



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTIMATIVA PROBABILÍSTICA DA RECARGA E SUA
SENSIBILIDADE À MUDANÇAS NOS REGIMES DE
PRECIPITAÇÃO PARA O AQUIFERO URUCUIA, BRASIL.

ELLEN CRISTINA OLIVEIRA SOUZA

SALVADOR

2025

**ESTIMATIVA PROBABILÍSTICA DA RECARGA E SUA
SENSIBILIDADE À MUDANÇAS NOS REGIMES DE
PRECIPITAÇÃO PARA O AQUÍFERO URUCUIA, BRASIL.**

Ellen Cristina Oliveira Souza

Orientador: Prof. Dr. Luiz Rogerio Bastos Leal

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Geologia do
Instituto de Geociências da Universidade
Federal da Bahia como requisito parcial à
obtenção do Título de Mestre em Geologia,
Área de Concentração: Geologia Ambiental,
Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR
2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Universitária de Ciências e Tecnologias Prof. Omar Catunda, SIBI – UFBA.

S729 Souza, Ellen Cristina Oliveira

Estimativa probabilística da recarga e sua sensibilidade à mudanças nos regimes de precipitação para o Aquífero Urucuia, Brasil/ Ellen Cristina Oliveira Souza. – Salvador, 2025.

70 f.

Orientador: Prof. Dr. Luíz Rogério Bastos Leal

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências, 2025.

1. Águas Subterrâneas. 2. Balanço hídrico do solo. 3. Evapotranspiração. 4. Precipitação. I. Leal, Luíz Rogério Bastos. II. Universidade Federal da Bahia – Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 556.3

ELLEN CRISTINA OLIVEIRA SOUZA

**ESTIMATIVA PROBABILÍSTICA DA RECARGA E SUA
SENSIBILIDADE À MUDANÇAS NOS REGIMES DE PRECIPITAÇÃO
PARA O AQUÍFERO URUCUIA, BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos em 15/08/2025.

TESE APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal - (Orientador) - UFBA

Prof. Dr. Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira (IGEO/UFBA)

Profa. Dra. Leanize Teixeira Oliveira (IFBA/SBG-CPRM)

**SALVADOR
2025**

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 88887.659696/2021-00. Expresso minha profunda gratidão à CAPES pela concessão da bolsa, cujo suporte financeiro foi essencial para que eu pudesse me dedicar integralmente ao desenvolvimento deste projeto. Agradeço, ainda, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio institucional concedido por meio dos processos nº 312977/2021-2 e nº 311333/2021-4.

Agradeço a Deus, por me conceder a força, sabedoria e perseverança para concluir esta jornada. Sua orientação foi fundamental em cada passo do caminho, e sou imensamente grato por sua presença constante em minha vida.

Agradeço ao Professor Harald Klammler, por todo o auxílio e incentivo durante minha pesquisa. Sua generosidade e apoio foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, e sou profundamente grata pela troca de conhecimentos e experiências.

Ao meu orientador, Professor Luiz Rogério, minha gratidão é imensa. Agradeço por sua orientação, paciência, e por sempre acreditar no meu potencial. Seu comprometimento e dedicação foram fundamentais para que eu pudesse crescer acadêmica e profissionalmente durante todo o curso deste mestrado.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFBA, deixo meu agradecimento pelo auxílio, pela paciência e pela convivência enriquecedora. Cada um de vocês contribuiu de forma significativa para minha formação e aprendizado.

Por fim, agradeço profundamente à minha família, em especial ao meu esposo, pai, mãe e filha, pela paciência e compreensão durante toda essa longa jornada. Sem o apoio, o amor e a compreensão de vocês, eu não teria conseguido superar os desafios e chegar até aqui. Sou eternamente grata por todo o carinho e suporte incondicional.

RESUMO

A recarga de águas subterrâneas representa um componente essencial no balanço hídrico dos aquíferos, influenciando diretamente na disponibilidade dos recursos hídricos, especialmente em regiões onde esses recursos estão sob intensa pressão. O Sistema Aquífero Urucuia, localizado no oeste da Bahia, vem desempenhando um papel estratégico no suporte à agricultura irrigada, ao abastecimento urbano e à manutenção dos ecossistemas. Contudo, a crescente expansão da agricultura irrigada, associada às mudanças no uso da terra e às mudanças climáticas, tem intensificado a extração de água subterrânea, comprometendo a recarga desse aquífero. Diante desse contexto, esta dissertação tem como objetivo estimar a recarga do Sistema Aquífero Urucuia em uma área localizada na bacia do rio Corrente, utilizando dados hidrometeorológicos diários de cinco estações. Foram aplicadas diferentes abordagens de balanço hídrico do solo, incluindo métodos determinísticos, probabilísticos e estocásticos, aplicados a um longo período de observação. A modelagem do balanço hídrico do solo foi fundamentada nos modelos desenvolvidos por Porporato et al. (2004) e Feng et al. (2015), permitindo avaliar a influência de variáveis climáticas como precipitação, evapotranspiração e umidade do solo sobre a recarga. Os resultados indicaram que a recarga ocorre de forma concentrada durante os meses chuvosos, sendo praticamente nula no período seco. Adicionalmente, observou-se que o comportamento sazonal da precipitação, caracterizado pela variação da probabilidade de chuva diária e a intensidade média de precipitação, influencia significativamente a formação da recarga, com maior frequência e intensidade de chuvas durante o verão. Foi possível obter uma relação empírica simples e robusta, expressa por $R \approx P - 2$, indicando que a recarga anual pode ser estimada a partir do excesso de precipitação em relação a um limite de evapotranspiração média constante de aproximadamente 2 mm/dia. Tal abordagem se mostrou mais adequada do que métodos baseados em percentuais fixos da precipitação, uma vez que reflete melhor a dinâmica hídrica local. As simulações indicam que reduções na precipitação podem diminuir a recarga em mais de 30%, enquanto a umidade do solo e a evapotranspiração permanecem estáveis devido à alta capacidade de armazenamento e profundidade das raízes. A metodologia aplicada foi eficiente na simulação da recarga e no suporte à gestão do Aquífero Urucuia, destacando a necessidade de uso sustentável frente à expansão agrícola e às mudanças climáticas.

Palavras-chave: águas subterrâneas; balanço hídrico do solo; evapotranspiração; precipitação.

ABSTRACT

Groundwater recharge represents a key component of the aquifer water balance, directly influencing water resource availability, especially in regions where these resources are under intense pressure. The Urucuia Aquifer System, located in western Bahia, plays a strategic role in supporting irrigated agriculture, urban water supply, and the maintenance of ecosystems. However, the continuous expansion of irrigated agriculture, combined with land use changes and climate change, has intensified groundwater extraction, compromising aquifer recharge. In this context, this dissertation aims to estimate the recharge of the Urucuia Aquifer System in an area located within the Corrente River basin, using daily hydrometeorological data from five stations. Different soil water balance approaches were applied, including deterministic, probabilistic, and stochastic methods, over an extended observation period. The soil water balance modeling was based on the models developed by Porporato et al. (2004) and Feng et al. (2015), allowing the evaluation of climatic variables such as precipitation, evapotranspiration, and soil moisture on recharge formation. The results indicated that recharge is concentrated during the rainy season and virtually absent during the dry period. Additionally, seasonal precipitation patterns, characterized by variations in daily rainfall probability and mean precipitation intensity, significantly influence recharge formation, with higher frequency and intensity of rainfall during summer. A simple and robust empirical relationship was obtained, expressed as $R \approx P - 2$, indicating that annual recharge can be estimated from the precipitation surplus above a constant average evapotranspiration threshold of approximately 2 mm/day. This approach proved more suitable than fixed-percentage precipitation methods, as it better reflects the local hydrological dynamics. Simulations show that reductions in precipitation may decrease recharge by over 30%, while soil moisture and evapotranspiration remain stable due to the high soil water storage capacity and deep rooting systems. The applied methodology proved effective in simulating recharge and supporting the management of the Urucuia Aquifer, emphasizing the need for sustainable use in the face of agricultural expansion and climate change.

Keywords: groundwater; soil water balance; evapotranspiration; precipitation.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL	7
CAPÍTULO 2 - ARTIGO – ESTIMATIVA PROBABILÍSTICA DA RECARGA E SUA SENSIBILIDADE À MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS REGIMES DE PRECIPITAÇÃO PARA AQUÍFERO URUCUIA, BRASIL.....	10
CAPÍTULO 3 - CONCLUSÕES.....	32
APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS CO-AUTORES	33
APÊNDICE B – MATERIAL SUPLEMENTAR.....	34
ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA AMBIENTE & ÁGUA	34
ANEXO B – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO	68

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

Desde a década de 1980, observa-se um crescimento contínuo na demanda por águas subterrâneas, fortemente associado à expansão da agricultura irrigada, responsável atualmente por cerca de 70% da extração global de água doce (UNESCO, 2022). Nesse contexto, o MATOPIBA, região que compreende áreas de cerrado nos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, é uma das principais fronteiras agrícolas em expansão no Brasil (Rausch et al., 2019). Em particular, o oeste da Bahia tornou-se referência nacional na agricultura em grande escala, favorecida pela implementação de tecnologias atreladas a esse tipo de atividade (AIBA, 2017).

Na região oeste da Bahia, destaca-se o Sistema Aquífero Urucuia (SAU) que desempenha um papel fundamental para a sustentabilidade hídrica local. Ocupando uma área de aproximadamente 90.000 km², o SAU constitui um importante reservatório de águas subterrâneas, alimentando rios perenes e atendendo à crescente demanda por irrigação agrícola (Campos et al., 2011). Para além do uso na agricultura, o aquífero também é responsável por suprir demandas domésticas, industriais e ambientais, sendo essencial na manutenção de ecossistemas ribeirinhos e na vazão do rio São Francisco (Gaspar, 2006).

No entanto, a intensificação da atividade agrícola tem ampliado significativamente a pressão sobre o aquífero, especialmente em virtude do uso intensivo de poços tubulares. Estudos baseados em modelagem numérica apontam que a extração contínua de água subterrânea tem provocado o rebaixamento progressivo dos níveis freáticos, acompanhado da redução do fluxo de base dos rios (Oliveira et al., 2019). Esses efeitos tornam-se ainda mais preocupantes quando associados à diminuição da recarga, comprometida por alterações no uso e cobertura do solo, bem como por eventos climáticos extremos, com períodos prolongados de estiagem (Oliveira et al., 2020).

Diante desse cenário, torna-se evidente que a exploração de águas subterrâneas está intrinsecamente ligada aos processos de recarga dos aquíferos, os quais, muitas vezes ocorre em proporção inferior à extração, comprometendo as reservas permanentes, especialmente em captações não controladas. Esse desequilíbrio pode levar ao rebaixamento do lençol freático e a redução das vazões dos rios, comprometendo a manutenção das atividades econômicas durante os períodos de estiagem (Albuquerque et al., 2015; Cambraia Neto & Rodrigues, 2021). Considerando as crescentes limitações no uso das águas superficiais, as águas subterrâneas se tornam alternativa estratégica para diversas regiões. Nesse contexto, compreender o processo da recarga dos aquíferos permite estimar o volume de água possível de ser explorado de forma sustentável, além de ser elemento fundamental para uma gestão integrada e eficiente dos recursos hídricos.

A recarga é entendida como o processo hidrológico em que a água da chuva, ou de outra fonte se infiltra a partir da superfície do solo e alcança a zona saturada, contribuindo para reposição do aquífero (Nogueira & Gonçalves, 2021). O balanço hídrico é amplamente reconhecido como uma abordagem eficaz e acessível para estimar a recarga de aquíferos, sendo especialmente útil em análises de cenários futuros relacionados às mudanças climáticas. Em modelos simplificados, esse processo é representado pela infiltração da água da precipitação na zona não saturada do solo, com posterior percolação para a zona saturada quando a capacidade de armazenamento é excedida, caracterizando a recarga efetiva (Cook & Brunner, 2025). No entanto, a aplicabilidade e a confiabilidade desse método dependem fortemente da qualidade das variáveis de entrada, como a precipitação e sobretudo a evapotranspiração, esta apresenta

uma maior sensibilidade metodológica na estimativa, sendo nesse contexto um fator crítico para o desempenho do balanço hídrico (Souza et al., 2017).

Modelos estocásticos que representam a dinâmica da umidade do solo em processos de recarga e escoamento subterrâneo, como os desenvolvidos por Botter et al. (2007) e Porporato et al. (2004), configuram-se como abordagens matemáticas avançadas e eficazes na modelagem do balanço hídrico, especialmente por capturarem a variabilidade temporal dos eventos de precipitação e suas implicações hidrológicas e ecológicas. Os resultados evidenciam que os modelos estocásticos são ferramentas eficazes para representar processos hidrológicos em distintas escalas, reproduzindo com realismo o comportamento do balanço hídrico tanto em nível local quanto em escala de bacia.

