, correlação negativa. Na mesma linha, infere-se que os padrões RPC3, RPC4 e RPC5 estão em fase com o SOI, logo, manifestam correlação positiva.

As relações entre as séries históricas temporais e o índice atmosférico de larga escala SOI são reconhecidamente efeitos de forte atividade do El Niño e intensas precipitações (CAMILLONI; BARROS, 2000; FLEISCHMANN et al., 2020). Para as periodicidades centralizadas no ano de 2010, embora tenha ocorrido um destacado evento La Niña, as precipitações na área de estudo não apresentaram forte intensidade.

A análise XWT para os índices atmosféricos de larga escala TPI e SAM na segunda e na quarta coluna mostra q uma região comum de alta potência centralizada no ano de 1983 para a RPC1 ((Figura 16b1) e (Figura 16d1)), RPC2 ((Figura 16b2) e (Figura 16d2)) e RPC4 ((Figura 16b4) e (Figura 16d4)) com comprimento de 8 a 10 anos, centradas nas bandas de 2 a 5 anos. Embora as regiões significantes de alta potência encontrem-se com parcelas fora do cone de influência na Figura 16b2) e Figura 16d2), a área dentro do cone de influência é tão extensiva e consistente que não deve ser considerada mera coincidência estatística (GRINSTED; MOORE; JEVREJEVA, 2004). Para a RPC5 ((Figura 16b5) e (Figura 16d5)), foram observadas regiões de alta potência próximas ao ano de 2010, com periodicidade entre 2,5-3 anos. Embora a RPC3 tenha apresentado comportamento similar ao da RPC5, a intensidade da potência de sua região significativa é menor, o que evidencia que as áreas próximas ao Planalto Brasileiro (Serra do Mar), são mais afetados por fenômenos provenientes do continente Antártico do que áreas interiores.

Segundo Blázquez e Solman (2017), os sistemas frontais da América do Sul são conectados com as oscilações ENSO, bem como com as oscilações advindas da Antártida. No presente trabalho, tais oscilações foram representadas pelo SOI e pelo par TPI/SAM respectivamente. De acordo com os citados autores, os efeitos do SOI mostraram-se mais intensos do que os efeitos das oscilações antárticas na estação de inverno. Como sistemas frontais movem-se na direção norte, partindo da região sul da América do Sul, o

comportamento da TPI e do SAM na análise XWT evidencia que o continente antártico afeta as precipitações na área de estudo. A baixa intensidade do índice SOI em relação aos índices TPI/SAM supões que exista uma defasagem que ultrapasse 6 meses. Segundo Andrade e Cavalcanti (2018), a influência das frentes frias nas precipitações, tanto em estações secas como em estações úmidas, se dá pelas condições climáticas polares, fato corroborado pelas regiões de alta potência para os índices TPI e SAM.

No que se refere às relações entre o índice atmosférico de larga escala NAO e os padrões temporais dominantes, foi identificada uma região de alta potência para a RPC2 (Figura 16c2) e, em potência menor, para a RPC1 (Figura 16c1). Tal fato indica teleconexões do NAO com as regiões Leste e Sul da área de estudo, bem como a possibilidade de impacto da Serra do Mar nestas teleconexões. Lovino et al. (2018) pontua que o sistema de precipitação está ligado ao SOI e ao NAO, mostrando periodicidade de 3 a 6 anos e um ciclo de, aproximadamente, 10 anos respectivamente. Tal análise está em consonância para com a análise XWT para o índice SOI, mas em dissonância para com a análise XWT para o índice NAO. A avaliação por região mostra que a região Leste mostrou maior sensibilidade a periodicidades para com os índices atmosféricos de larga escala, enquanto a região Norte mostrou menor sensibilidade. Tais evidências apresentam um contraste entre regiões, com a intensidade sendo reduzida conforme a latitude aumenta.

6.1.4. Teleconexões entre fenômenos atmosféricos de larga escala e regimes de precipitação

Para fins de identificação de teleconexões, a análise composta foi aplicada entre os índices atmosféricos de larga escala e os SPI6D para cada posto pluviométrico. Os anos cujos índices atmosféricos apresentaram 5 ou mais anos consecutivos abaixo do terceiro quartil (75%) ou acima do primeiro quartil (25%) estão indicados na Figura 17.

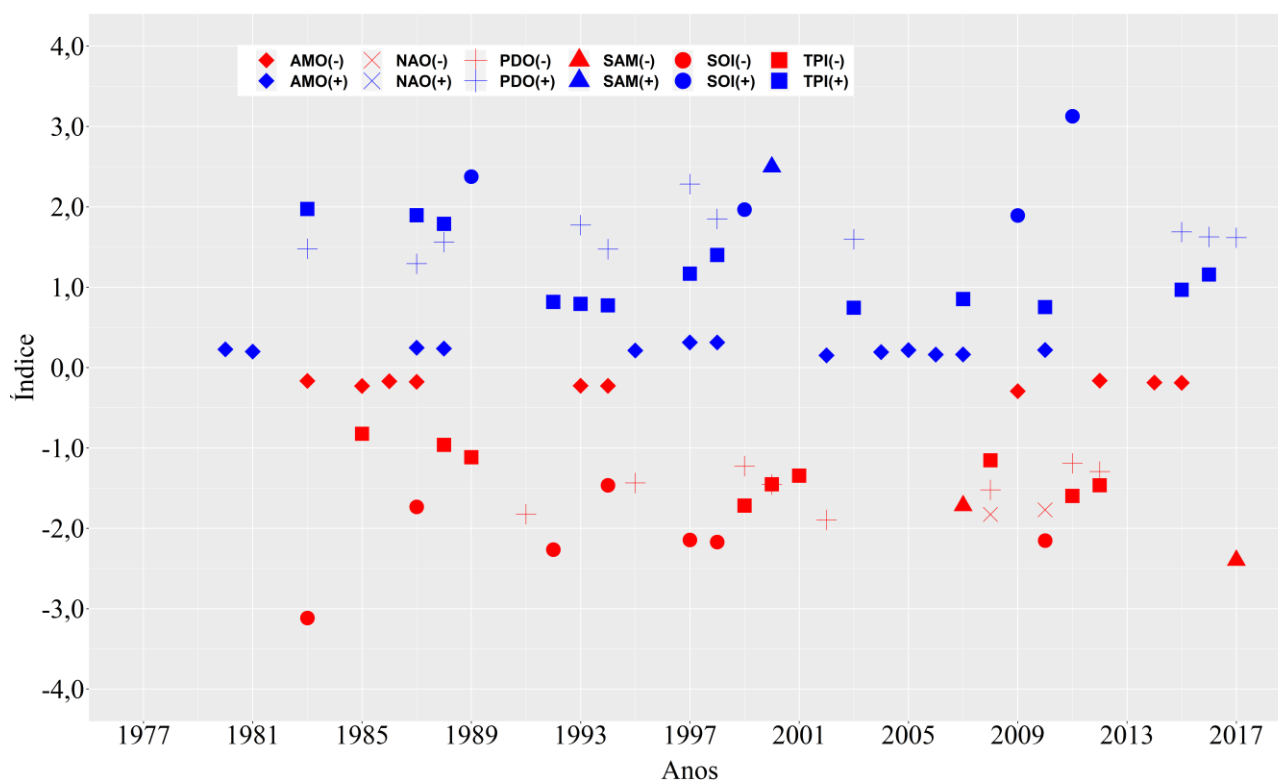


Figura 17. Compostos das teleconexões dos índices AMO, NAO, PDO, SAM, SOI e TPI. A teleconexão de cada índice foi plotada para compostos positivos e negativos, os quais estão dispostos da cor azul quando acima de zero e em vermelho quando abaixo de zero.

A Figura 17 mostra que o índice atmosférico de larga escala SOI teve maiores amplitudes, enquanto o índice AMO teve valores oscilando próximos a zero. O índice NAO (+) não mostrou quaisquer alterações na análise composta. O NAO (-) apresentou anos de anomalia, enquanto SAM (+) e SAM (-) apresentaram um e dois anos de anomalias respectivamente.

A média do SPI6D dos anos listados para cada índice atmosférico de larga escala foi extraída para cada estação pluviométrica. A Interpolação Shepherd foi aplicada para gerar a interpolação espacial através do ArcGIS 10.6. Tal espacialização está ilustrada na Figura 15.

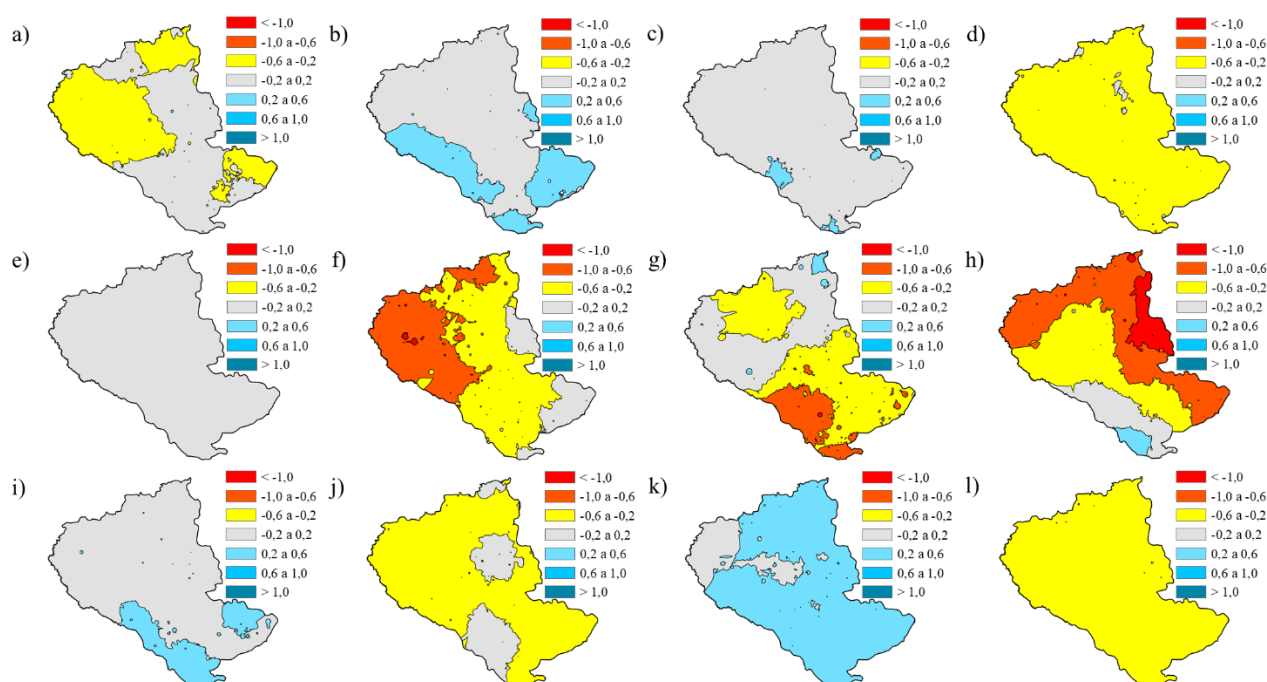


Figura 18. Interpolação média de SPI6D para a) SOI(+); b) SOI(-); c) TPI(+); d) TPI(-); e) NAO(+); f) NAO(-); g) SAM(+); h) SAM(-); i) PDO(+); j) PDO(-); k) AMO(+); l) AMO(-).

De acordo com a Figura 18, a atividade positiva da fase SOI (Figura 18a), a qual corresponde ao El Niño, levou a uma feição seca no Sudoeste, na sub-região Norte e Leste da área de estudo. Por outro lado, as precipitações durante os anos de fase negativa do SOI apresentaram uma teleconexão úmida nas sub-regiões Leste e Sudoeste da bacia. As teleconexões do SOI obtidas nas sub-regiões Leste estão em consonância com as obtidas por Junqueira et al. (2022) para a mesma região. A fase positiva do TPI (Figura 18c) mostrou uma teleconexão neutra sobre as precipitações na área de estudo, enquanto o TPI (-) (Figura 18d) impactou toda a área de estudo com um aumento da precipitação. A fase positiva do NAO (Figura 18e) não apresentou influência sobre as precipitações, enquanto a fase negativa do NAO (Figura 18f) mostrou diminuir fortemente as precipitações em todas as sub-regiões, exceto na oriental. A fase negativa do NAO apresentou apenas dois eventos anômalos, portanto sua relação com as precipitações na área de estudo não tem significado estatístico. A fase positiva e negativa do SAM (Figura 18g) e Figura 18h) teve a mesma teleconexão em termos de influência na precipitação, estando relacionada com a redução da precipitação na bacia. No entanto, assim como o índice NAO, as fases do SAM apresentaram um número pequeno de anomalias, e os efeitos do SAM sobre a precipitação mencionados não possuem significado estatístico.

O índice atmosférico de larga escala PDO apresentou teleconexões contrastantes a partir de suas fases positiva (Figura 15i) e negativa (Fig. 18j). As estações secas correspondem à fase PDO (+) com mais intensidade do que a estação chuvosa na fase PDO (-). Tal constatação difere de Junqueira et al. (2022) e está em consonância com Zanin e Satyamurty (2020). As fases da AMO apresentaram forte contraste, com a AMO (+) (Figura 15k) modulando uma feição seca em toda a área de estudo e uma teleconexão úmida em todas as regiões da área de captação UHC para o AMO (-) (Figura 15l). Zanin e Satyamurty (2020) apontaram que não está claro um impacto direto da AMO sobre a bacia do alto rio Paraná. No entanto, os resultados mostraram aqui que ambas as fases AMO positiva e negativa (Figura 15h e Figura 15i) levam os eventos da ZCAS a fortes e fracos, respectivamente, o que aumentaria e diminuiria respectivamente as precipitações na área de estudo. Nesse sentido, as teleconexões AMO neste estudo foram o oposto de Zanin e Satyamurty (2020), mas voltando a estar em consonância com Junqueira et al. (2022) para o índice atmosférico de larga escala AMO na sub-região Leste.

6.2. Evidências de impactos do uso e ocupação do solo no balanço hídrico

A avaliação do uso e ocupação do solo se deu através de: 1) Interdependências entre usos do solo, usos da água e disponibilidade hídrica; 2) Impactos do uso e ocupação do solo e usos da água no escoamento superficial através do modelo hidrológico. Para tanto, considera-se que, para melhor simplificação de análises e verticalização dos estudos, é interessante que a bacia hidrográfica do CHURB seja subdividida e analisadas em quatro parcelas: Grande, Paranaíba, Tietê e Complementar, as quais estão ilustradas na Figura 19 abaixo.

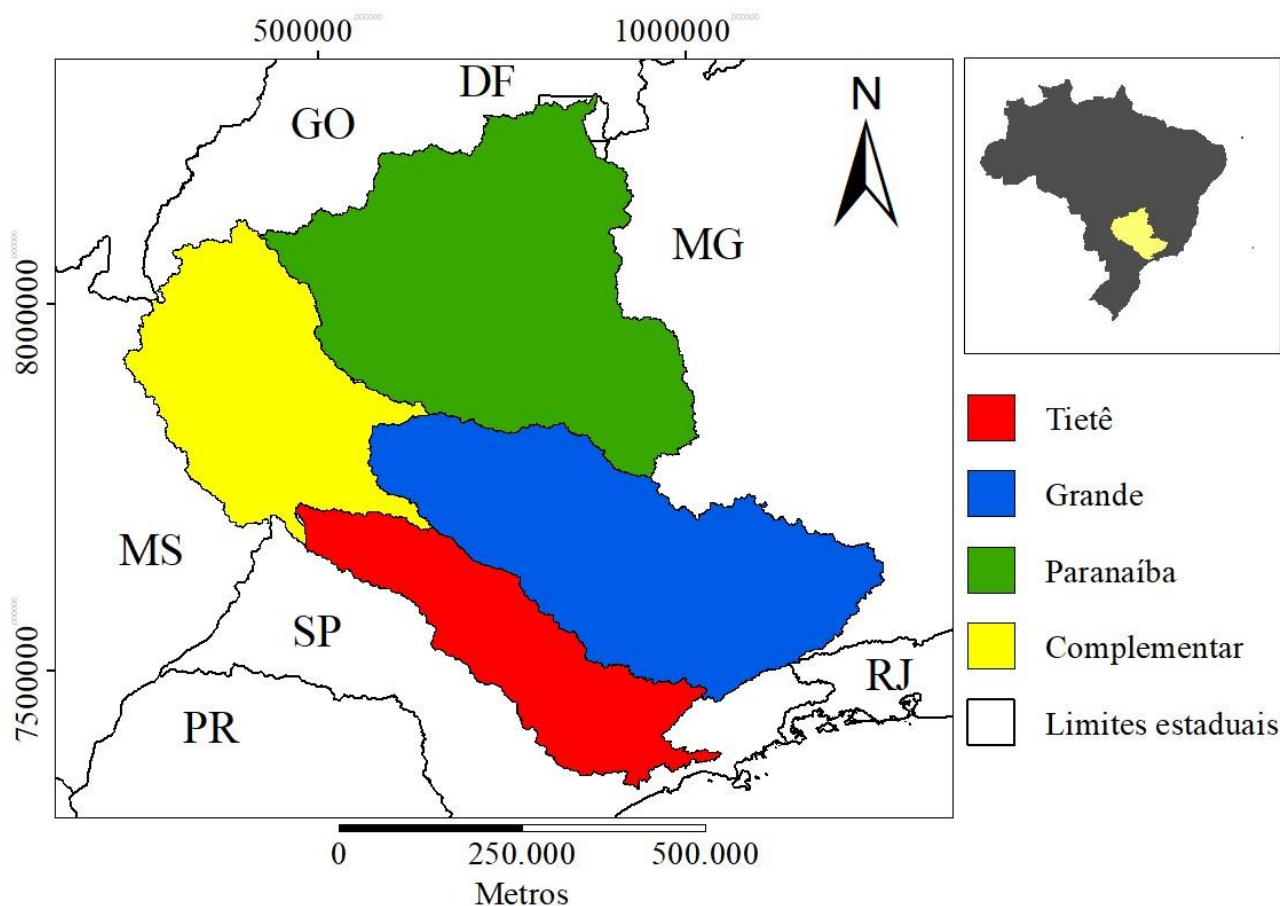


Figura 19. Sub-bacias hidrográficas que compõem a área de estudo

Esta etapa demandou esforço computacional destacado, principalmente devido à extensão das bacias hidrográficas da Figura 19. As etapas de processamento dos modelos digitais de elevações e as iterações para a calibração e validação do modelo hidrológico estão entre as que mais demandaram tempo. Para cada bacia hidrográfica da Figura 19, o processo de preparação, desenvolvimento e análise de resultados levou cerca de dois meses. Além da extensão das bacias hidrográficas, a qualidade dos dados de entrada e o comprimento das séries históricas também são variáveis que afetam o tempo de processamento de uma bacia hidrográfica como observado no trabalho de Poojashree, Peladdy e Suresha (2022).

As nomenclaturas utilizadas para cada uso e ocupação do solo seguiram as designações de cada uso e ocupação do solo utilizadas na construção do modelo hidrológico SWAT, estando as mesmas descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Siglas para os respectivos usos e ocupações do solo na bacia do CHURB

Sigla	Uso e ocupação do solo
FRSE	Formação florestal
RNGB	Formação savânica
EUCA	Silvicultura
WETL	Pântano
RNGE	Formação campestre
PAST	Pastagens
SUGC	Cana-de-açúcar
AGRL	Agricultura geral
URMD	Área urbana
BARR	Solo Exposto
WATR	Água

O processo de calibração e validação do modelo hidrológico para cada sub-bacia utilizou os parâmetros hidrológicos apresentados na Tabela 4. A etiqueta “R” indica que o parâmetro foi multiplicado, a etiqueta “V” indica a substituição de um parâmetro pelo outro. A escolha destes parâmetros está em acordo com a metodologia utilizada por Abou Rafee et al. (2020). A parametrização efetuada pelos autores permitiu uma boa calibração e validação em exutórios interessantes a este trabalho.

Tabela 4. Intervalo dos parâmetros iniciais de calibração

Parâmetro	Mínimo	Máximo
1:R__CN2.mgt	-0,100	0,100
2:R__SOL_AWC.sol	-0,400	0,400
3:R__SOL_K.sol	-0,800	0,800
4:R__OV_N.hru	-0,900	0,900
5:V__GWQMN.gw	1,000	3000,000
6:V__GW_DELAY.gw	1,000	90,000
7:V__REVAPMN.gw	0,000	1000,000
8:V__RCHRG_DP.gw	0,000	1,000
9:V__GW_REVAP.gw	0,020	0,200
10:V__ALPHA_BF.gw	0,000	1,000
11:V__ALPHA_BNK.rte	0,000	1,000
12:V__CH_N2.rte	0,015	0,150
13:V__CANMX.hru	0,000	30,000
14:V__SURLAG.bsn	0,001	15,000
15:V__ESCO.hru	0,000	1,000
16:R__SLSUBBSN.hru	-0,400	0,500
17:R__HRU_SLP.hru	-0,400	0,400
18:V__CH_K2.rte	0,000	10,000
19:V__LAT_TTIME.hru	0,000	30,000
20:R__EPCO.bsn	0,000	1,000

O processo de modelagem hidrológica da área de estudo se deu pela aplicação do mesmo procedimento metodológico em cada uma das sub-bacias expostas na Figura 16. O processamento do modelo se deu em três iterações para a calibração e uma para validação. A primeira calibração foi utilizada para avaliação de sensibilidade dos parâmetros do modelo e, nesta etapa, utilizou-se de 700 simulações para o processo. Para a segunda e terceira etapa da calibração, bem como para a etapa de validação, foram utilizadas 350 simulações.

6.2.1. Bacia hidrográfica do Rio Grande

6.2.1.1. Interdependências entre usos e ocupações do solo, usos da água e disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Grande

Através do SWAT, a área de estudo foi dividida em 102 sub-bacias, as quais estão ilustradas na Figura 20.

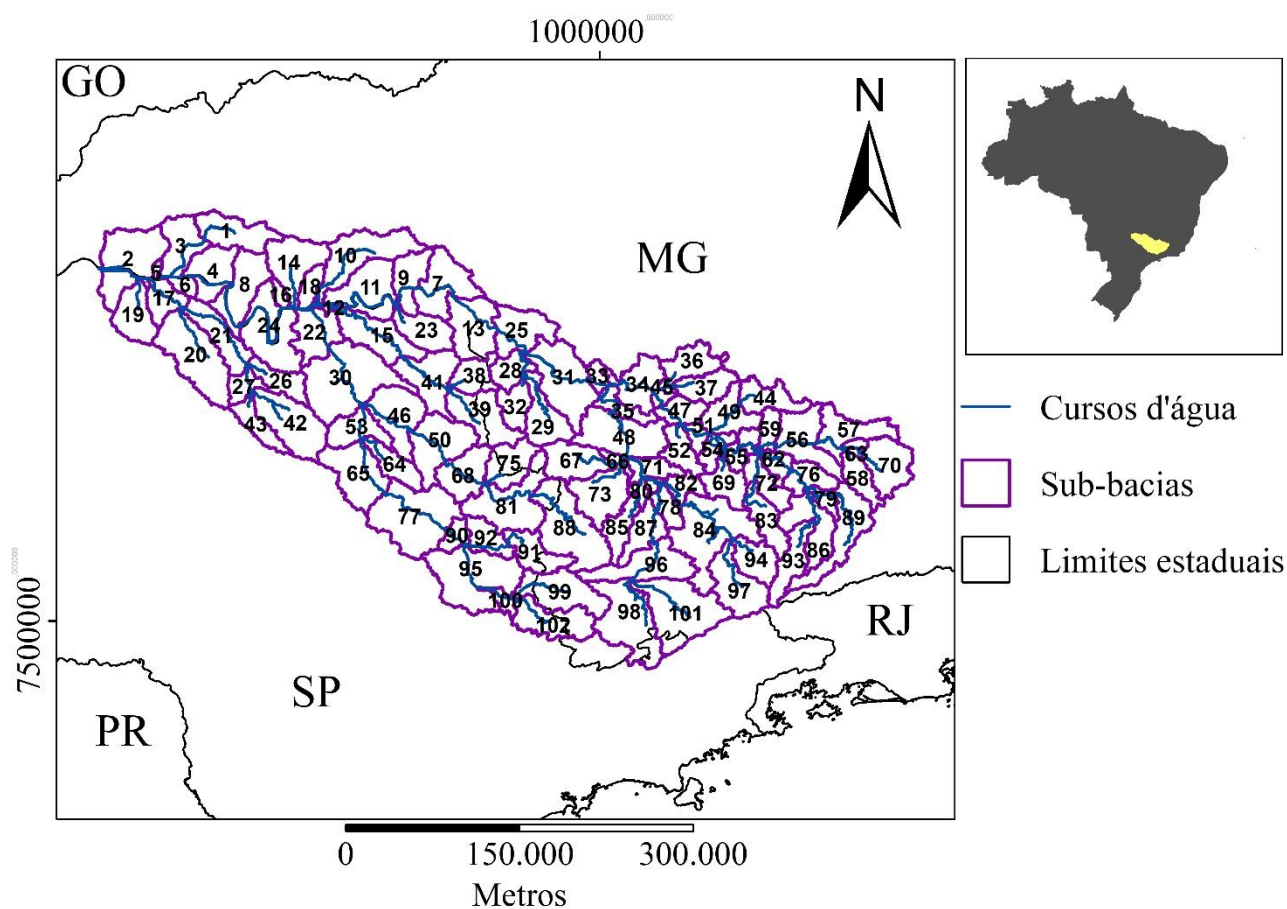


Figura 20. Divisão de sub-bacias na bacia hidrográfica do rio Grande

A subdivisão da área de estudo levou em consideração a distribuição de postos fluviométricos com séries históricas sem falhas. Nesse sentido, os postos fluviométricos a serem considerados na análise da bacia do rio Grande, estão apresentados na Figura 21, e a identificação e a localização dos mesmos estão descritas na Tabela 5.

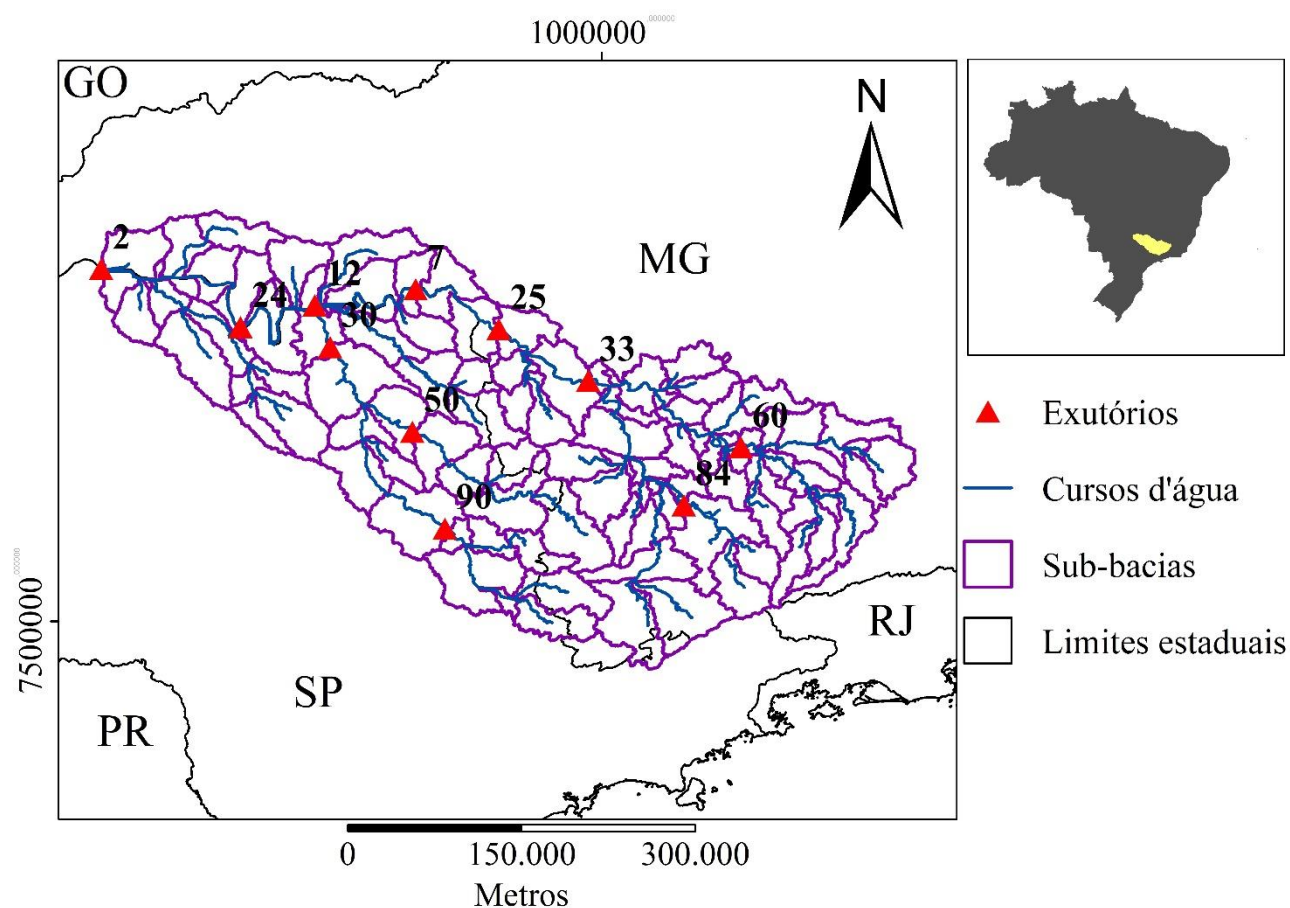


Figura 21. Postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Grande

Tabela 5. Postos fluviométricos na bacia do rio Grande

Subbacia do posto	Identificação do posto	Latitude	Longitude
2	UHE Água Vermelha	7803704	567899
7	UHE Igarapava	7786299	839314
12	UHE Porto Colômbia	7772505	752158
24	UHE Marimondo	7753680	688131
25	UHE Mascarenhas de Moraes	7751955	910908
30	Ponte Joaquim Justino	7736444	765390
33	UHE Furnas	7707303	988106
50	Clube de Regatas	7663421	836508
60	UHE Funil	7650045	1119780
84	UHE Furnas - Rio Verde	7599990	1070763
90	UHE Marimondo - Porto Ferreira	7579815	864398

Os postos fluviométricos apresentados na Figura 21 e descritos na Tabela 5 foram utilizados para a modelagem hidrológica. Para avaliação das interdependências entre

água, uso e ocupação do solo e disponibilidade hídrica, suprimiu-se da análise os postos que eram exutório das sub-bacias 7, 12, 30 e 33, e a padronização de suas vazões incrementais pelo SSI12 do mês de outubro está ilustrada na Figura 22. A aplicação do teste MMK nos postos fluviométricos não encontrou tendências significativas.

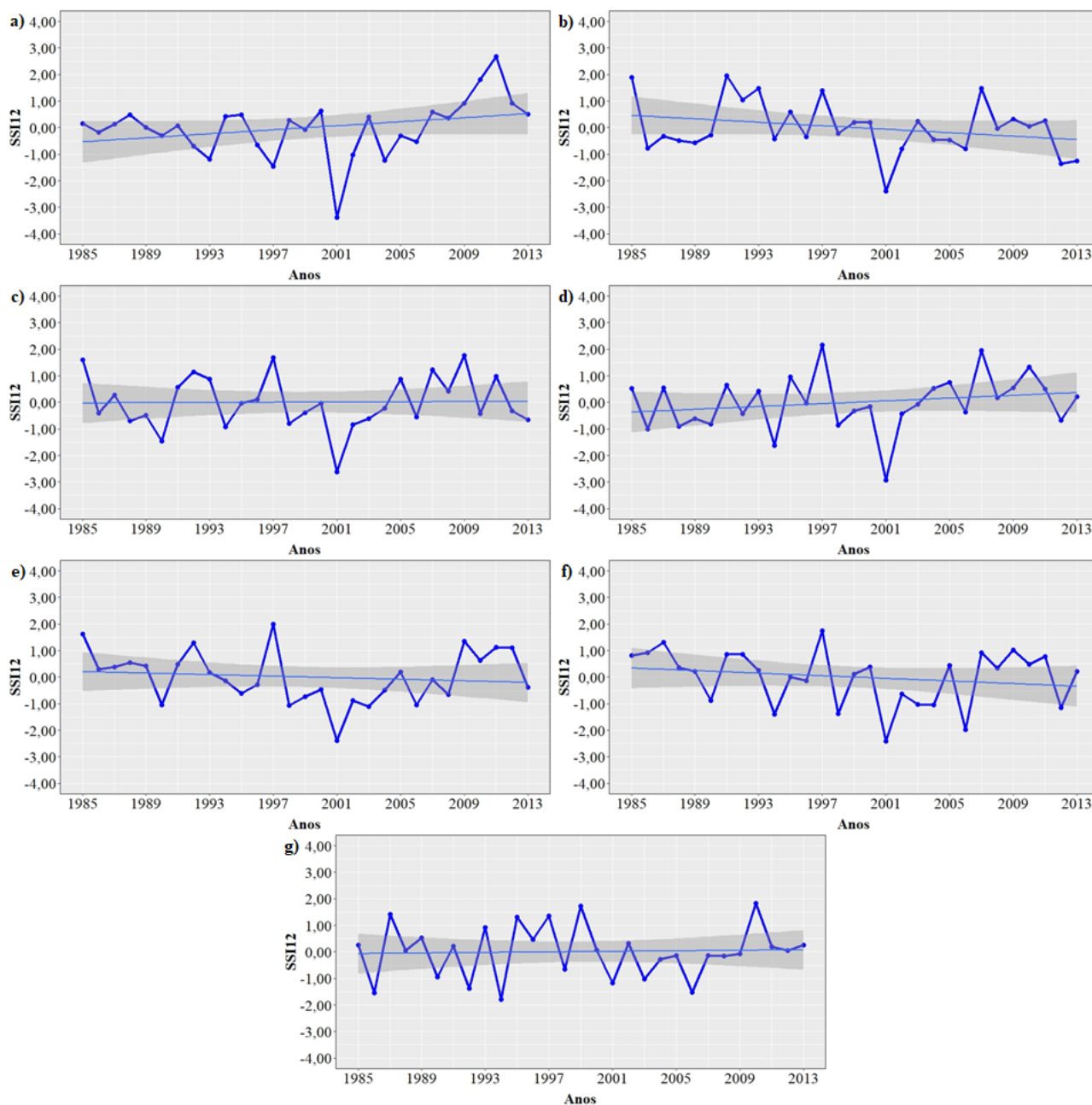


Figura 22. SSI12 de cada posto fluviométrico na bacia hidrográfica do rio Grande para a) UHE de Água Vermelha; b) UHE de Marimbondo; c) UHE de Mascarenhas de Moraes; d) Clube de Regatas; e) UHE de Funil; f) UHE de Furnas – Rio Verde; g) UHE de Marimbondo – Porto Ferreira

A aplicação da média das correlações de cada uso e ocupação do solo, os quais estão representados na Figura 23, ponderada com suas respectivas áreas de influência, revela os usos mais impactantes como, remoção do cerrado (b), cana-de-açúcar (f), pastagem (e) e áreas urbanas (h), seguidos por perda de campos (d), silvicultura (c), solo descoberto (i), agricultura (g) e florestas nativas (a). Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações que estejam acima de 0,37 são consideradas correlações positivas significantes, enquanto correlações que estejam abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significantes. Correlações que estejam entre -0,37 e 0,37 são consideradas correlações não-significantes.

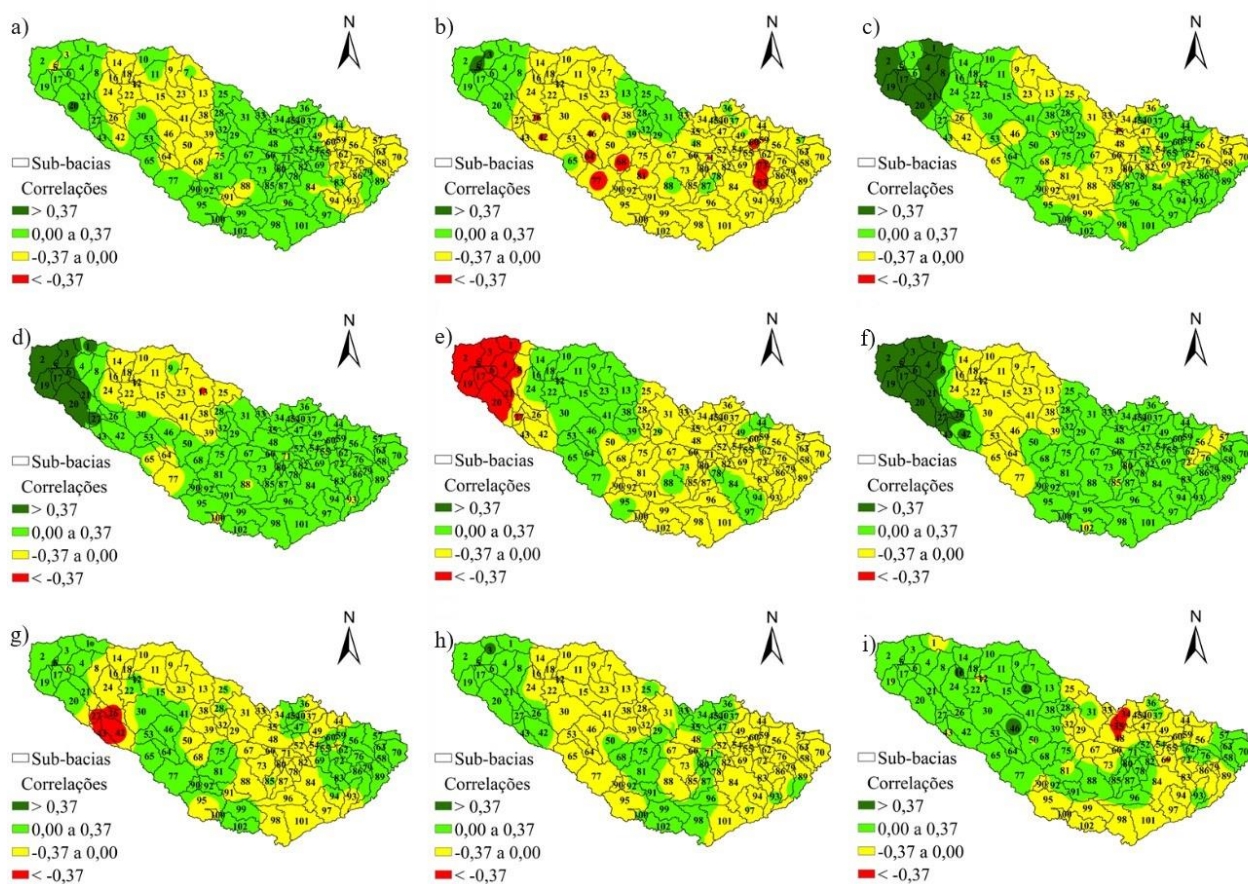


Figura 23. Correlação entre uso-ocupação do solo e SSI na bacia hidrográfica do rio Grande para a) Formação florestal; b) Formação savânica; c) Formação campestre; d) Floresta plantada; e) Pastagens; f) Cana-de-açúcar; g) Agricultura; h) Área urbana; i) Solo descoberto.