Nos últimos anos, diversos estudos têm sido realizados no Sistema Aquífero Urucuia, ampliando significativamente o conhecimento hidrogeológico da região. Apesar dos avanços, ainda persistem lacunas relevantes, sobretudo no que se refere à compreensão dos mecanismos e da variabilidade espacial e temporal da recarga. A recarga é um componente essencial para o balanço hídrico e para a avaliação da disponibilidade de água subterrânea. Nesse contexto, este trabalho se justifica pela necessidade de aprofundar o entendimento sobre os processos de recarga em uma área caracterizada por intensa pressão antrópica, marcada pelo aumento expressivo das outorgas para captação por poços tubulares e pelo declínio dos níveis freáticos observados nos últimos anos. A geração de informações mais precisas sobre a recarga pode subsidiar estratégias de gestão e uso racional dos recursos hídricos, contribuindo diretamente para a sustentabilidade hídrica da região.

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo caracterizar estatísticas sazonais de precipitação e avaliar a recarga do Sistema Aquífero Urucuia em uma área localizada na bacia do rio Corrente, oeste da Bahia. Para avaliação da recarga foi utilizada a metodologia do balanço hídrico do solo, fundamentada por Porporato et al. (2004), com extensões para variações sazonais propostas por Feng et al. (2015). A metodologia considera a influência de variáveis climáticas, como a precipitação e evapotranspiração, bem como características da vegetação típica da região, para representar a dinâmica da umidade do solo e quantificar a recarga em diferentes cenários climáticos.

REFERENCIAS

AIBA. Agricultura irrigada: tecnologias e estratégias para eficiência no uso da água e expansão sustentável no Cerrado baiano. AIBA Rural, Barreiras-BA, ano III, n. 07, p. 36–41, 2º trim. 2017.

ALBUQUERQUE, C. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. D. A.; & FONTES JUNIOR, R. V. D. P. Recarga do aquífero aluvial sob uso agrícola. *Águas Subterrâneas*. 60-71. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v29i1.27931>

BOTTER, G.; PORPORATO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I.; RINALDO, A. Basin-scale soil moisture dynamics and the probabilistic characterization of carrier hydrologic flows: Slow, leaching-prone components of the hydrologic response. *Water Resources Research*, v. 43, n. 2, 2007. doi:10.1029/2006WR005043.

CAMBRAIA NETO, A. J.; RODRIGUES, L. N. Impact of land use and occupation on potential groundwater recharge in a Brazilian savannah watershed. *Water International*. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02508060.2021.1898862>.

CAMPOS, J. C. V.; OLIVEIRA, L. T.; LUZ, L. D.; LEAL, L. R. B.; LUZ, J. A. G.; LIMA, O. A. L. Avaliação da recarga do aquífero Urucuia na região de Jaborandi – Oeste da Bahia. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Anais do Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo: ABAS, 2011.

COOK, P; BRUNNER, P. Quantification of Groundwater Recharge. Guelph: The Groundwater Project, 2025. 112 p. ISBN 978-1-77470-114-0. Disponível em: <https://doi.org/10.62592/BAUS7081>.

FENG, X.; PORPORATO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Stochastic soil water balance under seasonal climates. Proceedings of the Royal Society A, v. 471, p. 20140623, 2015.

GASPAR, M. T. P. Sistema Aquífero Urucuia: caracterização regional e propostas de gestão. 2006. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

NOGUEIRA, G. E. H.; GONÇALVES, R. D. Recarga de águas subterrâneas em aquíferos freáticos, um estudo de caso: modelagem da zona não saturada e de taxas de recarga do aquífero Rio Claro usando HYDRUS-1D. Holos Environment, Rio Claro, v. 21, n. 3, p. 402–422, 2021. Disponível em: <http://doi.org/10.14295/holos.v21i3.12455>.

OLIVEIRA, L. T.; KLAMMLER, H.; LEAL, L. R. B.; GRISSOLIA, E. M. Analysis of the long-term effects of groundwater extraction on the water balance in part of the Urucuia Aquifer System in Bahia – Brazil. Revista Ambiente & Água, Taubaté, v. 14, n. 6, e2390, 2019. DOI: 10.4136/ambi-agua.2390.

OLIVEIRA, L. T.; KLAMMLER, H.; LEAL, L. R. B. Balanço hídrico transitório do aquífero Urucuia meridional na Bahia. Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 325–339, 2020. DOI: 10.14295/ras.v34i3.29915.

PORPORATO, A.; DALY, E.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Soil water balance and ecosystem response to climate change. The American Naturalist, v. 164, n. 5, p. 625-632, 2004.

RAUSCH, Lisa L.; GIBBS, Holly K.; SCARAMUZZA, Carlos Alberto de Moraes; HERRERO, Maria; CASTRO, Juliana Dalla Mora; MORTON, Douglas C.; NOOJIPADY, Prasanth; WALKER, Nathan F. Soy expansion in Brazil's Cerrado. Conservation Letters, v. 12, n. 6, e12671, 2019. Wiley Periodicals. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/conl.12671>.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; SCHAFER, R.; GURSKI, B. C.; SCHAFER, H. Balanço hídrico climatológico: precipitação e evapotranspiração de referência estimadas com metodologia alternativa. Revista Brasileira de Climatologia, Curitiba, v. 20, p. 284–298, jan./jul. 2017.

UNESCO. O valor das águas subterrâneas. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2022. Brasília: UNESCO, 2025. Disponível em: <https://www.unesco.org>.

CAPÍTULO 2

ARTIGO - ESTIMATIVA PROBABILÍSTICA DA RECARGA E SUA SENSIBILIDADE À MUDANÇAS NOS REGIMES DE PRECIPITAÇÃO PARA O AQUIFERO URUCUIA, BRASIL

PROBABILISTIC ESTIMATION OF RECHARGE AND ITS SENSITIVITY TO CHANGING PRECIPITATION REGIMES FOR THE URUCUIA AQUIFER, BRAZIL

Ellen Cristina Oliveira Souza¹; Harald Klammler¹; Luíz Rogério Bastos Leal¹

¹ Institute of Geosciences, Federal University of Bahia (UFBA), Ondina Campus, Avenida
Barão de Jeremoabo, s/n, ZIP 40050-090, Salvador, BA, Brazil.

E-mail: ellen.cristina@ufba.br, hklammler@ufba.br, lrogerio@ufba.br

ABSTRACT

Given the rapid expansion of irrigated agriculture and climate change, it is essential to understand the dynamics of groundwater recharge formation for a sustainable management of water resources. This study focuses on a portion ($\approx 20,000 \text{ km}^2$) of the Urucuia aquifer in northeastern Brazil, for which we use daily hydrometeorological records at five stations over several decades to infer monthly statistics (probabilities and intensities) of precipitation P . We further apply different existing deterministic and probabilistic / stochastic soil water balance approaches to estimate recharge R for the past and a limited number of possible future scenarios. Long-term average recharge estimates range from 257 to 440 mm/year (east to west) with recharge events concentrated exclusively in the rainy summer months. For annual averages in mm/day, we identify the empirical relationship $R = P - 2$ as a simple and accurate approximation for the region. We further conclude that quantification of recharge as a percentage of precipitation is inappropriate and that seasonal variability with soil water carry-over between seasons cannot be neglected. Future scenarios with reduced average precipitation are estimated to affect groundwater recharge over-proportionally and stronger than soil water content. Overall, the study provides an evaluation of relevant methods and insights for regional water planning.

Keywords: evapotranspiration; groundwater; stochastic simulation; soil water balance; climate change.

ESTIMATIVA PROBABILÍSTICA DA RECARGA E SUA SENSIBILIDADE A MUDANÇAS NOS REGIMES DE PRECIPITAÇÃO PARA O AQUIFERO URUCUIA, BRASIL

RESUMO

Diante do crescente avanço da agricultura irrigada e das mudanças climáticas, torna-se essencial compreender a dinâmica da recarga de águas subterrâneas para a gestão sustentável dos recursos hídricos. Este estudo foca em uma porção ($\approx 20.000 \text{ km}^2$) do aquífero Urucuia no nordeste do Brasil, para qual utilizamos dados hidrometeorológicos diários de cinco estações durante várias décadas, a fim de inferir estatísticas mensais (probabilidades e intensidades) de precipitação P . Foram aplicadas diferentes abordagens existentes de balanço hídrico do solo, tanto determinísticas quanto probabilísticas / estocásticas, para estimar a recarga R em cenários passados e em um número limitado de cenários futuros possíveis. As estimativas de recarga média de longo prazo variam de 257 a 440 mm/ano (de leste para oeste), com eventos de recarga concentrados exclusivamente nos meses chuvosos de verão. Para médias anuais em mm/dia, identificamos a relação empírica $R = P - 2$ como estimativa simples e precisa para a região. Concluimos ainda que quantificar a recarga como uma porcentagem da precipitação é inadequado, e que a variabilidade sazonal com transferência de umidade do solo entre estações não pode ser negligenciada. Cenários futuros com redução de precipitação média devem afetar a recarga de água subterrânea de forma mais acentuada que o conteúdo de umidade do solo. Em geral, o estudo oferece uma avaliação de métodos relevantes e subsídios para o planejamento hídrico regional.

Palavras-chave: águas subterrâneas; balanço hídrico do solo; evapotranspiração; simulação estocástica; mudança climática.

1. INTRODUCTION

Groundwater is essential for supporting economic activities, supplying urban and rural areas, and sustaining aquatic ecosystems such as rivers, lakes, mangroves, and wetlands. It represents 97% of the planet's freshwater, making aquifers the largest reservoir of potable water available to humanity (Hirata et al., 2019). In western Bahia, the Urucua Aquifer System (UAS) represents a strategic resource, mainly due to its significant contribution to maintaining baseflows of the São Francisco River's tributaries, and due to the increasing water demand associated with the considerable expansion of agricultural activity since the 1980s (Gaspar, 2006; Oliveira et al., 2019).

Located in the MATOPIBA frontier, the portion of the UAS situated in western Bahia faces various pressures on its water system, particularly due to the implementation of large irrigation projects using center pivots for soybean and cotton cultivation. This raises concerns about water quality and the reduction of water volumes in the water bodies (ANA, 2017; Oliveira, 2021). The MATOPIBA areas feature key conditions for modern industrial agriculture, such as flat terrain, productive soil, and favorable climate, highlighting the region's potential in arable land and establishing it as a new frontier for agricultural expansion in Brazil (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, 2018; Miranda et al., 2014; Polizel et al., 2021).

Conflicts related to water use in western Bahia reflect the growing dispute over water resources between local communities and large agricultural enterprises. Since the mid-2010s, a significant reduction in river flow volumes has been observed, which has raised questions regarding the granting of water-use permits and the effectiveness of hydrological monitoring in the region. The most emblematic episode occurred in 2017, when around two thousand people invaded the Igarashi farm in Correntina to protest against the excessive water withdrawal for irrigation. These events highlight the increasing tensions resulting from the expansion of agribusiness (Coelho, 2024).

Although often attributed to the expansion of irrigation systems, the conflicts in the region are also significantly influenced by natural factors, particularly climatic variability. Its geographic location, in a transitional zone between semi-arid tropical and seasonally dry climates, makes the area particularly vulnerable to the effects of climate change (Pousa et al., 2019). Therefore, assessing the potential impacts of climate change on water resources is essential, given their broad implications.

In this context, estimating groundwater recharge is a key prerequisite for planning and managing water resources, especially in regions that rely on these resources for irrigated agricultural activities (Eilers, 2004). The UAS recharge area consists of the predominant high-plain regions that allow for the retention and direct infiltration of rainwater into the sandstone aquifer (ANA, 2017; Gaspar and Campos, 2007). However, anthropogenic impacts have already affected infiltration conditions, which, in turn, impact aquifer recharge. Additionally, the authors highlight the risk of groundwater overexploitation driven by high irrigation demands in the region.

Estimating recharge remains a significant challenge, as there is no universally accepted methodology for its quantification (Scanlon et al., 2002). Rainfall infiltration and water balance approaches have been highlighted for their simplicity and effectiveness in estimating groundwater recharge (Kumar et al., 2022). Pontes et al. (2016) state that among the various ways to estimate recharge, the soil zone water balance is the simplest, as it requires few data inputs. Several methods are used to model the water balance in the soil zone, including mathematical approaches such as Balseq (Lobo-Ferreira et al., 2014) and Thornthwaite-Mather (Thornthwaite, 1948; Mather, 1955), and computational models like Hydrobal (Touhami et al., 2014). Most models incorporate land use and land cover and are adaptable to different scales,

in addition to being useful for predicting soil moisture and vegetation water stress.

Another widely used approach for estimating recharge is the water table fluctuation method, known for its simplicity, low cost, and ability to provide quick and practical estimates. The technique is based on analyzing the water table dynamics with a known or estimated value of specific yield. However, compared to other recharge estimation methods, this method tends to overestimate values, as it considers water table fluctuations that are not always exclusively related to recharge (Becke et al., 2024). Due to the relatively deep (up to 100 m) water table under the Urucua high-plains and the significant effect of the unsaturated zone on recharge propagation, this method is not deemed appropriate for the present study.