As formações florestais, as áreas urbanas e as áreas de solo descoberto na Figura 23a), Figura 23h) e Figura 23i) apresentaram correlações significantes pontuais que

podem ser tratadas como meramente estatísticas. De acordo com De Oliveira-Filho (2009), as formações savânicas e as formações campestres, apresentadas nas Figuras 23b) e 23c), compõem o cerrado. A correlação negativa de forma generalizada na área central da bacia hidrográfica indica entre fluviometria e área de formação savânica indica que estas áreas de cerrado excepcionalmente sofreram acréscimo de área e, logo, incrementaram a evapotranspiração ao longo do tempo, em parte devido aos efeitos da Lei 13550/2009, a qual dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Cerrado no Estado, e dá providências correlatas. As formações campestres têm correlação positiva na área próxima ao exutório da bacia, o que pode ser explicado pela menor capacidade evapotranspirativa e aumento no escoamento superficial da formação campestre em relação às formações savânicas.

A relação entre fluviometria e de floresta plantada (eucalipto) foi evidenciada na Figura 23d), A floresta plantada apresenta evapotranspiração potencial em relação aos demais usos-ocupações (WENDLAND; BARRETO; GOMES, 2007) característica da sua fase de crescimento, frequente nas fazendas devido à idade produtiva desta cultura. Identifica-se correlação positiva significativa entre formação campestre e fluviometria na região baixa da bacia. Logo, as correlações positivas na área baixa da bacia são meramente estatísticas,

A significativa correlação negativa na área baixa da bacia hidrográfica para as pastagens na Figura 23e) indica substituição de cultura, bem como a correlação positiva apresentada na Figura 23f) para cana de açúcar e 23g) para agricultura geral nas sub-bacias do trecho baixo da bacia indicam substituição de atividade econômica. A substituição de atividades indica impacto no escoamento superficial por conta do aumento da evapotranspiração potencial. Tal dinâmica indica o efeito da transferência da umidade atmosférica de uma fonte evapotranspirativa, vindo a condensar e ser convertida em precipitação a oeste. Também é possível inferir que a agricultura implantada não era usuária de irrigação, visto que a concentração de pivôs ocorre em regiões específicas principalmente na área de drenagem dos postos fluviométricos 12 e 50, nas quais o terreno apresenta característica plana.

De acordo com Landau e Guimarães (2014), terrenos com declividade acima de 13% representam limitações para a mecanização da agricultura, e, conforme estudo de Guidolini et al. (2020), a bacia do rio Grande caracteriza-se por ter um relevo ondulado (declividade de 8% a 20%) com declividade média de 11,03 m, valor próximo ao limiar que

limita a agricultura irrigada. De forma geral, o crescimento dos uso-ocupações ocorreu em decorrência das áreas de pastagens terem dado lugar a atividades econômicas diversificadas, as quais foram rotacionadas sem ceder lugar novamente às pastagens, além dos ganhos obtidos com o aumento do rigor das leis de conservação e sua aplicação no baixo curso do rio Grande.

Partindo das vazões padronizadas, buscou-se identificar correlações entre o comportamento histórico das demandas hídricas na bacia e as séries históricas em cada posto fluviométrico. Estas correlações estão apresentadas na Figura 24. De forma geral, a aplicação da média de tais correlações significativas de cada uso, ponderada com suas respectivas áreas de cobertura, revela os dois usos mais impactantes como dessedentação animal e irrigação agrícola, sendo os menos impactantes o uso industrial, o abastecimento humano e a mineração. Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações que estejam acima de 0,37 são consideradas correlações positivas significantes, enquanto correlações que estejam abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significantes. Correlações que estejam entre -0,37 e 0,37 são consideradas correlações não-significantes.

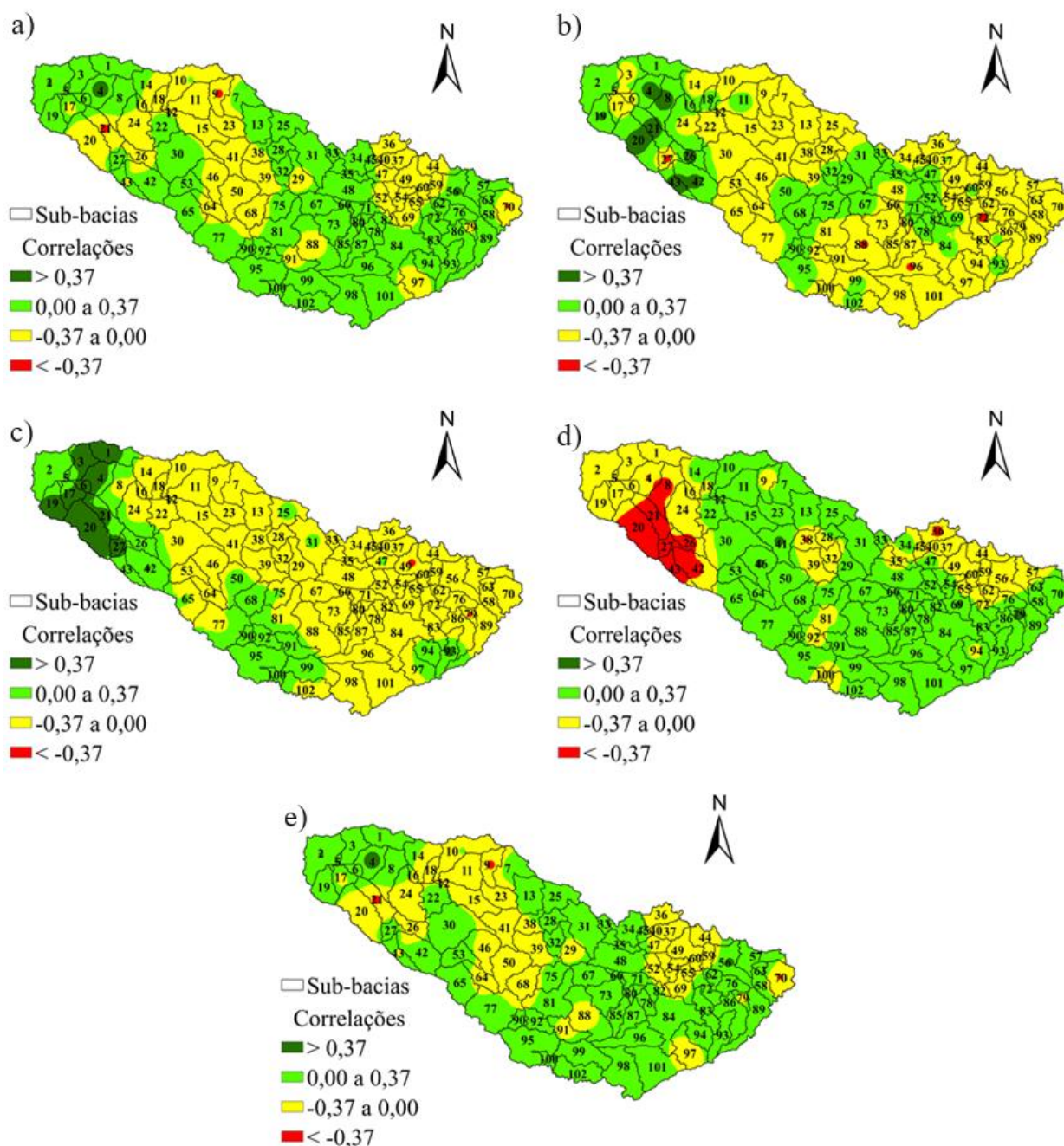


Figura 24. Correlação entre uso da água e SSI para a) Abastecimento humano; b) Industrial; c) Irrigação agrícola; d) Dessedentação animal; e) Mineração na bacia hidrográfica do rio Grande.

As correlações significativas são observadas com valores positivos para o uso em irrigação e negativos para o uso em dessedentação, ambos concentrados no trecho baixo da bacia. Pontos isolados, embora com correlações significantes, foram desprezados em função da sua representatividade espacial reduzida em relação à área.

Foram investigadas as interdependências entre as duas demandas hídricas e os dois usos produtivos do solo mais impactantes sobre a disponibilidade hídrica. Para tanto, optou-se por estabelecer correlações entre variáveis restritas, e as mesmas a serem correlacionadas na Figura 25 foram: dessedentação animal contra cana-de-açúcar, dessedentação animal contra pastagem, irrigação agrícola contra cana-de-açúcar, irrigação agrícola contra pastagens. Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações que estejam acima de 0,37 são consideradas correlações positivas significantes, enquanto correlações que estejam abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significantes. Correlações que estejam entre -0,37 e 0,37 são consideradas correlações não-significantes.

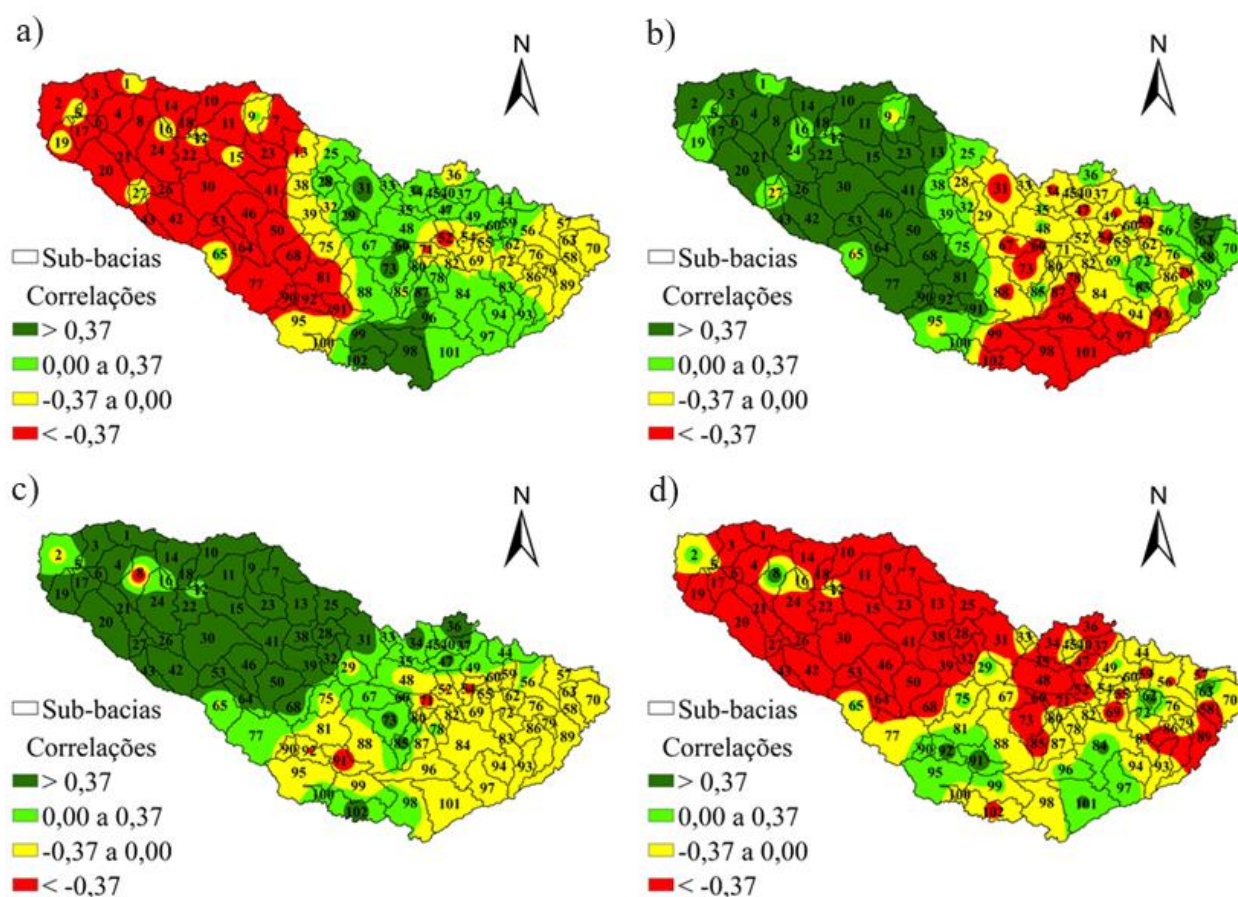


Figura 25. Correlações entre usos da água e usos e ocupações do solo para: a) Dessedentação animal contra cana-de-açúcar; b) Dessedentação animal contra pastagem; c) Irrigação agrícola contra cana-de-açúcar; d) Irrigação agrícola contra pastagens para a bacia hidrográfica do rio Grande

Na Figura 25a), identifica-se correlações não-significantes, entre dessedentação animal e cana-de-açúcar, na parte mineira de leste da bacia, correlação positiva significativa em toda faixa norte-sul da bacia, iniciada no seu extremo sul e correlação negativa significativa em todo lado oeste, trecho médio e baixo da bacia hidrográfica. A correlação negativa na bacia se dá pelo crescimento da cana-de-açúcar em detrimento da atividade pecuária, o que pode ser explicado pela redução na área de pastagens em todo lado paulista da bacia. As correlações positivas significantes na faixa vertical central da figura evidenciam que, embora possa ter ocorrido aumento da área de plantio de cana-de-açúcar, seguido de redução na área de pastagens, a dessedentação animal teve incremento. O extremo leste da bacia sistematicamente não apresenta correlações significativas entre os fatores até aqui correlacionados (usos-ocupações e disponibilidade hídrica e demandas hídricas versus disponibilidade hídrica, além das correlações com o setor sucroalcooleiro). Por outro lado, esta porção da bacia apresentou relações claramente evidentes quanto aos fatores da urbanização e da irrigação, conforme resultados a seguir.

A observação da Figura 25b) permite inferir que a série histórica do uso-ocupação do solo para pastagens e a série histórica de demandas hídricas para dessedentação animal mostra correlação significativa na quase totalidade das sub-bacias. Uma correlação negativa encontra-se limitada à região sul da bacia hidrográfica enquanto a esperada correlação positiva pode ser atribuída para o restante da área de estudo. Nas áreas de correlação positiva, é possível inferir, conforme o esperado, tanto o aumento do pasto seguido do aumento do rebanho e da dessedentação, quanto a possível redução do pasto acompanhada também da redução do rebanho. Segundo o IBGE (2017a), os municípios mineiros da bacia do rio Grande (213), apresentam 12% do rebanho sendo leiteiro (770 mil cabeças) e os paulistas (159), 1,9% (123 mil cabeças). Nos municípios da região sul da bacia (19 paulistas e 37 mineiros) a produção de gado para abate em ambos rebanhos se configura abaixo das médias estaduais na bacia (52% abaixo de 6,9 bi R\$/município da porção do SP, com 12 dos seus 19 municípios abaixo da mediana e 73% abaixo de 8,8 bi R\$/município da porção do MG, com 22 dos seus 37 municípios abaixo da mediana mineira da bacia). Por outro lado, segundo IBGE (2017b) embora a produção leiteira paulista na região sul da bacia seja 41% acima da média na bacia (2,5 m³/município-ano), com 11 destes 19 municípios acima da mediana paulista da bacia, a produção da porção mineira inverte a tendência paulista na região sul da bacia de forma acentuada (44% abaixo da média na porção, com 10 destes 37 municípios acima da mediana mineira da bacia), devido ao montante expressivamente mais elevado em toda porção mineira da bacia

(12,1 contra 2,5 m³/município-ano paulistas). Assim, o fato da correlação entre pasto e dessedentação ser significativamente negativa no setor sul da bacia e o da produção bovina aquém do restante da bacia, sugerem condições para a conversão das pastagens em lavouras, eventualmente com aumento da produtividade do rebanho e demanda de dessedentação mesmo em níveis inferiores ao do restante da bacia. Este fato pode ser ilustrado pelo uso de confinamento de rebanho e pelo crescimento de outros produtos animais.

Observa-se correlação positiva entre cana-de-açúcar e irrigação na Figura 25c) na parcela central e na parcela final da área de estudo em virtude do crescimento de 145% da atividade sucroalcooleira no Centro-Sul brasileiro entre 2000 e 2015 (ANA, 2017). O surgimento desta cana-de-açúcar se dá paralelamente ao aparecimento de outras atividades agrícolas em substituição às pastagens, como apontado na Figura 23. Logo, há evidências de que, tanto a cana-de-açúcar como outras atividades agrícolas apresentaram áreas irrigadas. As significantes correlações negativas entre irrigação agrícola e pastagens (Figura 25d)) mostram que na parte central e na parte oeste (baixa) e extremo leste (alta) da bacia a queda na área de pastagens ocorreu também acompanhada de incremento de demandas de irrigação. Na parte sul da bacia, as correlações não foram significativas demonstrando independência entre estes fatores. Este fato é exemplificado com o incremento na área de cana-de-açúcar, em detrimento das pastagens, sem que as mesmas fossem irrigadas.

6.2.1.2. Impactos do uso e ocupação do solo na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Grande

Após a primeira calibração, foram excluídos os parâmetros R__SLSUBBSN.hru, R__EPCO.bsn, V__SURLAG.bsn, V__ALPHA_BNK.rte por conta da insensibilidade dos mesmos perante o processo de modelagem. O desempenho de cada posto fluviométrico na etapa de calibração está disposto na Tabela 6.

Tabela 6. Métricas de cada posto fluviométrico para a calibração do modelo hidrológico na bacia hidrográfica do rio Grande

Calibração (1993 – 2007)				
Posto	R2	NSE	PBIAS	KGE
UHE Água Vermelha	0,95	0,94	-2,40	0,93
UHE Igarapava	0,95	0,93	7,80	0,84
UHE Porto Colômbia	0,95	0,92	9,20	0,82
UHE Marimbondo	0,94	0,94	0,60	0,97
UHE Mascarenhas de Moraes	0,95	0,87	14,00	0,74
Ponte Joaquim Justino	0,90	0,68	-6,70	0,58
UHE Furnas	0,94	0,78	21,10	0,64
Clube de Regatas	0,85	0,83	7,30	0,89
UHE Funil	0,91	-0,30	62,10	0,14
UHE Furnas Rio Verde	0,90	0,80	21,60	0,75
UHE Marimbondo Porto Ferreira	0,87	0,48	-23,40	0,49

Após a fase de calibração, o modelo hidrológico foi validado e, para tanto, os parâmetros calibrados foram validados para anos distintos, e o desempenho das métricas para a validação está representado na Tabela 7. O melhor valor para cada parâmetro está disposto na Tabela 8.

Tabela 7. Métricas cada posto fluviométrico na validação do modelo na bacia hidrográfica do rio Grande

Validação (2008 – 2013)				
Posto	R2	NS	PBIAS	KGE
UHE Água Vermelha	0,96	0,96	0,40	0,94
UHE Igarapava	0,94	0,88	10,10	0,77
UHE Porto Colômbia	0,94	0,86	12,40	0,75
UHE Marimbondo	0,96	0,96	-0,50	0,93
UHE Mascarenhas de Moraes	0,93	0,84	13,30	0,71
Ponte Joaquim Justino	0,89	0,68	-13,50	0,66
UHE Furnas	0,92	0,71	22,90	0,59
Clube de Regatas	0,76	0,57	6,30	0,68
UHE Funil	0,85	-0,42	62,30	0,11
UHE Furnas Rio Verde	0,91	0,69	28,30	0,64
UHE Marimbondo Porto Ferreira	0,84	0,59	-27,30	0,69

Tabela 8. Parâmetros calibrados e validados para o modelo hidrológico da bacia hidrográfica do rio Grande

Parâmetro	Valor
R__CN2.mgt	-0,170
SOL_AWC(..).sol	0,467
R__SOL_K(..).sol	-0,662
R__OV_N.hru	0,653
V__GWQMN.gw	1613,251
V__GW_DELAY.gw	56,723
V__REVAPMN.gw	1540,166
V__RCHRG_DP.gw	0,976
V__GW_REVAP.gw	0,023
V__ALPHA_BF.gw	0,821
V__CH_N2.rte	0,043
V__CANMX.hru	24,599
V__ESCO.hru	0,994
R__HRU_SLP.hru	-0,355
V__CH_K2.rte	9,733
V__LAT_TTIME.hru	14,290

Observando a avaliação dos períodos de calibração e validação, o modelo hidrológico teve desempenho satisfatório para 10 dos 11 postos fluviométricos na calibração, com o posto da UHE de Funil, apresentando valores de métricas abaixo da faixa satisfatória, com exceção do R^2 . Na etapa de validação, o desempenho das métricas caiu conforme a distância para com o exutório da área de estudo aumentava. O posto fluviométrico com melhor desempenho entre os avaliados foi o posto da UHE de Água Vermelha, o qual está localizado no exutório da bacia hidrográfica em questão.

A quantificação de escoamento superficial emitida pelo modelo hidrológico foi avaliada para o exutório da área de estudo – UHE de Água Vermelha, estando as vazões observadas e simuladas, bem como a incerteza (95PPU), dispostas na Figura 26. O comparativo entre as vazões observadas e as vazões simuladas pelo modelo está representado na Figura 27.

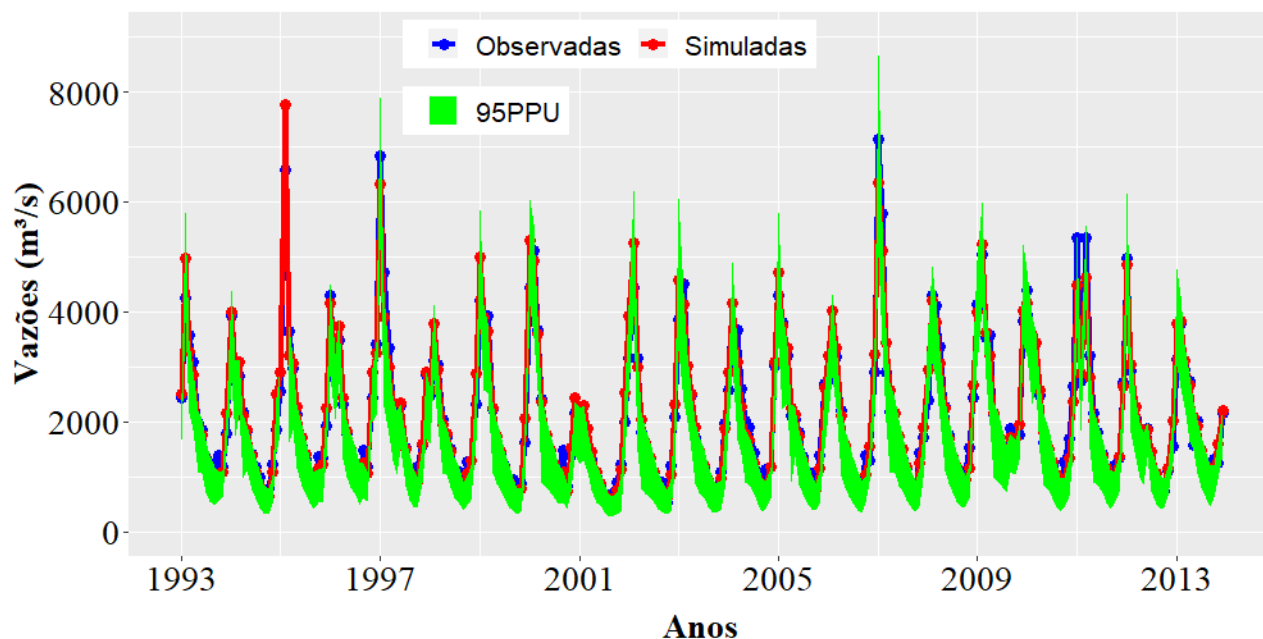


Figura 26. Vazões observadas e vazões simuladas no processo de calibração para o exutório da bacia hidrográfica do rio Grande (UHE de Água Vermelha).

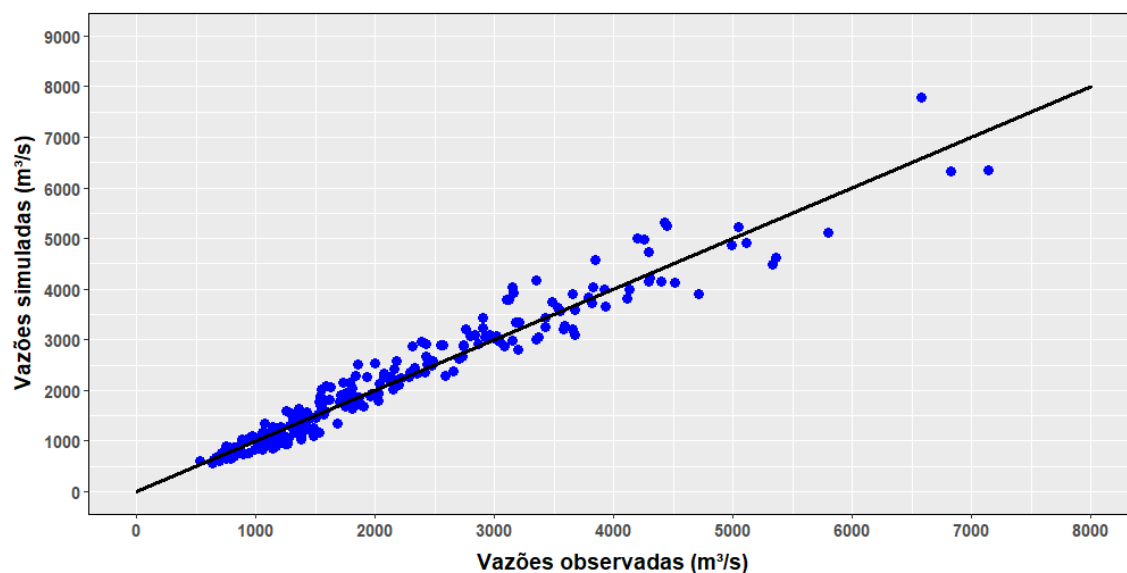


Figura 27. Comparativo entre vazões observadas e simuladas para a bacia hidrográfica do rio Grande

Da Figura 26, extrai-se que o comportamento das vazões simuladas pelo modelo hidrológico no decorrer da série histórica esteve em conformidade com a série histórica de vazões observadas, tanto pela proximidade entre vazões observadas e vazões simuladas, quanto pela inexistência de outliers por parte das vazões simuladas. Este fato está em consonância com as avaliações de desempenho das métricas efetuadas para calibração e validação nas Tabelas 6 e 7.

Na Figura 27, o comparativo entre vazões observadas e vazões simuladas permite identificar três faixas de domínio de informações. Na primeira faixa, entre 500 m³/s e 1500 m³/s, ocorre concentração de pontos em torno da reta 45° apontando que o modelo teve boa acurácia. Para a faixa de domínio entre 1500 m³/s e 3000 m³/s, a convergência de pontos se deu acima da reta de 45°, indicando que as vazões foram superestimadas neste trecho. No trecho acima de 3000 m³/s, a qual caracteriza-se por conter os picos de vazão para cada ano, mostra que as vazões simuladas tiveram um maior distanciamento das vazões observadas, seja superestimando, seja subestimando as vazões. No entanto, as diferenças encontradas nestas faixas de domínio, principalmente na primeira e na última faixa, não prejudicaram o modelo. O coeficiente de correlação entre as séries históricas da Figura 27 foi de 0,97, o que indica boa aderência do simulado ao observado.

Com o modelo hidrológico calibrado e validado para um uso dinâmico, variando em intervalos de 5 anos, buscou-se determinar o impacto que as mudanças no uso e na ocupação do solo tiveram no escoamento superficial da área de estudo. Para executar esta avaliação, o modelo hidrológico dinâmico foi comparado para a situação de uso e ocupação do solo constante, cujas informações referem-se ao cenário inicial da série que, neste estudo, é o ano de 1985. Também buscou-se quantificar, em termos percentuais, a parcela de escoamento superficial perdida na série histórica apontada. O comparativo de vazões simuladas para uso constante e uso dinâmico, bem como a diferença, em porcentagem, entre as mesmas, estão ilustrados na Figura 28 e na Figura 29, respectivamente.

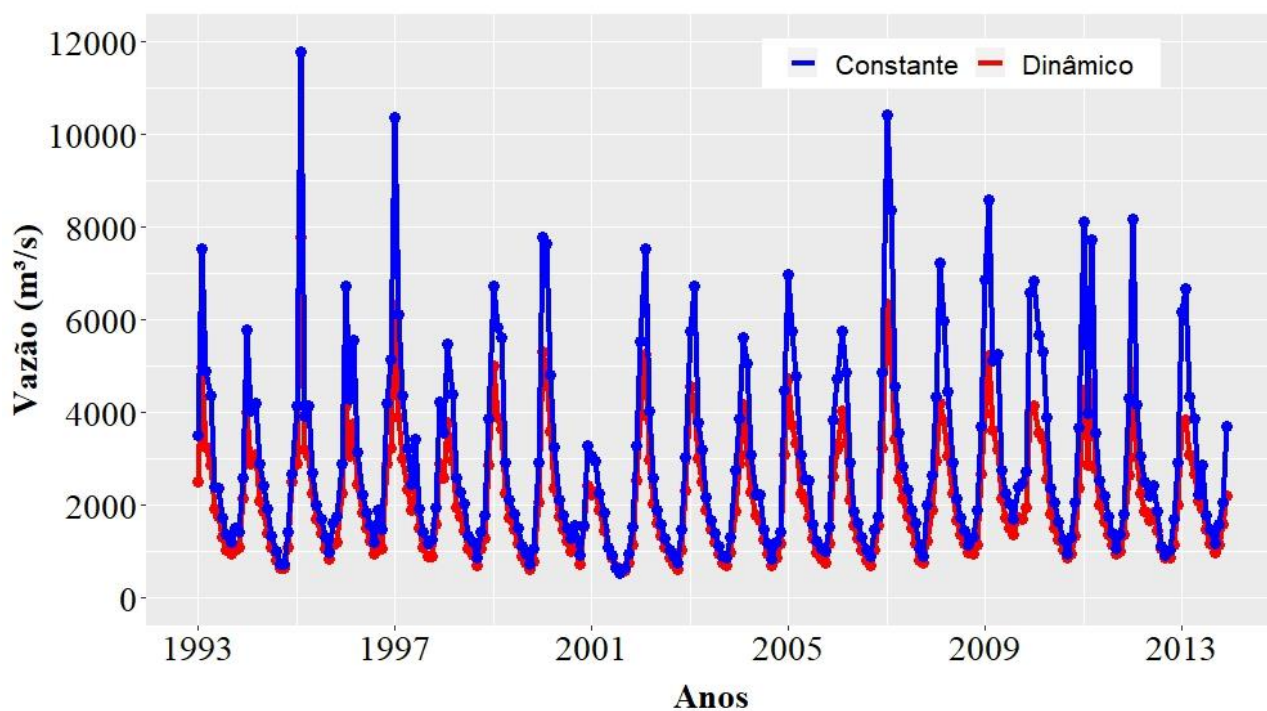


Figura 28. Comparativo de vazões simuladas para uso constante (1985) e uso dinâmico para a bacia hidrográfica do rio Grande

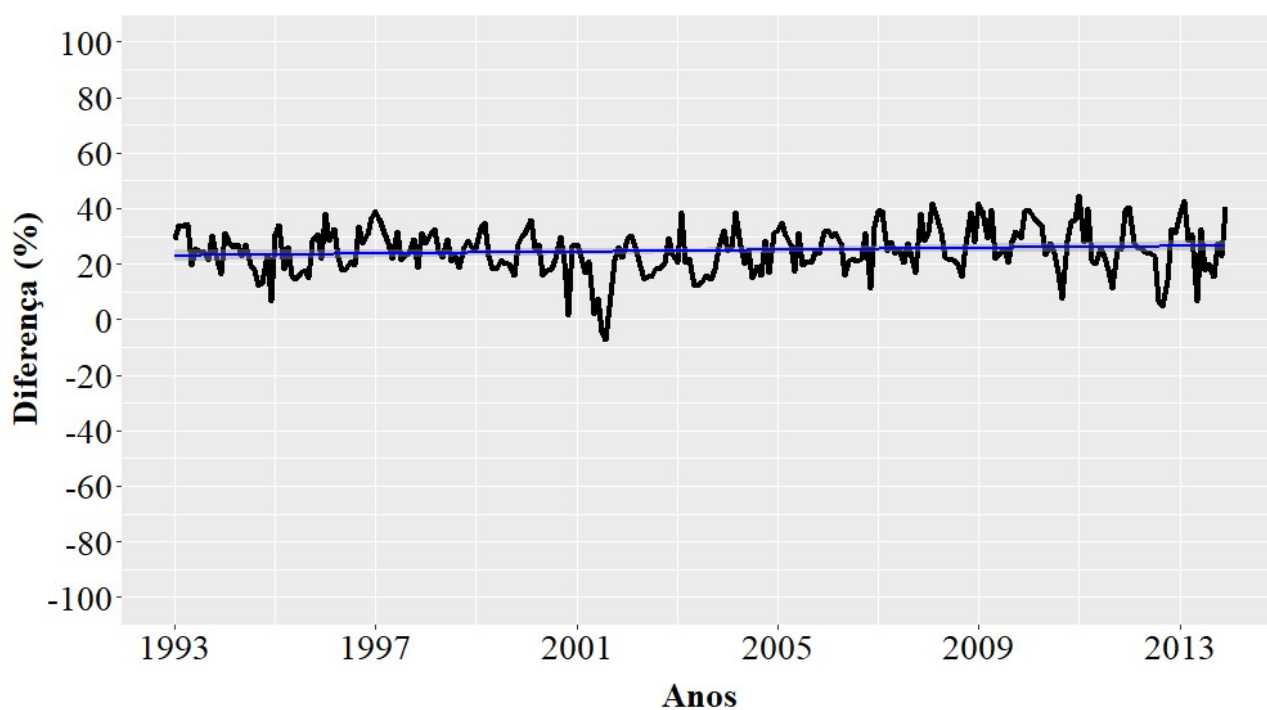


Figura 29. Diferença percentual entre escoamento superficial para o uso constante (1985) e para uso dinâmico na bacia hidrográfica do rio Grande.

De acordo com as informações apresentadas na Figura 28 e na Figura 29, é possível identificar que as modificações no uso e ocupação do solo – representadas pelas vazões simuladas pelo modelo hidrológico – impactaram na disponibilidade hídrica de forma a reduzir a vazão na bacia do rio Grande. Aplicando-se um ajuste de reta linear à curva de diferenças entre vazões para uso constante e vazões para uso dinâmico, observa-se que as diferenças nas vazões ficaram em torno de 30%. As maiores reduções ocorreram em passagens de ano, em que os totais precipitados são maiores, enquanto as maiores reduções ocorreram na metade ano, em que estão os meses mais secos. Logo, evidencia-se que as mudanças no uso e ocupação do solo provocaram redução na disponibilidade hídrica em torno de 20% para os meses mais secos e em até 40% para meses mais úmidos. Confrontando os quesitos, evidencia-se que as mudanças no uso-ocupação do solo impactaram o escoamento superficial na bacia do rio Grande de maneira mais contundente que o aumento nas demandas hídricas.

6.2.1.3. Séries temporais de uso e ocupação do solo e de usos da água na bacia do rio Grande

As séries históricas de cada uso e ocupação do solo tratados nesta seção estão representadas na Figura 30. Os usos e ocupações do solo estão representados de acordo com sua identificação no modelo hidrológico SWAT.

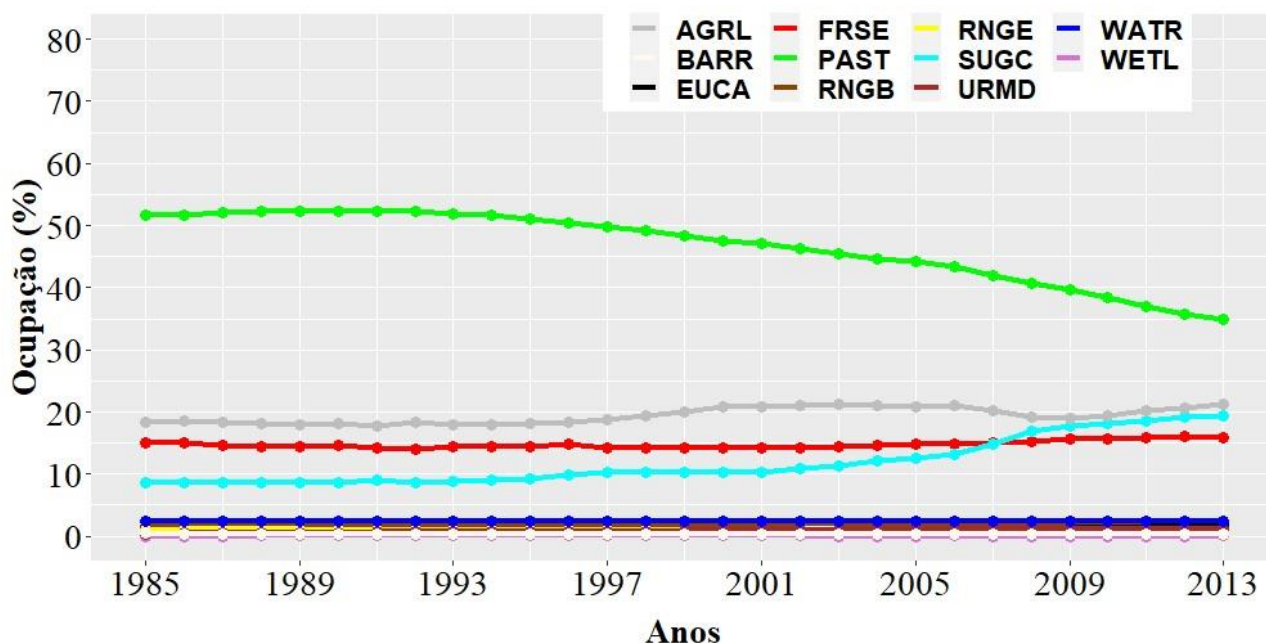


Figura 30. Parcela de usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica do rio Grande.

As correlações foram efetuadas para todos os usos do solo, excetuando agricultura irrigada (AGRR) e solo descoberto (BARR) por estarem presentes em baixo número de bacias hidrográficas. Dentre os usos do solo apresentados na Figura 30, apenas as pastagens (PAST), agricultura (AGRL) formação florestal (FRSE) e cana-de-açúcar (SUGC) apresentaram parcela maior que 5%, acumulando área acima de 90% anualmente.

As correlações apresentadas na Seção 6.2.1.1. mostram que a queda na área de pastagens tem significativa correlação negativa com o incremento de vazões na área de drenagem da UHE de Água Vermelha. Embora não-significativas, as correlações positivas em locais de decréscimo de vazão (UHE Marimbondo, UHE Furnas – Rio Verde) e negativas em áreas de incremento de vazões (Clube de Regatas) reforçam o fato de que ocorreu queda na área de pastagens. Confrontando o comportamento das correlações das pastagens com a queda na disponibilidade hídrica na área de estudo descrita nesta seção, e com o decréscimo da área de pastagens na área da bacia apresentado na Figura 30, passando de acima de 50% para 35%, conclui-se que a redução na área de pastagens teve participação direta na redução da oferta de água na área de estudo, e o aumento de vazão observado na área de drenagem da UHE de Água Vermelha não foi influenciado pela retirada das áreas de pastagens.

A parcela de formação florestal na área de estudo oscilou em torno da fração de 15% da área de estudo. As correlações positivas em áreas de incremento de vazão (UHE

de Água Vermelha) e negativas para áreas de decréscimo (UHE de Marimbondo) apontaram que o crescimento da formação florestal gera aumento de vazões. No entanto, o comportamento constante em termos de porcentagem de área para toda área de estudo indica que a redução na oferta hídrica na área de estudo não foi impactada por alterações nas formações florestais.

A análise de correlações da cana-de-açúcar mostrou correlação positiva significativa para áreas de drenagem cujos exutórios apresentaram incremento de vazões. No entanto, embora não significativas, as correlações na parte leste da bacia, em que ocorreram reduções na vazão, também se mostraram positivas, assim como a atividade agrícola geral. A avaliação do escoamento superficial mediante modelo hidrológico e o comportamento das parcelas de cada uso do solo na série histórica estudada mostram evidências de que o crescimento da cana-de-açúcar e de atividades agrícolas em geral contribuíram para redução no escoamento superficial da bacia hidrográfica. Nesse sentido, em que pese a correlação positiva entre área agrícola e área de cana-de-açúcar na área de drenagem do posto da UHE de Água Vermelha, estas correlações não são evidências de aumento da vazão no mesmo.

Para avaliação das demandas hídricas, contabilizou-se as séries históricas de cada um dos usos da água na bacia do rio Grande, os quais estão apresentados na Figura 31.

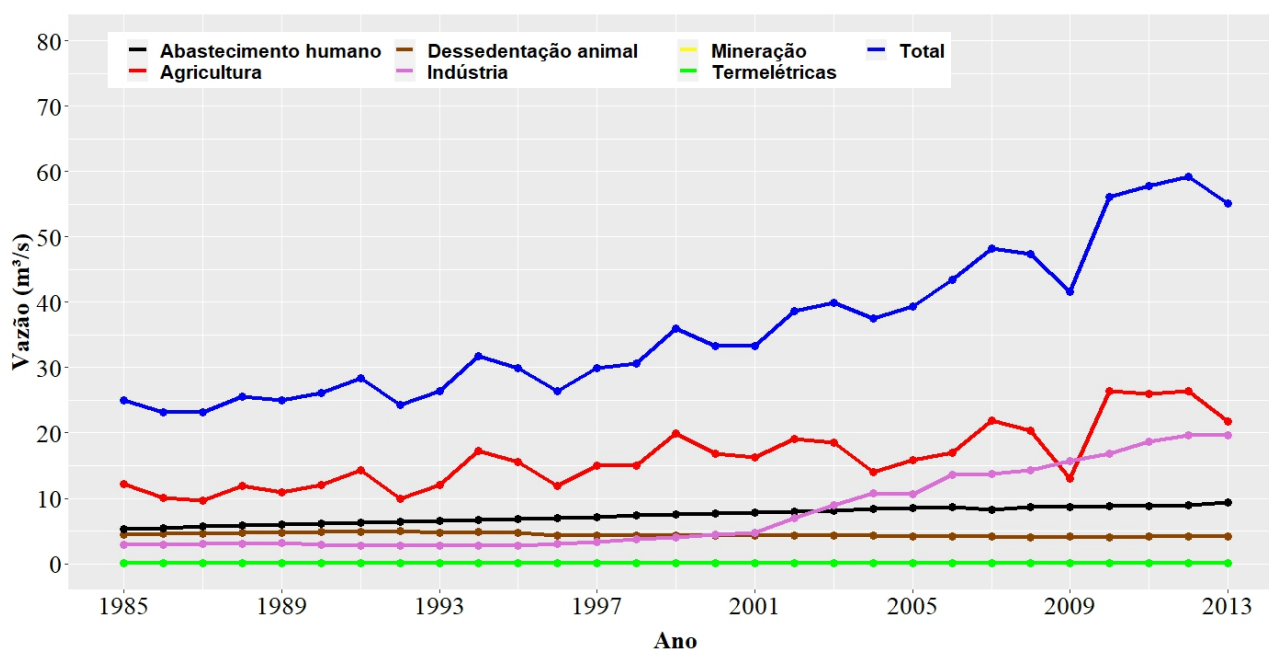


Figura 31. Série histórica dos usos da água na bacia hidrográfica do rio Grande

Notadamente, na Figura 31, a agricultura irrigada é a atividade que mais demanda água entre as atividades econômicas analisadas, no entanto, sua demanda não está amplamente correlacionada ao incremento de áreas agrícolas na área de estudo. A indústria teve crescimento a partir de 2001, no entanto, este crescimento não foi identificado, em termos correlacionais, a mudanças no escoamento superficial. Os outros usos hídricos, embora apresentem pequenas variações, não tiveram crescimento impactante. Alterando a demanda hídrica no modelo hidrológico, passando da demanda de 1985 para a demanda de 2010, o modelo apresentou uma redução de 30 m³/s na vazão no exutório da bacia.

6.2.2. Bacia hidrográfica do Rio Paranaíba

6.2.2.1. Interdependências entre usos e ocupações do solo, usos da água e disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Paranaíba

Através do SWAT, a área de estudo foi dividida em 130 sub-bacias, as quais estão ilustradas na Figura 32.

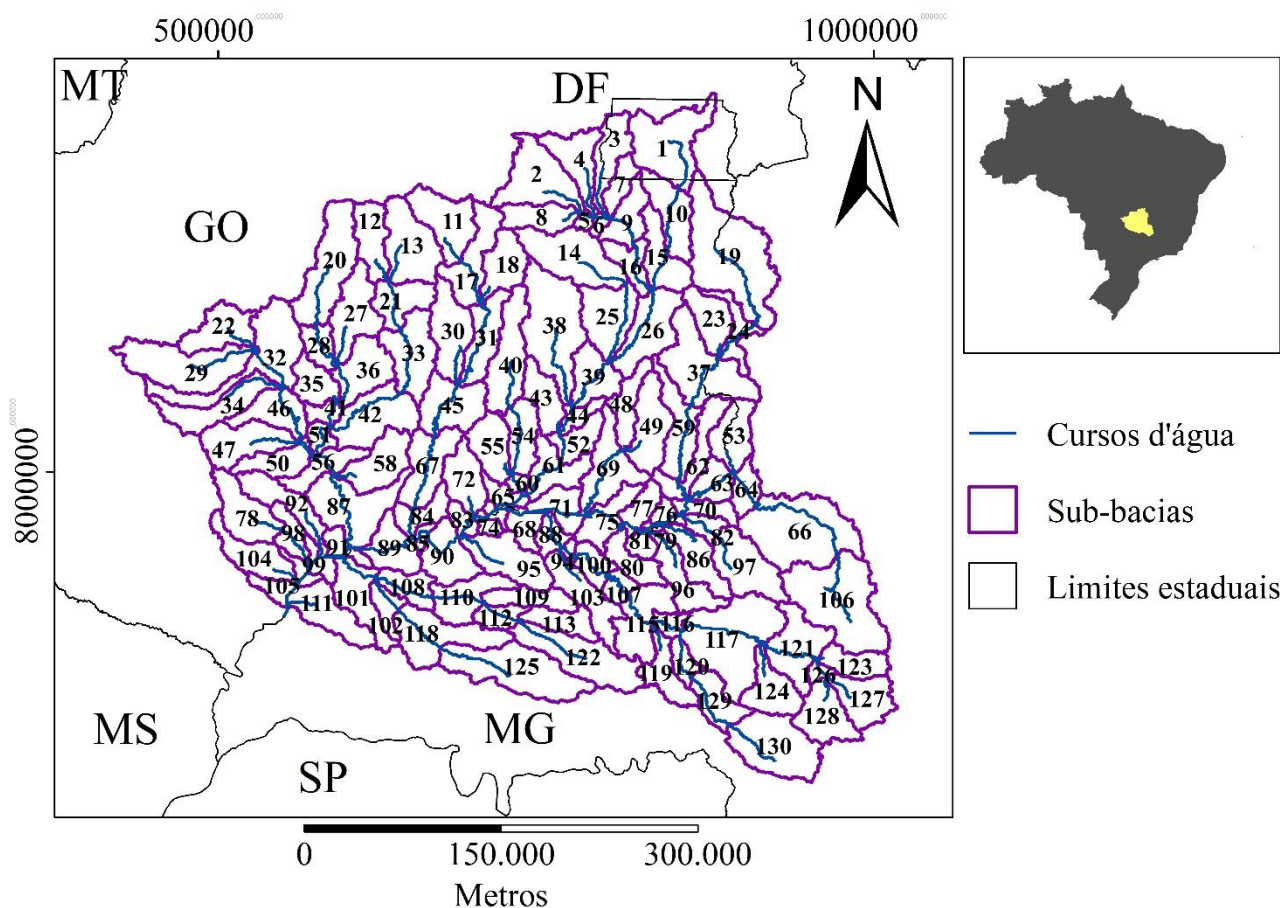


Figura 32. Divisão de subbacias na bacia hidrográfica do rio Paranaíba

A subdivisão da área de estudo, é apresentada na Figura 32, levou em consideração a distribuição de postos fluviométricos com séries históricas sem falhas. Nesse sentido, os postos fluviométricos a serem considerados na análise da bacia do rio Paranaíba, estão dispostos na Figura 33, e a identificação e a localização dos mesmos estão descritas na Tabela 9.

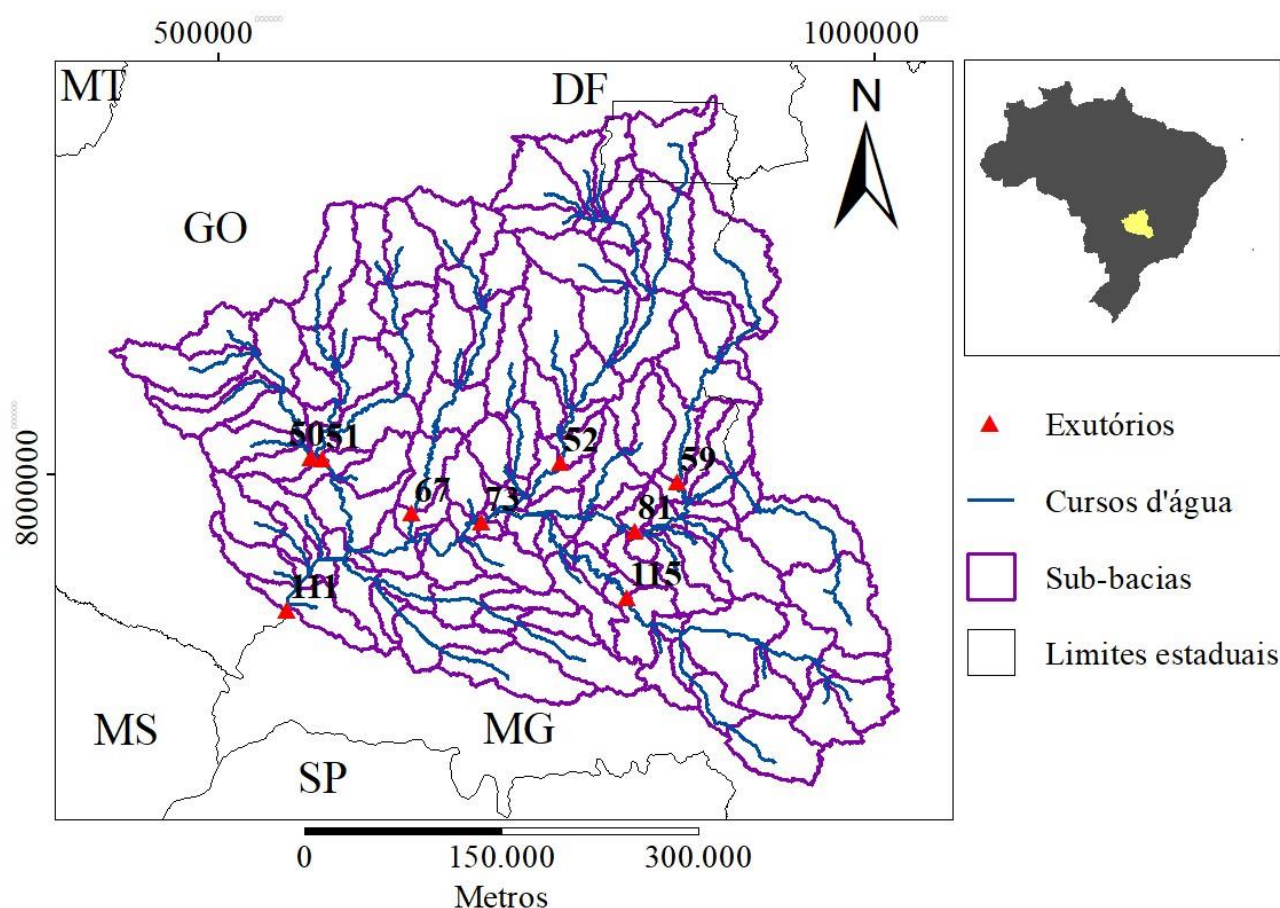


Figura 33. Postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Paranaíba

Tabela 9. Postos fluviométricos utilizados para avaliação da bacia hidrográfica do rio Paranaíba

Subbacia do posto	Identificação do posto	Latitude	Longitude
50	Maurilândia	8013249	570677
51	Fazenda Santa Maria	8011866	579407
52	UHE Corumbá I	8009305	761298
59	Fazenda São Domingos	7994469	850165
67	Ponte Meia Ponte	7970645	647745
73	UHE Itumbiara	7963676	700877
81	UHE Emborcação	7957223	818266
111	UHE São Simão	7896610	552648
115	UHE Miranda	7896976	811613

Os postos fluviométricos apresentados na Figura 33 e descritos na Tabela 9 foram utilizados para modelo hidrológico. Para avaliação das interdependências entre água, uso e ocupação do solo e disponibilidade hídrica, padronizaram-se as vazões incrementais pelo SSI12 do mês de outubro está ilustrada na Figura 34. A aplicação do teste MMK nos

postos fluviométricos encontrou tendências significantes no posto da UHE Miranda. A existência de tendência no posto fluviométrico reforça a existência de fatores que interferindo na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica.

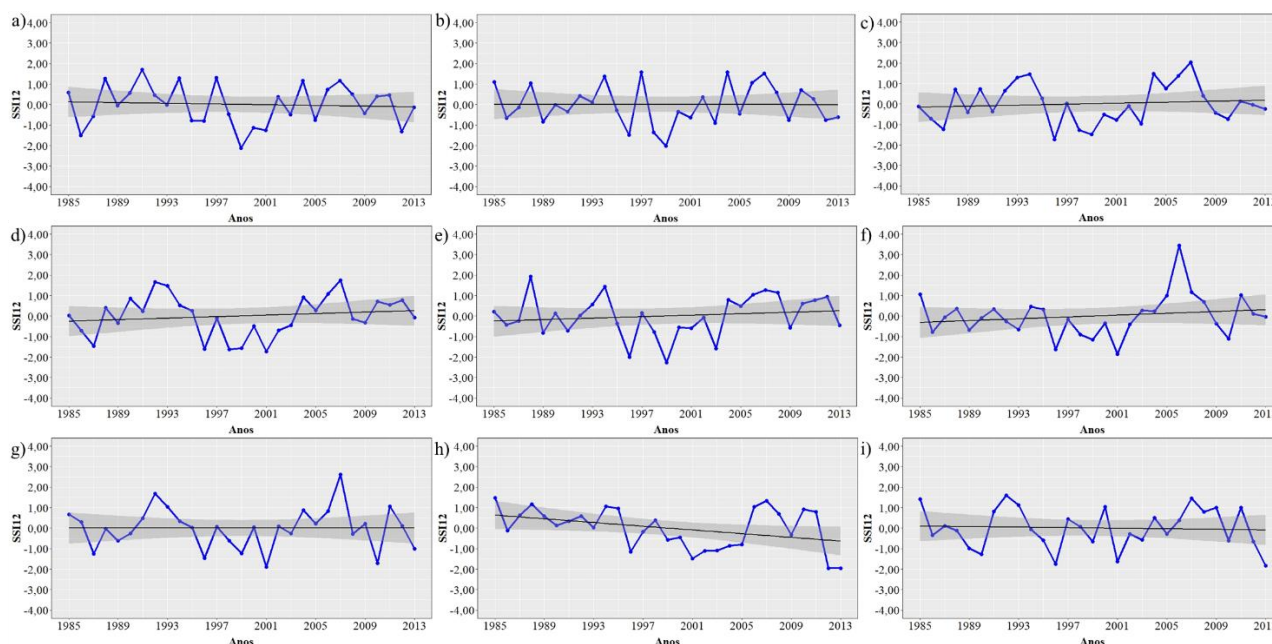


Figura 34. SSI12 de cada posto fluviométrico para a) Maurilândia b) Fazenda Santa Maria; c) UHE Corumbá I; d) Fazenda São Domingos; e) Ponte Meia Ponte ; f) UHE Itumbiara; g) UHE Emborcação; h) UHE Miranda; i) UHE São Simão, na bacia hidrográfica do rio Paranaíba

A aplicação da média das correlações de cada uso e ocupação do solo, os quais estão representados na Figura 35, ponderada com suas respectivas áreas de influência, revela os usos mais impactantes como: área urbana (h), cerrado (b), silvicultura (c) e formação florestal (a), seguida, com menor influência, por formação campestre (d), solo descoberto (i), pastagens (e), cana-de-açúcar (f) e agricultura (g). Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações que estejam acima de 0,37 são consideradas correlações positivas significantes, enquanto correlações que estejam abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significantes. Correlações que estejam entre -0,37 e 0,37 são consideradas correlações não-significantes.

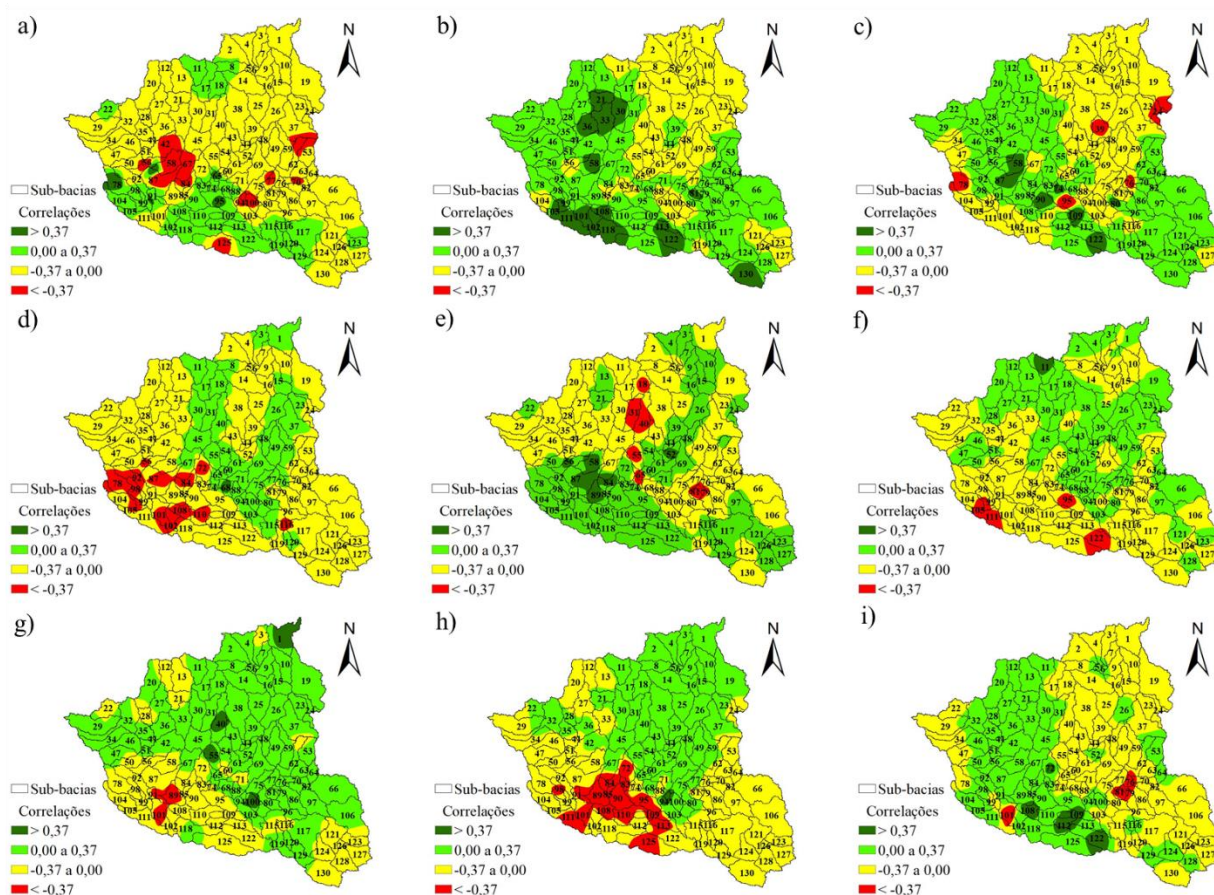


Figura 35. Correlações entre uso e ocupação do solo e SSI12 para a) Formação florestal; b) Formação savânica; c) Formação campestre; d) Floresta plantada; e) Pastagens; f) Cana-de-açúcar; g) Agricultura; h) Área urbana; i) Solo descoberto para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba

Conforme pode ser observado na Figura 35, não foram detectadas correlações significantes para os usos e ocupações do solo para a formação campestre (Figura 35c)). Cana-de-açúcar e agricultura, tiveram correlações significantes pontuais, sendo consideradas meramente estatísticas. Em termos de formação florestal, as vazões observadas para a área em que ocorrem, que é a área de drenagem da UHE São Simão, não apresentaram tendência significativa.

A formação savânica, Figura 35b), considerada cerrado, apresentou significativa correlação positiva para com a disponibilidade hídrica na região central e na região próxima ao exutório da área de estudo. Anache et al. (2019) observaram que a formação savânica preservada contribui para a estabilização do ciclo hidrológico, contribuindo com baixos coeficientes de runoff e altas taxas de evapotranspiração, portanto, nas áreas de significativa correlação positiva há evidências de substituição do cerrado por coberturas que manifestam menor evapotranspiração e maior runoff, como atividades agrícolas (cana-de-

açúcar inclusa) e pastagens. As correlações positivas para com o cerrado e floresta plantada, bem como a correlação negativa para com a área urbana, as três ocorridas na parcela sul da bacia indicam geração de empregos na silvicultura. De acordo com Reichert et al. (2021), a maior parte das espécies de eucaliptos plantadas no Brasil requerem grandes quantidades de água para apresentarem um rápido crescimento, logo, é possível inferir que o aumento nas áreas de cultivo de eucalipto, associado à precisão na utilização de água para obtenção de máximo crescimento, provocam reduções na vazão dos cursos d'água na região em pauta. Na bacia do rio Paranaíba, Scarpare et al. (2016) observaram que a bacia do rio Paranaíba possuía destacada condição edafoclimática. Logo, a disponibilidade hídrica nesta bacia hidrográfica é menos sensível ao incremento de atividades agrícolas e ao aumento das demandas para irrigação.

Partindo das vazões padronizadas, buscou-se identificar correlações entre o comportamento histórico das demandas hídricas na bacia e as séries históricas em cada posto fluviométrico. Estas correlações estão apresentadas na Figura 36. Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações que estejam acima de 0,37 são consideradas correlações positivas significantes, enquanto correlações que estejam abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significantes. Correlações que estejam entre -0,37 e 0,37 são consideradas correlações não-significantes.

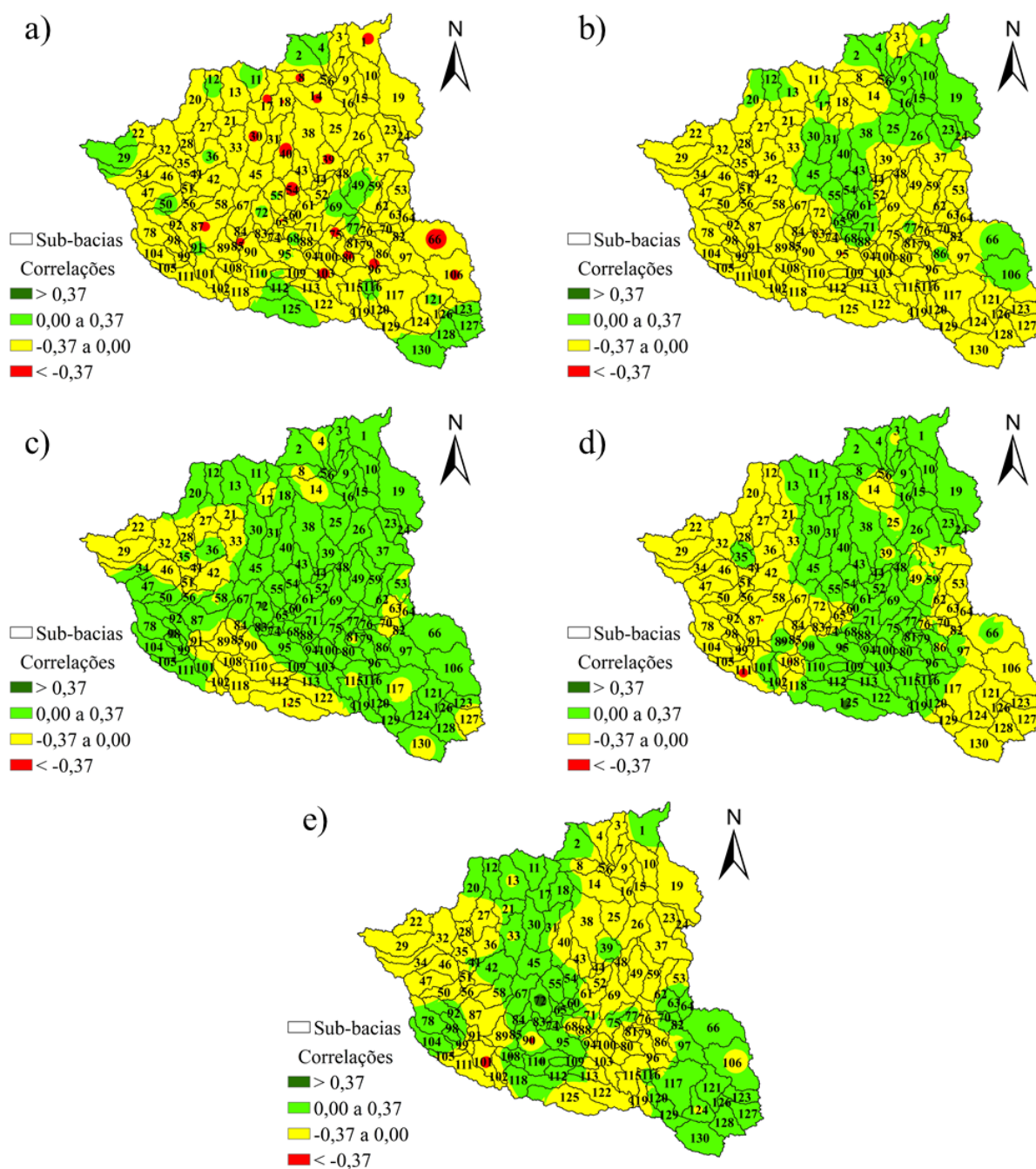


Figura 36. Correlação entre uso da água e SSI na bacia hidrográfica do rio Paranaíba para a) Abastecimento humano; b) Industrial; c) Irrigação agrícola; d) Dessedentação animal; e) Mineração, na bacia hidrográfica do rio Paranaíba

De forma geral, a aplicação da média de tais correlações significativas de cada uso, ponderada com suas respectivas áreas de cobertura, revela que as correlações significantes estão geograficamente isoladas e em pequeno número, podendo ser consideradas meramente estatísticas.

Foram investigadas as interdependências entre as duas demandas hídricas e os dois usos produtivos do solo mais impactantes sobre a disponibilidade hídrica. Para tanto,

optou-se por estabelecer correlações entre variáveis restritas, e as mesmas a serem correlacionadas na Figura 37 foram: dessedentação animal contra agricultura geral, dessedentação animal contra pastagem, irrigação agrícola contra agricultura geral, irrigação agrícola contra pastagens. Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações que estejam acima de 0,37 são consideradas correlações positivas significantes, enquanto correlações que estejam abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significantes. Correlações que estejam entre -0,37 e 0,37 são consideradas correlações não-significantes.

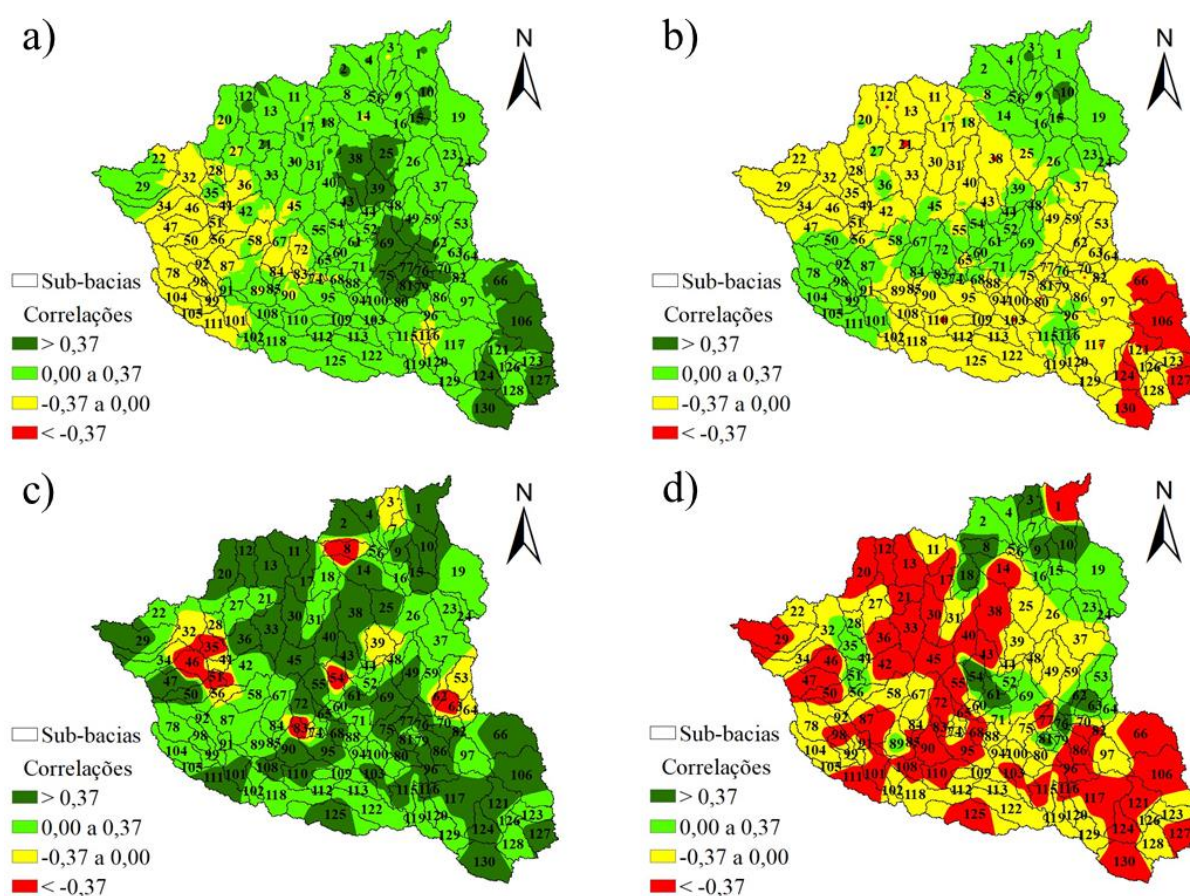


Figura 37. Correlações entre usos da água e usos e ocupações do solo para: a) Dessedentação animal contra agricultura geral para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba; b) Dessedentação animal contra pastagem; c) Irrigação agrícola contra agricultura geral; d) Irrigação agrícola contra pastagens;

Observando a Figura 37, é possível identificar a ocorrência de correlações significantes positivas na Figura 37a) e negativas na Figura 37b), com evidente contraste entre a agricultura geral e o uso para pastagens respectivamente, embora tal contraste não

seja significativa em toda extensão da área de estudo. Para a dessedentação animal, observa-se que a região sudeste da área de estudo apresentou significativo contraste para com os usos para agricultura e em relação às pastagens. Tal contraste, indica, primeiramente, uma substituição de culturas. A redução das áreas de pastagens e o aumento do consumo de água para dessedentação animal indica incremento tecnológico da atividade pecuária. Embora não haja mapeamento de série histórica do número de confinamentos no Brasil, é notório o crescimento da atividade pecuária por confinamento, passando de uma estimativa de 1,5 milhões de animais na década de 60 para 6 milhões em 2020 (AGROCERES, 2021).

Com relação às correlações entre irrigação e para com usos e ocupações do solo na Figura 37c) e 37d), a correlação positiva para ao uso agrícola, bem como as correlações negativas para com as áreas de pastagens indica substituição de culturas. Para além disso, o número de pivôs no Brasil aumentou de 363 em 1985 para 23181 em 2017 (ANA, 2017). Na bacia hidrográfica do Paranaíba, o número de pivôs passou de 15 para 130 entre 1985 e 2017.

Da mesma forma, a Figura 37c) mostra pontuais correlações significantes negativas enquanto a Figura 37d) apresenta pontuais correlações positivas significantes. Estas correlações pontuais estão dispersas em toda área da bacia, com uma pequena concentração na parte norte da área de estudo de cada tipo e, sendo contrastantes, mostram que há substituição de cultura, tal como ocorreu na avaliação do uso da água para dessedentação animal. De acordo com Tayt'sohn, Nunes e Pereira, (2018), o crescimento da cultura de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba esbarra no déficit de condições climáticas, necessitando assim de irrigação para seu desenvolvimento. Ainda segundo os autores, esta substituição se faz interessante em áreas de pastagens degradadas na bacia do Paranaíba em função da melhora ambiental que a mesma provoca, as quais concentram-se mais na região sudoeste da mesma. Nesse sentido, as correlações negativas evidenciam que o desenvolvimento da cana-de-açúcar independeu da atividade irrigante, e que as demandas hídricas para irrigação foram direcionadas a outras culturas agrícolas.

6.2.2.2. Impactos do uso e ocupação do solo na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Paranaíba

Após a primeira calibração, foram excluídos os parâmetros GW_DELAY.gw, SLSUBBSN.hru, EPCO.bsn, SURLAG.bsn, ALPHA_BNK.rte por conta da indiferença dos mesmos perante o processo de modelagem. O desempenho de cada posto fluviométrico na etapa de calibração está disposto na Tabela 10.

Tabela 10. Métricas de cada posto fluviométrico para a calibração do modelo na bacia hidrográfica do rio Grande

Calibração (1993-2007)				
Posto	R2	NSE	PBIAS	KGE
Maurilândia	0,78	-0,36	56,60	0,24
Fazenda Santa Maria	0,82	0,81	0,00	0,79
UHE Corumbá I	0,88	0,82	10,70	0,73
Fazenda São Domingos	0,77	0,71	17,50	0,78
Ponte Meia Ponte	0,85	0,83	4,30	0,81
UHE Itumbiara	0,91	0,80	-19,10	0,76
UHE Emborcação	0,89	0,59	-36,20	0,56
UHE Miranda	0,93	0,93	-0,90	0,96
UHE São Simão	0,91	0,90	2,00	0,90

Superada a fase de calibração, foi necessário validar o modelo. Para tanto, os parâmetros calibrados foram validados para anos distintos, e o desempenho das métricas para a validação está representado na Tabela 11. O melhor valor para cada parâmetro está disposto na Tabela 12.

Tabela 11. Métricas de cada posto fluviométrico na validação do modelo na bacia hidrográfica do rio Paranaíba

Validação (2008-2013)				
Posto	R2	NSE	PBIAS	KGE
Maurilândia	0,77	-0,35	53,00	0,30
Fazenda Santa Maria	0,89	0,88	-2,40	0,83
UHE Corumbá I	0,88	0,88	2,40	0,90
Fazenda São Domingos	0,68	0,32	37,50	0,55
Ponte Meia Ponte	0,82	0,62	25,40	0,62
UHE Itumbiara	0,95	0,76	-23,60	0,70
UHE Emborcação	0,93	0,59	-33,00	0,55
UHE Miranda	0,95	0,93	-8,10	0,89
UHE São Simão	0,89	0,82	-12,80	0,83

Tabela 12. Parâmetros calibrados e validados para bacia hidrográfica do rio Paranaíba

Parâmetros	Valor
R: __CN2.mgt	-0,106
R: __SOL_AWC().sol	0,377
R: __SOL_K().sol	0,351
R: __OV_N.hru	0,120
V: __GWQMN.gw	1354,690
V: __REVAPMN.gw	1481,928
V: __RCHRG_DP.gw	0,459
V: __GW_REVAP.gw	0,068
V: __ALPHA_BF.gw	0,557
V: __ALPHA_BNK.rte	0,500
V: __CH_N2.rte	0,084
V: __CANMX.hru	20,962
V: __ESCO.hru	0,986
R: __HRU_SLP.hru	-0,001
V: __CH_K2.rte	8,533

Observando a avaliação dos períodos de calibração e validação, a modelagem hidrológica da bacia do rio Paranaíba teve desempenho satisfatório para 10 dos 11 postos fluviométricos na calibração. O posto fluviométrico de Maurilândia apresentou métricas abaixo das faixas satisfatórias. O posto da UHE de Emborcação apresentou um PBIAS abaixo da faixa satisfatória, no entanto, os outros índices tiveram boa aderência. Para a

etapa de validação, tanto o posto de Maurilândia como o posto da Fazenda Domingos apresentando valores de métricas abaixo da faixa satisfatória. Os postos de Ponte Meia Ponte e da UHE Emborcação apresentaram um PBIAS abaixo do aceitável. O posto fluviométrico com melhor desempenho para o índice NSE entre os avaliados foi o posto da UHE Miranda. O posto da UHE São Simão, o qual está localizado no exutório da bacia hidrográfica em questão, também teve boa aderência ao citado índice.

A quantificação de escoamento superficial emitida pelo modelo hidrológico foi avaliada para o exutório da área de estudo – UHE de Água Vermelha, estando as vazões observadas e simuladas, bem como a incerteza (95PPU), dispostas na Figura 38. O comparativo entre as vazões observadas e as vazões simuladas pelo modelo está representado na Figura 39.