Groundwater recharge is also expected to be highly susceptible to the impacts of climate change. Adhikari et al. (2022) highlighted the importance of investigating these effects for efficient planning and sustainable water resource management. Although the methods used in this type of analysis have advanced, their application in decision-making remains limited due to associated uncertainties. Probabilistically quantifying the confidence level in future recharge projections can help managers define more assertive strategies. However, such studies present challenges, since groundwater responds differently to climate variations than surface water. Gebru et al. (2024) conducted a review of the main methods used to estimate groundwater recharge in Ethiopia, identifying major limitations such as a lack of accurate data and the absence of adequate validation of results, which compromises the reliability of estimates. The authors also stress the need to consider the impacts of climate change to assess the long-term effects on groundwater recharge.

The IPCC (2022) report projects a reduction in rainfall in northern South America, with an increase in consecutive dry days and historically unprecedented droughts in the region. Additionally, an increase in evapotranspiration has been observed since the 1980s, along with a reduction in soil moisture across arid, humid, and transitional regions. In a simulation projecting future recharge (2041–2060) for the UAS in an optimistic scenario, Pereira (2021) concluded that recharge could decrease by up to 27%, whereas in a pessimistic scenario, the reduction could reach up to 43%.

The objectives of this study are to characterize the seasonal (i.e., monthly) statistics of precipitation and to assess the recharge R in a portion of the UAS corresponding to the Corrente River basin. The latter is achieved by using the soil water balance framework of Porporato et al. (2004) with extensions for seasonal variations by Feng et al. (2015). In particular, three approaches are applied and compared: (1) direct deterministic simulation with existing time series of precipitation P and potential evapotranspiration PET for calibration of soil water capacity, (2) probabilistic estimation using existing analytical solutions and statistics of P (with and without seasonal carry-over of soil water between months), and (3) stochastic Monte Carlo simulation with future projections of seasonal P statistics. The simulation results are used to infer a very simple and practical relationship between the annual means of precipitation and recharge.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study Area

The study focuses on the central-western portion of the Corrente River basin (Figure 1), partially covering the municipalities of Correntina, Cocos, Coribe, and Jaborandi. The area of approximately 18,000 km² encompasses the sub-basins of the Éguas, Arrojado, and Formoso rivers. The region is mainly characterized by a flat-topped plateau (high-plain), with altitudes ranging from 470 to 1,016 meters over approximately 200 km from east to west, and predominantly parallel to subparallel drainage patterns (Oliveira et al., 2020). The northern, western, and southern boundaries are defined based on topographic highs, while the eastern

boundary was determined by the area containing the Correntina, Arrojado, and Gatos hydrometeorological stations. The geological units occurring in the study area belong to the Urucuia Group and can reach thicknesses of up to 400 meters. These units generally present high textural and mineralogical maturity and overlie a basement of Proterozoic rocks. The Posse Formation, the basal unit of the Urucuia Group, is composed of fine to medium sandstones that indicate an aeolian depositional environment with characteristics of dune fields and interbedded fluvial processes. Above it is the Serra das Araras Formation, which is distinguished by its greater lithological diversity. Composed mainly of sandstones, this formation is characterized by a balanced depositional environment between aeolian and fluvial processes, and it is thicker and more extensive than the Posse Formation (Campos & Dardenne, 1997; ANA, 2017).

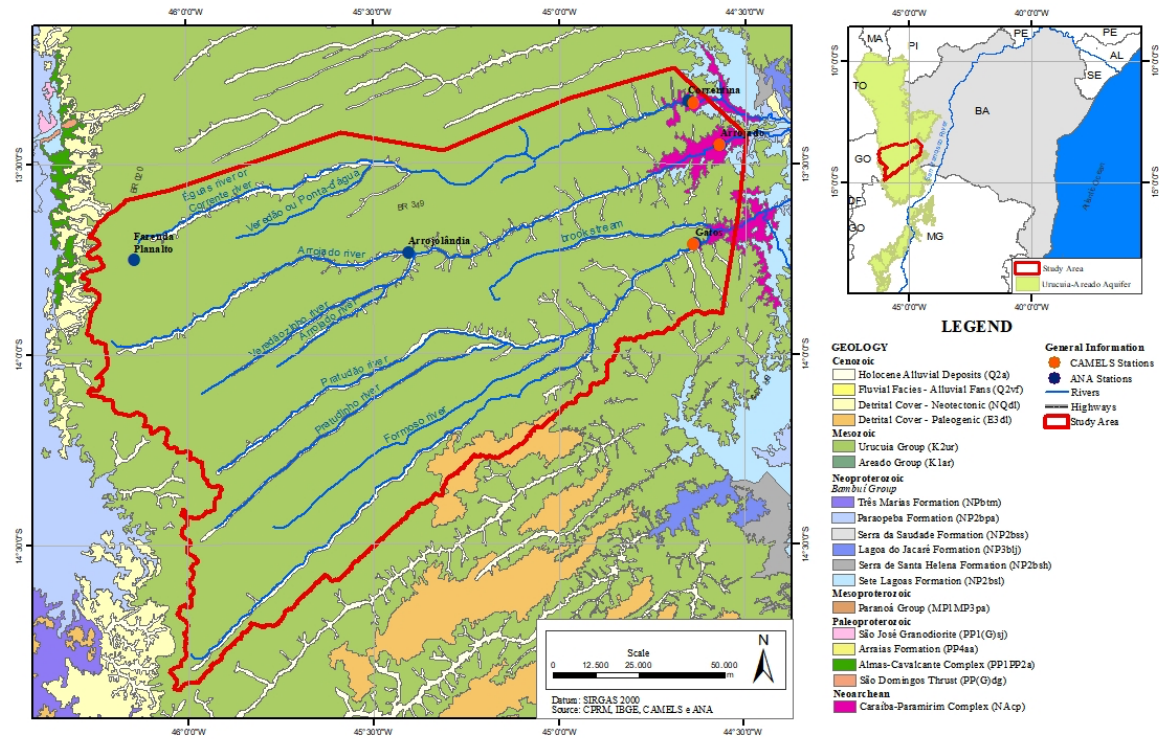


Figure 1. Map of the study area with stations, where data is available from CAMELS-BR (Chagas et al., 2020) or ANA (2024), showing also the main rivers and predominant geology of the Urucuia Group. Other rain gauge stations exist within the study area but were excluded due to very short or incomplete records and / or a significant amount of inconsistent data (outliers).

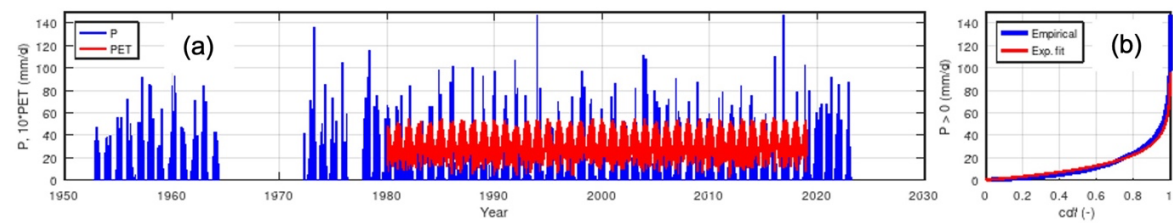


Figure 2. Example of available climate data. (a) Daily time series of precipitation P at the Gatos station (ANA, 2024); for other stations, see Supplemental Material) and potential evapotranspiration PET (Chagas et al., 2020; 10 times exaggerated relative to P) in the study area, showing strong seasonality with dry winters and rainfall concentrated in the summer during periods of high PET . Since PET is very uniform across the study area (high correlation among the Gatos, Arrojado, and Correntina stations) and data are unavailable for the other

stations investigated, we used the average PET from these three stations for the entire area. (b) Cumulative distribution (cdf) of daily rainfall on rainy days (i.e., excluding dry days) with a fitted exponential distribution (as used by Porporato et al., 2004), showing good agreement.

Land use in the study area is characterized by a strong presence of agriculture, with emphasis on both large-scale and small-scale irrigated farming, in addition to pastures, native vegetation of the Cerrado biome, urban areas, and water bodies (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 2019). According to Köppen's classification, the climate in the study area is tropical with a dry winter (type Aw), presenting a temperature range between 20°C and 26°C. This climate is marked by strong seasonality and high evapotranspiration during the wet summer months (Figure 2).

2.2. Daily Soil Water Balance

We conduct a regional-scale recharge study using the daily soil water balance over time t [T] (Porporato et al., 2004). The "soil" is considered as the rooting zone of vegetation with a depth Z [L] and a relative moisture content w [-], defined as the volume of water per total soil volume. Soil moisture w can vary between a minimum residual value w_{res} [-] and a maximum critical value w_{cr} [-]. The absolute volume of water in the soil per unit surface area is therefore equal to wZ . The soil gains water from precipitation P [LT^{-1}] and loses water through evapotranspiration ET [LT^{-1}] and deep percolation R [LT^{-1}], interpreted as recharge (usually at the top of the unsaturated zone) to the aquifer, since surface runoff is negligible in the study area. For $w = w_{res}$, the soil is dry and ET becomes zero; near $w = w_{cr}$, the soil is close to field capacity, and ET reaches its maximum as potential evapotranspiration PET [LT^{-1}] for a given day. For intermediate values of w , the model assumes a linear relationship between the two limits, expressed as

$$ET = \frac{w - w_{res}}{w_{cr} - w_{res}} PET \quad (1)$$

The corresponding soil water balance is

$$Z \frac{dw}{dt} = P - ET - R \quad (2)$$

where daily values of R are calculated to keep $w \leq w_{cr}$ for given time series of P and PET . In other words, on days when w would exceed w_{cr} , recharge R is exactly the amount of water that drains from the soil downward to bring w back to w_{cr} . During prolonged dry periods with $P = 0$, w approaches w_{res} , causing ET to approach zero, and the soil remains in a stable dry state.

Multiplying both the numerator and denominator of Equation 1 by Z and introducing $h = Z(w - w_{res})$ and $h_{cr} = Z(w_{cr} - w_{res})$ [L] as the dynamic and critical water volumes in the soil per unit surface area, we can simplify Equation 1 to

$$ET = \frac{h}{h_{cr}} PET \quad (3)$$

This shows that the three soil-specific parameters Z , w_{res} , and w_{cr} can be summarized in a single value h_{cr} , which is needed to partition P into ET and R . We also note that $Z dw/dt$ in Equation 2 directly corresponds to dh/dt , leading to the water balance in terms of h as

$$\frac{dh}{dt} = P - \frac{h}{h_{cr}} PET - R \quad (4)$$

Using the finite difference method for day i [-] with $\Delta t = 1$ day and $\Delta h = h_{i+1} - h_i$, we implemented Equation 4 numerically as

$$h_{i+1} = h_i + \left(P_i - \frac{h_i}{h_{cr}} PET_i - R_i \right) \Delta t \quad (5)$$

where the time series of R_i results to keep $h \leq h_{cr}$, i.e., $R_i = h_i - h_{cr}$ on days when $h_i > h_{cr}$, while $R_i = 0$ at other times. This implementation can be automated using software such as Excel or GNU Octave 8.2.0, as done in this study.

2.3. Probabilistic Soil Water Balance

To assess the effects of climate change, for example, the water balance from Section 2.2 has been extensively studied, including probabilistic aspects related to ecosystem responses (Porporato et al., 2004) and streamflow in watersheds (Botter et al., 2007). In this framework, PET is considered constant, and stochasticity is introduced through random precipitation P with a daily probability λ [1/d] and a mean intensity α [mm] on days when $P > 0$ (i.e., excluding dry days with $P = 0$). Both λ and α are also considered constant, resulting in a constant average precipitation $\langle P \rangle = \lambda \alpha$. This approach also assumes that days with precipitation follow a random sequence over time (Poisson distributed), while daily precipitation intensities follow an exponential distribution (Figure 2b and Supplemental Material for stations studied here containing seasonality), which is widely verified in practice (Porporato et al., 2004).

Based on this, advanced mathematical operations yield an estimate of the average $\langle h \rangle$ of the water available in the soil as (Porporato et al., 2004, their Equations 3 and 4):

$$\frac{\langle h \rangle}{h_{cr}} = \frac{1}{\phi} - \frac{\frac{A}{\phi} - 1}{\gamma(\frac{A}{\phi}, A)} e^{-A} \quad (6)$$

where the aridity index

$$\phi = \frac{PET}{\langle P \rangle} \quad (7)$$

and the normalized soil water storage capacity

$$A = \frac{h_{cr}}{\alpha} \quad (8)$$

are dimensionless constants, while $\gamma(A/\phi, A)$ is the lower incomplete gamma function of A/ϕ from zero to A . Using Equation 3, this implies an average $\langle ET \rangle$ for actual evapotranspiration as

$$\langle ET \rangle = \frac{\langle h \rangle}{h_{cr}} PET \quad (9)$$

and, from Equation 4 with $dh/dt = 0$ (steady-state water balance), it also yields the average recharge $\langle R \rangle$ estimated as

$$\langle R \rangle = \langle P \rangle - \langle ET \rangle \quad (10)$$

Given meteorological data (precipitation statistics λ and α , and a PET value) and soil /

vegetation characteristics (porosity, residual and critical moisture, and rooting depth, all summarized in parameter h_{cr}) for a region, Equations 6 to 10 provide a direct estimate of the probabilistically expected recharge rate $\langle R \rangle$. Consequently, these equations also make it easy to quantify the sensitivity of $\langle R \rangle$ to variations in input parameters for assessing future climate or land use / vegetation change scenarios. The most complex part of this process is computing the gamma function in Equation 6, which can be handled with Excel or GNU Octave 8.2.0, as in this work.