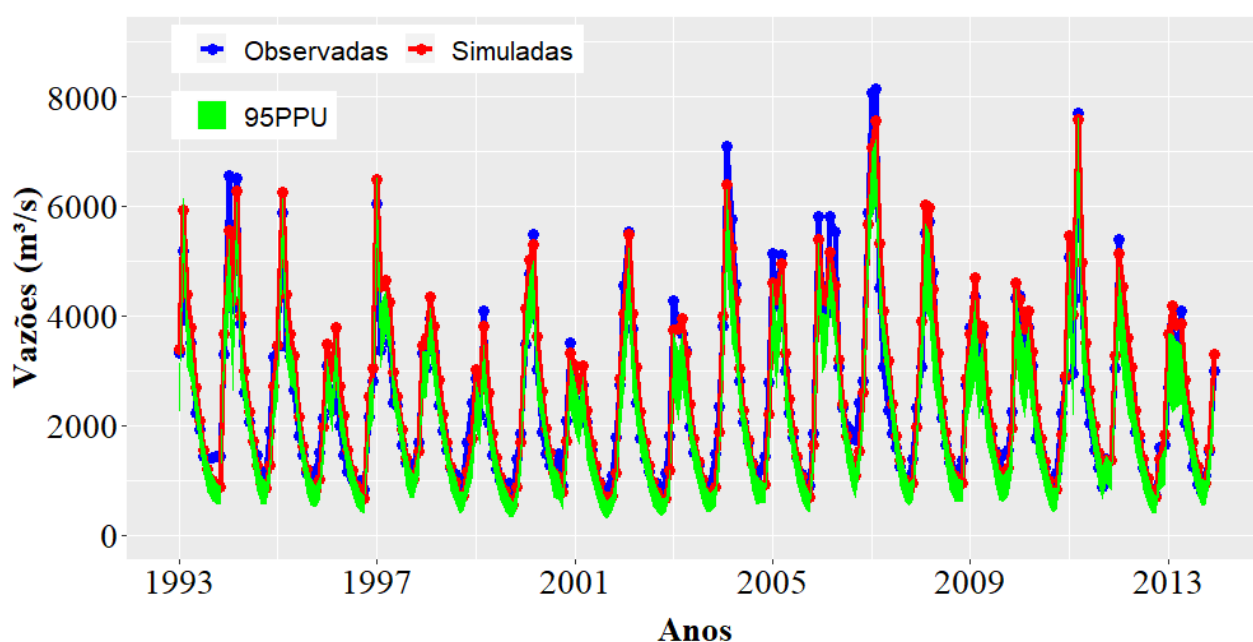


Figura 38. Comparativo de vazões observadas e vazões simuladas para uso constante (1985) e uso dinâmico na bacia hidrográfica do rio Paranaíba

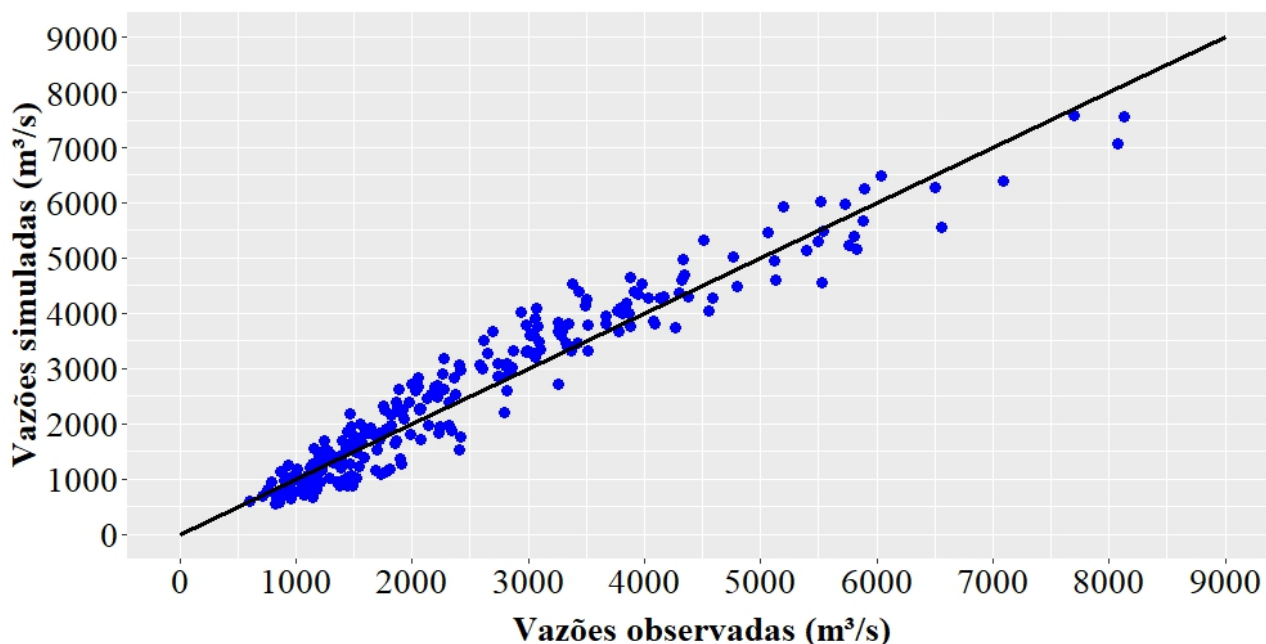


Figura 39. Comparativo entre vazões observadas e simuladas para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba

Das Figuras 38 e 39, deduz-se que o comportamento das vazões simuladas no decorrer da série histórica esteve em conformidade com a série histórica de vazões observadas, tanto pela proximidade da série histórica como pela não identificação de outliers. Tal fato está em consonância para com as métricas encontrados nas etapas de calibração e validação para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba.

Na Figura 37, observa-se que há uma menor dispersão dos dados a antes da vazão igual a 1500 m³/s, e a distribuição é simétrica entre vazões observadas e simuladas. Na faixa de vazão que vai entre 1500 m³/s e 4000 m³/s, há uma preponderância das vazões simuladas. A partir da vazão igual a 4000 m³/s, as vazões observadas apresentam valores maiores. Em termos da dispersão, a amplitude se manteve constante. O coeficiente de correlação para a bacia do rio Paranaíba foi de 0,97, o que, assim como na bacia do rio Grande, indica boa aderência do simulado ao observado.

Com o modelo hidrológico calibrado e validado para um uso dinâmico, variando em intervalos de 5 anos, buscou-se determinar o impacto que as mudanças no uso e na ocupação do solo tiveram no escoamento superficial da área de estudo. Para fazer esta avaliação, executou-se o modelo hidrológico para um uso e ocupação do solo constante, cujas informações referem-se ao cenário inicial da série que, neste trabalho, é o ano de 1985. Também buscou-se quantificar, em termos percentuais, a parcela de escoamento superficial perdida na série histórica apontada. O comparativo de vazões simuladas para

uso constante e uso dinâmico está ilustrado na Figura 40. As diferenças entre as duas grandezas citadas, em porcentagem, estão ilustradas na Figura 41.

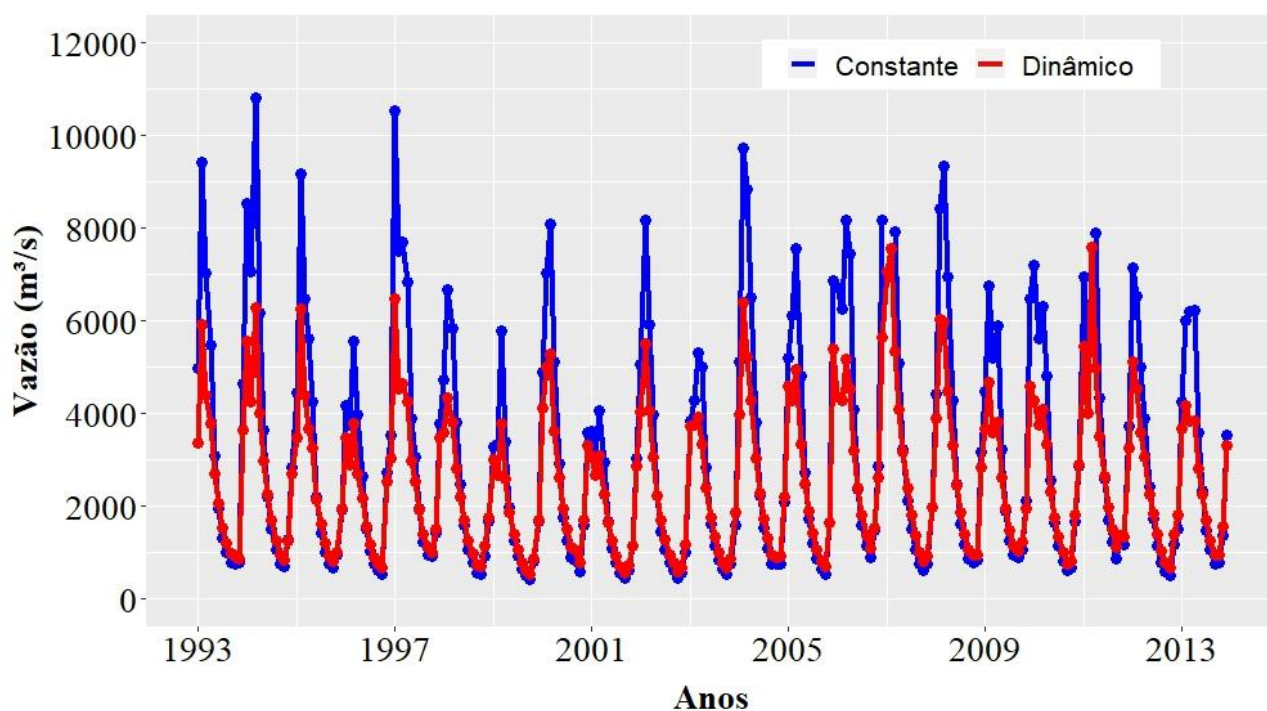


Figura 40. Comparativo de vazões simuladas para uso constante (1985), uso dinâmico, e diferença percentual entre as mesmas.

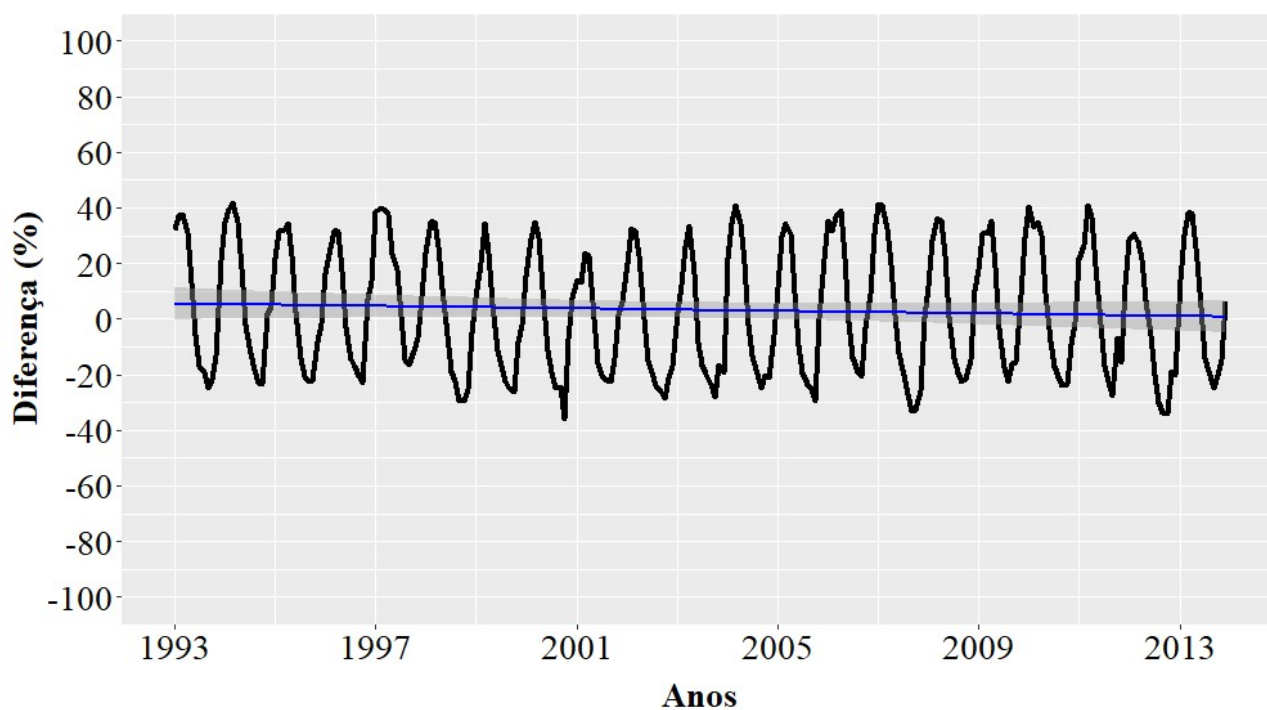


Figura 41. Diferença percentual entre escoamento superficial para o uso constante (1985) e para uso dinâmico para a bacia hidrográfica do rio Paranaíba.

De acordo com as informações apresentadas na Figura 40, é possível identificar que as modificações no uso e ocupação do solo – representadas pelas vazões simuladas pelo modelo hidrológico – impactaram na disponibilidade hídrica de maneira variada na bacia do rio Paranaíba.

Aplicando-se um ajuste de reta linear à curva de diferenças entre vazões para uso constante e vazões para uso dinâmico, observa-se que as reduções de vazões são mais visíveis nos picos, enquanto, para as menores vazões, o modelo aponta que houve um incremento de vazões. O ajuste linear de reta apresentada na Figura 41 aponta que, em geral, ocorre uma redução de, aproximadamente, 5%. Alterando a demanda hídrica no modelo hidrológico, passando da demanda de 1985 para a demanda de 2010, o modelo apresentou uma redução de 45 m³/s na vazão no exutório da bacia. Confrontando os quesitos apresentados, identifica-se que as mudanças no uso e ocupação do solo reduziram a amplitude da variação entre mínimos e máximos de escoamento superficial. No entanto, em termos absolutos, a diminuição na vazão do rio Paranaíba se deu na ordem de 5%, com as maiores reduções ocorrendo no meio dos anos, enquanto os maiores incrementos de vazão ocorreram próximos à virada do ano.

6.2.2.3. Séries temporais de uso e ocupação do solo e de usos da água na bacia hidrográfica do rio Paranaíba

As séries históricas de cada uso e ocupação do solo estão representadas na Figura 42. Os usos e ocupações do solo estão representados de acordo com sua identificação no modelo hidrológico SWAT.

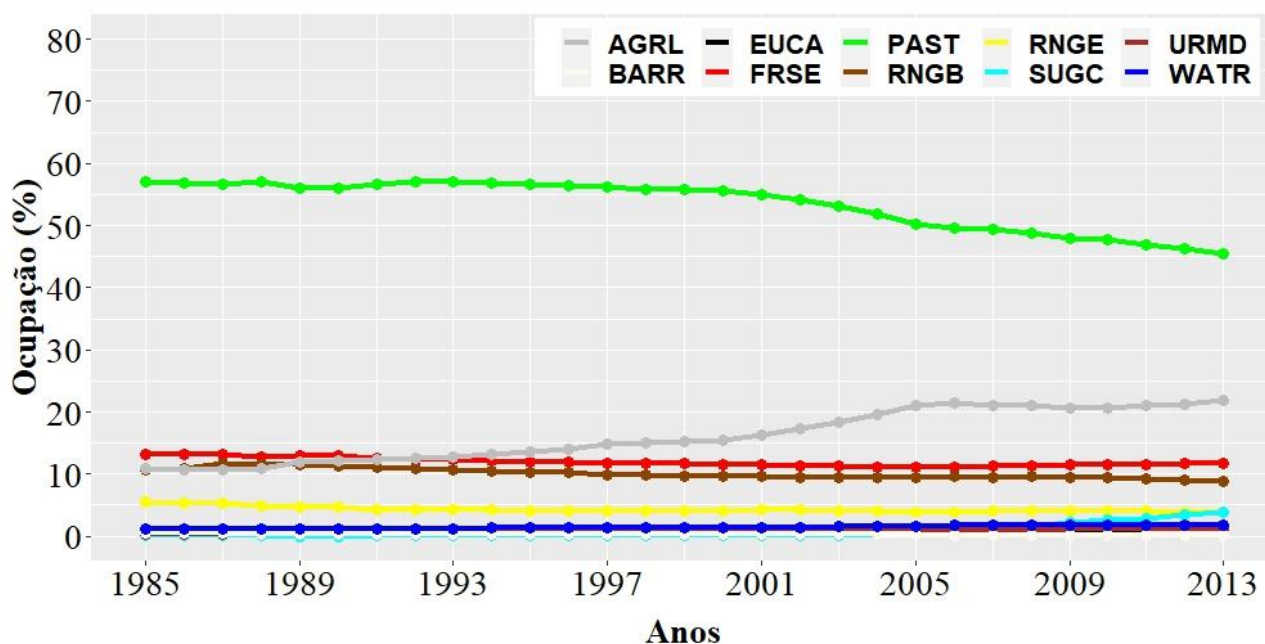


Figura 42. Parcela de usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica do rio Paranaíba

Na bacia do rio Paranaíba, observa-se que a característica mais forte é o decréscimo das áreas de pastagem em detrimento das áreas de agricultura geral. Os outros usos e ocupações do solo não manifestaram diferenças modificações significativas em suas séries históricas. Diferentemente dos usos e ocupações do solo da bacia do rio Grande, as modificações relevantes nas séries históricas de uso e ocupação do solo não tiveram reflexos nas correlações entre esta variável e a disponibilidade hídrica. Ainda comparando com a bacia hidrográfica do rio Grande, a queda nas modificações deu lugar a atividades agrícolas diversificadas. Bellezoni et al.(2018) observaram que, no estado de Goiás, no qual a bacia do Paranaíba tem parcela destacada, ocorreu forte incremento de áreas agricultáveis. As áreas destinadas às atividades sucroalcooleiras também apresentaram expansão, o que está em linha com o observado por Scarpore et al. (2016).

Para avaliação das demandas hídricas na bacia do rio Paranaíba, utilizou-se do comportamento histórico das demandas hídricas para a área de estudo, o qual está representado na Figura 43.

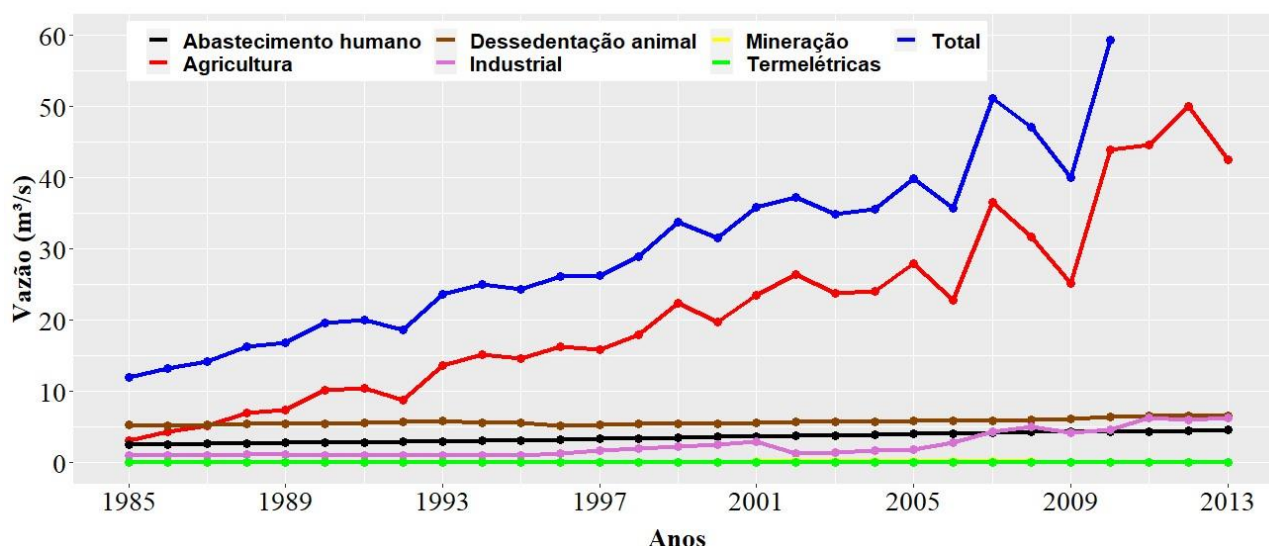


Figura 43. Séries históricas de usos da água na bacia hidrográfica do rio Paranaíba

Como observado na Figura 40, é possível observar que o crescimento da agricultura confirma o fato observado na Figura 39. O fato de que o uso da água para agricultura tenha aumentado é indicativo de que ocorreu um crescimento na situação das pastagens foram substituídas por áreas de agricultura irrigada. Assim como na bacia do rio Grande, ocorreu um forte decréscimo no uso da água por parte da agricultura entre os anos de 2009 e 2010. Como mencionado anteriormente, a recessão global ocorrida no ano de 2008 pode ter afetado economicamente a atividade agrícola, reduzindo sua intensidade, logo, bem como a utilização da água para seu desenvolvimento. Na bacia do rio Paranaíba, as demandas hídricas tiveram um incremento de, aproximadamente, 48 m³/s. A irrigação da cana-de-açúcar também apresentou expansão (SCARPARE et al., 2016) e, de acordo com Tayt'sohn, Nunes e Pereira (2018), por conta das mudanças climáticas, o incremento da atividade sucroalcooleira necessitará do auxílio da irrigação.

6.2.3. Bacia hidrográfica do Rio Tietê

6.2.3.1. Interdependências entre usos e ocupações do solo, usos da água e disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Tietê

Através do ArcSWAT, a bacia do Tietê foi subdividida em 100 sub-bacias, as quais estão ilustradas na Figura 44.

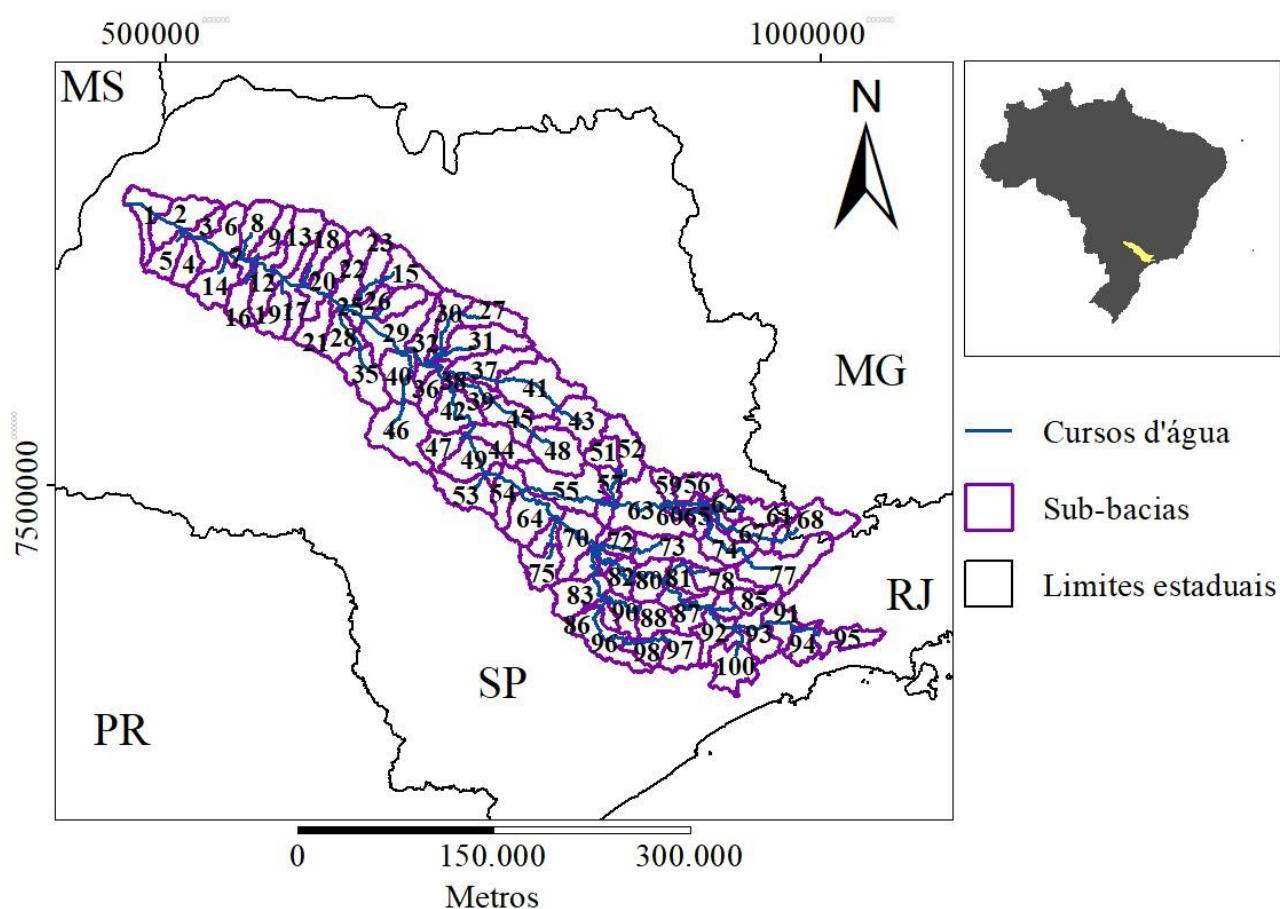


Figura 44. Divisão de subbacias na bacia hidrográfica do rio Tietê

A subdivisão da área de estudo levou em consideração a distribuição de postos fluviométricos com séries históricas sem falhas. Nesse sentido, os postos fluviométricos a serem considerados na análise da bacia do rio Tietê, estão dispostos na Figura 45, e a identificação e a localização dos mesmos estão descritas na Tabela 13.

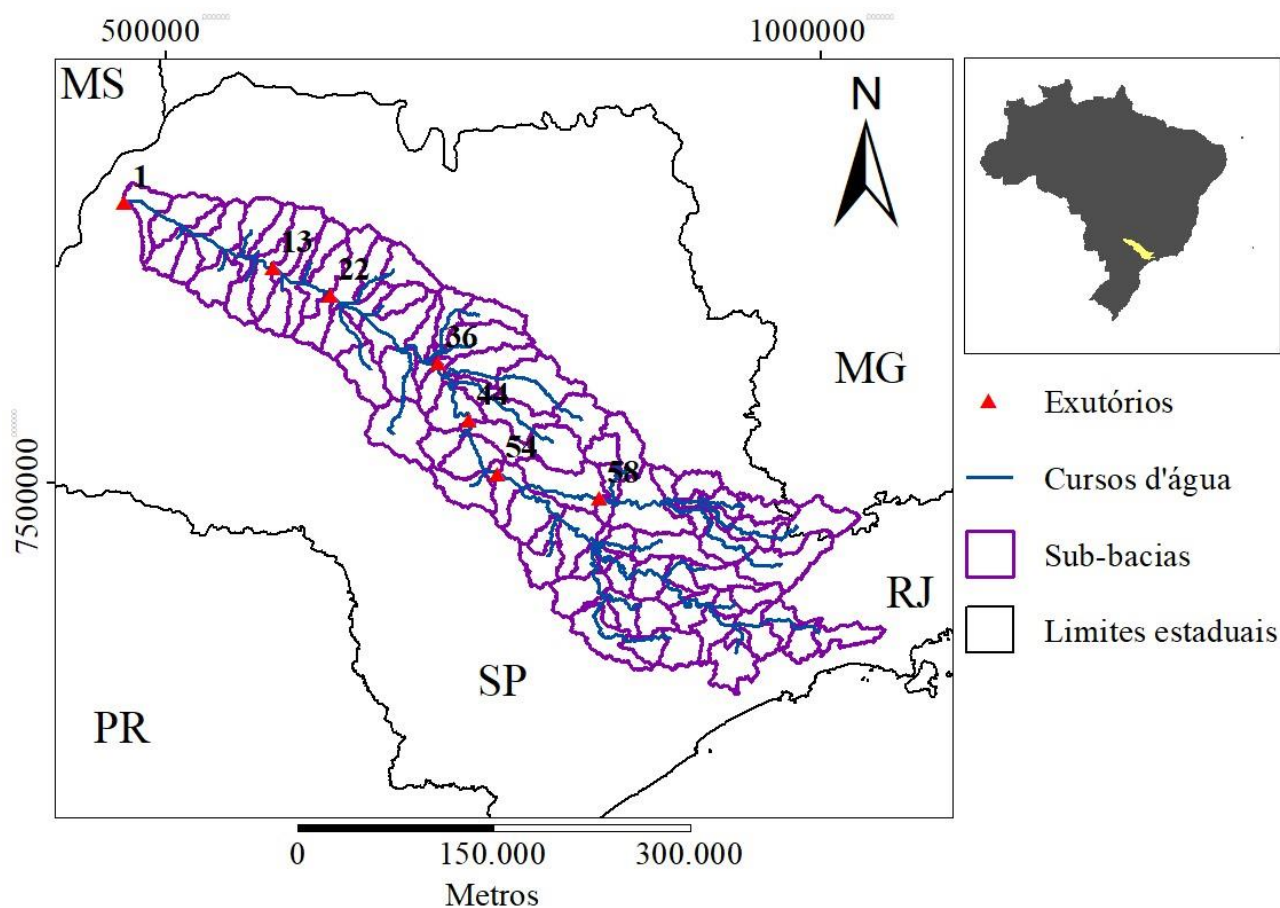


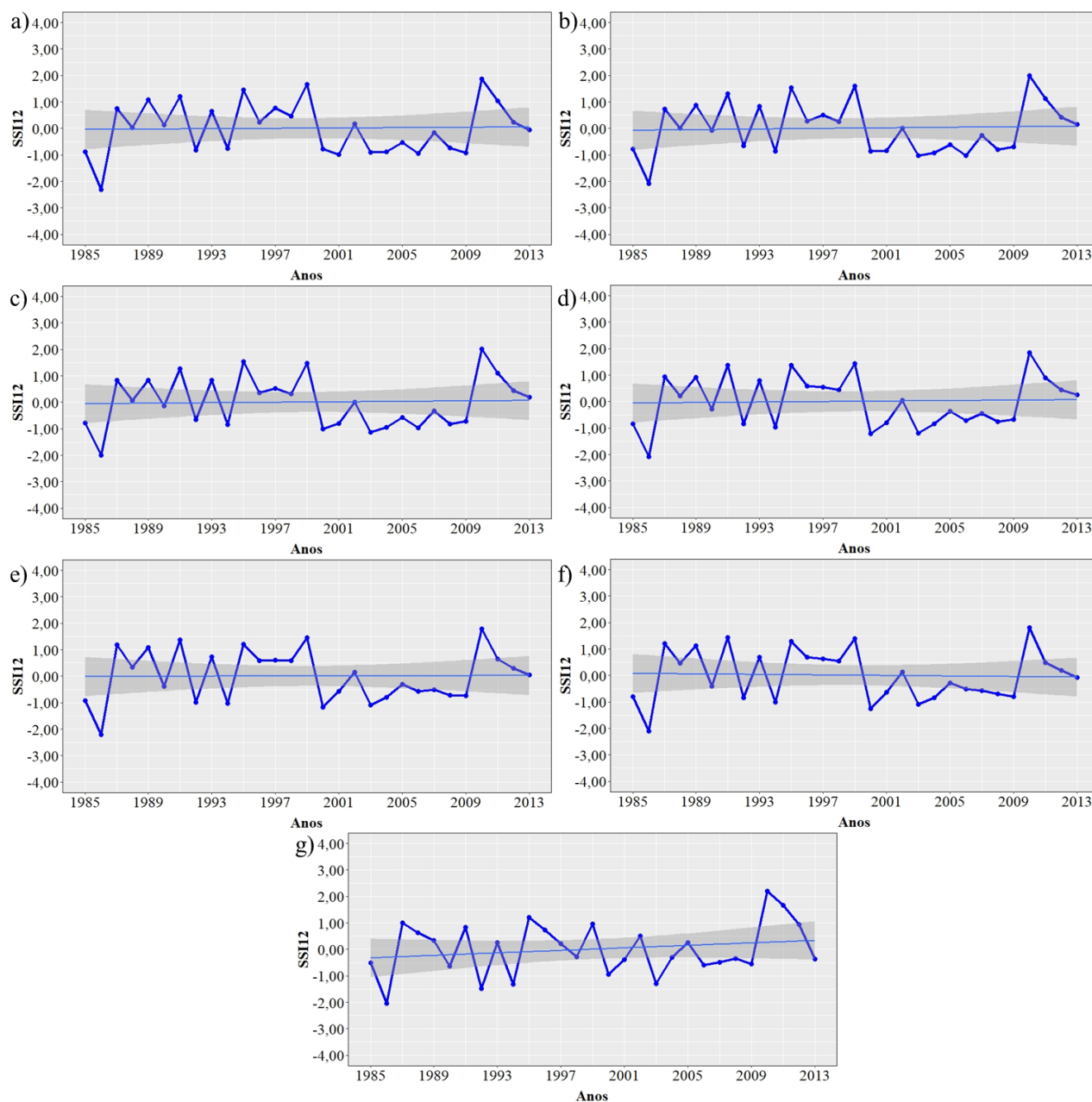
Figura 45. Postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Tietê

Tabela 13. Postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Tietê

Subbacia do posto	Identificação do posto	Latitude	Longitude
1	UHE Três Irmãos	7714344	468753
13	UHE Nova Avanhandava	7664362	583078
22	UHE Promissão	7644160	626545
36	UHE Ibitinga	7592385	707852
44	UHE A.S. Lima	7548851	732044
54	UHE Barra Bonita	7507516	754071
58	Artemis	7488397	831374

Os postos fluviométricos apresentados na Figura 45 e na Tabela 13 foram utilizados para modelo hidrológico. Para avaliação das interdependências entre água, uso e ocupação do solo e disponibilidade hídrica, padronizaram-se as vazões incrementais pelo SSI12 do mês de outubro está ilustrada na Figura 46. A aplicação do teste MMK nos

postos fluviométricos não encontrou tendências significantes em nenhum posto. A existência de tendência no posto fluviométrico reforça a existência de fatores que interferindo na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica.



A aplicação da média das correlações de cada uso e ocupação do solo, representada na Figura 47, ponderada com suas respectivas áreas de influência, revela que não houve destacada amplitude no impacto dos diversos usos do solo na disponibilidade hídrica. Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações que estejam acima de 0,37 são consideradas correlações positivas significantes, enquanto correlações que estejam abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significantes. Correlações que estejam entre -0,37 e 0,37 são consideradas correlações não-significantes.

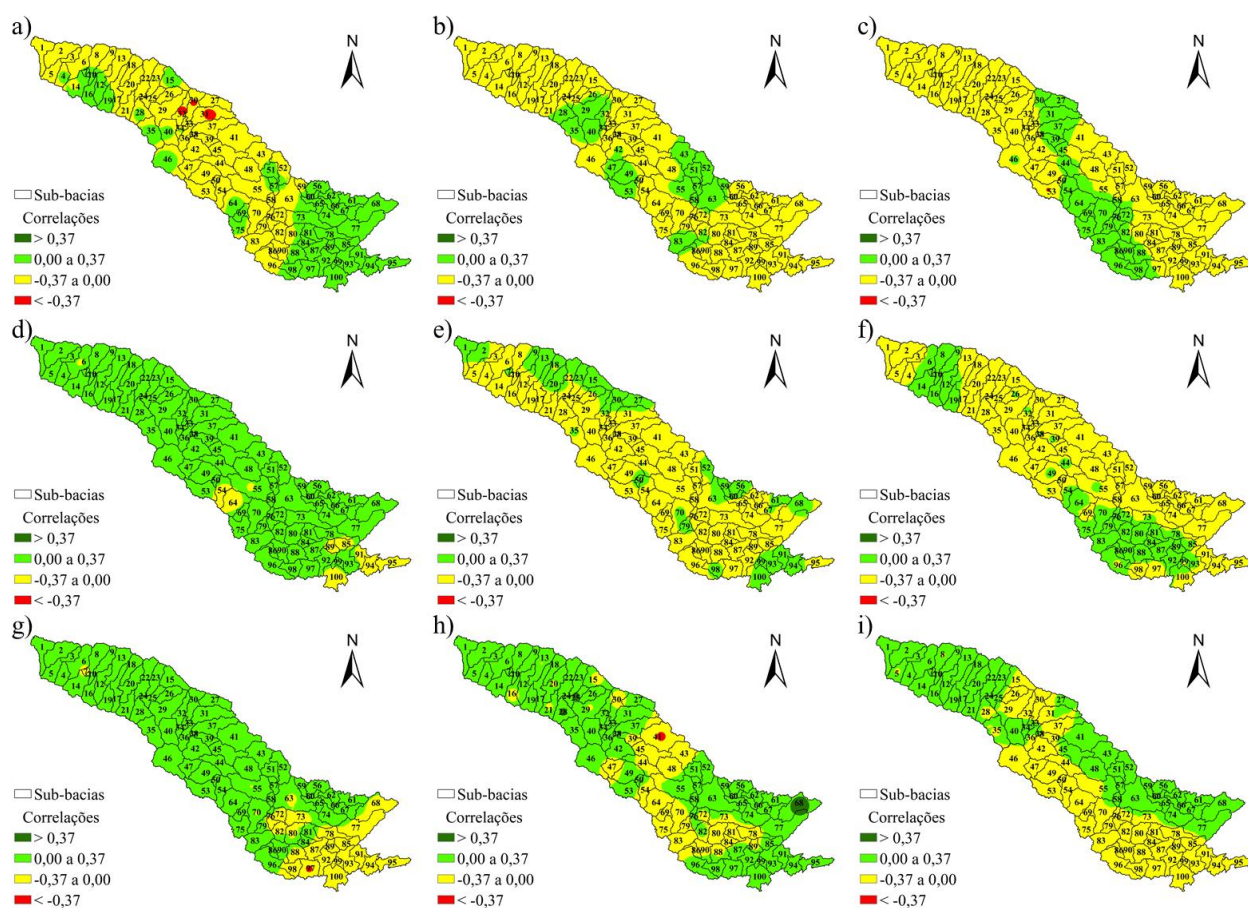


Figura 47. Correlação entre uso-ocupação do solo e SSI para a) Formação florestal; b) Formação savânica c) Formação campestre; d) Floresta plantada; e) Pastagens; f) Cana-de-açúcar; g) Agricultura; h) Área urbana; i) Solo descoberto, na bacia hidrográfica do rio Tietê

Como pode ser observado na Figura 47, não foram encontradas quaisquer correlações significantes para formação savânica (Figura 47b), formação campestre (Figura

47c), floresta plantada (Figura 47d), pastagens (Figura 47e), cana-de-açúcar (Figura 47f) e solo descoberto (Figura 47i). Para formação florestal (Figura 47a), agricultura (Figura 47g) e área urbana (Figura 47h), foram encontradas correlações pontuais dispersas pela área de estudo e em baixo número, sendo consideradas meramente estatísticas. Nesse sentido, não se observam evidências de que as modificações no uso e ocupação do solo impactaram na disponibilidade hídrica na bacia do Tietê.

Partindo das vazões padronizadas, buscou-se identificar correlações entre o comportamento histórico das demandas hídricas na bacia e as séries históricas em cada posto fluviométrico. De forma geral, a aplicação da média de tais correlações significativas de cada uso, ponderada com suas respectivas áreas de cobertura, revela os dois usos mais impactantes como dessedentação animal e irrigação agrícola, sendo os menos impactantes o uso industrial, abastecimento humano e a mineração.

A aplicação da média das correlações de cada uso e ocupação do solo, os quais estão representados na Figura 48, ponderada com suas respectivas áreas de influência revela que não houve destacada amplitude no impacto dos diversos usos do solo na disponibilidade. Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações que estejam acima de 0,37 são consideradas correlações positivas significantes, enquanto correlações que estejam abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significantes. Correlações que estejam entre -0,37 e 0,37 são consideradas correlações não-significantes.

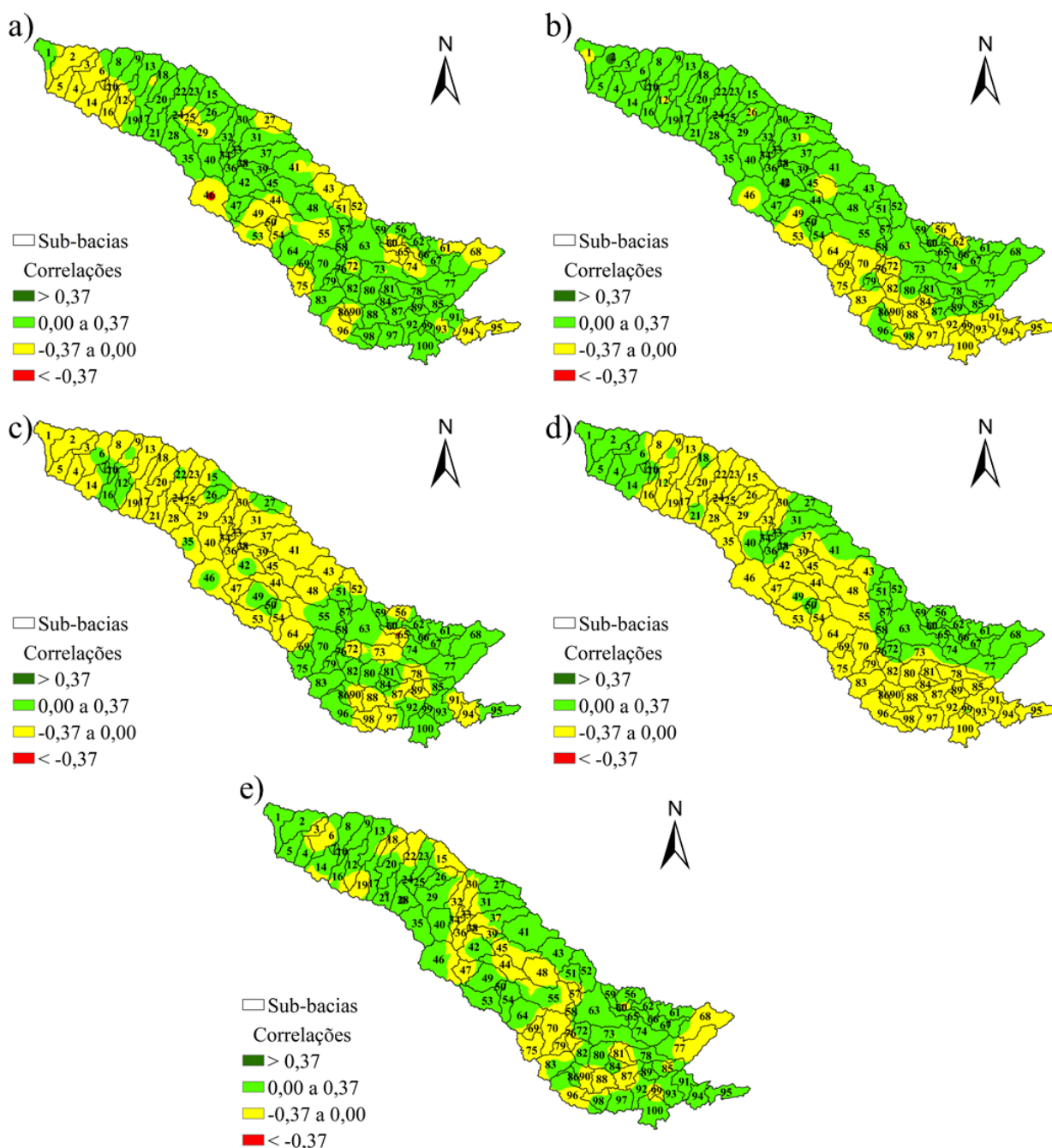


Figura 48. Correlação entre uso da água e SSI para Abastecimento humano a); Industrial b); Irrigação agrícola c); Dessedentação animal d); Mineração e) na bacia hidrográfica do rio Tietê

Conforme observado na Figura 48, não foram observadas correlações significantes entre usos da água e a disponibilidade hídrica nos postos fluviométricos dispostos na bacia hidrográfica do rio Tietê.

Foram investigadas as interdependências entre as duas demandas hídricas e os dois usos produtivos do solo mais impactantes sobre a disponibilidade hídrica. Para tanto,

optou-se por estabelecer correlações entre variáveis restritas, e as mesmas a serem correlacionadas na Figura 49 foram: dessedentação animal contra cana-de-açúcar, dessedentação animal contra pastagem, irrigação agrícola contra cana-de-açúcar, irrigação agrícola contra pastagens. Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações que estejam acima de 0,37 são consideradas correlações positivas significantes, enquanto correlações que estejam abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significantes. Correlações que estejam entre -0,37 e 0,37 são consideradas correlações não-significantes.

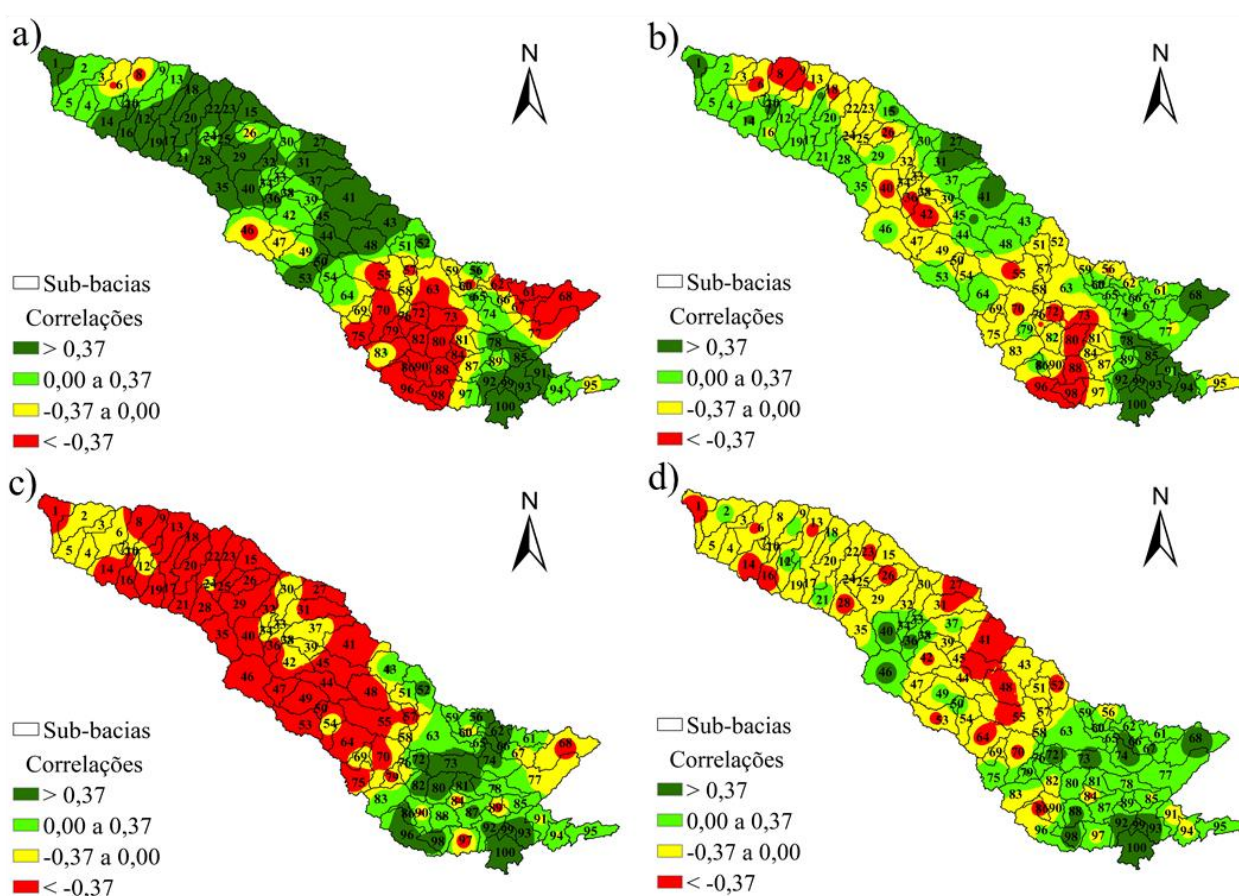


Figura 49. Correlações entre usos da água e usos e ocupações do solo para: a) Dessedentação animal contra cana-de-açúcar; b) Dessedentação animal contra pastagem; c) Irrigação agrícola contra cana-de-açúcar; d) Irrigação agrícola contra pastagens na bacia hidrográfica do rio Tietê.

Observando a Figura 49a) e a Figura 49c), observa-se que há um contraste entre a dessedentação animal e a irrigação agrícola quando correlacionadas para com o uso para da cana-de-açúcar. Este contraste, sendo a correlação positiva para a dessedentação

animal na parte superior da bacia hidrográfica e negativa na parte inferior da área de estudo, indica que houve uma substituição do uso de pastagens, fato observado por Caldarelli e Gilio (2018) em estudo sobre a expansão da cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

6.2.3.2. Impactos do uso e ocupação do solo na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Tietê

Após a primeira calibração, foram excluídos os parâmetros CH_N2.rte, ALPHA_BNK.rte, R__SLSUBBSN.hru, ALPHA_BF.gw, SURLAG.bsn, REVAPMN.gw, LAT_TIME.hru, HRU_SLP.hru, OV_N.hru. O desempenho de cada posto fluviométrico na etapa de calibração está disposto na Tabela 14.

Tabela 14. Métricas de cada posto fluviométrico da bacia hidrográfica do Tietê na etapa de calibração

Calibração (1993-2007)				
Identificação do posto	R2	NSE	PBIAS	KGE
UHE Três Irmãos	0,69	0,68	4,30	0,71
UHE Nova Avanhandava	0,67	0,59	14,80	0,64
UHE Promissão	0,64	0,63	6,30	0,71
UHE Ibitinga	0,61	0,59	2,20	0,75
UHE A.S. Lima	0,60	0,58	9,60	0,67
UHE Barra Bonita	0,56	0,54	9,20	0,65
Artemis	0,60	0,31	-30,40	0,61

Após a fase de calibração, passou-se à etapa de validação do modelo. Para tanto, os parâmetros calibrados foram validados para o intervalo de 2008 a 2013, e o desempenho das métricas para a validação está representado na Tabela 15. O melhor valor para cada parâmetro está disposto na Tabela 16.

Tabela 15. Métricas de cada posto fluviométrico da bacia hidrográfica do Tietê na etapa de validação

Validação (2008-2013)				
Identificação do posto	R2	NS	PBIAS	KGE
UHE Três Irmãos	0,45	0,42	0,50	0,62
UHE Nova Avanhandava	0,45	0,41	7,30	0,59
UHE Promissão	0,46	0,44	5,50	0,62
UHE Ibitinga	0,49	0,46	0,70	0,66
UHE A.S. Lima	0,47	0,45	4,80	0,61
UHE Barra Bonita	0,46	0,45	3,60	0,60
Artemis	0,46	0,38	-20,90	0,55

Após as etapas de calibração e validação, melhores parâmetros para a bacia do Tietê estão dispostos na Tabela 16 abaixo.

Tabela 16. Parâmetros calibrados e validados para a bacia hidrográfica do rio Tietê

Parâmetros	Valor
R__CN2.mgt	-0,180
R__SOL_AWC().sol	-0,162
R__SOL_K().sol	-0,143
V__GWQMN.gw	3612,457
V__GW_DELAY.gw	147,974
V__RCHRG_DP.gw	0,992
V__GW_REVAP.gw	0,077
V__CANMX.hru	16,545
V__ESCO.hru	0,970
V__CH_K2.rte	8,246

Como observado na Tabela 14, diferentemente das bacias do rio Grande e da bacia do rio Paranaíba, a modelagem hidrológica na bacia do rio Tietê apresentou um processo de calibração satisfatório e um processo de validação insatisfatório. Como

tentativa de contornar essa questão, buscou-se reduzir o número de postos fluviométricos, mantendo a homogeneidade da distribuição, ao retirar os postos da UHE de Nova Avanhandava, da UHE Ibitinga e da UHE de Barra Bonita. Também tentou-se modificar os intervalos anuais de calibração e validação. No entanto, ambas as tentativas se mostraram infrutíferas, reduzindo o a qualidade da calibração e da validação, o que indica que o processo metodológico foi executado da maneira correta. A diferença de qualidade entre calibração e validação sugere forte modificação dentro da janela de 5 anos, a qual não foi captada na transição da calibração para validação.

A quantificação de escoamento superficial calculada pelo modelo hidrológico foi avaliada para o exutório da área de estudo – UHE Três Irmãos estando as vazões observadas e simuladas, bem como a incerteza (95PPU), dispostas na Figura 50. O comparativo entre as vazões observadas e as vazões simuladas pelo modelo está representado na Figura 51.

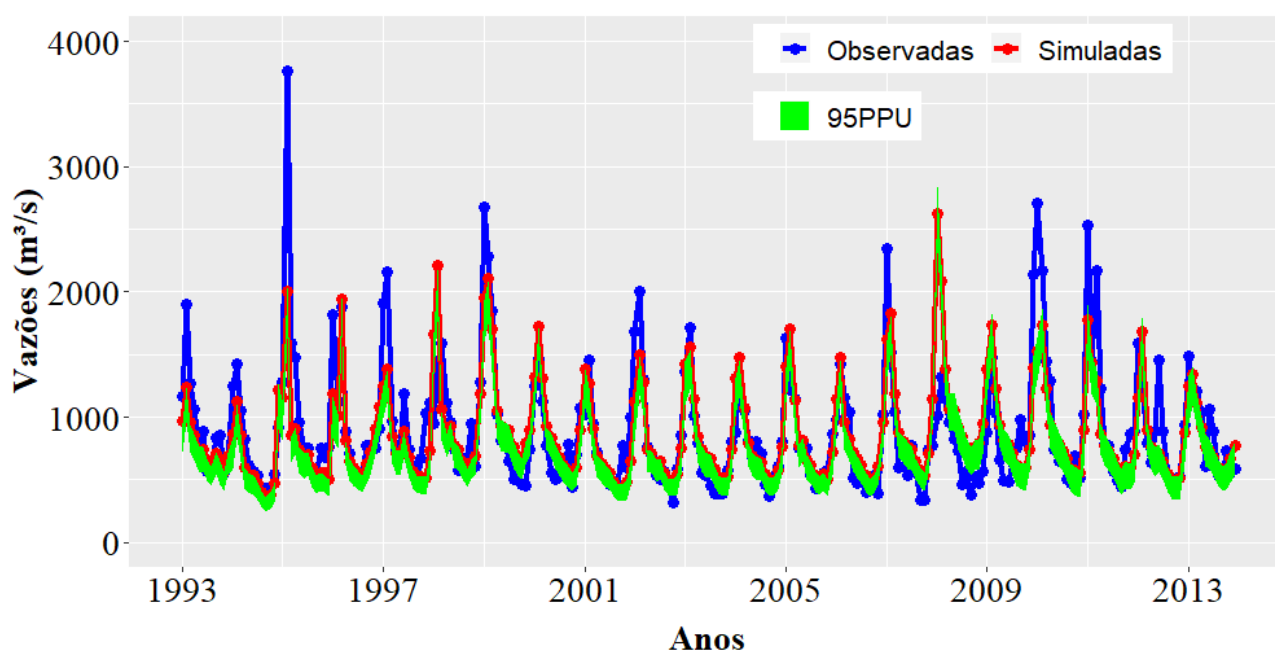


Figura 50. Comparações entre vazões simuladas e vazões observadas na bacia hidrográfica do rio Tietê

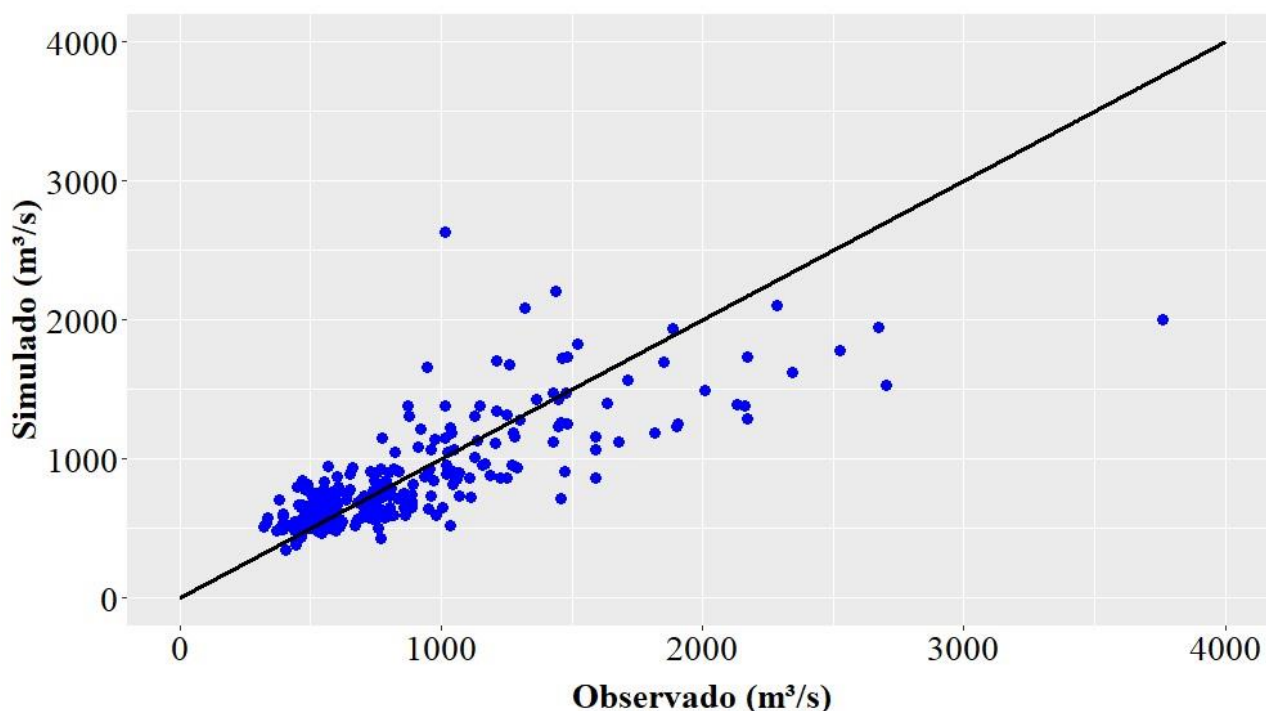


Figura 51. Comparativo entre vazões observadas e simuladas para a bacia hidrográfica do rio Tietê.

Das Figuras 50 e 51, extrai-se que o comportamento das vazões simuladas no decorrer da série histórica variou em relação ao comportamento das séries históricas observadas. Para vazões mais baixas, as variações foram menores, havendo razoável concentração na faixa entre 0 e 1000 m³/s. No entanto, a partir de 1000 m³/s, a dispersão aumenta consideravelmente. Na região em que ocorre esta dispersão, é possível observar que o centroide se encontra abaixo da linha-base de análise, indicando que, para vazões mais elevadas, os valores simulados estiveram aquém dos valores observados. O coeficiente de correlação entre as séries históricas de observadas e simuladas é de 0,78, o que indica uma aderência menor que as identificadas para a bacia do rio Grande e para a bacia do rio Paranaíba.

Com o modelo hidrológico calibrado e validado para um uso dinâmico, variando em intervalos de 5 anos, buscou-se determinar o impacto que as mudanças no uso e na ocupação do solo tiveram no escoamento superficial da área de estudo. Para executar esta avaliação, executou-se o modelo hidrológico para um uso e ocupação do solo constante, cujas informações referem-se ao cenário inicial da série que, neste estudo, é o ano de 1985. Também buscou-se quantificar, em termos percentuais, a parcela de escoamento superficial perdida na série histórica apontada. O comparativo de vazões simuladas para uso constante e uso dinâmico, bem como a diferença, em porcentagem, entre as mesmas,

estão ilustrados na Figura 52. A diferença percentual entre as variáveis está representada na Figura 53.

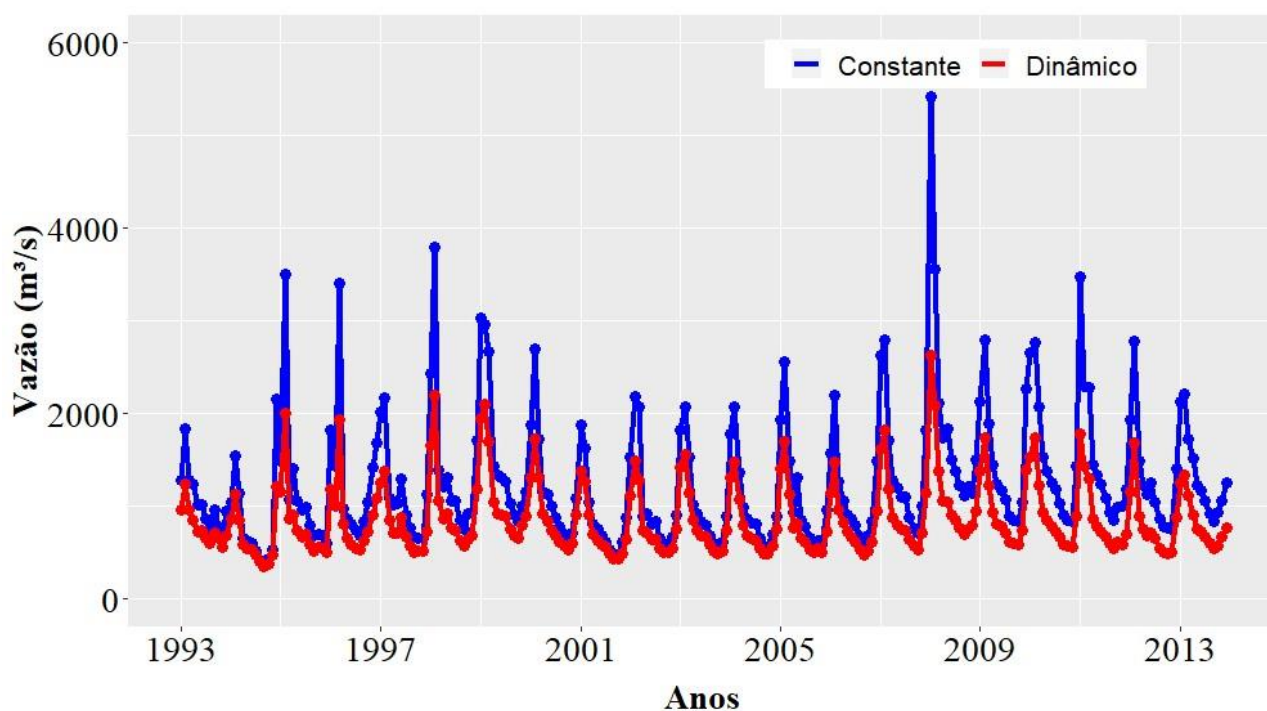


Figura 52. Comparativo de vazões simuladas para uso constante (1985), uso dinâmico, e diferença percentual entre as mesmas para a bacia hidrográfica do rio Tietê

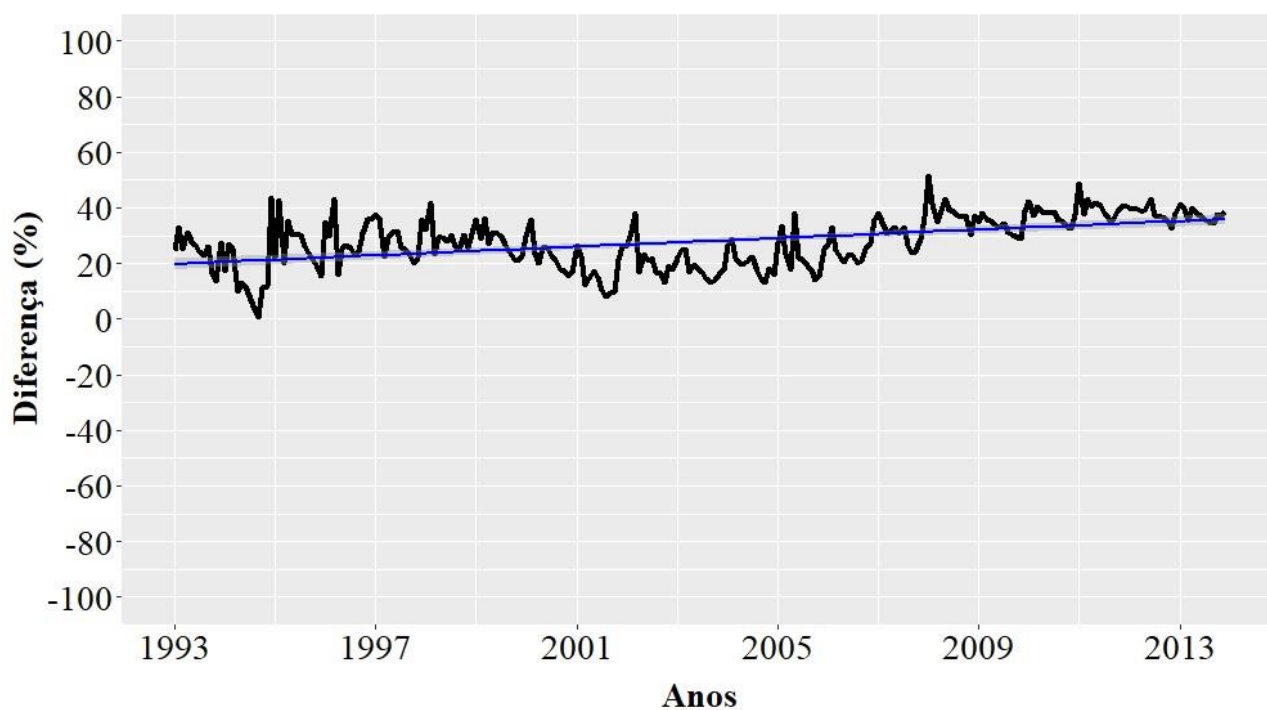


Figura 53. Diferença percentual entre escoamento superficial para o uso constante (1985) e para uso dinâmico para a bacia hidrográfica do rio Tietê.

Assim como observado no modelo hidrológico nas bacias do rio Grande e no rio Paranaíba, as vazões para uso e ocupação do solo constante (cenário de 1985) e dinâmico (com mudanças de 5 em 5 anos) tiveram diferenças, com o uso e ocupação do solo constante apresentando vazões mais elevadas. As maiores diferenças se deram, principalmente, nos picos de vazões. Aplicando-se um ajuste de reta linear à curva de diferenças entre vazões para uso constante e vazões para uso dinâmico, observa-se que as diferenças entre usos e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Tietê apresentaram reduções entre 20% e 30%. No entanto, diferentemente da bacia do rio Grande, as diferenças aumentaram ao longo do tempo. No entanto, as diferenças na bacia do rio Grande apresentam comportamento linear, enquanto as diferenças na bacia do rio Tietê apresentam comportamento ascendente. Tais comportamentos são distintos do apresentado pelas diferenças de escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Paranaíba, em que as diferenças pouco variaram ao longo do tempo e tiveram valor próximo à 5%.

6.2.3.3. Séries temporais de uso e ocupação do solo e de usos da água na bacia hidrográfica do rio Tietê

As séries históricas de cada uso e ocupação do solo tratados na Seção 6.2.3.1. estão representadas na Figura 54. Os usos e ocupações do solo estão representados de acordo com sua identificação no modelo hidrológico SWAT.

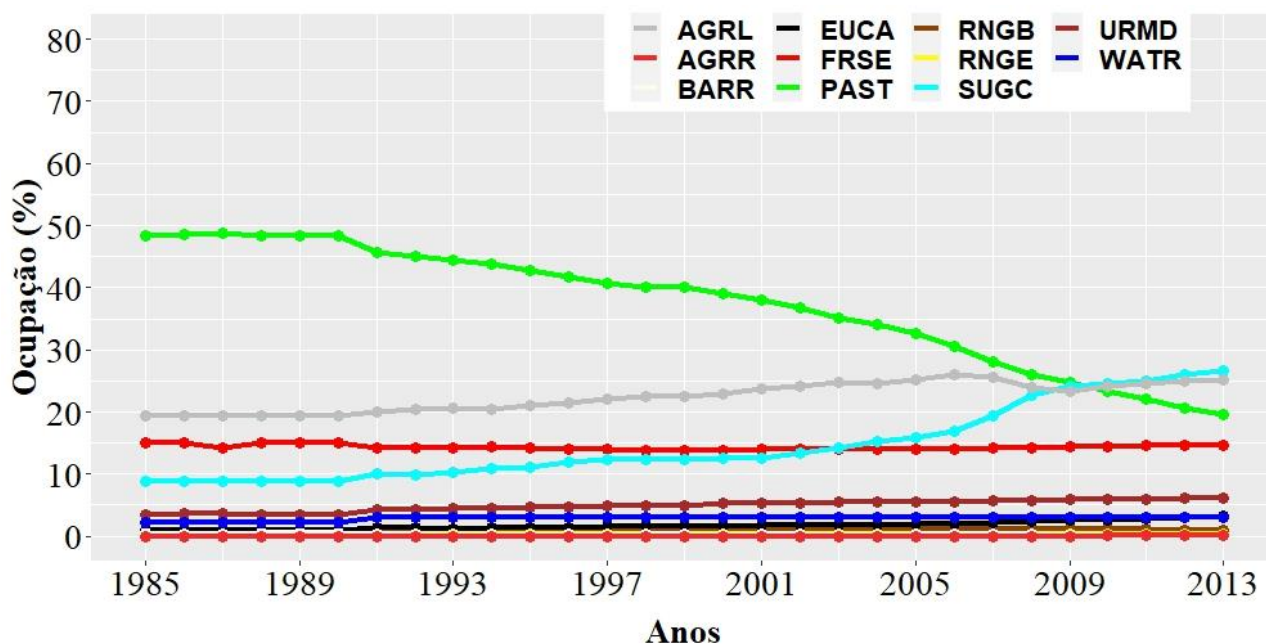


Figura 54. Parcela de usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica do rio Tietê

Como pode ser observado na Figura 54, ocorreu forte redução das áreas de pastagens, enquanto o uso do solo para a atividade sucroalcooleira teve forte aumento. Estes comportamentos assemelham-se ao observado para a bacia hidrográfica do rio Grande, com o adendo de que, a partir de 2009, o uso do solo para plantio da cana-de-açúcar superou as áreas de pastagens. Para o estado de São Paulo, o qual abriga parcela próxima à totalidade da bacia do rio Tietê, Caldarelli e Gilio (2018) observaram que houve intensa substituição de áreas de pastagens para áreas de cana-de-açúcar.

Para avaliação das demandas hídricas na bacia do rio Tietê, utilizou-se do comportamento histórico das demandas hídricas para a área de estudo, o qual está representado na Figura 55.

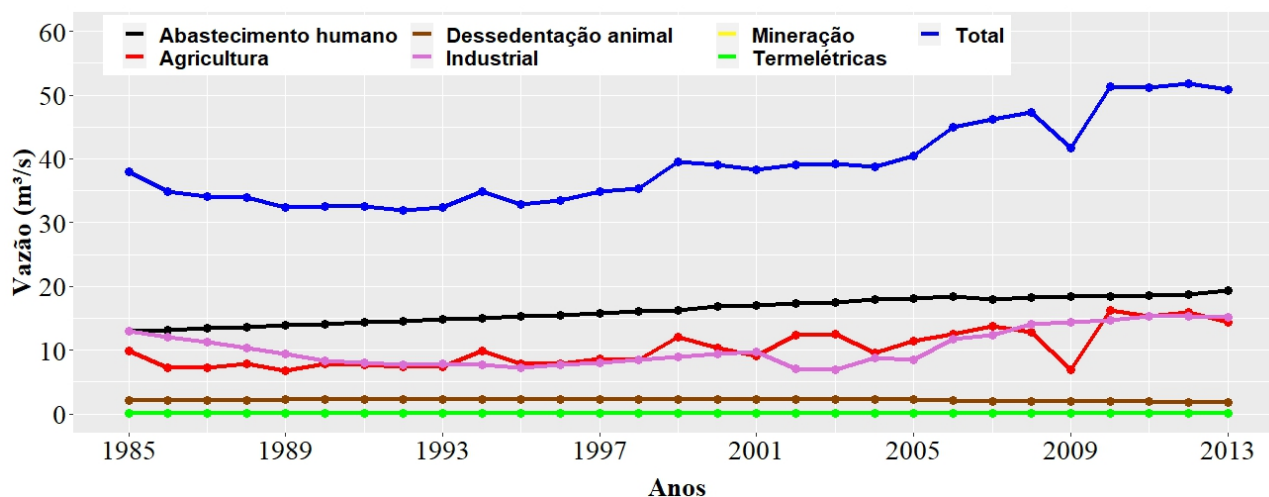


Figura 55. Séries históricas de usos da água na bacia hidrográfica do rio Tietê

Com relação ao uso da água, observa-se, na Figura 55, que o uso predominante se dá para o abastecimento público. Tal fato é explicado pela alta parcela populacional brasileira que vive em áreas abastecidas por cursos d'água da bacia hidrográfica do Tietê. Observando o aumento das áreas de cana-de-açúcar em detrimento das áreas de pastagens e com a detecção do aumento das demandas de água por parte da indústria, gera-se uma evidência de aumento da atividade sucroalcooleira. Na bacia hidrográfica do rio Tietê, observa-se que as demandas hídricas tiveram um incremento de 12 m³/s ao longo da série histórica.

6.2.4. Bacia hidrográfica Complementar

Através do ArcSWAT, a bacia Complementar foi subdividida em 109 sub-bacias, as quais estão ilustradas na Figura 56.

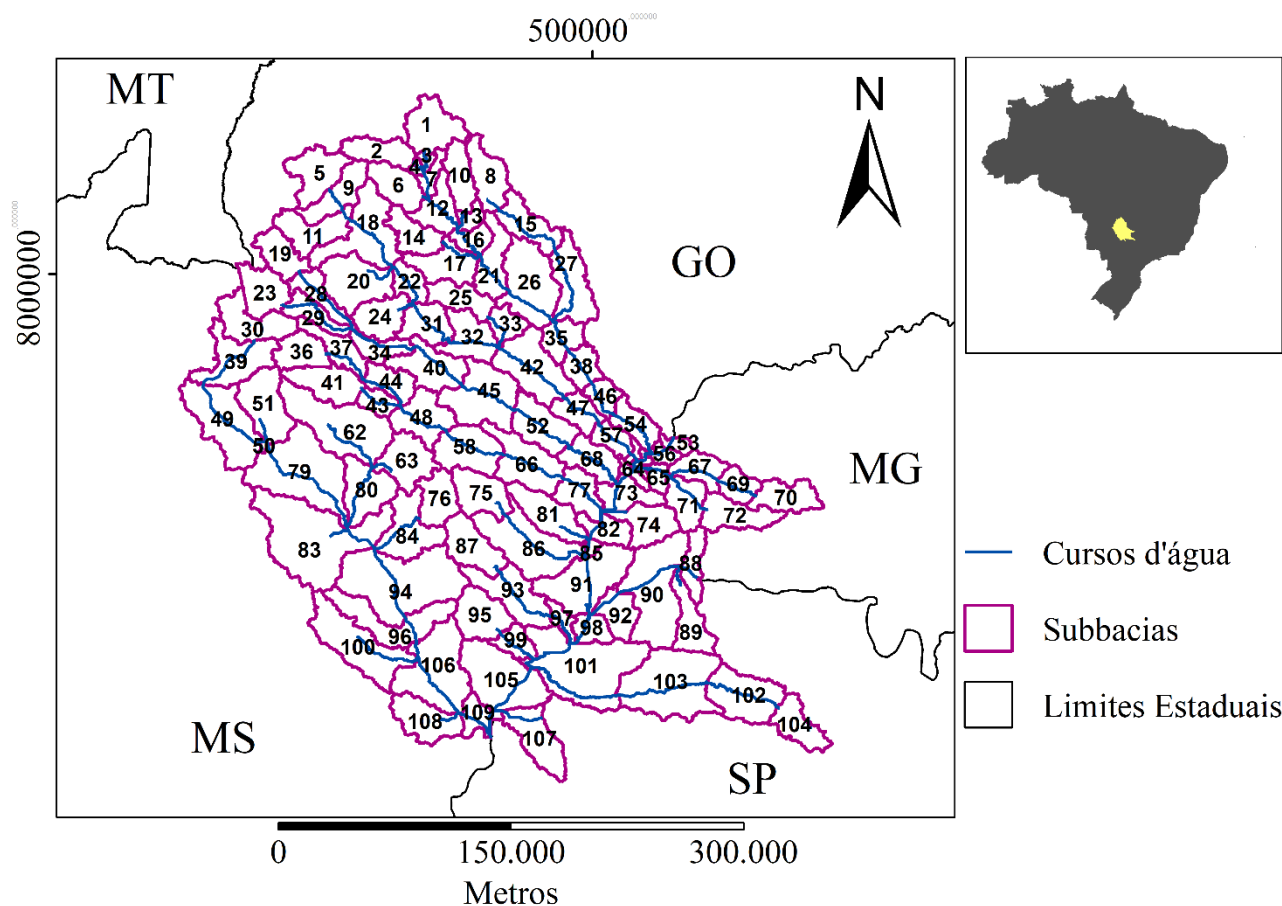


Figura 56. Divisão em subbacias na bacia hidrográfica Complementar

A subdivisão da área de estudo levou em consideração a distribuição de postos fluviométricos com séries históricas sem falhas. Nesse sentido, os postos fluviométricos a serem considerados na análise da bacia do rio Grande, estão dispostos na Figura 57, e a identificação e a localização dos mesmos estão descritas na Tabela 17.

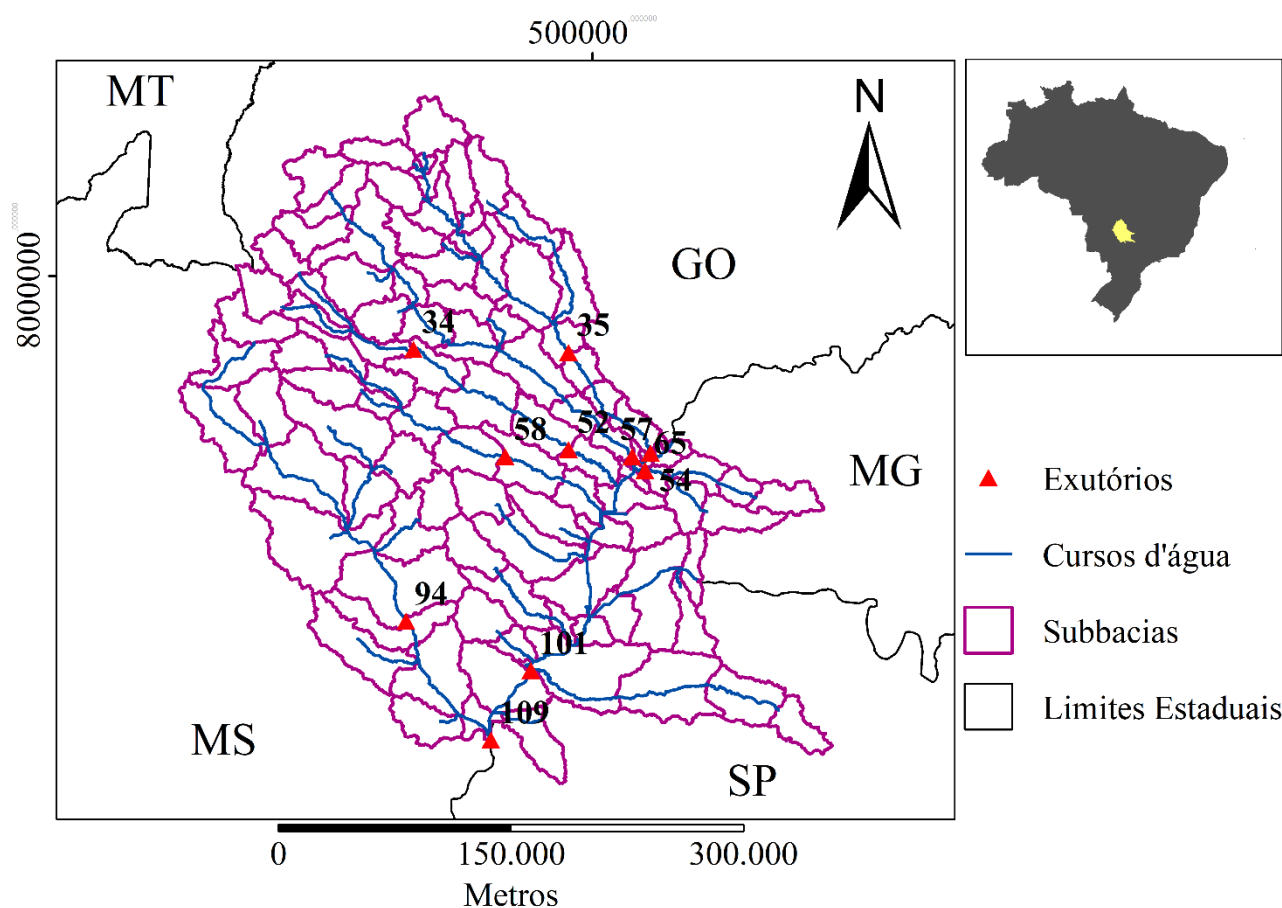


Figura 57. Postos fluviométricos da bacia hidrográfica Complementar

Tabela 17. Postos fluviométricos na bacia do rio Grande

Subbacia do posto	Identificação do posto	Latitude	Longitude
34	Campo Alegre	7952626	384579
35	UHE - Caçú	7950714	484460
52	Canastra	7888114	484507
54	UHE Eng. José Muller Montante Itaguaçu	7885971	537422
57	UHE Salto do Rio Verdinho	7883610	525715
58	Itajá	7883530	443718
65	Ponte São Domingos	7874730	533914
94	Porto Galeano	7777570	379683
101	UHE Ilha Solteira	7745690	460323
109	UHE Jupia	7700903	434523

Os postos fluviométricos apresentados na Figura 57 e descritos na Tabela 17 foram utilizados para a modelagem hidrológica. Para avaliação das interdependências entre água, uso e ocupação do solo e disponibilidade hídrica, suprimiu-se da análise os postos

que eram exutório das sub-bacias 7, 12, 30 e 33, e a padronização de suas vazões incrementais pelo SSI12 do mês de outubro está ilustrada na Figura 58. A aplicação do teste MMK observou a existência de tendências positivas significantes nos postos de Ponte São Domingos (Figura 58g) e Porto Galeano (Figura 58h).