Combining Equations 6, 9, and 10, the expected recharge can be expressed as a proportion of average precipitation

$$\frac{\langle R \rangle}{\langle P \rangle} = \phi \frac{A \bar{\phi}^{-1}}{\gamma(\frac{A}{\phi}, A)} e^{-A} \quad (11)$$

As expected, and despite the multiplication by aridity index ϕ in Equation 11, recharge decreases with growing ϕ (i.e., more energy for ET and less available P) and with higher values of A (i.e., greater soil water storage increases ET availability).

For variable climates (e.g., seasonal), these results only hold for soils with low water storage capacity, so that the soil moisture state rapidly adjusts (on a daily scale) to new climate conditions. Here, we apply the truncated gamma distribution approximation (Feng et al., 2015) to better account for the seasonal variations of PET and especially λ and α in the study area. Based on the water balance in Equation 4 and monthly $\langle h \rangle$ estimates from Equation 6, this approximation becomes

$$\frac{d\langle h_t \rangle}{dt} = \alpha_t \lambda_t - \frac{\langle h_t \rangle}{h_{cr}} PET_t - \langle R_t \rangle \quad (12)$$

where we add the subscript “ t ” to indicate time dependence. The adjusted recharge $\langle R_t \rangle$ is obtained from Equation 11 using a value of λ (embedded in ϕ) so that $\langle h \rangle = \langle h_t \rangle$ in Equation 6. As in Equation 5, Equation 12 is implemented using the finite difference method with time steps $\Delta t = 1$ day. Since the forcing variables α_t , λ_t , and PET_t are annually periodic, the numerical simulation ends when periodic stability is achieved within a small tolerance margin.

2.4. Stochastic Simulation (Monte Carlo)

The Monte Carlo simulation consists of numerically modeling a deterministic process repeatedly, for example, with random input parameters and / or data within their probabilistic characteristics. Although it requires greater computational effort, this method combines the advantages of Sections 2.2 and 2.3, allowing Equation 5 to be applied with synthetic rainfall time series generated using variable λ and α parameters throughout the year due to climatic seasonality. Based on the resulting simulations of h_i , ET_i , and R_i , it is possible to estimate averages and ranges of variability for each day or month of the year, while PET_i may also vary over time and / or include uncertainty. This enables future projections not only in terms of expected values (as in Section 2.3), but also accounting for associated uncertainties. Moreover, it is applicable in scenarios involving seasonal climate variation and considerable soil water storage capacity (Feng et al., 2015).

Since available PET data do not cover the same periods as the rainfall data, and given the high consistency in PET 's seasonal variability across different years (Figure 2a), we used average monthly PET values (Figure 3) for all years. This also allows the simulation of future scenarios with different rainfall parameters. We considered four scenarios, always in comparison to the baseline scenario (Figure 3), as follows: (1) 10% reduction in α with λ

unchanged, (2) 10% reduction in λ with α unchanged, (3) simultaneous 10% reduction in α and 10% increase in λ , and (4) simultaneous 10% reduction in λ and 10% increase in α . While average rainfall in scenarios (1) and (2) also decreases by 10%, it remains unchanged in scenarios (3) and (4). Simulations with exponentially distributed rainfall heights (Figure 2b) were generated for 100 years with an additional year at the beginning, which was disregarded in the results to avoid model initialization effects.

2.5. Parameter Definition

The single model parameter to be defined is the critical soil water storage h_{cr} in Equation 4, which affects the timing and average amount of groundwater recharge R generated by the soil zone. Higher values of h_{cr} allow for larger soil water storage, thus making more water available for ET and reducing R , while lower values of h_{cr} achieve the opposite effect. Over the long term when changes in storage can be neglected, averages of R have to correspond to averages of river discharge Q per unit catchment area, given that direct surface runoff (overland flow to rivers) is virtually inexistent in the study region. Based on this, $h_{cr} = 250$ mm is adopted here, generating a long-term average recharge estimate of 352 mm/year for the Gatos station. This compares well with observed values of 342 and 366 mm/year for the full historical period of record and before 1980 only, when both potential reductions of river discharge due to extensive groundwater pumping as well as vegetation and soil use changes due to (partially irrigated) agriculture may still be neglected.

Given a soil porosity of approximately 30% in the region (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 2019), residual and critical saturation values of 0.1 and 0.3 correspond to $w_{res} = 0.03$ and $w_{cr} = 0.09$, respectively. The Cerrado biome is characterized by a wide diversity of plant species, with rooting systems ranging from shallow to deep and species adaptation to drought periods (Rawitscher et al., 1943; Canadell et al., 1996). Oliveira et al. (2005) observed that, in the “campo sujo” physiognomy, which is predominant in the study area especially prior to 1980, roots reached depths of up to 4 m. Thus, adopting a rooting depth of $Z = 4$ m also results in a critical soil water capacity $h_{cr} = Z(w_{cr} - w_{res}) \approx 250$ mm, which suggest that the calibrated value is not only consistent with observed river discharge, but also with regard to regional soil and vegetation conditions.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The statistical analysis of the hydrometeorological data from the Gatos station between 1953 and 2023 (Figure 2a) reveals the overall seasonal characteristics in the monthly averages of precipitation P and potential evapotranspiration PET (Figure 3). Monthly PET ranges between 2 and 4 mm/day and presents a significantly weaker seasonality than P , which varies from 0 to 8 mm/day. After maximum values in November and December, a smooth decline in P is observed in January and February, followed by a sharp drop to near-zero values from May through September. The daily precipitation probability λ and its intensity α follow a similar pattern showing that the rainy season is marked by both more frequent and stronger precipitation events. During the wettest time of the year in November and December, there is an almost 50% chance of rain per day with average intensities of approximately 16 mm/day.

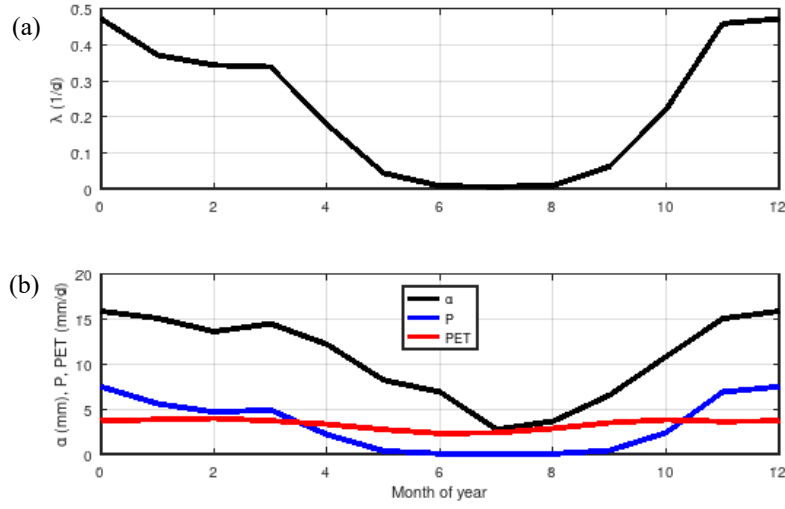


Figure 3. Monthly average climate parameters for the Gatos station inferred from data in Figure 2a. (a) Daily probability λ of rainfall, and (b) average rainfall height α on rainy days, along with monthly averages of precipitation P and potential evapotranspiration PET .

A graphical analysis of Equation 11 shows in agreement with expectation that as the aridity index Φ increases, the expected recharge as proportion of precipitation tends to decrease (Figure 4). It is also observed that greater soil water storage capacities with larger values of A (Equation 8) result in reduced recharge, since more water is available to be extracted via ET . Moreover, the larger A , the steeper and larger is the drop in recharge with Φ , potentially reaching zero. While A at the Gatos station (red circles) varies between approximately 15 and 80, the graph for $A = 20$ (dark brown line) appears to be an accurate approximation for all months. Such a high value of A indicates that soil water storage capacity is much larger than expected rainfall intensity, making isolated precipitation events highly unlikely to generate groundwater recharge. Instead, recharge may be triggered more easily during the rainy season, when repeated rainfall fills up the soil water storage for subsequent precipitation events to surpass the critical level. As a further consequence, the portion of precipitation becoming recharge is more sensitive to Φ than A , which is illustrated by a clear reduction in relative recharge from almost 60% at $\Phi = 0.5$ to zero for values above 1.5.

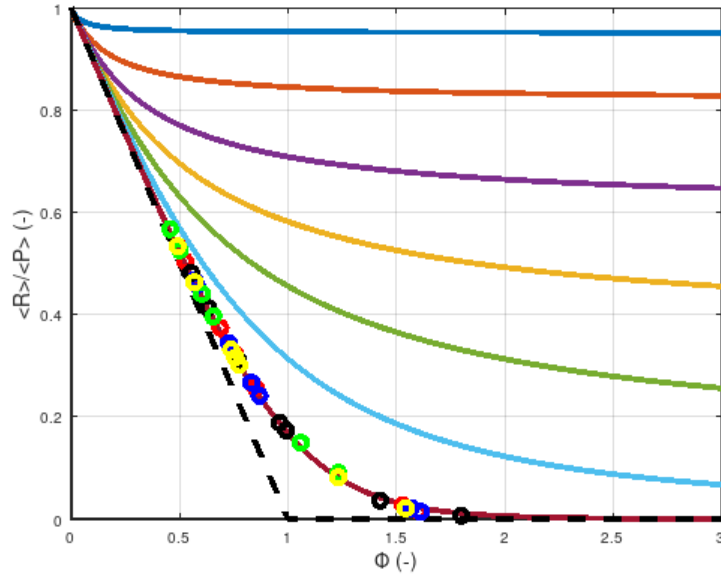


Figure 4. Representation of Equation 11 for different values of $A = \{0.05, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 20\}$ (solid colored lines from top to bottom), indicating the wettest months (circles) at the Gatos (red), Arrojado (blue), Correntina (black), Fazenda Planalto (green), and Arrojolândia (yellow) stations for $h_{cr} = 250$ mm. The dashed black line corresponds to $A \rightarrow \infty$, i.e., very large soil water storage capacities, where $\langle R \rangle = \langle P \rangle - PET$ for $\langle P \rangle > PET$ (energy-limited ET), and $\langle R \rangle = 0$ otherwise (water-limited ET). All data cluster around the $A = 20$ line (Equation 8). Months not shown in this figure have $P \approx 0$, thus lying outside the chart with very high Φ and $R \approx 0$.

The results from the daily soil water balance modeling of Equation 5 (Figure 5 with zoom in Figure 6) are based on constant monthly values of PET (Figure 3b). This is justified by the relatively uniform annual cyclicity of PET and allows for executing the simulation including periods where data for P are available, while those for PET are not (Figure 2a). The long-term averages of observed P and simulated recharge R amount to 1064 and 352 mm/year (approximately 33% of P), respectively. Moreover, there are consistent seasonal patterns among P , ET , h and R over time. Variability in ET aligns strongly with the soil moisture h due to the relatively small variability in PET . Recharge R is marked by peaks during the two to three months with greatest precipitation. However, the first precipitation events of a rainy season do not generate recharge, but increase the soil water content for subsequent rainfall to trigger recharge events, when $h > h_{cr}$. These results highlight the dominant influence of P on both ET and R , through their relationship with soil water availability h .

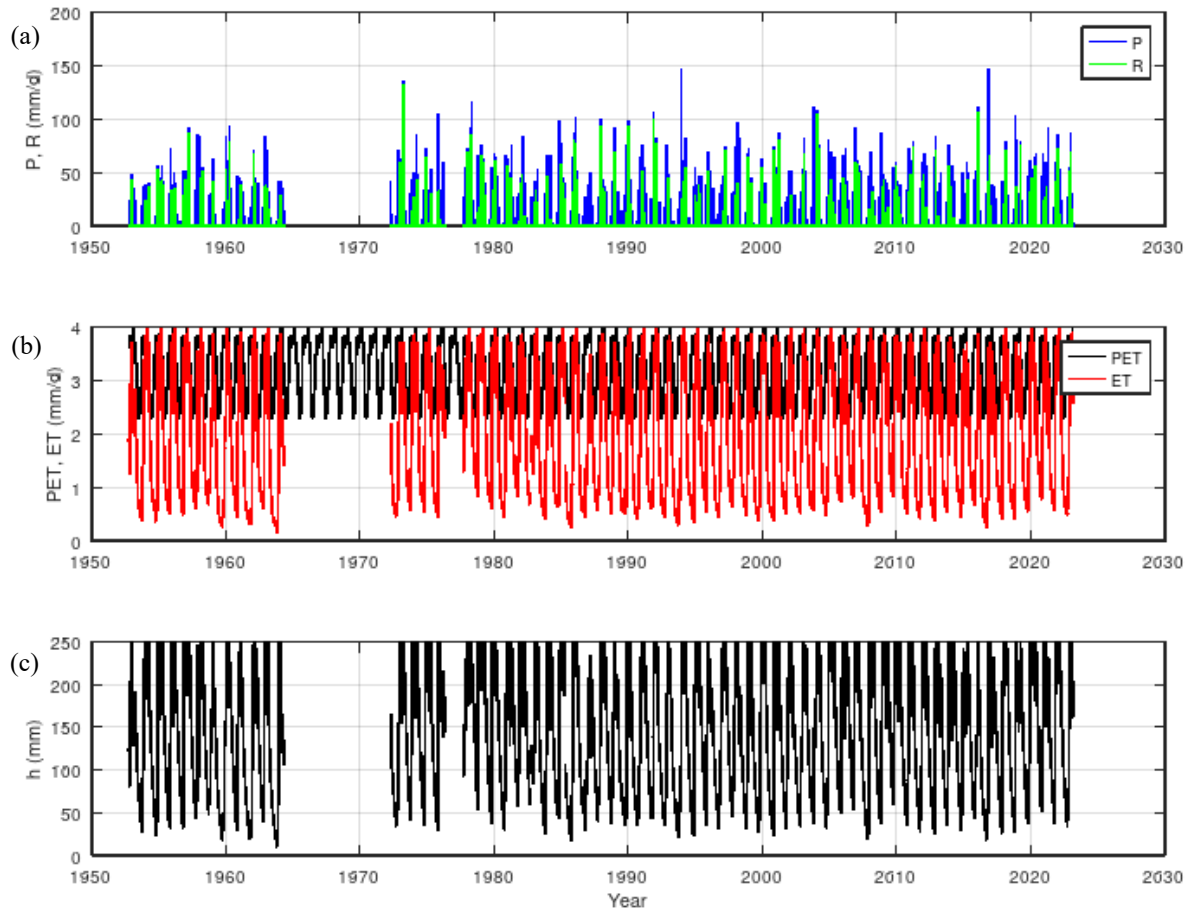


Figure 5. Simulation of the historical daily soil water balance at Gatos based on Equation 5 in terms of (a) precipitation P and recharge R , (b) potential evapotranspiration PET and actual evapotranspiration ET , and (c) soil water content h . The long-term averages of P and simulated R are 1064 and 352 mm/year, respectively.

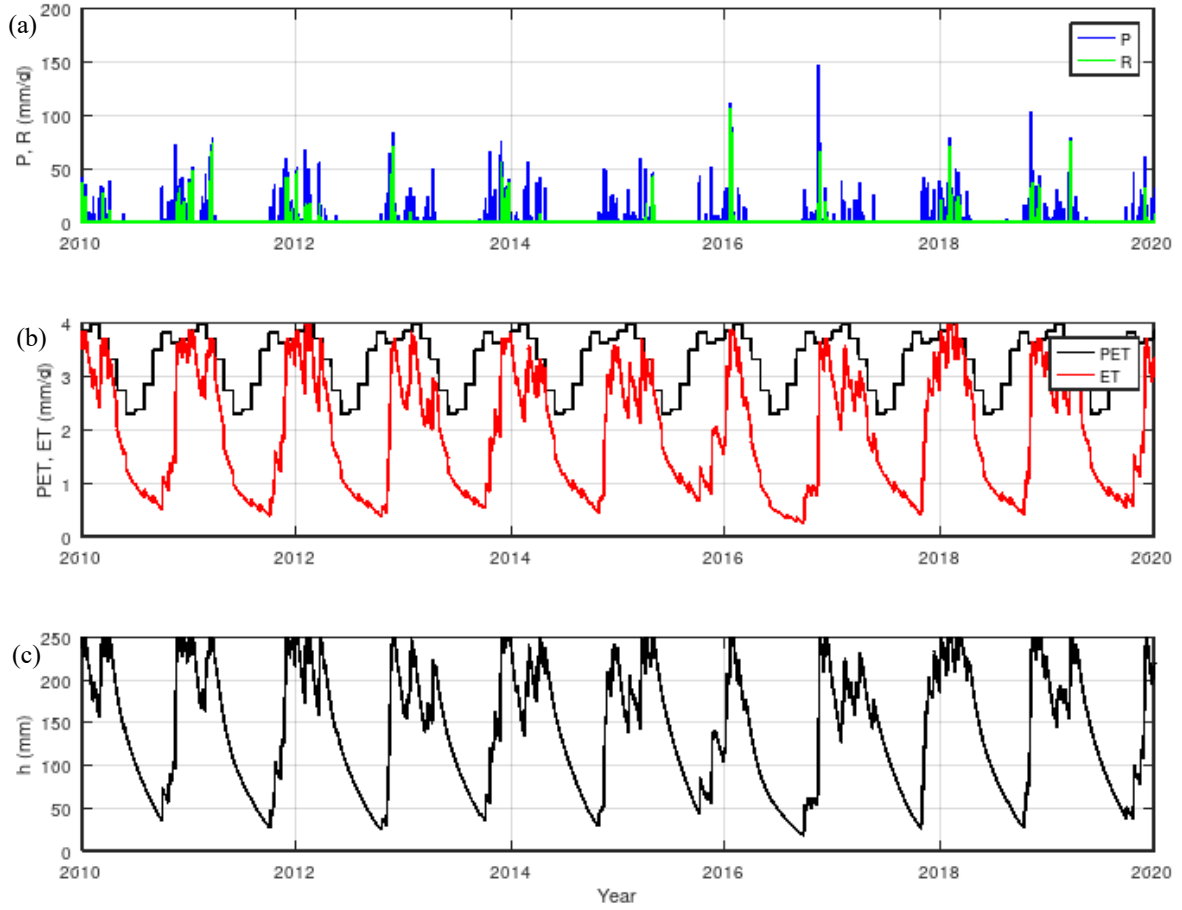


Figure 6. Zoom into Figure 5 for the 10-year interval from 2010 to 2020.

Based on the daily simulation results of Figure 5, we compute annual averages of P , ET and R for a direct comparison (Figure 7). The averages are taken from July of one year to June of the subsequent year, such that the transitions coincide with the dry season of the year and soil water content h is consistently on the well-defined falling limb near 100 mm (e.g., Figure 6). For a negligible variation in h at the transition points in each year, the annual soil water balance simplifies to $R = P - ET$, and more specifically to the approximate relationship

$$R \approx \begin{cases} P - 2 & \text{for } P \geq 2 \\ 0 & \text{for } P < 2 \end{cases} \quad (13)$$

with R and P in mm/day. This is inferred from Figure 7 (red line) demonstrating that $ET \approx 2$ mm/day is a highly accurate ($\pm 10\%$) approximation. The second condition is included to avoid negative values of R , which would correspond to a consumption of groundwater from the saturated zone by ET . Due to the generally deep water tables, this is unreasonable for our field sites, while also consistent with the modeling approach in Section 2.2. The approximate estimates of annual R from Equation 13 (black line) agree well with full simulation results (green line). This demonstrates that the emerging behavior of annual ET being highly constant near 2 mm/day observed from the daily soil water balance simulation allows for this very simple and practical annual recharge estimation method based on annual data of P only. Notably, the relationship of R is not a fraction (percentage) of P , but rather an excess quantity with respect to a constant threshold.

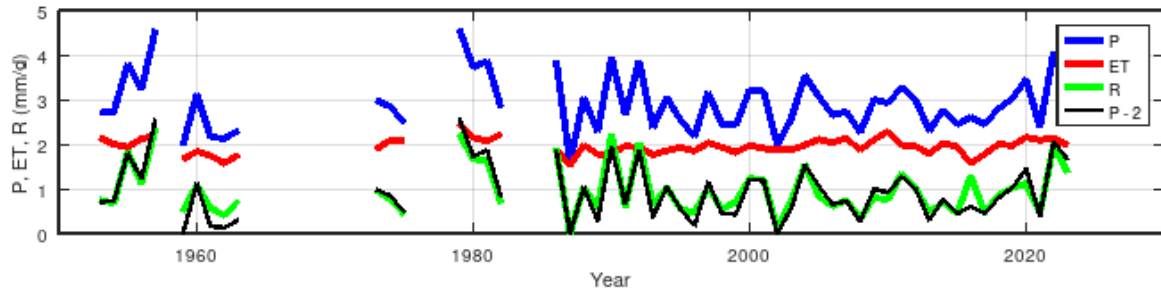


Figure 7. Annual averages from July to June corresponding to simulation results of Figure 5 with gaps due to missing data values in observed P time series. Actual evapotranspiration ET remains consistently close to 2 mm/day, suggesting the very simple and practical relationship $R \approx P - 2$ with $R \geq 0$ (black line; Equation 13) for annual averages of R (green line) in mm/day.

Besides annual averages, the simulated model results may also be represented in terms of averages for each month of the year (Figure 8, bold continuous lines labeled “Simulation continuous”) with corresponding 90% ranges of variability (thin dotted lines labeled “Range (90%)”). Recharge is seen to occur exclusively in the months from November to April with large ranges of variability bounded by zero from below. This means that although recharge is concentrated in this season, there is still a chance that it is zero in one or more of these months, or much larger than the average. From May to October recharge is rigorously zero without any variability at all. In a similar fashion, ET and h present seasonal variabilities peaking in the summer, however, with smaller variability ranges and not reaching zero in the winter months, which is important from an ecological / vegetation perspective.

The representation of Figure 8 also allows for a direct comparison to the analytical estimates of Section 2.3., which we call “Analytical by month” (hereafter AM; Equations 6, 9 and 10) and “Analytical continuous” (hereafter AC; Equations 6, 9 and 10 with Equation 12 for soil water carry-over between months). For recharge, both AM and AC agree well with the full simulation results, except for the month of November, where AM significantly overestimates. This is due to the fact that this method ignores the very low soil moisture content of the preceding months (black line), such that precipitation erroneously starts triggering recharge, instead of first filling up soil water storage. On the other hand, there is a small but consistent underestimation for the months from January to April, which over the whole year contributes to an only slightly larger recharge estimate of 379 mm/year.

In terms of h and ET , the AM approach clearly underestimates during the dry season, which is again because carry-over of soil water from previous months is not accounted for. For these reasons, the AM approach is found to be inappropriate for the study area. In contrast, the AC method remedies exactly this deficiency and achieves significantly improved estimates of R , ET and h throughout the year with a smaller annual recharge estimate of 290 mm/year, however. This underestimation with respect to the simulation is small (and clearly with the 90% variability bounds) but consistent over the months and may be due to deviations from the analytical model assumptions (e.g., deviations of the historical data from the assumptions of Poisson distributed precipitation days and exponentially distributed precipitation intensities).

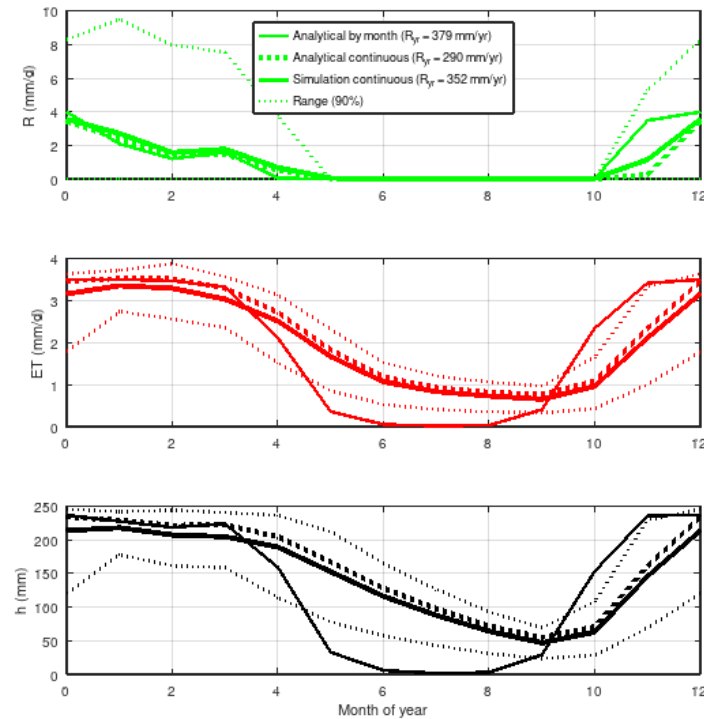


Figure 8. Comparison of estimates for recharge R (green), actual evapotranspiration ET (red), and soil moisture h (black) from different modeling approaches. “Analytical by month” uses monthly averages of Figure 3 for evaluation of Equations 6, 9 and 10 separately for each month of the year (without soil water carry-over between months; Porporato et al., 2004). “Analytical continuous” is like “Analytical by month”, but with inclusion of Equation 12 to account for soil water carry-over between months (Feng et al., 2015). “Continuous simulation” is based on monthly averages of the daily water balance of Equation 5 as used in Figures 5 and 6. The thin dotted lines represent respective ranges that contain 90% of the simulated monthly values.