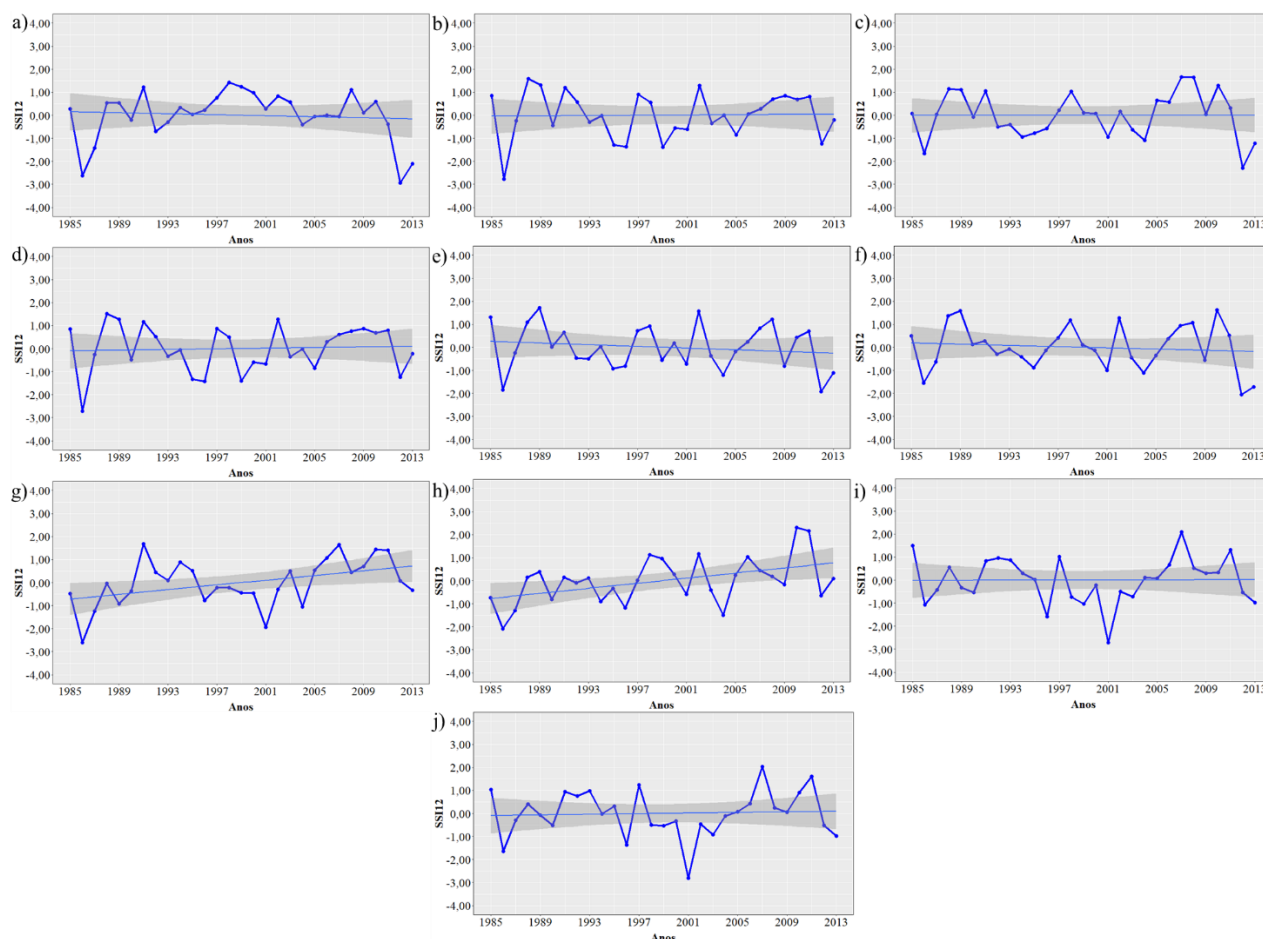


Figura 58. SSI12 de cada posto fluviométrico na área de estudo para a) Campo Alegre; b) UHE Caçu; c) Canastra; d) UHE Eng. Jose Muller Montante Itaguaçu; e) UHE Salto do Rio Verdinho; f) Itajá; g) Ponte São Domingos; h) Porto Galeano; i) UHE Ilha Solteira; j) UHE Jupiá na bacia hidrográfica Complementar

6.2.4.1. Interdependências entre usos e ocupações do solo, usos da água e disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica Complementar

A aplicação da média das correlações de cada uso e ocupação do solo, os quais estão representados na Figura 59, ponderada com suas respectivas áreas de influência revela que não houve destacada amplitude no impacto dos diversos usos do solo na

disponibilidade. Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações que estejam acima de 0,37 são consideradas correlações positivas significativas, enquanto correlações que estejam abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significativas. Correlações que estejam entre -0,37 e 0,37 são consideradas correlações não-significantes.

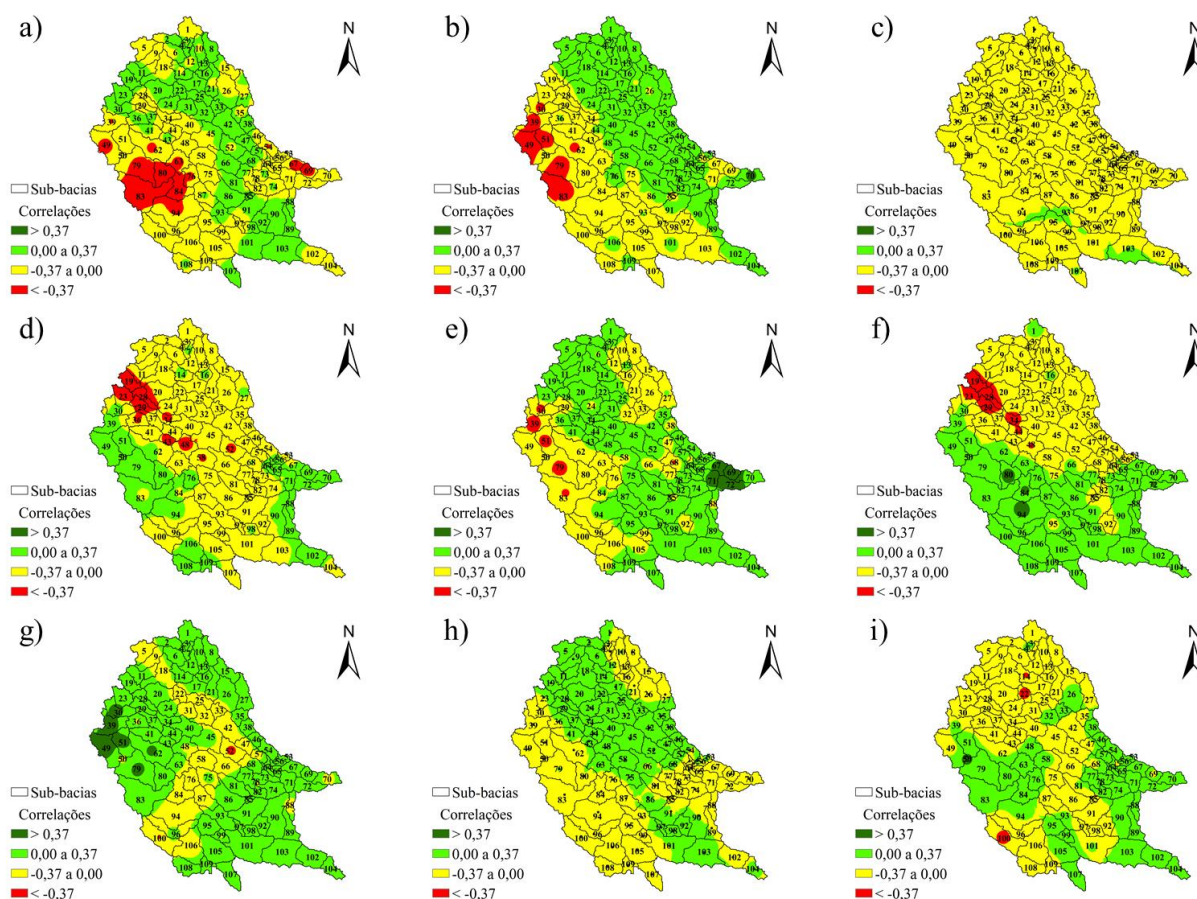


Figura 59. Correlação entre uso-ocupação do solo e SSI para a) Formação florestal; b) Formação savânica c) Formação campestre; d) Silvicultura; e) Pastagens; f) Cana-de-açúcar; g) Agricultura; h) Área urbana; i) Solo descoberto na bacia hidrográfica Complementar

Como pode ser observado na Figura 59, há uma significativa correlação negativa entre determinados usos e ocupações do solo e a disponibilidade hídrica na parcela localizada na região oeste/noroeste da área de estudo. Nestas áreas, as correlações significativas ocorreram para as formações florestais, para a as formações savânicas (cerrado), silvicultura, pastagens e cana de açúcar. A mesma região apresentou significantes correlações positivas para com a agricultura. A intersecção das áreas de

correlações significantes e divergentes entre agricultura e outras coberturas de solo indica um processo bilateral de substituição de coberturas. De acordo com Bergtold et al. (2017), nos estados do Mato Grosso do Sul e Goiás, ocorreu a substituição de pastagens e de cerrado por áreas agrícolas.

A aplicação da média das correlações de cada uso e ocupação do solo, a qual está representada na Figura 60, ponderada com suas respectivas áreas de influência revela que não houve destacada amplitude no impacto dos diversos usos do solo na disponibilidade hídrica. Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações que estejam acima de 0,37 são consideradas correlações positivas significantes, enquanto correlações que estejam abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significantes. Correlações que estejam entre -0,37 e 0,37 são consideradas correlações não-significantes.

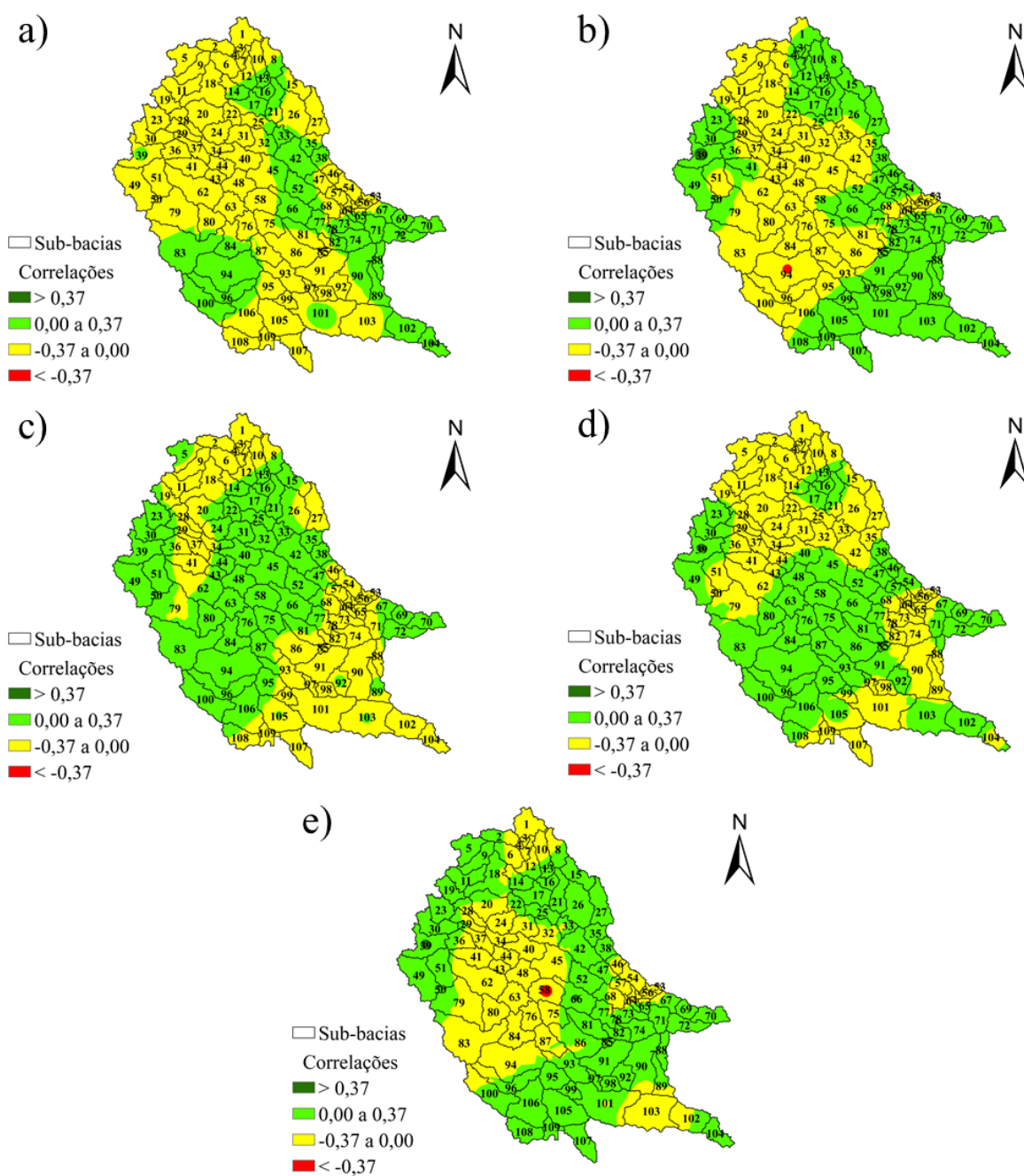


Figura 60. Correlação entre uso da água e SSI para a) Abastecimento humano; b) Industrial; c) Irrigação agrícola; d) Dessedentação animal; e) Mineração.

A observação da Figura 60 mostra que, entre os usos da água e a disponibilidade hídrica, não ocorreram correlações significantes. É possível que tal fato ocorra em virtude da baixa densidade populacional, ausência de polos industriais e de áreas de mineração, bem como a ausência de pastagens uniformes, principalmente nas regiões pertencentes ao estado do Mato Grosso do Sul.

A Figura 61 ilustra as correlações entre usos do solo e usos da água na bacia Complementar. Para um intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, as correlações que estejam acima de 0,37 são consideradas correlações positivas significativas, enquanto correlações que estejam abaixo de -0,37 são consideradas correlações negativas significativas. Correlações que estejam entre -0,37 e 0,37 são consideradas correlações não-significantes.

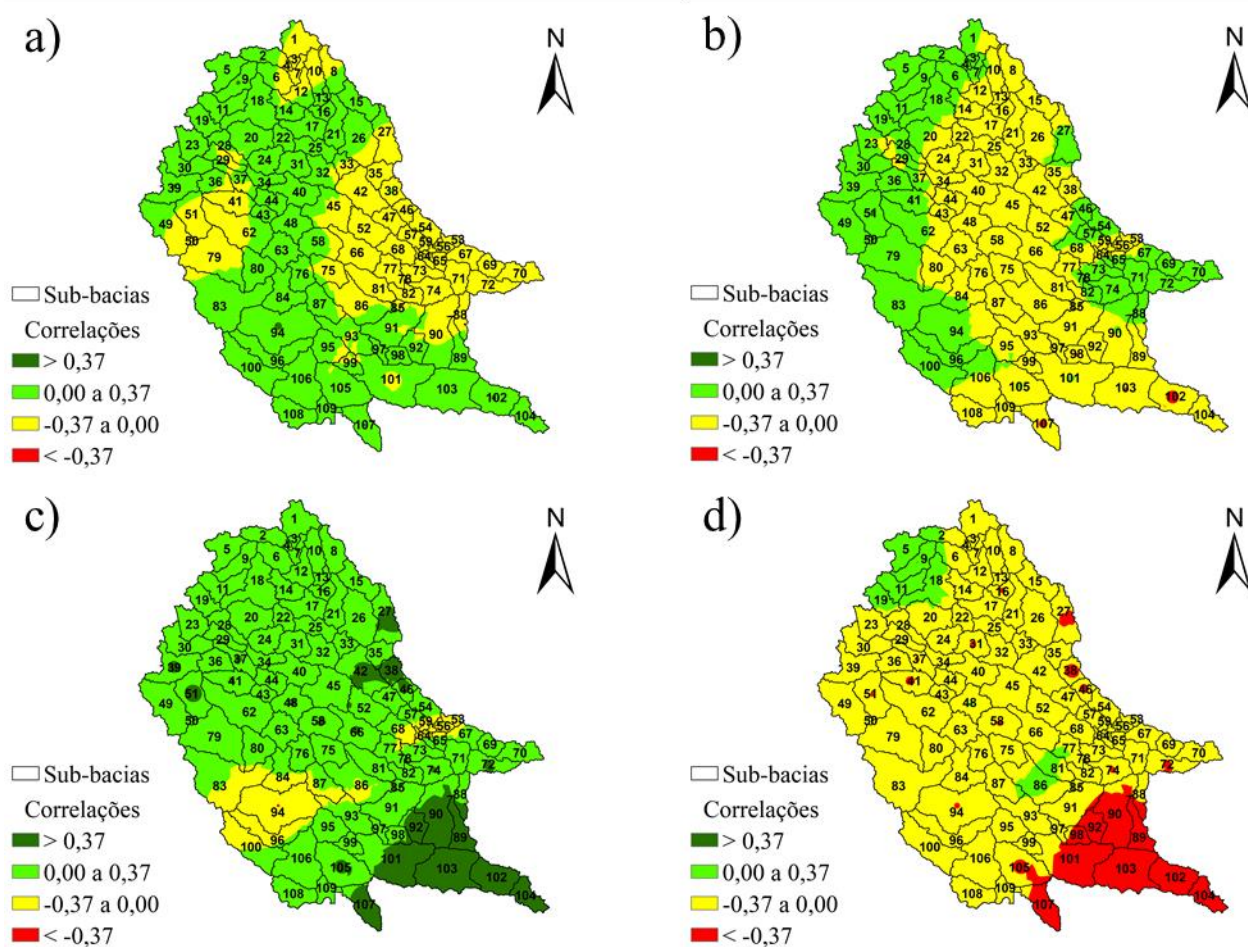


Figura 61. Correlações entre usos da água e usos e ocupações do solo para: a) Dessedentação animal contra cana-de-açúcar; b) Dessedentação animal contra pastagem; c) Irrigação agrícola contra cana-de-açúcar d); Irrigação agrícola contra pastagens, para a bacia hidrográfica Complementar.

Como observado na Figura 61, há um contraste entre a utilização do solo para pastagens e para plantio de cana-de-açúcar na região sul da área de estudo. Tal contraste é revelado quando se observa a correlação de ambos os usos do solo com a irrigação

agrícola, com tal fenômeno ocorrendo, majoritariamente, na região pertencente ao estado de São Paulo, Como observado por Abou Rafee et al, (2021), entre 1985 e 2015, 125 mil km² de pastagens na região central da bacia do Alto Paraná foram substituídas por áreas agrícolas, estando a maior parte destas áreas concentradas no setor sul da mencionada área de estudo, a qual também engloba a bacia hidrográfica Complementar do presente estudo.

6.2.4.2. Impactos do uso e ocupação do solo na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica Complementar

Após a primeira calibração, não ocorreu nenhuma exclusão de parâmetros, visto que a mesma se mostrou de baixa qualidade. Outras duas calibrações adicionais foram efetuadas sobre os 20 parâmetros iniciais. No entanto, as métricas estiveram aquém do esperado, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18. Métricas de cada posto fluviométrico na calibração do modelo hidrológico da bacia Complementar

Calibração (1993-2007)					
Posto	R2	NSE	PBIAS	KGE	
Campo Alegre	0,53	-0,51	9,50	0,30	
UHE - Caçú	0,60	0,35	23,30	0,54	
Canastra	0,68	0,15	-11,40	0,52	
UHE Eng. José Muller Montante Itaguaçu	0,63	0,30	26,40	0,50	
UHE Salto do Rio Verdinho	0,47	0,08	17,50	0,64	
Itajá	0,72	0,18	15,80	0,67	
Ponte São Domingos	0,60	0,52	-22,10	0,55	
Porto Galeano	0,30	-0,53	-12,20	0,41	
UHE Ilha Solteira	0,79	0,58	-24,30	0,73	
UHE Jupia	0,57	0,39	-22,90	0,64	

Nesse sentido, tentou-se modificar o comprimento da série histórica da calibração, bem como calibrar pontualmente sub-bacias. No entanto, as calibrações tiveram desempenhos piores do que a calibração efetuada de maneira semelhante à outras bacias. As dificuldades na etapa de calibração podem ter se dado por conta das vazões afluentes

das bacias hidrográficas do rio Grande, rio Paranaíba e rio Tietê, as quais estão posicionadas à montante da bacia hidrográfica Complementar. Devido à forma e ao tamanho destas bacias, ao distintos padrões de precipitações nestas bacias hidrográficas (Apontadas na Seção 6.1.), bem como a heterogeneidade das atividades de uso e ocupação do solo e de uso da água, apontadas em toda Seção 6.2.4., a modelagem hidrológica pode tornar-se custosa e pouco eficaz. Por conta da baixa qualidade da calibração/validação, a aplicação da mudança de cenário (dinâmico-constante) pode gerar resultados inconsistentes.

6.2.4.3. Séries temporais de uso e ocupação do solo e de usos da água na bacia hidrográfica Complementar

As séries históricas de cada uso e ocupação do solo da bacia Complementar estão representadas na Figura 62. Os usos e ocupações do solo estão representados de acordo com sua identificação no modelo hidrológico SWAT.

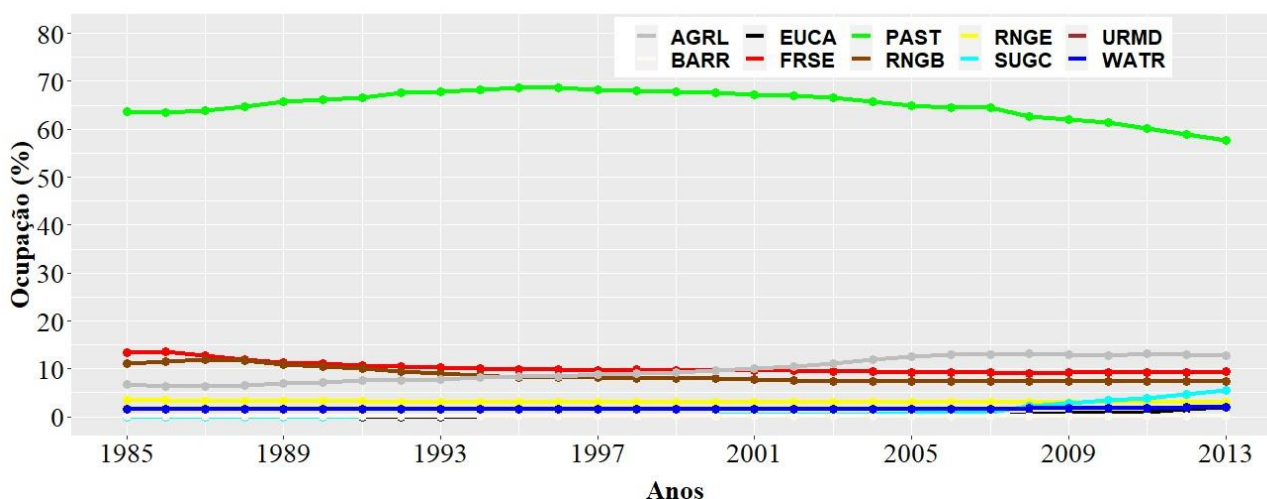


Figura 62. Usos e ocupações do solo na bacia hidrográfica Complementar

A partir da Figura 62, identifica-se que, para a bacia hidrográfica Complementar, as pastagens (PAST) tiveram um quadro de oscilação que não foi observado nas bacias do rio Grande, Paranaíba e Tietê. Oscilação oposta pode ser vista para formações campestres (RNGE) e formações savânicas (RNGB), principalmente entre 1986 e 2001, indicando uma

supressão vegetal em benefício de atividade pecuária. Após 2001, observa-se uma redução da área de pastagens, ao mesmo tempo que pode ser observado um crescimento de atividade agrícola, o que indica a substituição de atividades econômicas.

Para avaliação das demandas hídricas na bacia Complementar, utilizou-se do comportamento histórico das demandas hídricas para a área de estudo, o qual está representado na Figura 63.

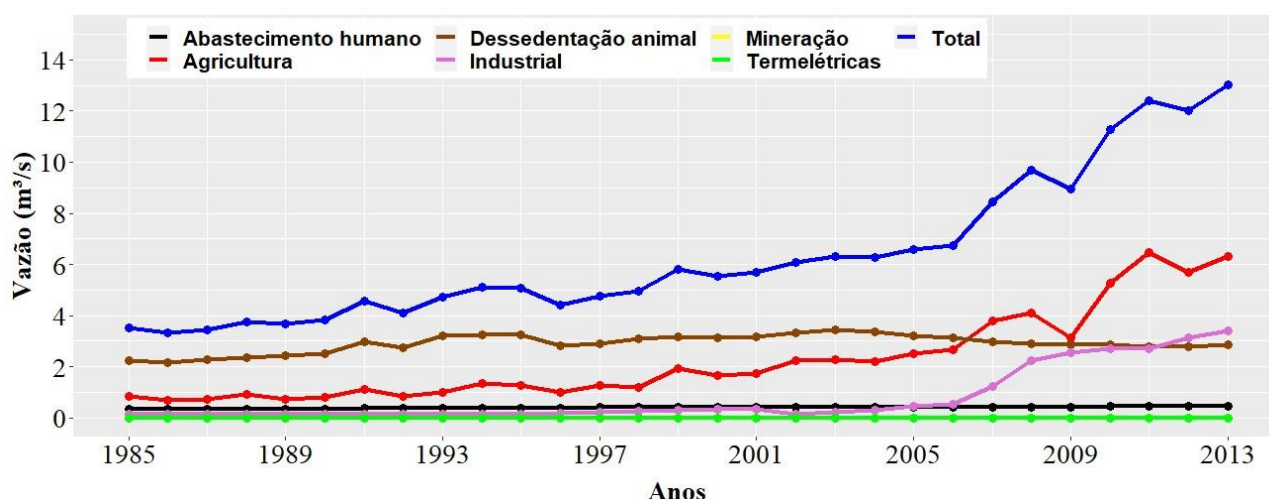


Figura 63. Usos da água em atividades econômicas na bacia Complementar

Como pode ser observado na Figura 63, o uso da água para agricultura apresentou destacado crescimento a partir de 1998, indicando que a agricultura de precisão passou a ser inserida na área de estudo por meio do incremento de áreas irrigadas. De acordo com Souza, Rodrigues e Da Cunha (2023) e Althoff e Rodrigues (2019), 80% das irrigações brasileiras estão em áreas de cerrado, e espera-se que esta área aumente ainda mais. A partir de 2006, observa-se um aumento do uso da água para fins industriais. Na Figura 59, observa-se que, a partir deste ano, ocorre um incremento nas áreas de cana-de-açúcar na área de estudo. Logo, o aumento na demanda de água pode ter ocorrido por conta da implantação de usinas sucroalcooleiras, as quais demandam altas quantidades de água para seu funcionamento. Na bacia hidrográfica Complementar, as demandas hídricas apresentadas na Figura 63 tiveram um incremento de, aproximadamente, 10 m³/s.

6.3. Integração de precipitações e usos e ocupações do solo

O método de correlação cruzada entre séries históricas anuais foi utilizado para avaliação da defasagem no tempo (*lag*) entre os diversos usos e ocupações do solo e as precipitações na área de estudo. Para tanto, aplicou-se o método de Polígonos de Thiessen para obtenção da área de influência de cada posto pluviométrico. Foram utilizados 166 postos pluviométricos com comprimento de série histórica igual a 33 anos, a qual se inicia em 1985 e se encerra em 2017. Tal comprimento de série histórica também se aplica aos dados anuais de uso e ocupação do solo.

As séries históricas de precipitações foram padronizadas através do índice de precipitação padronizado SPI (do inglês *Standardized Precipitation Index*). A escala temporal escolhida foi de três meses (SPI3) pois, de acordo com Zhang et al. (2022), a escala trimestral mostra altas correlações entre áreas plantadas expostas a secas e decréscimos na produção agrícola destas áreas. Nesse sentido, os trimestres escolhidos para padronização são pertencentes às estações do ano no hemisfério sul: Verão (dezembro – fevereiro); Outono (março-maio); Inverno (junho-agosto); Primavera (setembro – novembro).

Com relação aos usos e ocupações do solo, foram considerados 18 classes, as quais estão classificadas como (a maneira como aparece em cada Figura está entre parêntesis): Formação florestal (Florestas), Cerrado, floresta plantada (Silvicultura), Pântano, Campos, Pastagens, Cana-De-Açúcar (Cana-Açúcar), Mosaico de Agricultura e Pastagens (Mosaico AP), Infraestrutura Urbana (Cidade), Outras Áreas Não-Vegetadas (Área NV), Mineração, Corpo Hídrico, soja, Mosaico de Plantações (M. Plantações), Café, Cítricos, Culturas Perenes (C. Perenes) e Algodão.

A avaliação das correlações cruzadas entre usos e ocupações do solo e precipitações se dará pela divisão entre correlações positivas e correlações negativas em cada estação do ano. Em termos físicos, as correlações positivas apresentam-se quando há significância entre o crescimento de uma série histórica para com o crescimento de outra série histórica, ou quando há significância entre o decrescimento de uma série histórica para com o decrescimento de outra série histórica. Da mesma forma, para as correlações negativas, observa-se significância no relacionamento entre séries históricas, de forma que, quando ocorre o crescimento de uma série histórica, ocorre o decrescimento de outra. Tais

correlações são efetuadas a partir de *lags* entre as séries históricas analisadas. O *lag* entre uma série e outra foi constatado mediante a identificação de uma autocorrelação com atraso ou com adiantamento de uma série histórica em relação à outra. Quando as séries históricas apresentaram forte autocorrelação para um *lag* positivo, observava-se ali uma evidência de que as mudanças no uso e ocupação do solo podem ter influenciado o regime de precipitação. Dado que, para um *lag* positivo, o ponto identificado para a série histórica de precipitações é posterior ao ponto identificado para a série histórica do uso ou ocupação do solo em questão, define-se que a série histórica de precipitações está “atrasada” em relação à série histórica do uso ou ocupação em questão. Da forma análoga, maiores autocorrelações para *lags* negativos indicam que os totais precipitados podem ter influenciado modificações na cobertura da superfície. Dado que, para um *lag* negativo, o ponto identificado para a série histórica de precipitações é anterior ao ponto identificado para a série histórica do uso ou ocupação do solo em questão, define-se que a série histórica de precipitações está “adiantada” em relação à série histórica do uso ou ocupação em questão.

6.3.1. Correlações positivas

As correlações positivas entre as precipitações padronizadas da Primavera e os usos e ocupações do solo estão ilustradas na Figura 64.

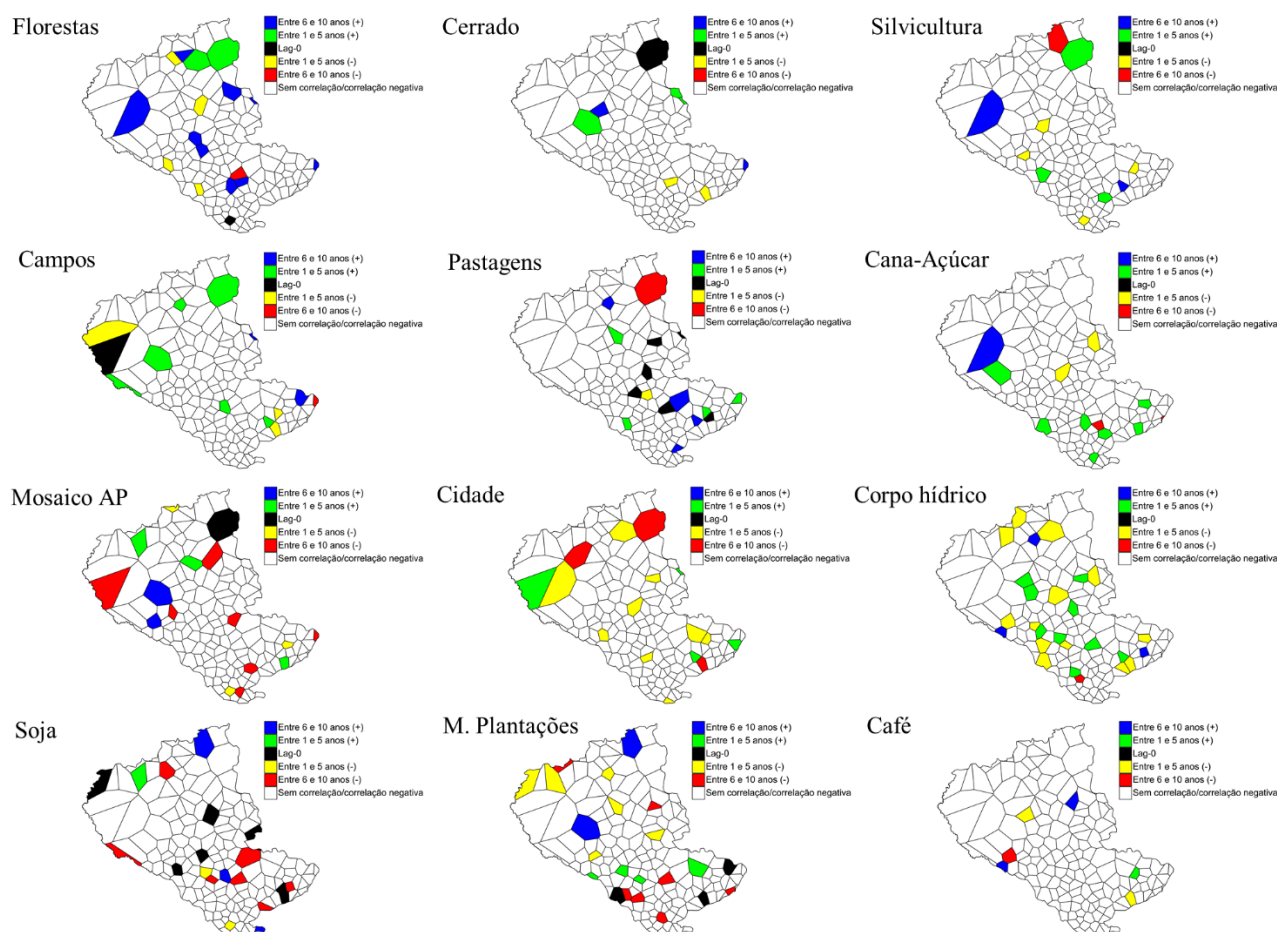


Figura 64. Correlação cruzada positiva entre SPI3 da Primavera e usos e ocupações do solo. *Lags* negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. *Lags* positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações

A Figura 64 permite observar a ocorrência de correlações significantes para *lags* negativos para corpos hídricos, majoritariamente com *lag* negativo entre 1 e 5 anos em áreas centrais e áreas ao norte da bacia. Tais *lags* negativos, por indicar influência de precipitações sobre corpos hídricos, são evidências de oscilações nas áreas de reservatórios de grande porte distribuídos ao longo da área de estudo, como o reservatório da UHE Furnas, UHE Emborcação e UHE Ilha Solteira. O reservatório de Furnas, por exemplo, tem um tempo de acumulação mais extenso, conforme observado por Da Luz et al. (2022). Para outros usos e ocupações do solo, as correlações significantes ocorreram de maneira difusa tanto com *lag* negativo, como positivo com *lag-0*.

As correlações positivas entre as séries históricas de precipitações para o Verão e os usos e ocupações do solo estão dispostas na Figura 65.

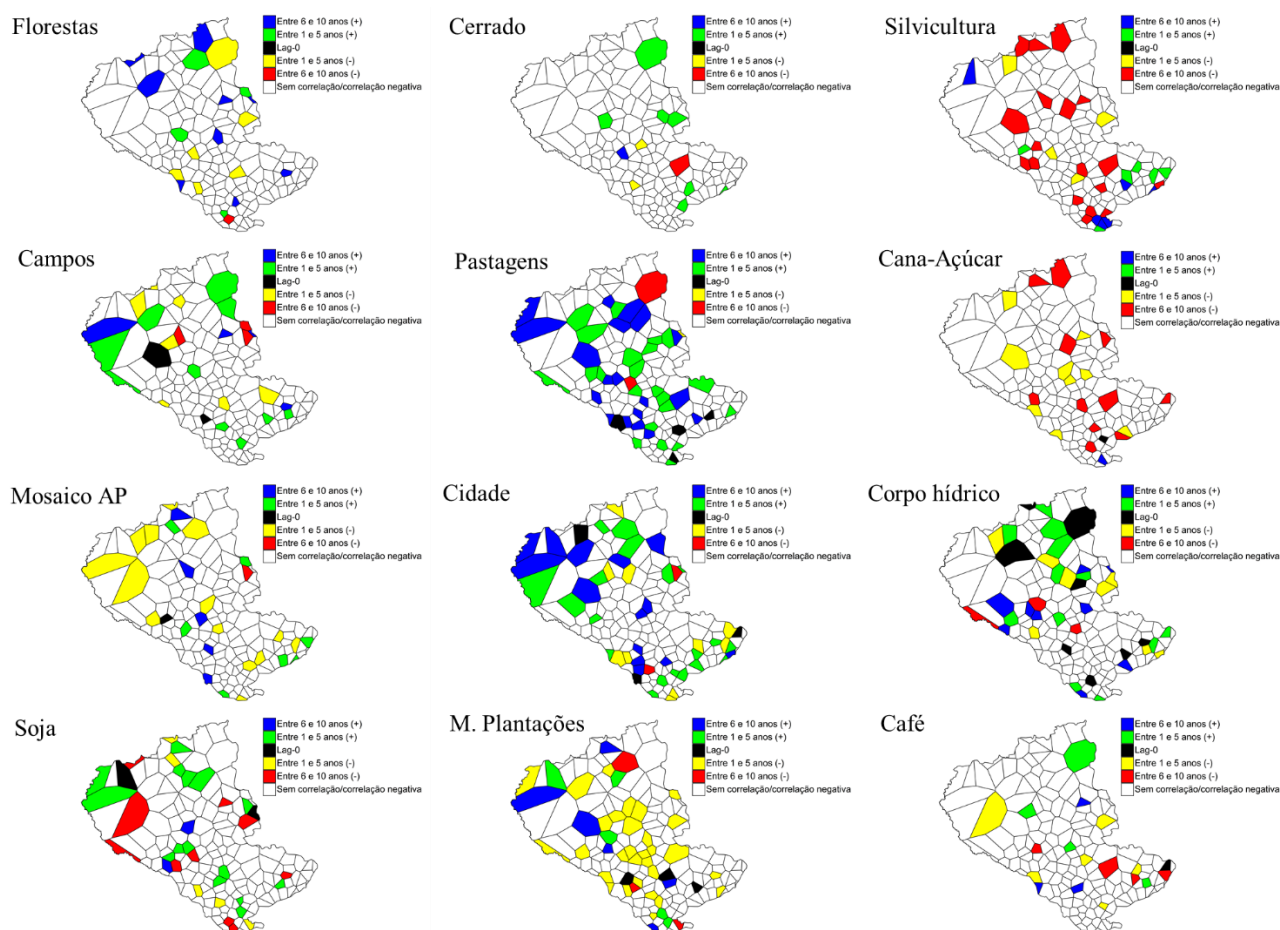


Figura 65. Correlação cruzada positiva entre SPI3 do Verão e usos e ocupações. *Lags* negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. *Lags* positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações.

Na Figura 65, é possível observar que, para a silvicultura e para a cana-de-açúcar, ocorreram correlações com *lag* negativo de 6-11 anos para com as regiões central e norte da área de estudo para o Verão. As pastagens e as cidades apresentaram correlações com *lag* positivo tanto de 1-5 anos como de 6 a 10 anos, estando tais correlações distribuídas em toda área de estudo para as pastagens e na região norte da bacia hidrográfica para as cidades. Os mosaicos de plantações apresentaram correlações com *lag* negativo da ordem de 1-5 anos na região central da bacia hidrográfica. Para correlações com *lag*-0, não foram encontrados agrupamentos de células de Thiessen, tendo as mesmas uma característica pontual.

Conforme indicado por Fachinelli e Pereira (2015), a cana-de-açúcar avançou sobre áreas de cerrado na Região Centro-Oeste brasileira, tendo aumentado sua área em 3 vezes entre 2002 e 2011. Com relação à silvicultura, Cunha et al. (2021) e Oliveira et al.

(2021) observaram que as florestas plantadas são parte da expansão das fronteiras agrícolas na região Centro-Oeste brasileira. O significativo adiantamento da série histórica de precipitações com relação às séries históricas de cana-de-açúcar e de silvicultura evidenciaria que o incremento das atividades agrícolas se deu pela adaptação ao regime de chuvas da região. Porém, conforme observado na Seção 6.1.2, as precipitações na região norte da bacia sofreram reduções, enquanto, de acordo com Bellezoni et al. (2018) e Spera, Vanwey e Mustard (2017), as áreas de cana-de-açúcar aumentaram significativamente. Logo, as significantes correlações encontradas para cana-de-açúcar e silvicultura podem ser consideradas coincidências estatísticas. Com relação aos corpos hídricos, foram inseridas 19 UHEs na área de estudo durante a série histórica analisada, o que pode ser explicado pelo aumento do nível dos reservatórios em virtude dos totais precipitados durante o verão.

As correlações positivas entre as precipitações padronizadas do Outono e os usos e ocupações do solo estão ilustradas na Figura 66.

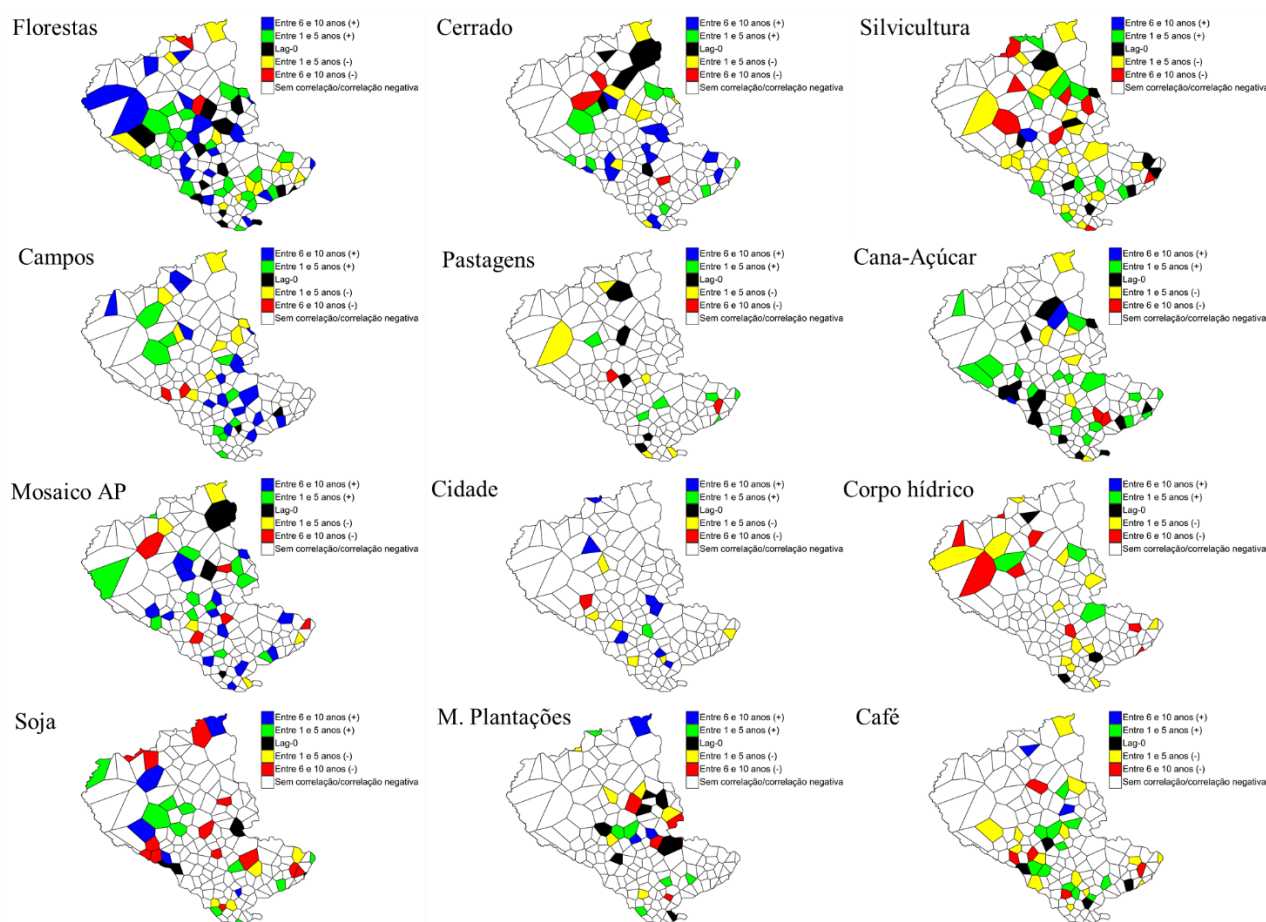


Figura 66. Correlação cruzada positiva entre SPI3 do Outono e usos e ocupações do solo. *Lags* negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. *Lags* positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações.

Como pode ser observado na Figura 66, as precipitações padronizadas para o Outono apresentaram correlações esparsas com *lag* positivo para com as florestas, das formações campestres e dos mosaicos de agriculturas e pastagens, para todas as faixas de comprimento de *lag*. Para as florestas, as correlações significantes se deram na região central e na região norte, enquanto para as formações campestres se deram na região sul e nos mosaicos de agricultura e pastagens se deram na região central. Com relação aos *lags* negativos, observa-se uma significativa ocorrência nos usos do solo para silvicultura e os corpos hídricos em todas as faixas de *lag*. Para outros usos e ocupações do solo nas faixas positivas e negativas, bem como como para *lag*-0 as correlações observadas mostraram-se esparsas, indicando coincidência estatística.

Com relação às áreas florestais, o *lag* positivo encontrado indica que o comportamento das precipitações acompanhou o comportamento das áreas florestais. De acordo com Mendonça dos Santos, Proença de Oliveira e Di Lollo (2020) a expansão das áreas agricultáveis sobre as florestas tem por consequência a diminuição do armazenamento de água por parte da vegetação, reduzindo a evapotranspiração local. Ainda nesta linha, Zemp et al. (2017) apontam que a redução de evapotranspirações por conta da supressão vegetal estão ligadas a reduções de precipitações locais.

As correlações positivas entre as precipitações padronizadas do Inverno e os usos e ocupações do solo estão ilustradas na Figura 67.

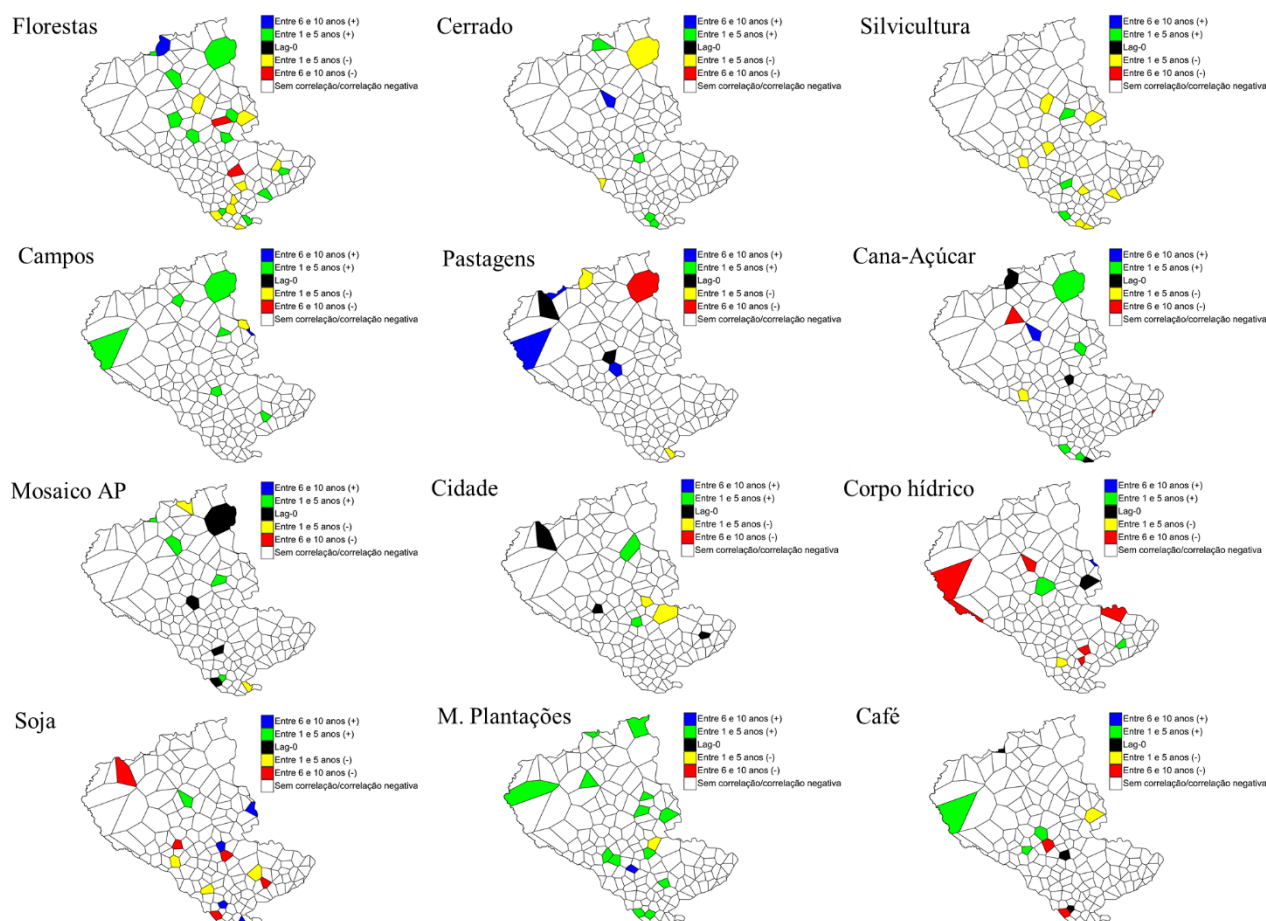


Figura 67. Correlação cruzada positiva entre SPI3 do Inverno e usos e ocupações do solo. *Lags* negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. *Lags* positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações.

A avaliação das correlações positivas entre as séries históricas de precipitação do Inverno e os usos e ocupações do solo mostrou que as correlações significantes se deram de maneira esparsa para todos os usos e ocupações do solo, tanto as positivas, como as negativas e as com *lag-0*. Nesse sentido, as correlações positivas significantes para *lag-0*, com *lag* positivo ou com *lag* negativo podem ser consideradas estatisticamente casuais. Nesse sentido, para as precipitações trimestrais de Inverno evidencia-se como tendo pouca ligação para com as mudanças na cobertura vegetal e nas atividades agrícolas.

6.3.2. Correlações negativas

As correlações negativas entre a série histórica de uso e ocupação do solo e das precipitações para a Primavera estão dispostas na Figura 68 abaixo.

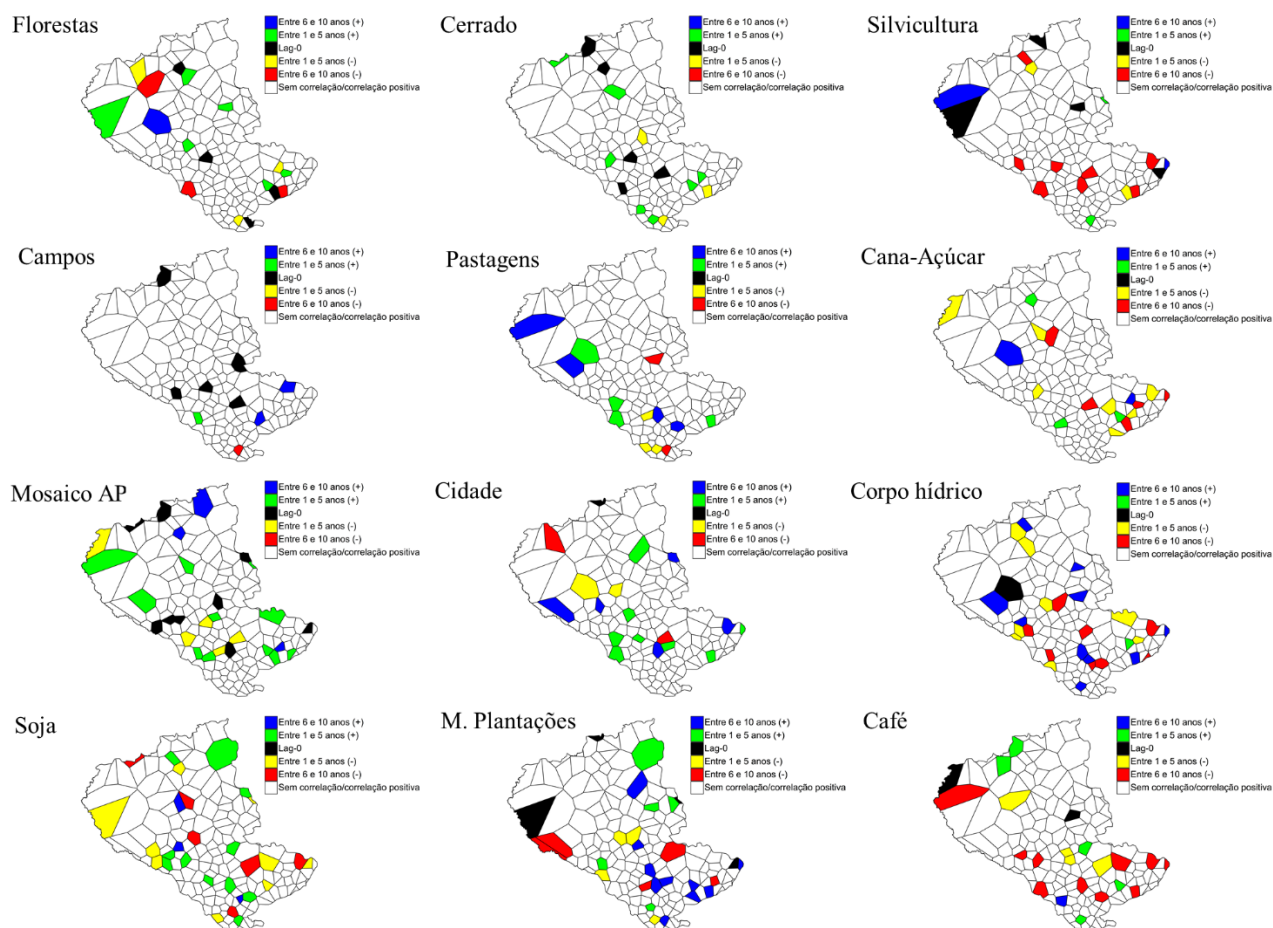


Figura 68. Correlação cruzada negativa entre SPI3 da Primavera e usos e ocupações. *Lags* negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. *Lags* positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações

A observação da Figura 68 evidencia que as significantes correlações negativas entre as precipitações padronizadas para a Primavera e os usos e ocupações do solo estão distribuídas de maneira esparsa. Nesse sentido, a dispersão apresentada pelas correlações negativas com atraso, *lag-0* e adiantamento por parte das precipitações de Inverno, com relação aos usos e ocupações do solo, podem ser consideradas coincidências estatísticas.

As correlações negativas entre a série histórica de uso e ocupação do solo e das precipitações para o Verão estão dispostas na Figura 66 abaixo.

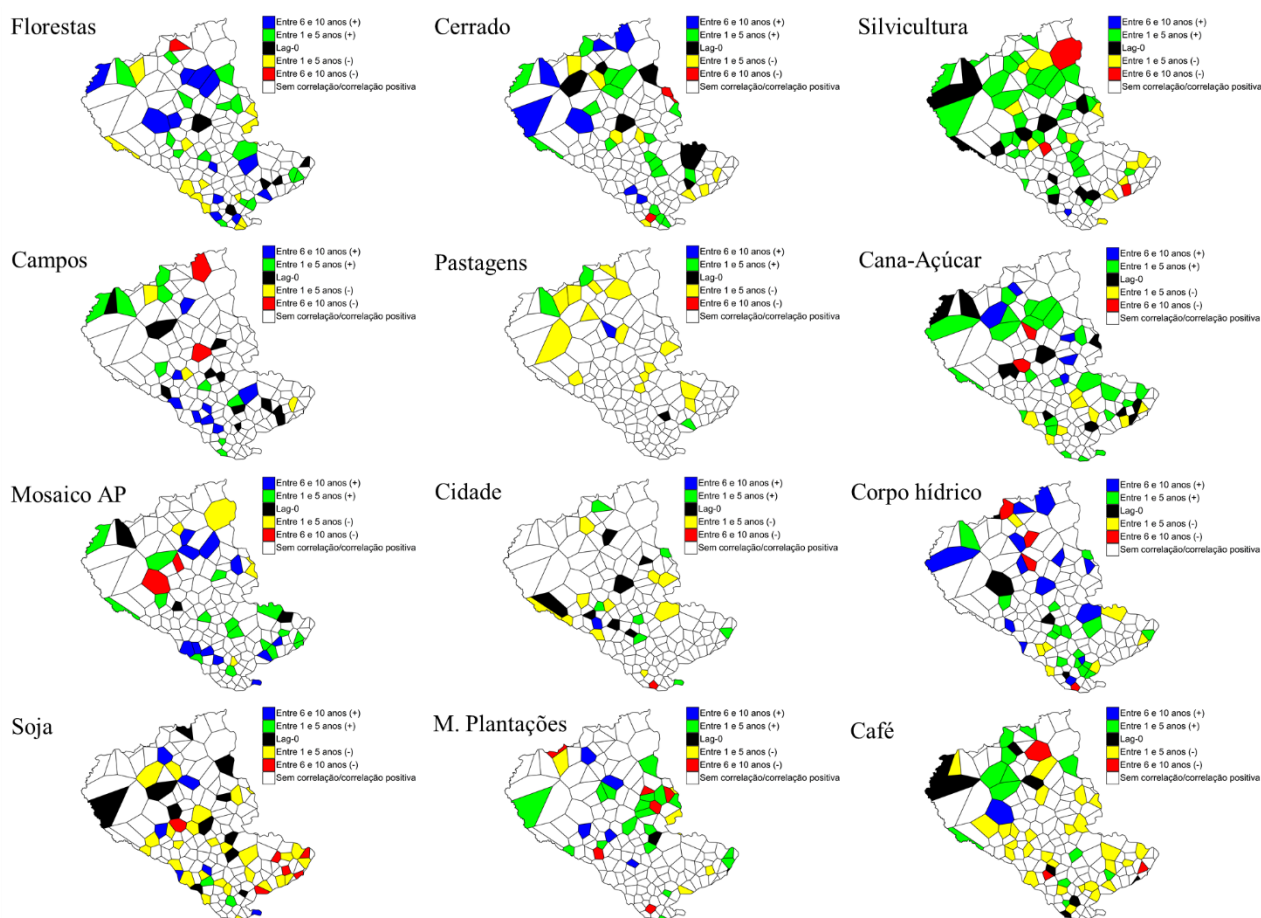


Figura 69. Correlação cruzada negativa entre SPI3 do Verão e usos e ocupações. *Lags* negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. *Lags* positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações.

Como observado na Figura 69, as florestas, o cerrado, a silvicultura e a cana-de-açúcar apresentaram correlações com *lag* positivo. Para as formações florestais, as correlações significantes ocorreram na região norte e na região central, numa mescla de *lag* de 1-5 anos e 6-10 anos. Para o cerrado, as correlações significantes ocorreram na região norte, para todas as faixas de *lag* positivo. Para a silvicultura, as precipitações trimestrais de verão apresentaram correlação significativa predominantemente na faixa de 1 a 5 anos para a área central e a área norte da bacia hidrográfica. Tal comportamento também pode ser observado na relação entre precipitações e as modificações de uso do solo pela cana-de-açúcar. Em termos de correlações com *lag* negativo, observa-se que,

para as pastagens, a significância se deu na região norte da área de estudo, numa escala de 1-5 anos. Os demais usos e ocupações do solo, bem como as correlações relativas ao *lag-0* mostraram-se difusas na área de estudo, podendo ser consideradas coincidências estatísticas.

As correlações negativas com lag positivo entre silvicultura e os totais precipitados na região norte da área de estudo evidenciam que o regime de precipitação, no Verão, foi influenciado por modificações no uso e ocupação do solo. De acordo com Farley, Jobbágy e Jackson (2005), a taxa de evapotranspiração de uma planta é influenciada, também, pela característica de suas raízes. Ainda, de acordo com os autores, o eucalipto tem por característica, ainda jovem, o desenvolvimento de raízes profundas. Consequentemente, sua absorção de água e consequente evapotranspiração tende a ser maior em estações mais chuvosas como o Verão, visto que as raízes tendem a estar mais próximas do lençol freático por mais tempo. Na parte norte da bacia, observou-se um correlacionamento com *lags* positivos entre totais precipitados e cana-de-açúcar. Conforme observado por Spera, Vanwey e Mustard (2017), a cana-de-açúcar teve forte expansão no estado de Goiás entre 2003 e 2017. Como observado na Seção 6.1, esta mesma região apresentou déficits hídrico, gerando evidência de que as substituições no uso e ocupação do solo na região norte da bacia hidrográfica afetaram o regime de precipitações.

As correlações negativas entre a série histórica de uso e ocupação do solo e das precipitações para o Outono estão dispostas na Figura 70 abaixo.

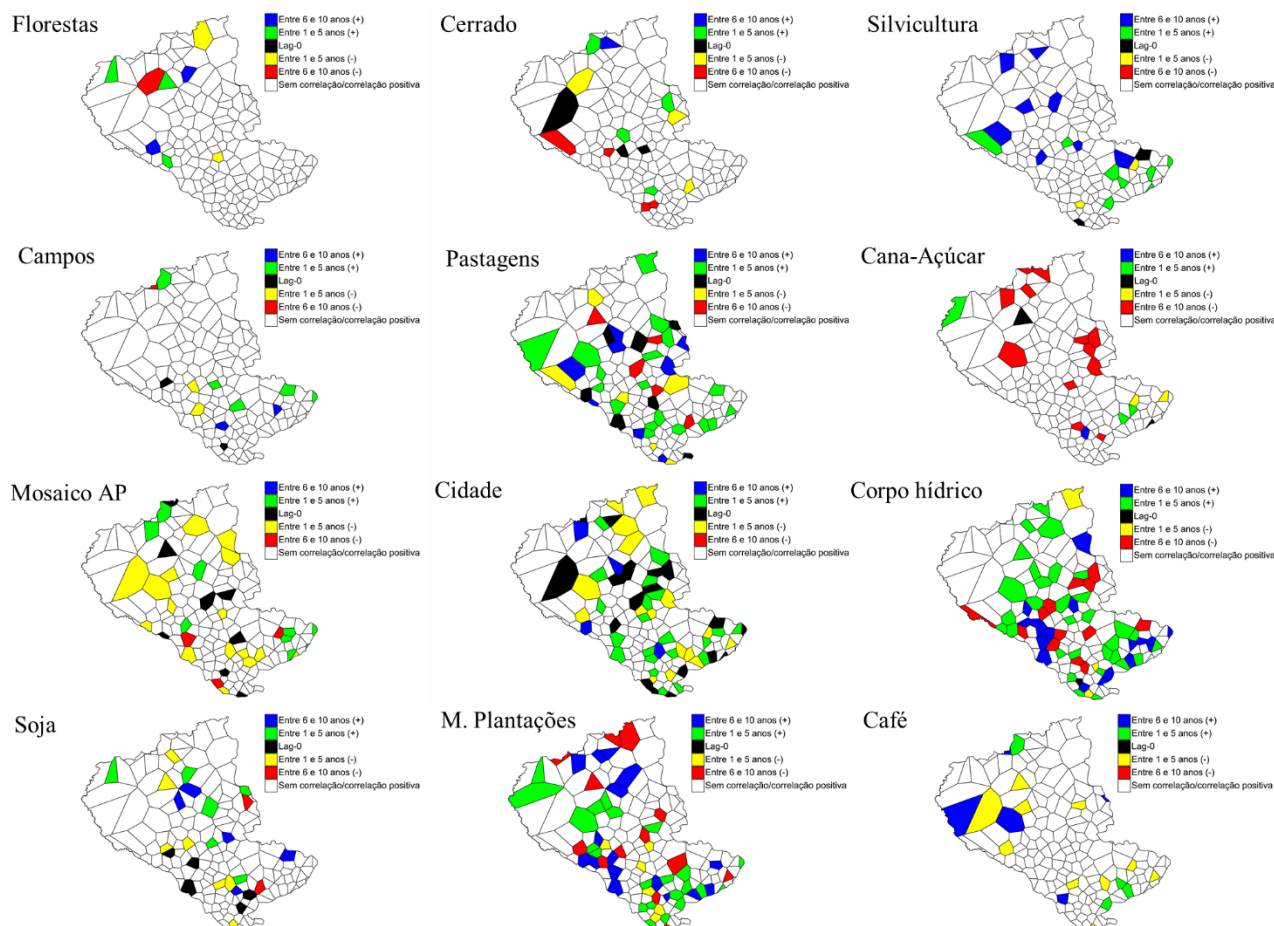


Figura 70. Correlação cruzada negativa entre SPI3 do Outono e usos e ocupações do solo. *Lags* negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. *Lags* positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações.

Ao examinar a Figura 70, é possível observar que as precipitações padronizadas apresentaram significantes correlações negativas em regiões bem definidas para com pastagens, cidades, corpos hídricos e os mosaicos de plantações. Tais correlações não apresentaram polígonos de Thiessen definidos, estando presentes em todas as regiões da bacia hidrográfica, porém, sem um agrupamento definido, bem como sendo uma mescla de *lags* positivos e negativos. Para outros usos e ocupações do solo, não foram encontrados agrupamentos de polígonos de Thiessen contendo correlações negativas significantes.

As correlações negativas entre a série histórica de uso e ocupação do solo e das precipitações para o Inverno estão dispostas na Figura 71 abaixo.

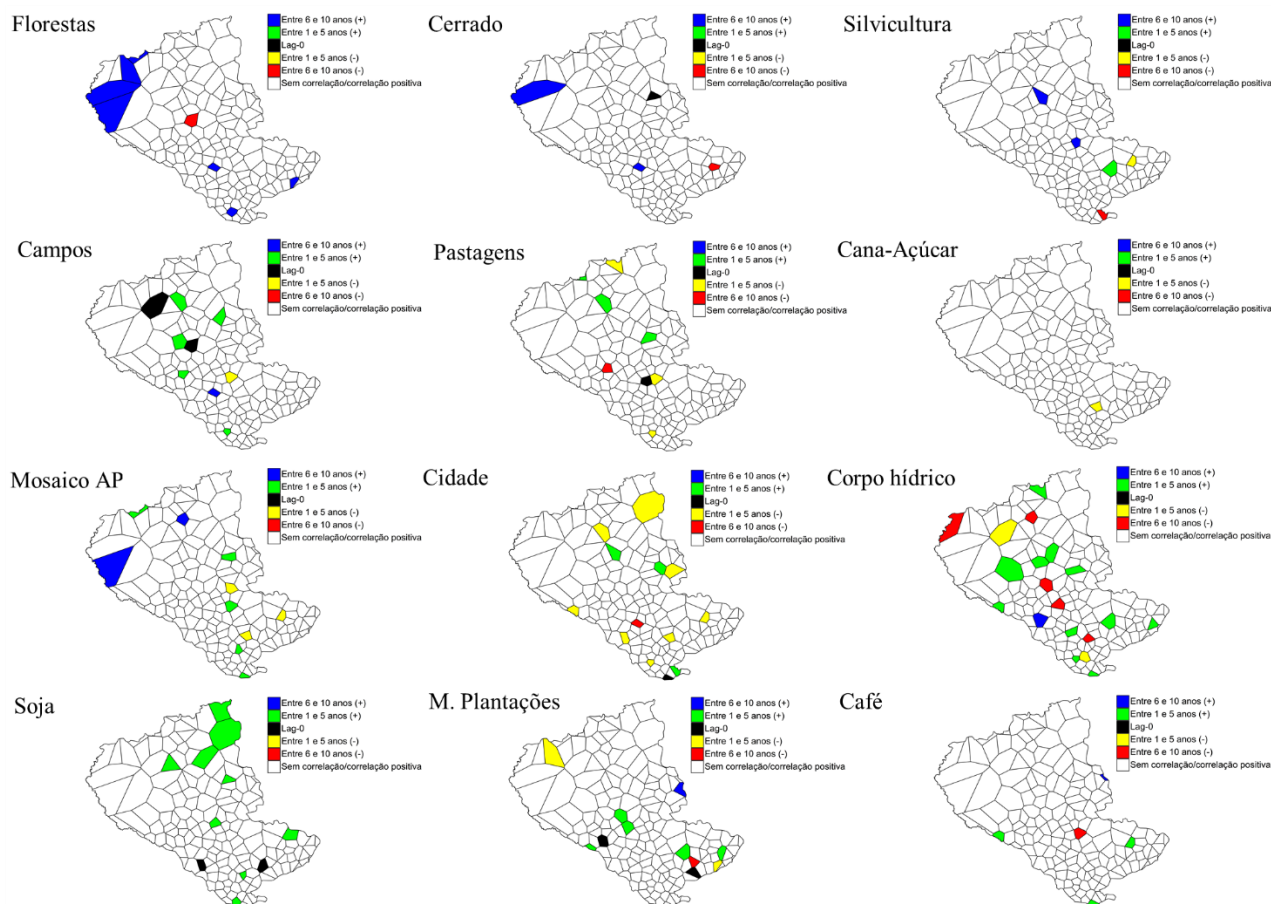


Figura 71. Correlação cruzada negativa entre SPI3 do Inverno e usos e ocupações. *Lags* negativos indicam possível influência das precipitações sobre usos e ocupações do solo. *Lags* positivos indicam possível influência dos usos e ocupações do solo nas precipitações.

A observação da Figura 71 evidencia que as significantes correlações negativas entre as precipitações padronizadas do Inverno e os usos e ocupações do solo estão distribuídas de maneira esparsa. Nesse sentido, a dispersão apresentada pelas correlações negativas com atraso, *lag-0* e adiantamento por parte das precipitações de Inverno, com relação aos usos e ocupações do solo, podem ser consideradas coincidências estatísticas.

7. CONCLUSÕES

Para a bacia hidrográfica relativa à área de drenagem do CHURB, foram investigados: 1) Padrões espaço-temporais de precipitações, as tendências destes regimes de precipitação e suas teleconexões para com índices atmosféricos de larga escala; 2) Interdependências entre precipitações, usos e ocupações do solo e usos da água e seus impactos no balanço hídrico; 3) Relacionamento temporal entre precipitações e usos e ocupações do solo.

Na avaliação de variabilidades espaço-temporais de precipitação, observou-se que o período seco, representado pelo SPI6D, foi aquele que apresentou padrões espaço-temporais significantes por toda área de estudo, sendo as regiões Sul, Leste e Norte aquelas com significâncias mais expressivas, como pode ser observado na Seção 6.1.1. Na seção 6.1.2, a análise de tendência ao longo do SPI6D apontou que a sub-região Norte concentra significativas perdas graduais de precipitação, com mudanças em sua tendência entre os anos de 1997 e 1998. Com relação às teleconexões, o fenômeno do El-Niño e as oscilações provenientes do continente antártico tiveram as maiores evidências de ligações para com as precipitações durante o período seco da área de estudo, conforme apontado na Seção 6.1.3 e Seção 6.1.4.

A análise de interdependências entre usos e ocupações do solo, usos da água e balanço hídrico foi efetuada para as bacias hidrográficas do rio Grande, rio Paranaíba, rio Tietê e Complementar à área de estudo. As pastagens se destacaram por sua substituição em pela cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do rio Grande (Seção 6.2.1) e Complementar (Seção 6.2.4.) e por usos agrícolas gerais na bacia hidrográfica do rio Paranaíba (6.2.2). Em termos de impacto no balanço hídrico, as demandas hídricas aumentaram em toda área de estudo, enquanto reduções no escoamento superficial foram observadas na bacia do rio Grande, Paranaíba e Tietê.

Na seção 6.3, as correlações de uso-ocupação e precipitações encontradas no verão complementam as maiores teleconexões no outono e inverno, permitindo preencher lacunas de explicações do comportamento das precipitações, deixadas pelas teleconexões durante o período úmido, especialmente no verão. Por outro lado, os resultados obtidos no verão entre as precipitações e o uso-ocupação identificaram interdependências de menor prazo do que as das teleconexões, com três meses e de menor escala do que das teleconexões, na escala municipal.

Este trabalho dá visibilidade ao relacionamento entre teleconexões, precipitações, usos do solo e balanço hídrico, o qual se desenrola em uma bacia hidrográfica de grande porte, em uma região economicamente relevante do Brasil. As técnicas utilizadas no presente estudo são aplicáveis a bacias hidrográficas de portes diversos, fornecendo insumos para embasar diretrizes de projetos de gerenciamento de recursos hídricos. Para trabalhos futuros, sugere-se uma investigação das relações entre fenômenos atmosféricos de larga-escala e as precipitações em escalas temporais menores, como, por exemplo a diária. Também se sugere que, para a análise de precipitações e mudanças no uso e ocupação do solo no balanço hídrico das bacias hidrográficas, sejam consideradas as inserções de reservatórios, bem como as operações de descarga dos mesmos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733–752, maio 2015.

ABOU RAFEE, S. A.; DE FREITAS, E. D.; MARTINS, J. A.; MACHADO, C. B.; UVO, C. B. Hydrologic response to large-scale land use and cover changes in the Upper Paraná River Basin between 1985 and 2015. **Regional Environmental Change**, v. 21, n. 4, p. 112, dez. 2021a.

ABOU RAFEE, S. A.; DE FREITAS, E. D.; MARTINS, J. A.; MACHADO, C. B.; UVO, C. B. Hydrologic response to large-scale land use and cover changes in the Upper Paraná River Basin between 1985 and 2015. **Regional Environmental Change**, v. 21, n. 4, p. 112, dez. 2021b.

ABOU RAFEE, S. A.; FREITAS, E. D.; MARTINS, J. A.; MARTINS, L. D.; DOMINGUES, L. M.; NASCIMENTO, J. M. P.; MACHADO, C. B.; SANTOS, E. B.; RUDKE, A. P.; FUJITA, T.; SOUZA, R. A. F.; HALLAK, R.; UVO, C. B. Spatial Trends of Extreme Precipitation Events in the Paraná River Basin. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 59, n. 3, p. 443–454, mar. 2020.

ABOU RAFEE, S. A.; UVO, C. B.; MARTINS, J. A.; DOMINGUES, L. M.; RUDKE, A. P.; FUJITA, T.; FREITAS, E. D. Large-Scale Hydrological Modelling of the Upper Paraná River Basin. **Water**, v. 11, n. 5, p. 882, 26 abr. 2019.

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, A. **Handbook of Mathematical Functions, With Formulas, Graphs and Mathematical Tables**. Inc.31 E. Second St. Mineola, New York, USA: Dover Publications, 1974.

ADAMOWSKI, J.; ADAMOWSKI, K.; PROKOPH, A. Quantifying the spatial temporal variability of annual streamflow and meteorological changes in eastern Ontario and southwestern Quebec using wavelet analysis and GIS. **Journal of Hydrology**, v. 499, p. 27–40, ago. 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Hidroweb: Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL) (ANA). **Levantamento da Cana-de-Açúcar Irrigada na Região Centro-Sul do Brasil**. Brasília - DF: [s.n.]. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/_LevantamentoCanalIrigada_posCE_CEDOC_SemISBN2.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL) (ANA). **Dados Abertos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. , 2021. Disponível em: <<https://dadosabertos.ana.gov.br/>>. Acesso em: 1 ago. 2021

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS; SUPERINTENDÊNCIA DE PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília: ANA - Agência Nacional de Águas, 2017.

AGROCERES. Revolução no Cocho. 7 jul. 2021.

AHMADI-SANI, N.; RAZAGHNIA, L.; PUKKALA, T. Effect of Land-Use Change on Runoff in Hyrcania. **Land**, v. 11, n. 2, p. 220, 31 jan. 2022.

ALSUBIH, M.; MALLICK, J.; TALUKDAR, S.; SALAM, R.; ALQADHI, S.; FATTAH, MD. A.; THANH, N. V. An investigation of the short-term meteorological drought variability over Asir Region of Saudi Arabia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 145, n. 1–2, p. 597–617, jul. 2021.

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. THE EXPANSION OF CENTER-PIVOT IRRIGATION IN THE CERRADO BIOME. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 56–61, 30 out. 2019.

ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E.; ROSALEM, L. M. P.; YOULTON, C.; OLIVEIRA, P. T. S. Hydrological trade-offs due to different land covers and land uses in the Brazilian Cerrado. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 23, n. 3, p. 1263–1279, 7 mar. 2019.

ANDRADE, K. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Atmospheric characteristics that induce extreme precipitation in frontal systems over Southeastern Brazil during summer: Observations and atmospheric model simulation. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 14, p. 5368–5385, nov. 2018.

ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. ENSO-related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during warm and cold Pacific decadal oscillation regimes. **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 15, p. 2017–2030, 2005.

AON, S.; BISWAS, S. Spatially distributed bivariate meteorological drought analysis using copula technique in a semi-arid river basin of West Bengal, India. **Theoretical and Applied Climatology**, 18 dez. 2023.