The analysis of possible future scenarios is crucial for understanding the sensitivity of groundwater recharge formation to climatic changes (Figure 9). In all of the analyzed scenarios, recharge remains limited to the season from October to April. During the opposite recharge-free period, evapotranspiration continues due to the available soil moisture with a minimum of approximately 50 mm in September. Across all scenarios, the variations in both ET and h remained relatively unaffected throughout the year, averaging approximately 2 mm/day and 150 mm, respectively.

In contrast, the recharge rates vary significantly for individual months as well as in terms of the annual average with respect to the base case of 322 mm/day. This lower base case recharge compared to Figure 8 (352 mm/day) is due to the fact that rainfall time series here are randomly generated based on the statistics of Figure 3 for a direct comparison to the change scenarios, while the actual observed time series are used in Figure 8. For scenarios 1 and 2, which imply a 10% reduction in average precipitation, recharge is reduced most significantly to 248 and 222 mm/year, respectively, i.e., by up to over 30% with respect to the base case. In contrast, scenarios 3 and 4 with internally different rainfall statistics but otherwise constant average precipitation, present a slight increase in recharge to 339 and 353 mm/year, respectively, i.e., by up to almost 10% compared to the base case.

Overall, this indicates that due to the large soil water storage capacity in the study region, groundwater recharge is much more sensitive to changes in the precipitation regime than evapotranspiration and soil water content. As a consequence, this implies that impacts on groundwater availability (saturated water table elevation) may be expected to be more severe

than on land surface vegetation.

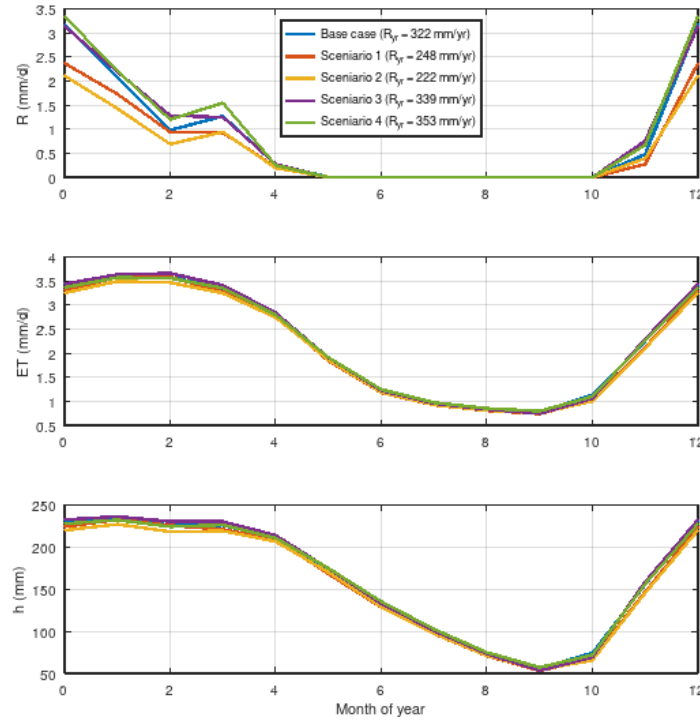


Figure 9. Simulation results for future scenarios. The base case corresponds to Figure 3, while scenario 1 applies a 10% reduction in α , scenario 2 a 10% reduction in λ , scenario 3 a 10% reduction in α with 10% increase in λ , and scenario 4 a 10% increase in α with 10% reduction in λ , all with respect to the base case.

The same approach used to create Figures 3-9 for Gatos station is also applied for the remaining hydrometeorological stations at Arrojado, Arrojolândia, Correntina, and Fazenda Planalto. Based on the strong homogeneity of the soil, climate and native vegetation in the region as well as a lack of more detailed information, we maintain the same critical soil water storage capacity of $h_{cr} = 250$ mm and the time series of PET (Figure 3) for all stations. The corresponding results are available as figures in the online Supplemental Material illustrating that in general, the monthly statistics of P as well as the estimated seasonal variabilities in R , ET and h follow a highly uniform pattern across all five stations and methods applied. In particular, recharge remains completely absent everywhere from May to October. This similarity persists for the future scenarios analyzed and is further corroborated by Figure 4 showing that Equation 11 with $A = 20$ is a reasonable approximation for estimating recharge as a proportion of precipitation in the study area, when soil water carry-over (i.e., seasonality) is neglected.

A spatial trend in the annual mean precipitation is observed, with increasing volumes from east to west, following the altitudinal gradient. This variation is related to the statistical parameters α and λ , for which monthly maps are presented in the Supplementary Material. Average rainfall intensity α shows lower values in the central and eastern regions throughout the year, with highest values concentrated in the west. Daily rainfall probability λ , in turn, displays a seasonal pattern: from February to June, the highest values occur in the western portion, while this pattern reverses in July and August with a relative increase of λ in the central and eastern regions.

The averages of observed precipitation and estimated recharge in mm/year for all stations are 1064 and 352 at Gatos, 927 and 257 at Correntina, 990 and 286 at Arrojado, 1081 and 364

at Arrojoândia, and 1258 and 440 at Fazenda Planalto, with interpolated maps presented in Figure 10. At Gatos and Arrojoândia, recharge accounts for approximately 33% of precipitation. In contrast, Arrojado and Correntina show slightly lower proportions around 28%, while Fazenda Planalto has a slightly higher relative recharge near 35% of precipitation.

These percentages are somewhat higher than 17% adopted by Oliveira et al. (2019) and also than the values obtained at the Gatos station by CPRM (2008), which indicated an annual water surplus equivalent to approximately 24% of the mean annual precipitation. However, the absolute recharge value at Correntina compares well to an independent estimate of 230 mm/year for the Corrente River basin (ANA, 2017) and, most importantly, recharge estimates at Gatos, Correntina and Arrojado agree very well with averages of available river discharge data per unit catchment area of 342, 247 and 316 mm/year, respectively (Chagas et al., 2020).

Note that while the value for Gatos has already been used in Section 2.5 to partially justify the definition of $h_{cr} = 250$ mm, the excellent agreement for Correntina and Arrojado is achieved independently, thus providing confidence in the modeling approach adopted.

Finally, we also consistently observe at all stations (online Supplemental Material) that the simplified relationship $R = P - 2$ mm/day (Equation 13) inferred for Gatos from Figure 7 for estimating annual averages of recharge from annual averages of precipitation is generally applicable. Consequently, we identify this relationship as an accurate and practical candidate for estimating annual recharge rates in the study region and, pending future verification not provided here, for the entire Urucuia aquifer. Being a relationship of the threshold (2 mm/day) exceedance type, it inherently suggests disqualifying any alternative percentage-based approaches, which would still estimate some amount of recharge for $P \leq 2$ mm/day on average over a year.

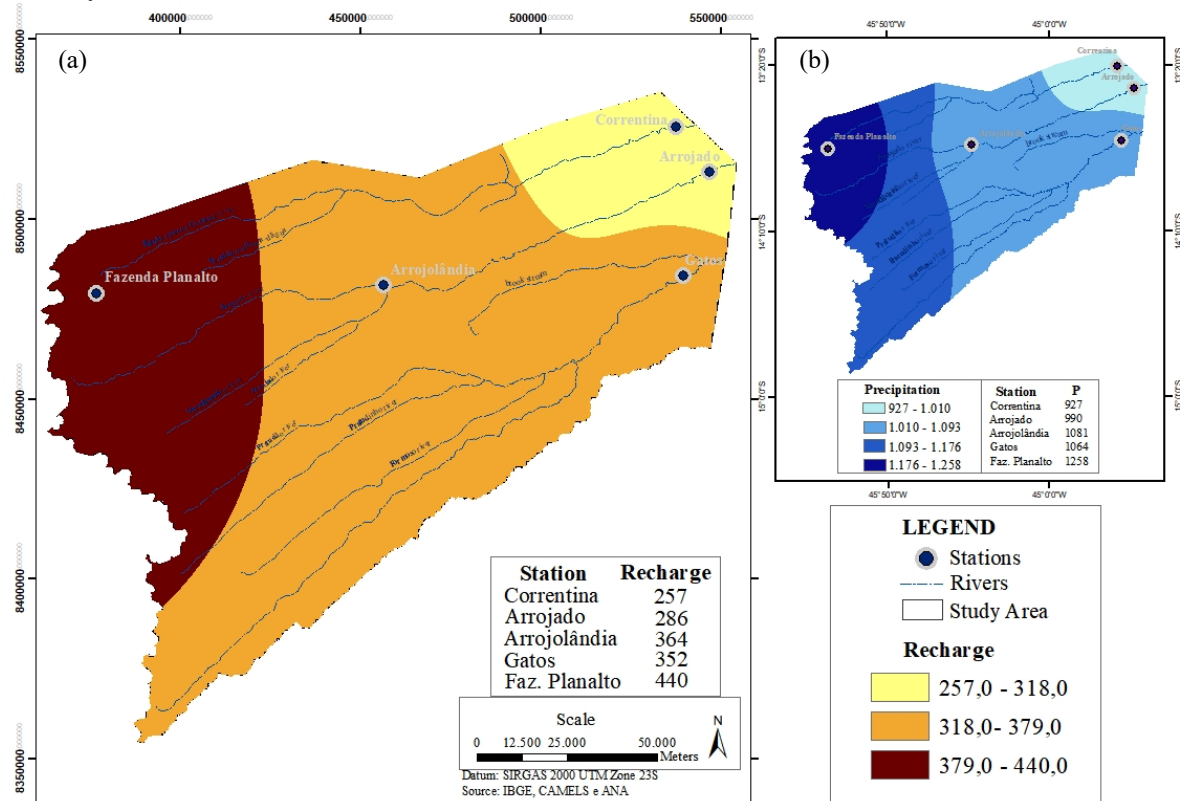


Figure 10. Maps of average (a) simulated average recharge R and (b) observed precipitation P , both in mm/year. Spatial interpolation between stations by inverse distance weighting (IDW).

4. CONCLUSIONS

The statistical analysis of long-term precipitation data from five stations in the Corrente River basin of the UAS reveals that the known pronounced seasonality in rainfall is due to synchronous seasonality in both daily precipitation probability and mean intensity. Groundwater recharge as deep percolation from the soil zone is closely linked to this climatic seasonality, being higher during the rainy season and practically null during dry periods, demonstrating a strong correlation with soil water availability. The estimated average recharge rates for different hydrometeorological stations range between 257 mm/year and 440 mm/year, which is consistent with previous estimates for the region and observed long-term average river discharges per unit catchment area. The spatial mapping highlights the western headwater region around Fazenda Planalto station as the area with the highest precipitation and recharge rates, making it a strategic zone for the Urucuia Aquifer's water supply.

The estimated average recharge rates represent approximately 28% to 35% of the average precipitation at each station. However, detailed soil water balance simulations also reveal that annual (from July to June) actual evapotranspiration remains highly steady near 2 mm/day. This suggests the simple relationship $R = P - 2$ (in mm/day with $R \geq 0$; Equation 13) as a practical way to estimate annual recharge directly and accurately from annual precipitation, implying that a quantification by percentage of annual precipitation is inappropriate and not recommended. Similarly, we observe that considering individual months of a year in isolation leads to erroneous results for soil water content, evapotranspiration and recharge, meaning that the pronounced seasonality and soil water carry-over on a seasonal scale cannot be neglected in the Urucuia region.

The stochastic simulation of future scenarios suggests that a decrease in average precipitation due to a decrease in rainfall frequency or intensity leads to an over-proportional decrease in recharge. This strong sensitivity is contrasted by a relative robustness of soil water content and evapotranspiration, which may be attributed to the large rooting depth and associated soil water storage capacity. In overarching terms, this indicates that possibly reduced precipitation rates, as projected for the region, will more significantly impact the deep saturated groundwater resources rather than the soil zone and vegetation.

In summary, this study provides essential methods and information for planning and managing water resources, being fundamental for the sustainable development of the region. With the growing pressure from irrigated agriculture and the impacts of climate change, it is crucial to adopt conservation strategies, promoting sustainable water use and minimizing the environmental effects of agricultural expansion. Further research and the implementation of public policies are essential to ensure a sustainable future of the Urucuia Aquifer System. Related to the present work in particular, future investigations could focus on extensions to the remaining portions of the Urucuia region, including agricultural areas with and without irrigation, different rooting depth (crop types) and / or potential evapotranspiration regimes.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

E.C. Oliveira Souza thanks the Brazilian Federal Agency for Support and Evaluation of Graduate Education (CAPES) for financial support through scholarship no. 88887.659696/2021-00. L.R. Bastos Leal and H. Klammler thank the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the support provided through grants no. 312977/2021-2 and no. 311333/2021-4, respectively.

6. REFERENCES

- ADHIKARI, R. K.; YILMAZ, A. G.; MAINALI, B.; DYSON, P.; IMTEAZ, M. A. Methods of Groundwater Recharge Estimation under Climate Change: A Review. **Sustainability**, v. 14, n. 23, p. 15619, 2022. <https://doi.org/10.3390/su142315619>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Brasília, 2024. Available at: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia e proposição de modelo de gestão integrada e compartilhada: Volume 2 – Hidrogeologia dos sistemas aquíferos Urucuia e Areado. Brasília, 2017. 41-53p. Available at: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/b26a6c8e-affa-4766-8cb7-ccdaadb3453/attachments/Volume_2.pdf
- BECKE, A. L.; SOLÓRZANO-RIVAS, S. C.; WERNER, A. D. The watertable fluctuation method of recharge estimation: A review. **Advances in Water Resources**, v. 189, p. 104635, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104635>.
- BOTTER, G.; PORPORATO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I.; RINALDO, A. Basin-scale soil moisture dynamics and the probabilistic characterization of carrier hydrologic flows: Slow, leaching-prone components of the hydrologic response. **Water Resources Research**, v. 43, n. 2, 2007. doi:10.1029/2006WR005043.
- CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, p. 269-282, set. 1997. doi: 10.25249/0375-7536.1997269282
- CANADELL, J.; JACKSON, R. B.; EHLERINGER, J. R.; MOONEY, H. A.; SALA, O. E.; SCHULZE, E.-D. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. **Oecologia**, Berlin, v. 108, p. 583–595, 1996. doi: 10.1007/BF00329030.
- CHAGAS, V. B. P. et al. CAMELS-BR: hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil. **Earth System Science Data**, [S.l.], v. 12, p. 2075–2096, 2020. doi: 10.5194/essd-12-2075-2020.
- COELHO, Luiza. Ninguém vai morrer de sede nas margens do rio. ep. 6, temp. 7. In: Prato Cheio – Podcast: O Joio e o Trigo. Correntina, 05 nov. 2024. Produção: O Joio e o Trigo. Available at: <https://ojoioeotrigo.com.br/podcast/prato-cheio>.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil; UFBA - Universidade Federal da Bahia. Caracterização hidroquímica e de vulnerabilidade: Meta D – Hidrogeologia da Bacia Sedimentar do Urucuia: Bacias Hidrográficas dos Rios Arrojado e Formoso. Salvador: Rede Cooperativa de Pesquisa – Comportamento das Bacias Sedimentares da Região Semi-Árida do Nordeste Brasileiro, out. 2007.
- EILERS, V. H. M. Estimativa de recarga de águas subterrâneas utilizando o método do balanço hídrico. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, Belo Horizonte. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004. p. 1-19.
- FENG, X.; PORPORATO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Stochastic soil water balance under

- seasonal climates. **Proceedings of the Royal Society A**, v. 471, p. 20140623, 2015.
- GASPAR, M. T. P. **Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização regional e propostas de gestão**. 2006, 156f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G. O Sistema Aquífero Urucuia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 4, suplemento, p. 1068-1078, dez. 2007.
- GEBRU, A. B.; GEBREYOHANNE, T.; KAHSAY, G. H.; GRUM, B. The dilemma of choosing appropriate groundwater recharge estimation methods in Ethiopia: A systematic review of the existing methods. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 27, p. 101358, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101358>.
- HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.; SUSKO MARCELLINI, S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo / Instituto de Geociências, 2019. 158 p.
- IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. In: PÖRTNER, H.-O. et al. (org.). Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter 4 – Water. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-4/>
- KUMAR, P. J. S.; SCHNEIDER, M.; ELANGO, L. The state-of-the-art estimation of groundwater recharge and water balance with a special emphasis on India: A critical review. **Sustainability**, v. 14, n. 1, 340 p, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14010340>.
- LOBO-FERREIRA, J. P.; LEITÃO, T. E.; OLIVEIRA, M. M. Portugal's river basin management plans: groundwater innovative methodologies, diagnosis, and objectives. **Environmental Earth Sciences**, 2014. doi: 10.1007/s12665-014-3462-8.
- MIRANDA, E. E.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. Proposta de delimitação territorial do MATOPIBA. Nota Técnica 1, GITE – Grupo de Inteligência Territorial Estratégia, Campinas, SP: Embrapa, 2014. 18 p. Available at: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/139202/1/NT1-DelimitacaoMatopiba.pdf>.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. Projeções do Agronegócio: Brasil 2017/18 a 2027/28 projeções de longo prazo. Brasília: MAPA/ACE, 2018. 112 p. Available at: http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/banner_site-03-03-1.png/@download/file/PROJEC%CC%A7O%CC%83ES%20DO%20AGRONEGO%CC%81CIO%202018.pdf.
- OLIVEIRA, R. S.; BEZERRA, L.; DAVIDSON, E. A.; PINTO, F.; KLINK, C. A.; NEPSTAD, D. C.; MOREIRA, A. Deep root function in soil water dynamics in Cerrado savannas of central Brazil. **Functional Ecology**, v. 19, p. 574-581, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.01003.x>.
- OLIVEIRA, L. T.; KLAMMLER, H.; LEAL, L. R. B.; GRISSOLIA, E. M. Analysis of the long-term effects of groundwater extraction on the water balance in part of the Urucuia

- Aquifer System in Bahia – Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 6, e2390, 2019. doi: 10.4136/ambi-agua.2390.
- OLIVEIRA, L. T.; KLAMMLER, H.; LEAL, L. R. B.; GRISSOLIA, E. M. Balanço hídrico transitório do aquífero Urucuia meridional na Bahia. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 3, p. 325-339, 2020. doi: 10.14295/ras.v34i3.29915.
- OLIVEIRA, S. D. M. Conflitos pela água no Oeste da Bahia: por uma abordagem ontológica dos conflitos socioambientais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOCIOLOGIA, Belém. Anais do 20º Congresso Brasileiro de Sociologia. Belém: Universidade Federal do Pará, 2021. p. 1-23.
- PEREIRA, B. H. F. **Projeções de recarga hídrica para o Sistema Aquífero Urucuia (Bahia) no período 2041-2060**. 2021, 88f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.
- POLIZEL, S. P. et al. Land use changes and compliance with environmental legislation in the MATOPIBA region of Brazil. **Land Use Policy**, v. 111, p. 105713, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105713>.
- PONTES, L. M.; COELHO, G.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; OLIVEIRA, G. C.; VIOLA, M. R. Avaliação de modelo de balanço hídrico com base na estimativa da recarga potencial. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 11, n. 4, p. 915–928, 2016. doi: 10.4136/ambi-agua.1856.
- PORPORATO, A.; DALY, E.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Soil water balance and ecosystem response to climate change. **The American Naturalist**, v. 164, n. 5, p. 625-632, 2004.
- POUSA, R.; COSTA, M. H.; PIMENTA, F. M.; FONTES, V. C.; BRITO, V. F. A.; CASTRO, M. Climate Change and Intense Irrigation Growth in Western Bahia, Brazil: The Urgent Need for Hydroclimatic Monitoring. **Water**, v. 11, n. 933, p. 1-21, 2019.
- RAWITSCHER, F. K.; FERRI, M. G.; RACHID, M. Profundidade dos solos e vegetação em campos cerrados do Brasil Meridional. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 15, p. 267-294, 1943.
- SCANLON, B.; HEALY, R.; COOK, P. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 1, p. 18-39, 2002.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948. <https://doi.org/10.2307/210739>
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Centerton, New Jersey: Drexel Institute of Technology, **Laboratory of Climatology**, v. VIII, n. 1, 1955.
- TOUHAMI, I.; ANDREU, J. M.; CHIRINO, E.; SÁNCHEZ, J. R.; PULIDO-BOSCH, A.; MARTÍNEZ-SANTOS, P.; MOUTAHIR, H.; BELLOT, J. Comparative performance of soil water balance models in computing semi-arid aquifer recharge. **Hydrological Sciences Journal**, Abingdon, v. 59, n. 1, p. 193–203, 2014. doi: 10.1080/02626667.2013.802094.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **Estudo do potencial hídrico da Região Oeste da Bahia: quantificação e monitoramento da disponibilidade dos recursos do Aquífero**

Urucuia e superficiais nas bacias dos rios Grande, Corrente e Carinhanha. Relatório técnico final. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/382184107_Estudo_do_Potencial_Hidrico_da_Regiao_Oeste_da_Bahia_Quantificacao_e_Monitoramento_da_Disponibilidade_dos_Recursos_do_Aquifero_Urucuia_e_Superficiais_nas_Bacias_dos_rios_Grande_Corrente_e_Carinhanha

CAPÍTULO 3

CONCLUSÕES

A investigação sobre a recarga do Sistema Aquífero Urucuia (SAU) apresentada nesta dissertação, reforça a importância de compreender os processos que controlam a disponibilidade de água subterrânea em regiões marcadas por intensa atividade agrícola e alta variabilidade climática. A aplicação conjunta de modelos determinísticos e estocásticos de balanço hídrico do solo mostrou-se eficaz para caracterizar a dinâmica da recarga na região oeste da Bahia, permitindo capturar tanto os padrões médios quanto as sensibilidades associadas às mudanças no regime pluviométrico.

A abordagem metodológica adotada possibilitou uma avaliação integrada entre dados observacionais e simulações estocásticas de cenários futuros, revelando que a recarga não ocorre de forma contínua, mas sim em eventos concentrados durante a estação chuvosa. Essa dinâmica evidencia que os primeiros episódios de precipitação não resultam necessariamente em recarga direta, mas atuam na reposição da umidade do solo, condição prévia para que os eventos subsequentes superem a capacidade crítica e gerem percolação efetiva.

A porção ocidental da área de estudo, próxima à estação Fazenda Planalto, foi identificada como a zona com maior potencial de recarga e, portanto, estratégica para a sustentabilidade hídrica do SAU. Além disso, observou-se uma consistência marcante entre os valores simulados e os dados observados de vazão fluvial por unidade de área de drenagem, conferindo maior confiabilidade ao modelo adotado.

A análise também identificou que a evapotranspiração real apresenta baixa variabilidade interanual, com valores médios em torno de 2 mm/dia ao longo do ciclo hidrológico. A partir dessa constatação, propõe-se a relação empírica $R = P - 2$, como uma estimativa prática e acurada da recarga anual com base apenas na precipitação média.

A simulação de cenários climáticos futuros revelou a sensibilidade da recarga frente às mudanças nos regimes de precipitação, indicando que reduções mesmo modestas na intensidade das chuvas podem levar a quedas na recarga. Tal comportamento, contrastado com a relativa estabilidade da evapotranspiração real e do teor de umidade do solo, destaca a vulnerabilidade dos recursos subterrâneos diante de cenários de alteração climática, com implicações diretas para a sustentabilidade das atividades agrícolas e para a manutenção dos fluxos de base nos rios da região.

Dessa forma, esta dissertação oferece uma contribuição metodológica relevante para o planejamento hídrico no contexto do SAU, especialmente em um cenário de crescente demanda agrícola e mudanças climáticas. Os resultados aqui apresentados fortalecem a base científica acerca da recarga para esta região, de modo que investigações futuras podem estender essa abordagem a outras áreas do Urucuia, explorando variações no uso do solo, profundidade radicular e regimes diferenciados de evapotranspiração, aprofundando ainda mais a compreensão regional dos processos de recarga.

APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS CO-AUTORES

A autoria do presente artigo reflete a contribuição efetiva de cada participante na elaboração do trabalho. A autora principal, é mestranda e foi responsável pelo desenvolvimento da pesquisa. O segundo autor, Harald Klammler, contribuiu substancialmente com a formulação e implementação do modelo de balanço hídrico estocástico, além de colaborar na estruturação matemática das equações aplicadas. O terceiro autor, é o orientador, dr. Luíz Rogério Bastos Leal, atuou na concepção do projeto e supervisão geral do trabalho, o que fundamenta a inclusão de ambos como coautores do artigo.

APÊNDICE B – SUPPLEMENTAL MATERIAL

PROBABILISTIC ESTIMATION OF RECHARGE AND ITS SENSITIVITY TO CHANGING PRECIPITATION REGIMES FOR THE URUCUIA AQUIFER, BRAZIL

Ellen Cristina Oliveira Souza¹; Harald Klammler¹; Luíz Rogério Bastos Leal¹

¹ Institute of Geosciences, Federal University of Bahia (UFBA), Ondina Campus, Avenida
Barão de Jeremoabo, s/n, ZIP 40050-090, Salvador, BA, Brazil.