ASONG, Z. E.; WHEATER, H. S.; BONSAI, B.; RAZAVI, S.; KURKUTE, S. Historical drought patterns over Canada and their teleconnections with large-scale climate signals. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 6, p. 3105–3124, 4 jun. 2018.

AUBREY, D. G. Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 84, n. C10, p. 6347–6354, 20 out. 1979.

BAGHANAM, A. H.; NOROUZI, E.; NOURANI, V. Wavelet-based predictor screening for statistical downscaling of precipitation and temperature using the artificial neural network method. **Hydrology Research**, v. 53, n. 3, p. 385–406, 1 mar. 2022.

BELLEZONI, R. A.; SHARMA, D.; VILLELA, A. A.; PEREIRA JUNIOR, A. O. Water-energy-food nexus of sugarcane ethanol production in the state of Goiás, Brazil: An analysis with regional input-output matrix. **Biomass and Bioenergy**, v. 115, p. 108–119, ago. 2018.

BERGSTRÖM, S. **The HBV Model: Its Structure and Applications**. [s.l.] SMHI, 1992.

BERGTOLD, J. S.; CALDAS, M. M.; SANT'ANNA, A. C.; GRANCO, G.; RICKENBRODE, V. Indirect land use change from ethanol production: the case of sugarcane expansion at the farm level on the Brazilian Cerrado. **Journal of Land Use Science**, v. 12, n. 6, p. 442–456, 2 nov. 2017.

BHUYAN, M.; SINGH, B.; VID, S.; JEGANATHAN, C. Analysing the spatio-temporal patterns of vegetation dynamics and their responses to climatic parameters in Meghalaya from 2001 to 2020. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 1, p. 94, jan. 2023.

BLÁZQUEZ, J.; SOLMAN, S. A. Interannual variability of the frontal activity in the Southern Hemisphere: relationship with atmospheric circulation and precipitation over southern South America. **Climate Dynamics**, v. 48, n. 7–8, p. 2569–2579, abr. 2017.

BORELLA, D. R.; PAULISTA, R. S. D.; ALVES, M. A. B.; MARTIM, C. C.; DA SILVA, C. J.; DE ALMEIDA, F. T.; DE SOUZA, A. P. Flow Measurement Methods in Small Tributaries of the Teles Pires River, Southern of the Amazon Hydrological Region. **Water**, v. 15, n. 21, p. 3811, 31 out. 2023.

BRESSIANI, D. DE A.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A.; MENDIONDO, E. M. Effects of spatial and temporal weather data resolutions on streamflow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. **Biol Eng**, v. 8, p. 15, jun. 2015.

CALDARELLI, C. E.; GILIO, L. Expansion of the sugarcane industry and its effects on land use in São Paulo: Analysis from 2000 through 2015. **Land Use Policy**, v. 76, p. 264–274, jul. 2018.

CAMILLONI, I.; BARROS, V. The Paraná River Response to El Niño 1982–83 and 1997–98 Events. **Journal of Hydrometeorology**, v. 1, n. 5, p. 412–430, out. 2000.

CÂNDIDO, B. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BATISTA, P. V. G. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na bacia do rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1565–1575, out. 2014.

CARDOSO DE SALIS, H. H.; MONTEIRO DA COSTA, A.; MOREIRA VIANNA, J. H.; AZENETH SCHULER, M.; KÜNNE, A.; SANCHES FERNANDES, L. F.; LEAL PACHECO, F. A. Hydrologic Modeling for Sustainable Water Resources Management in Urbanized Karst Areas. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 14, p. 2542, 16 jul. 2019.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88–108, 2004.

CAZES-BOEZIO, G.; ROBERTSON, A. W.; MECHOSO, C. R. Seasonal Dependence of ENSO Teleconnections over South America and Relationships with Precipitation in Uruguay. **Journal of Climate**, v. 16, n. 8, p. 1159–1176, abr. 2003.

CHEN, J.; ZHANG, B.; YAO, R.; ZHANG, X.; ZHANG, Y.; ZHOU, J. Dry and Wet Changes and Vegetation Time-Delay Responses in Western China. **Atmosphere**, v. 13, n. 12, p. 2013, 30 nov. 2022.

CHEN, M.; PAPADIKIS, K.; JUN, C.; MACDONALD, N. Linear, nonlinear, parametric and nonparametric regression models for nonstationary flood frequency analysis. **Journal of Hydrology**, v. 616, p. 128772, jan. 2023.

CUNHA, T. Q. G. D.; SANTOS, A. C.; NOVAES, E.; HANSTED, A. L. S.; YAMAJI, F. M.; SETTE JR, C. R. Eucalyptus expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, p. 105900, jan. 2021.

D. N. MORIASI; J. G. ARNOLD; M. W. VAN LIEW; R. L. BINGNER; R. D. HARMEL; T. L. VEITH. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

DA LUZ, M. P.; LINS DA SILVA, J.; HIGUERA-CASTRO, E. L.; RIBEIRO, L. F. Water Availability Assessment from Power Generation Reservoirs in the Rio Grande Operated by Furnas, Brazil. **Energies**, v. 15, n. 23, p. 8950, 26 nov. 2022.

DE BODAS TERASSI, P. M.; GALVANI, E.; SOBRAL, B. S.; XAVIER, A. C. F.; FILHO, W. L. F. C.; BIFFI, V. H. R. Application of the vector autoregressive model and the association between ocean indicators and rainfall anomalies in eastern Paraná State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 154, n. 3–4, p. 925–943, nov. 2023.

DE LIMA, A. A.; ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Sub-monthly variability of the South American summer precipitation under El Niño and La Niña backgrounds during the 1998–2012 period. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 5, p. 2153–2166, 2018.

DE MEDEIROS, F. J.; DE OLIVEIRA, C. P. Dynamical Aspects of the Recent Strong El Niño Events and Its Climate Impacts in Northeast Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 178, n. 6, p. 2315–2332, jun. 2021.

DE OLIVEIRA, V. A.; DE MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005–5023, 2017.

DE OLIVEIRA-FILHO, E. C.; DA SILVA, F. A. M.; VIEIRA, E. A.; JÚNIOR, G. B. M.; DE CARVALHO, A. M.; SOUSA E SILVA, J. C. **II Mostra de Resultados de Pesquisa dos Projetos Finalizados em 2006 e 2007**. Planaltina, Distrito Federal: [s.n.].

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Usos por Rede Hidrográfica**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.aplicacoes.daee.sp.gov.br/usuarios/fchweb.html>>. Acesso em: 11 ago. 2018.

DIAS, L. C. P.; MACEDO, M. N.; COSTA, M. H.; COE, M. T.; NEILL, C. Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 108–122, 2015.

DILE, Y. T.; SRINIVASAN, R. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 50, n. 5, p. 1226–1241, out. 2014.

EINI, M. R.; JAVADI, S.; DELAVAR, M.; MONTEIRO, J. A. F.; DARAND, M. High accuracy of precipitation reanalyses resulted in good river discharge simulations in a semi-arid basin. **Ecological Engineering**, v. 131, p. 107–119, jun. 2019.

EMBED, A.; LIBER, M. **El Nexo entre el agua, la energia y la alimentación en America Latina y el Caribe: planificación, marco normativo e identificación de interconexiones prioritarias**. Recursos Naturales e Infraestructura, , mar. 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Mapa de Solos do Brasil**, 2001.

FACHINELLI, N. P.; PEREIRA, A. O. Impacts of sugarcane ethanol production in the Paranaíba basin water resources. **Biomass and Bioenergy**, v. 83, p. 8–16, dez. 2015.

FANG, G.; LI, X.; XU, M.; WEN, X.; HUANG, X. Spatiotemporal Variability of Drought and Its Multi-Scale Linkages with Climate Indices in the Huaihe River Basin, Central China and East China. **Atmosphere**, v. 12, n. 11, p. 1446, 1 nov. 2021.

FARLEY, K. A.; JOBBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. **Global Change Biology**, v. 11, n. 10, p. 1565–1576, out. 2005.

FICKLIN, D. L.; STEWART, I. T.; MAURER, E. P. Effects of projected climate change on the hydrology in the Mono Lake Basin, California. **Climatic Change**, v. 116, n. 1, p. 111–131, jan. 2013.

FLEISCHMANN, A. S.; SIQUEIRA, V. A.; WONGCHUIG-CORREA, S.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R. C. D. D. The great 1983 floods in South American large rivers: a continental hydrological modelling approach. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 8, p. 1358–1373, 10 jun. 2020.

FONSECA DA SILVA, C. L.; DAVID DA SILVA, D.; MOREIRA, M. C.; RODRIGUES, J. M.; STEVEN DE SOUSA ROCHA, I.; COELHO LIMA, R. P.; CALEGARIO, A. T. Trend analysis and identification of possible periods of change in the occurrence of extreme streamflow events in a tropical basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 128, p. 104485, ago. 2023.

FU, Q.; ZHOU, Z.; LI, T.; LIU, D.; HOU, R.; CUI, S.; YAN, P. Spatiotemporal characteristics of droughts and floods in northeastern China and their impacts on agriculture. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 32, n. 10, p. 2913–2931, out. 2018.

FUKA, D. R.; WALTER, M. T.; MACALISTER, C.; DEGAETANO, A. T.; STEENHUIS, T. S.; EASTON, Z. M. Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models: USING CFSR AS WEATHER INPUT DATA FOR WATERSHED MODELS. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 22, p. 5613–5623, 30 out. 2014.

G. ARNOLD, J.; N. MORIASI, D.; W. GASSMAN, P.; C. ABBASPOUR, K.; J. WHITE, M.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; D. HARMEL, R.; VAN GRIENSVEN, A.; W. VAN LIEW, M.; KANNAN, N.; K. JHA, M. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.

GILLETT, N. P.; KELL, T. D.; JONES, P. D. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 23, p. 2006GL027721, dez. 2006.

GLEICK, P. H.; PALANIAPPAN, M. Peak water limits to freshwater withdrawal and use. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 25, p. 11155–11162, 22 jun. 2010.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 172–182, jan. 2013.

GOMES, R.; LIMA, K. C. Influence of the modes of climate variability in the Tropical Pacific and Atlantic on accumulated rainfall and reservoir water volumes in the Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 11, p. 5331–5349, set. 2021.

GOODARZI, M. R.; POOLADI, R.; NIAZKAR, M. Evaluation of Satellite-Based and Reanalysis Precipitation Datasets with Gauge-Observed Data over Haraz-Gharehsoo Basin, Iran. **Sustainability**, v. 14, n. 20, p. 13051, 12 out. 2022.

GOPAKKALI, P.; SRIDHARA, S.; KASHYAP, G. R.; MANOJ, K. N.; DAS, B. Trend detection of annual precipitation of Karnataka, India during 1951–2020 based on the innovative trend analysis method. **Environmental Earth Sciences**, v. 82, n. 23, p. 551, dez. 2023.

GOSLING, S. N.; ARNELL, N. W. Simulating current global river runoff with a global hydrological model: model revisions, validation, and sensitivity analysis. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 7, p. 1129–1145, 30 mar. 2011.

GOSWAMI, G.; PRASAD, R. K. Trend Analysis of Rainfall Pattern in Arunachal Pradesh (India). **Environmental Modeling & Assessment**, v. 28, n. 6, p. 1093–1125, dez. 2023.

GRIMM, A. M.; PAL, J. S.; GIORGI, F. Connection between Spring Conditions and Peak Summer Monsoon Rainfall in South America: Role of Soil Moisture, Surface Temperature, and Topography in Eastern Brazil. **Journal of Climate**, v. 20, n. 24, p. 5929–5945, 15 dez. 2007.

GRINSTED, A.; MOORE, J. C.; JEVREJEVA, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 11, n. 5/6, p. 561–566, 18 nov. 2004.

GUIDOLINI, J. F.; OMETTO, J. P. H. B.; NERY, T. D.; ARCOVERDE, G. F. B.; GIAROLLA, A. Hydro-geomorphological characterization of the Rio Grande Basin, Brazil, using geospatial approach. **Sustainable Water Resources Management**, v. 6, n. 5, p. 93, out. 2020.

GUO, H.; BAO, A.; LIU, T.; JIAPAER, G.; NDAYISABA, F.; JIANG, L.; KURBAN, A.; DE MAEYER, P. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966–2015. **Science of The Total Environment**, v. 624, p. 1523–1538, maio 2018.

GUTTMAN, N. B. ACCEPTING THE STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX: A CALCULATION ALGORITHM ¹. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 35, n. 2, p. 311–322, abr. 1999.

HAIR JR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. **Multivariate Data Analysis**. 7th. ed. [s.l.] Pearson/Pretience Hall, 2010.

HAMED, K. H. Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis. **Journal of Hydrology**, v. 349, n. 3–4, p. 350–363, fev. 2008.

HAMED, K. H.; RAMACHANDRA RAO, A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. **Journal of Hydrology**, v. 204, n. 1–4, p. 182–196, jan. 1998.

HANASAKI, N.; KANAE, S.; OKI, T.; MASUDA, K.; MOTOYA, K.; SHIRAKAWA, N.; SHEN, Y.; TANAKA, K. An integrated model for the assessment of global water resources – Part 1: Model description and input meteorological forcing. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 12, n. 4, p. 1007–1025, 29 jul. 2008.

HODSON, D. L. R.; SUTTON, R. T.; CASSOU, C.; KEENLYSIDE, N.; OKUMURA, Y.; ZHOU, T. Climate impacts of recent multidecadal changes in Atlantic Ocean Sea Surface Temperature: a multimodel comparison. **Climate Dynamics**, v. 34, n. 7–8, p. 1041–1058, jun. 2010.

HOUSER, C.; SMITH, A.; WERNETTE, P.; LEHNER, J. 1.08 - Spatial Frequency Analysis and Information Synthesis for Understanding Coastal Barriers. Em: SHRODER, J. (JACK) F. (Ed.). **Treatise on Geomorphology (Second Edition)**. Second Edition ed. Oxford: Academic Press, 2022. p. 169–204.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017. Tabela 6910**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2017. Tabela 6912**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017b.

JESUS, E. T. D.; AMORIM, J. D. S.; JUNQUEIRA, R.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. D. Meteorological and hydrological drought from 1987 to 2017 in Doce River Basin, Southeastern Brazil. **RBRH**, v. 25, p. e29, 2020.

JIN; ZHANG; WANG; ZHANG; BAO; GUO; WANG. Analysis for Spatio-Temporal Variation Characteristics of Droughts in Different Climatic Regions of the Mongolian Plateau Based on SPEI. **Sustainability**, v. 11, n. 20, p. 5767, 17 out. 2019.

JOLLIFFE, I. Principal Component Analysis. Em: LOVRIC, M. (Ed.). **International Encyclopedia of Statistical Science**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 1094–1096.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis**. 2th. ed. New York: Springer, 2002.

JONES, P. D.; SALINGER, M. J.; MULLAN, A. B. Extratropical circulation indices in the Southern Hemisphere based on station data. **International Journal of Climatology**, v. 19, n. 12, p. 1301–1317, out. 1999.

JOWSEY, E. The changing status of water as a natural resource. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 19, n. 5, p. 433–441, out. 2012.

JUNQUEIRA, R.; AMORIM, J. DA S.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. DE; UDDAMERI, V.; PRADO, L. F. Drought occurrences and impacts on the upper Grande river basin, Brazil. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 134, n. 3, p. 45, jun. 2022.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, n. 3, p. 187–200, set. 1958.

KAYANO, M. T.; CAPISTRANO, V. B. How the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) modifies the ENSO influence on the South American rainfall: AMO MODIFIES ENSO INFLUENCE. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 1, p. 162–178, jan. 2014.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. Oxford, England: Griffin, 1948.

KHALIQ, M. N.; OUARDA, T. B. M. J.; ONDO, J.-C.; GACHON, P.; BOBÉE, B. Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. **Journal of Hydrology**, v. 329, n. 3–4, p. 534–552, out. 2006.

KODAMA, Y.-M.; SAGAWA, T.; ISHIDA, S.; YOSHIKANE, T. Roles of the Brazilian Plateau in the Formation of the SACZ. **Journal of Climate**, v. 25, n. 5, p. 1745–1758, mar. 2012.

KRYSANOVA, V.; MÜLLER-WOHLFEIL, D.-I.; BECKER, A. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. **Ecological Modelling**, v. 106, n. 2–3, p. 261–289, mar. 1998.

KRYSANOVA, V.; VETTER, T.; EISNER, S.; HUANG, S.; PECHLIVANIDIS, I.; STRAUCH, M.; GELFAN, A.; KUMAR, R.; AICH, V.; ARHEIMER, B.; CHAMORRO, A.; VAN GRIENSVEN, A.; KUNDU, D.; LOBANOVA, A.; MISHRA, V.; PLÖTNER, S.; REINHARDT, J.; SEIDOU, O.; WANG, X.; WORTMANN, M.; ZENG, X.; HATTERMANN, F. F. Intercomparison of regional-scale hydrological models and climate change impacts projected for 12 large river basins worldwide—a synthesis. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 10, p. 105002, 1 out. 2017.

KYRIAKIDIS, P. C.; JOURNEL, A. G. Geostatistical Space–Time Models: A Review. **Mathematical Geology**, v. 31, n. 6, 1999.

LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D. P. Concentração de Áreas Irrigadas por Pivôs Centrais no Estado de São Paulo - Brasil. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 100). p. 38, nov. 2014.

LATHUILLIÈRE, M. J.; COE, M. T.; JOHNSON, M. S. **What could irrigated agriculture mean for Amazonia? A review of green and blue water resources and their trade-offs for future agricultural production in the Amazon Basin.** [s.l.] Water Resources Management/Modelling approaches, 19 fev. 2016. Disponível em: <<https://hess.copernicus.org/preprints/hess-2016-71/hess-2016-71.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2023.

LAUREANTI, N. C.; CHOU, S. C.; NOBRE, P.; CURCHITSER, E. On the relationship between the South Atlantic Convergence Zone and sea surface temperature during Central-East Brazil extreme precipitation events. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 105, p. 101422, mar. 2024.

LEE, E.; LIVINO, A.; HAN, S.-C.; ZHANG, K.; BRISCOE, J.; KELMAN, J.; MOORCROFT, P. Land cover change explains the increasing discharge of the Paraná River. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 6, p. 1871–1881, ago. 2018.

LE MOS, F. C.; COELHO, V. H. R.; FREITAS, E. D. S.; TOMASELLA, J.; BERTRAND, G. F.; MEIRA, M. A.; FILHO, G. M. R.; FULLHART, A.; ALMEIDA, C. D. N. Spatiotemporal

distribution of precipitation and its characteristics under tropical atmospheric systems of BRAZIL : Insights from a large sub-hourly database. **Hydrological Processes**, v. 37, n. 11, p. e15017, nov. 2023.

LENTERS, J. D. **Climate dynamics of South America during summer: Connections between the large-scale circulation and regional precipitation**. Ph.D.—United States -- New York: Cornell University, 1997.

LEVY, M. C.; LOPES, A. V.; COHN, A.; LARSEN, L. G.; THOMPSON, S. E. Land Use Change Increases Streamflow Across the Arc of Deforestation in Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 8, p. 3520–3530, 28 abr. 2018.

LI, T.; ZHOU, Z.; FU, Q.; LIU, D.; LI, M.; HOU, R.; PEI, W.; LI, L. Analysis of precipitation changes and its possible reasons in Songhua River Basin of China. **Journal of Water and Climate Change**, v. 11, n. 3, p. 839–864, 1 set. 2020.

LI, Z.; LIU, W.; ZHANG, X.; ZHENG, F. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 35–42, out. 2009.

LIAN, T.; CHEN, D. An Evaluation of Rotated EOF Analysis and Its Application to Tropical Pacific SST Variability. **Journal of Climate**, v. 25, n. 15, p. 5361–5373, 1 ago. 2012.

LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGESS, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 99, n. D7, p. 14415–14428, 20 jul. 1994.

LINDSTRÖM, G.; JOHANSSON, B.; PERSSON, M.; GARDELIN, M.; BERGSTRÖM, S. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. **Journal of Hydrology**, v. 201, n. 1–4, p. 272–288, dez. 1997.

LIU, X.; CAO, K.; LI, M. Assessing the impact of meteorological and agricultural drought on maize yields to optimize irrigation in Heilongjiang Province, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, p. 139897, jan. 2024.

LOVINO, M. A.; MÜLLER, O. V.; MÜLLER, G. V.; SGROI, L. C.; BAETHGEN, W. E. Interannual-to-multidecadal hydroclimate variability and its sectoral impacts in northeastern Argentina. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 6, p. 3155–3174, 6 jun. 2018.

LU, Y.; CAI, H.; JIANG, T.; SUN, S.; WANG, Y.; ZHAO, J.; YU, X.; SUN, J. Assessment of global drought propensity and its impacts on agricultural water use in future climate scenarios. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 278, p. 107623, nov. 2019.

MALIK, A.; KUMAR, A. Spatio-temporal trend analysis of rainfall using parametric and non-parametric tests: case study in Uttarakhand, India. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 140, n. 1–2, p. 183–207, abr. 2020.

MALLAKPOUR, I.; VILLARINI, G. A simulation study to examine the sensitivity of the Pettitt test to detect abrupt changes in mean. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 2, p. 245–254, 25 jan. 2016.

MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245, jul. 1945.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas. Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso do Solo no Brasil**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 1 dez. 2020.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas. Coleção 7 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso do Solo no Brasil**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 1 dez. 2020.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP–NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, p. 2261–2280, jun. 2004.

MARKOVIC, D.; KOCH, M. Stream response to precipitation variability: a spectral view based on analysis and modelling of hydrological cycle components: BASIN LOW-FREQUENCY RESPONSE TO PRECIPITATION FORCING. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 7, p. 1806–1816, 30 mar. 2015.

MASON, S. J.; GODDARD, L. Probabilistic Precipitation Anomalies Associated with ENSO. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 4, p. 619–638, abr. 2001.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. **The Relationship of Drought Frequency and Duration Time Scales**. . Em: EIGHTH CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY. Anaheim, California: 1993.

MENDONÇA DOS SANTOS, F.; PROENÇA DE OLIVEIRA, R.; AUGUSTO DI LOLLO, J. Effects of Land Use Changes on Streamflow and Sediment Yield in Atibaia River Basin—SP, Brazil. **Water**, v. 12, n. 6, p. 1711, 16 jun. 2020.

MITTAL, N.; BHAVE, A. G.; MISHRA, A.; SINGH, R. Impact of Human Intervention and Climate Change on Natural Flow Regime. **Water Resources Management**, v. 30, n. 2, p. 685–699, jan. 2016.

MOHAMMADI, B. Modeling Various Drought Time Scales via a Merged Artificial Neural Network with a Firefly Algorithm. **Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 58, 27 fev. 2023.

MONTINI, T. L.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. The South American Low-Level Jet: A New Climatology, Variability, and Changes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 3, p. 1200–1218, 2019.

MOTOVILOV, Y. G.; GOTTSCHALK, L.; ENGELAND, K.; RODHE, A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 98–99, p. 257–277, dez. 1999.

MUHLBAUER, A.; SPICHTINGER, P.; LOHMANN, U. Application and Comparison of Robust Linear Regression Methods for Trend Estimation. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, n. 9, p. 1961–1970, 1 set. 2009.

MURAJA, D. O. S.; KLAUSNER, V.; PRESTES, A.; DA SILVA, I. R. Ocean–atmosphere interaction identified in tree-ring time series from southern Brazil using cross-wavelet analysis. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 153, n. 3–4, p. 1177–1189, ago. 2023.

NAWAZ, M.; IQBAL, M. F.; MAHMOOD, I. Validation of CHIRPS satellite-based precipitation dataset over Pakistan. **Atmospheric Research**, v. 248, p. 105289, jan. 2021.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009**. Texas A&M University System College Station, Texas 77843-2118: Texas Water Resources Institute, 2009.

NGUYEN, L. H.; NGUYEN, D. L.; NGUYEN, H. H. Assessing applicability of two gridded precipitation datasets for hydrological simulation in a poorly gauged river basin towards supporting sustainable water resources management. **Environmental Research**, v. 237, p. 116956, nov. 2023.

NORTH, G. R.; BELL, T. L.; CAHALAN, R. F.; MOENG, F. J. Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions. **Monthly Weather Review**, v. 110, n. 7, p. 699–706, 1982.

OLIVEIRA, P. T. S.; LEITE, M. B.; MATTOS, T.; NEARING, M. A.; SCOTT, R. L.; DE OLIVEIRA XAVIER, R.; DA SILVA MATOS, D. M.; WENDLAND, E. Groundwater recharge decrease with increased vegetation density in the Brazilian cerrado: Groundwater recharge in the Brazilian cerrado. **Ecohydrology**, v. 10, n. 1, p. e1759, jan. 2017.

OLIVEIRA, R. D. S.; SANTOS, L. T. V.; MELO, S. C.; CHAGAS, M. P.; RIBEIRO, D.; REIS, C. A. F.; NOVAES, E.; SETTE JR, C. R. Wood energy yield for Eucalyptus clones growing under seasonal drought-stress in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 154, p. 106264, nov. 2021.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>>. Acesso em: 5 jan. 2021.

P. W. GASSMAN; M. R. REYES; C. H. GREEN; J. G. ARNOLD. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

PAEGLE, J. N.; MO, K. C. Linkages between Summer Rainfall Variability over South America and Sea Surface Temperature Anomalies. **Journal of Climate**, v. 15, n. 12, p. 1389–1407, jun. 2002.

PANT, R. R.; ZHANG, F.; REHMAN, F. U.; KOIRALA, M.; RIJAL, K.; MASKEY, R. Spatiotemporal characterization of dissolved trace elements in the Gandaki River, Central Himalaya Nepal. **Journal of Hazardous Materials**, v. 389, p. 121913, maio 2020.

PETTITT, A. N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. **Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)**, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979.

POOJASHREE, B. P.; PELADDY, B.; SURESHA, K. J. Validation and calibration of SWAT model for Kollur River Basin, Kundapura Taluk, Udupi District, Karnataka, India. **Acta Geophysica**, v. 71, n. 2, p. 837–853, 13 set. 2022.

PRADO, L. F.; WAINER, I.; YOKOYAMA, E.; KHODRI, M.; GARNIER, J. Changes in summer precipitation variability in central Brazil over the past eight decades. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 8, p. 4171–4186, 30 jun. 2021.

RAMIREZ GUTIERREZ, E.; SILVA DIAS, P. L.; VEIGA, J. A.; CAMAYO, R.; DOS SANTOS, A. Multivariate analysis of the energy cycle of the South American rainy season. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 15, p. 2256–2269, dez. 2009.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; CRESPO, N. M.; DUTRA, L. M. M.; FERREIRA, G. W. D. S.; REHBEIN, A.; DRUMOND, A.; DA ROCHA, R. P.; SOUZA, C. A. D. Impacts of teleconnection patterns on South America climate. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1504, n. 1, p. 116–153, nov. 2021.

REICHERT, J. M.; PREVEDELLO, J.; GUBIANI, P. I.; VOGELMANN, E. S.; REINERT, D. J.; CONSENSA, C. O. B.; SOARES, J. C. W.; SRINIVASAN, R. Eucalyptus tree stockings effect on water balance and use efficiency in subtropical sandy soil. **Forest Ecology and Management**, v. 497, p. 119473, out. 2021.

ROBERTSON, A. W.; MECHOSO, C. R. Interannual and Decadal Cycles in River Flows of Southeastern South America. **Journal of Climate**, v. 11, n. 10, p. 2570–2581, out. 1998.

ROSSO, F.; BOIASKI, N.; FERRAZ, S.; ROBLES, T. Influence of the Antarctic Oscillation on the South Atlantic Convergence Zone. **Atmosphere**, v. 9, n. 11, p. 431, 7 nov. 2018.

SANTOS, E. B.; FREITAS, E. D.; RAFEE, S. A. A.; FUJITA, T.; RUDKE, A. P.; MARTINS, L. D.; FERREIRA DE SOUZA, R. A.; MARTINS, J. A. Spatio-temporal variability of wet and drought events in the Paraná River basin—Brazil and its association with the El Niño—Southern oscillation phenomenon. **International Journal of Climatology**, p. joc.7104, 7 abr. 2021.

SCARPARE, F. V.; HERNANDES, T. A. D.; RUIZ-CORRÊA, S. T.; PICOLI, M. C. A.; SCANLON, B. R.; CHAGAS, M. F.; DUFT, D. G.; CARDOSO, T. D. F. Sugarcane land use and water resources assessment in the expansion area in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 1318–1327, out. 2016.

SCHNEIDER, D. P.; OKUMURA, Y.; DESER, C. Observed Antarctic Interannual Climate Variability and Tropical Linkages. **Journal of Climate**, v. 25, n. 12, p. 4048–4066, 15 jun. 2012.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968.

SEO, S. B.; BHOWMIK, R. D.; SANKARASUBRAMANIAN, A.; MAHINTHAKUMAR, G.; KUMAR, M. The role of cross-correlation between precipitation and temperature in basin-scale simulations of hydrologic variables. **Journal of Hydrology**, v. 570, p. 304–314, 2019.

SEO, S. N.; MENDELSON, R. An analysis of crop choice: Adapting to climate change in South American farms. **Ecological Economics**, v. 67, n. 1, p. 109–116, ago. 2008.

SERAGO, J. M.; VOGEL, R. M. Parsimonious nonstationary flood frequency analysis. **Advances in Water Resources**, v. 112, p. 1–16, fev. 2018.

SHAO, G.; GUAN, Y.; ZHANG, D.; YU, B.; ZHU, J. The Impacts of Climate Variability and Land Use Change on Streamflow in the Hailu River Basin. **Water**, v. 10, n. 6, p. 814, 20 jun. 2018.

SHEPARD, D. S. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. **Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference**, 1968.

SHIMIZU, M. H.; AMBRIZZI, T. MJO influence on ENSO effects in precipitation and temperature over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 124, n. 1–2, p. 291–301, abr. 2016.

SIQUEIRA, P. P.; OLIVEIRA, P. T. S.; BRESSIANI, D.; MEIRA NETO, A. A.; RODRIGUES, D. B. B. Effects of climate and land cover changes on water availability in a Brazilian Cerrado basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 37, p. 100931, out. 2021.

SOBRAL, B. S.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. DE; DE GOIS, G.; PEREIRA-JÚNIOR, E. R.; TERASSI, P. M. DE B.; MUNIZ-JÚNIOR, J. G. R.; LYRA, G. B.; ZERI, M. Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: trends, statistical tests and its relation with ENSO. **Atmospheric Research**, v. 220, p. 141–154, maio 2019.

SOUZA, S. A.; RODRIGUES, L. N.; DA CUNHA, F. F. Assessing the precision irrigation potential for increasing crop yield and water savings through simulation. **Precision Agriculture**, v. 24, n. 2, p. 533–559, abr. 2023.

SPERA, S.; VANWEY, L.; MUSTARD, J. The drivers of sugarcane expansion in Goiás, Brazil. **Land Use Policy**, v. 66, p. 111–119, jul. 2017.

SULCA, J.; TAKAHASHI, K.; TACZA, J.; ESPINOZA, J.; DONG, B. Decadal variability in the austral summer precipitation over the Central Andes: Observations and the empirical-statistical downscaling model. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 9836–9864, 30 dez. 2022.

SUN, Q.; MIAO, C.; QIAO, Y.; DUAN, Q. The nonstationary impact of local temperature changes and ENSO on extreme precipitation at the global scale. **Climate Dynamics**, v. 49, n. 11–12, p. 4281–4292, dez. 2017.

SVENSSON, C.; HANNAFORD, J.; PROSDOCIMI, I. Statistical distributions for monthly aggregations of precipitation and streamflow in drought indicator applications: STATISTICAL DISTRIBUTIONS FOR PRECIPITATION AND STREAMFLOW. **Water Resources Research**, v. 53, n. 2, p. 999–1018, fev. 2017.

SVOBODA, M.; HAYES, M.; WOOD, D. **World Meteorological Organization: Standardized Precipitation Index User Guide**. 1090. ed. Geneva: WMO, 2012.

TACHIKAWA, T.; KAKU, M.; IWASAKI, A.; GESCH, D. B.; OIMOEN, M. J.; ZHANG, Z.; DANIELSON, J. J.; KRIEGER, T.; CURTIS, B.; HAASE, J.; ABRAMS, M.; CARABAJAL, C. **ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 - summary of validation results**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://pubs.er.usgs.gov/publication/70005960>>.

TAYT'SOHN, F. C. O.; NUNES, A. M. B.; PEREIRA, A. O. Assessing sugarcane expansion to ethanol production under climate change scenarios in Paranaíba river basin – Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 436–445, dez. 2018.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, v. 456–457, p. 12–29, ago. 2012.

THEIL, H. A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis. Em: RAJ, B.; KOERTS, J. (Eds.). **Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics**. Advanced Studies in Theoretical and Applied Econometrics. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992. v. 23p. 345–381.

TOMKRATOKE, S.; SIRISUP, S. Influence and variability of monsoon trough and front on rainfall in Thailand. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 1, p. 619–634, jan. 2022.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 18, 1998.

TORSRI, K.; LIN, Z.; DIKE, V. N.; THODSAN, T.; WONGSAMING, P. Evaluation of Spatial-Temporal Characteristics of Rainfall Variations over Thailand Inferred from Different Gridded Datasets. **Water**, v. 14, n. 9, p. 1359, 22 abr. 2022.

TRENBERTH, K. E.; STEPANIAK, D. P.; CARON, J. M. The Global Monsoon as Seen through the Divergent Atmospheric Circulation. **Journal of Climate**, v. 13, n. 22, p. 3969–3993, nov. 2000.

TRINH, T. A. The Impact of Climate Change on Agriculture: Findings from Households in Vietnam. **Environmental and Resource Economics**, v. 71, n. 4, p. 897–921, dez. 2018.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696–1718, 1 abr. 2010.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LORENZO-LACRUZ, J.; CAMARERO, J. J.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; AZORIN-MOLINA, C.; REVUELTO, J.; MORÁN-TEJEDA, E.; SANCHEZ-LORENZO, A. Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications. **Earth Interactions**, v. 16, n. 10, p. 1–27, 1 set. 2012.

WAINER, I.; VENEGAS, S. A. South Atlantic Multidecadal Variability in the Climate System Model. **Journal of Climate**, v. 15, n. 12, p. 1408–1420, jun. 2002.

WANG, D.; DONG, Z.; JIANG, F.; ZHU, S.; LING, Z.; MA, J. Spatiotemporal variability of drought/flood and its teleconnection with large-scale climate indices based on standard precipitation index: a case study of Taihu Basin, China. **Environmental Science and Pollution Research**, 28 fev. 2022.

WANG, H.; CHEN, Y.; PAN, Y.; LI, W. Spatial and temporal variability of drought in the arid region of China and its relationships to teleconnection indices. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 283–296, abr. 2015.

WANG, J.; CHI, Y.; SHI, B.; YUAN, Q.; WANG, X.; SHEN, L. Long-term spatiotemporal variability of precipitation and its linkages with atmospheric teleconnections in the Yellow River Basin, China. **Journal of Water and Climate Change**, v. 14, n. 3, p. 900–915, 1 mar. 2023.

WANG, J.; WANG, W.; CHENG, H.; WANG, H.; ZHU, Y. Propagation from Meteorological to Hydrological Drought and Its Influencing Factors in the Huaihe River Basin. **Water**, v. 13, n. 14, p. 1985, 20 jul. 2021.

WANG, X.; ZHUO, L.; LI, C.; ENGEL, B. A.; SUN, S.; WANG, Y. Temporal and spatial evolution trends of drought in northern Shaanxi of China: 1960–2100. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 139, n. 3–4, p. 965–979, fev. 2020a.

WANG, Y.; XU, Y.; TABARI, H.; WANG, J.; WANG, Q.; SONG, S.; HU, Z. Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall in the Yangtze River Delta, eastern China. **Atmospheric Research**, v. 231, p. 104673, jan. 2020b.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, v. 342, n. 3–4, p. 261–269, set. 2007.

WESTRA, S.; ALEXANDER, L. V.; ZWIERS, F. W. Global Increasing Trends in Annual Maximum Daily Precipitation. **Journal of Climate**, v. 26, n. 11, p. 3904–3918, 1 jun. 2013.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals**. , 2017. . Acesso em: 19 jun. 2018

WU, J. A framework for assessing compound drought events from a drought propagation perspective. **Journal of Hydrology**, 2022.

WU, M.; LI, Y.; HU, W.; YAO, N.; LI, L.; LIU, D. L. Spatiotemporal variability of standardized precipitation evapotranspiration index in mainland China over 1961–2016. **International Journal of Climatology**, 31 jan. 2020.

XU, K.; YANG, D.; YANG, H.; LI, Z.; QIN, Y.; SHEN, Y. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961–2012: A climatic perspective. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 253–264, jul. 2015.

YACOUB, E.; TAYFUR, G. Trend analysis of temperature and precipitation in Trarza region of Mauritania. **Journal of Water and Climate Change**, v. 10, n. 3, p. 484–493, 1 set. 2019.

YANG, R.; XING, B. Possible Linkages of Hydrological Variables to Ocean–Atmosphere Signals and Sunspot Activity in the Upstream Yangtze River Basin. **Atmosphere**, v. 12, n. 10, p. 1361, 18 out. 2021.

YANG, R.; XING, B. Evidence for Intensification in Meteorological Drought since the 1950s and Recent Dryness–Wetness Forecasting in China. **Atmosphere**, v. 13, n. 5, p. 745, 6 maio 2022.

YAŞAR KORKANÇ, S. Effects of the land use/cover on the surface runoff and soil loss in the Niğde-Akkaya Dam Watershed, Turkey. **CATENA**, v. 163, p. 233–243, abr. 2018.

YOULTON, C.; WENDLAND, E.; ANACHE, J.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; DABNEY, S. Changes in Erosion and Runoff due to Replacement of Pasture Land with Sugarcane Crops. **Sustainability**, v. 8, n. 7, p. 685, 16 jul. 2016.

ZANIN, P. R.; SATYAMURTY, P. Hydrological processes interconnecting the two largest watersheds of South America from multi-decadal to inter-annual time scales: A critical review. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 9, p. 4006–4038, jul. 2020.

ZEMP, D. C.; SCHLEUSSNER, C. -F.; BARBOSA, H. M. J.; RAMMIG, A. Deforestation effects on Amazon forest resilience. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 12, p. 6182–6190, 28 jun. 2017.

ZHANG, C. Madden–Julian Oscillation: Bridging Weather and Climate. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 94, n. 12, p. 1849–1870, dez. 2013.

ZHANG, C.; HUANG, G.; YAN, D.; WANG, H.; ZENG, G.; WANG, S.; LI, Y. Analysis of South American climate and teleconnection indices. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 244, p. 103915, jan. 2022a.

ZHANG, L.; YANG, X.; REN, L.; SHEFFIELD, J.; ZHANG, L.; YUAN, S.; ZHANG, M. Dynamic multi-dimensional identification of Yunnan droughts and its seasonal scale linkages to the El Niño–Southern Oscillation. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 42, p. 101128, ago. 2022b.

ZHOU, H.; LIU, Y. Spatio-temporal pattern of meteorological droughts and its possible linkage with climate variability: SPATIO-TEMPORAL PATTERN OF METEOROLOGICAL DROUGHTS. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 4, p. 2082–2096, mar. 2018.

ZHU, K.; QIU, X.; LUO, Y.; DAI, M.; LU, X.; ZANG, C.; ZHANG, W.; GAN, X.; ZHULA, W. Spatial and temporal dynamics of water resources in typical ecosystems of the Dongjiang River Basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 614, p. 128617, 2022.