E-mail: ellen.cristina@ufba.br, hklammler@ufba.br, lrogerio@ufba.br

CONTENT

Figures S1-S28: Results of Figures 2, 3, 5, 6, 7, 8 and 9 of the main text for the other stations at Arrojado, Arrojolândia, Correntina and Fazenda Planalto (see Figure 1).

Figures S29-S32: Monthly maps of the study area for precipitation P , probability of rainy days λ , average rainfall intensity on rainy days α , and estimated recharge R .

ARROJADO STATION

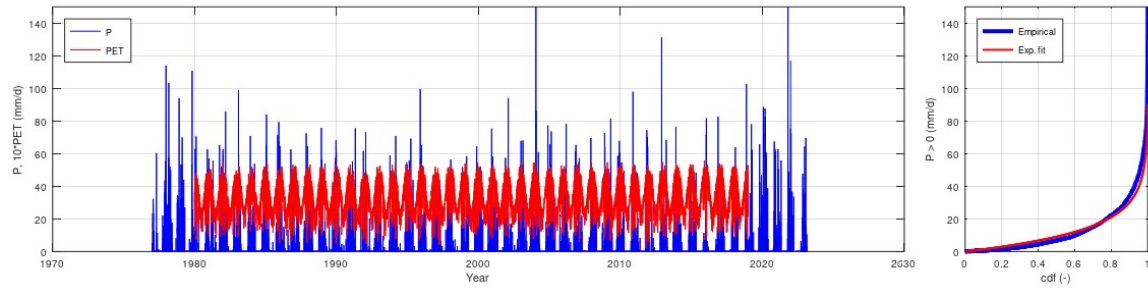


Figure S1. Same as Figure 2, but for Arrojado station.

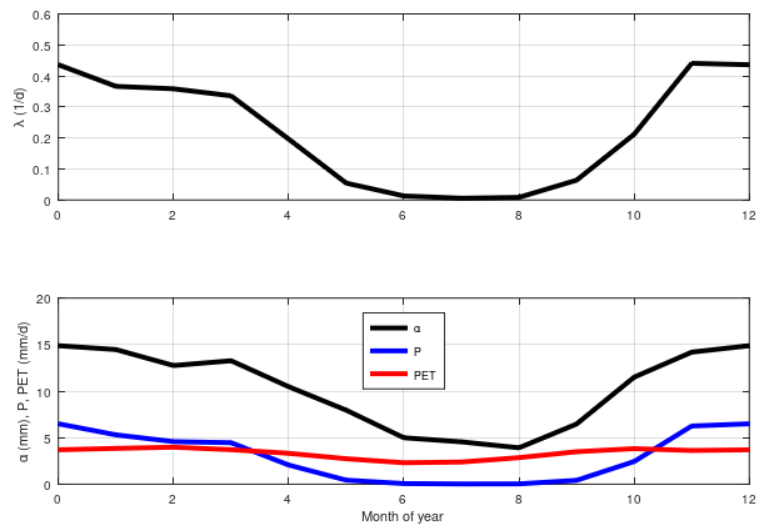


Figure S2. Same as Figure 3, but for Arrojado station.

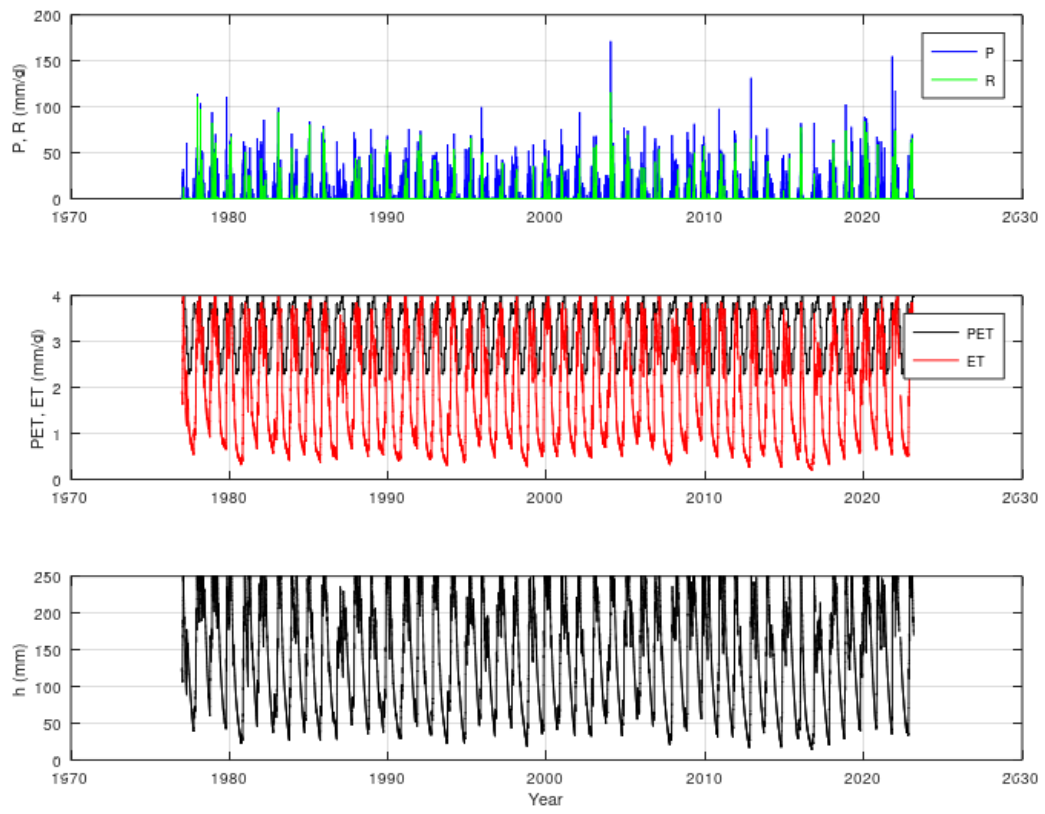


Figure S3. Same as Figure 5, but for Arrojado station.

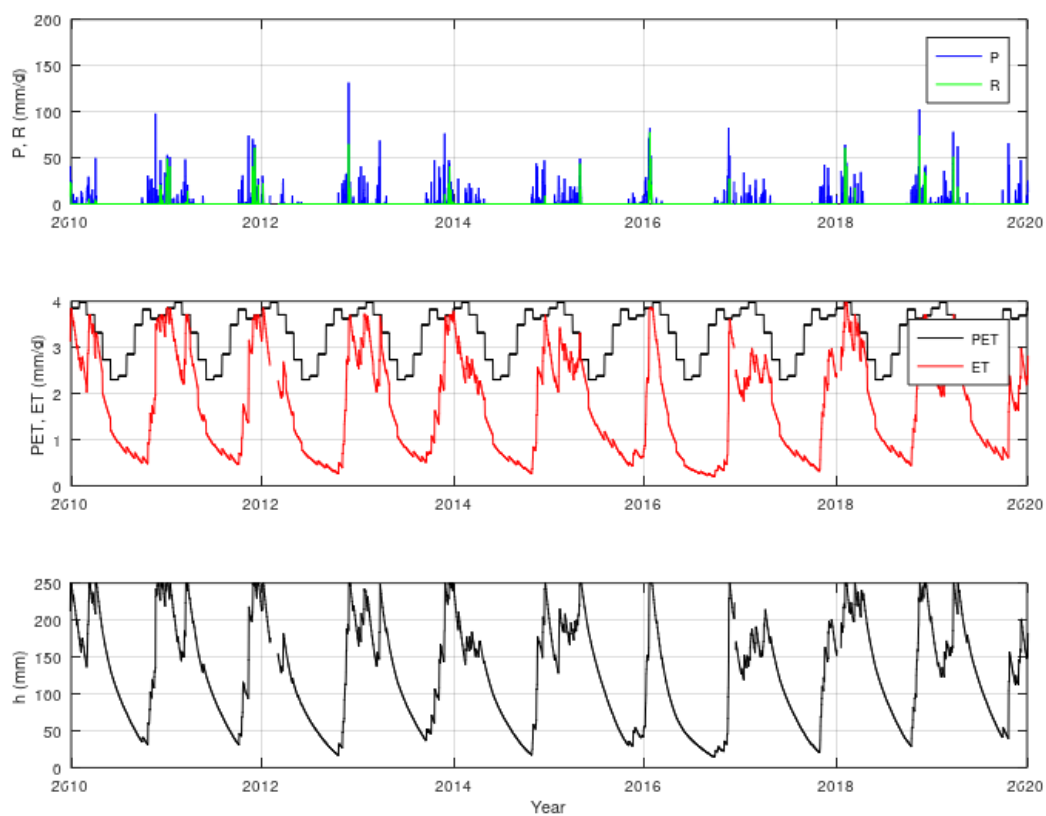


Figure S4. Same as Figure 6, but for Arrojado station.

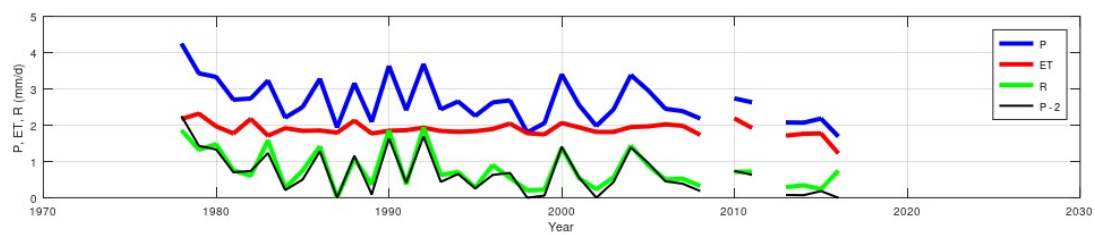


Figure S5. Same as Figure 7, but for Arrojado station.

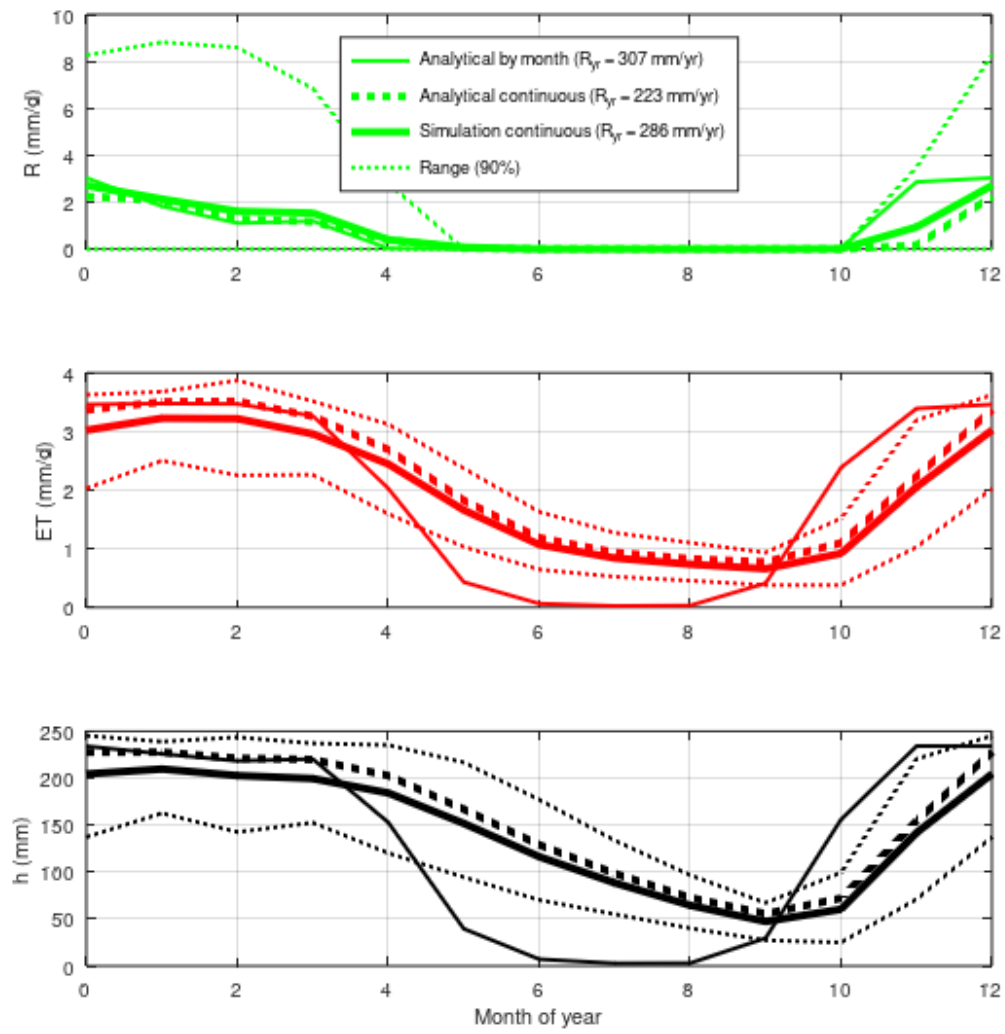


Figure S6. Same as Figure 8, but for Arrojado station.

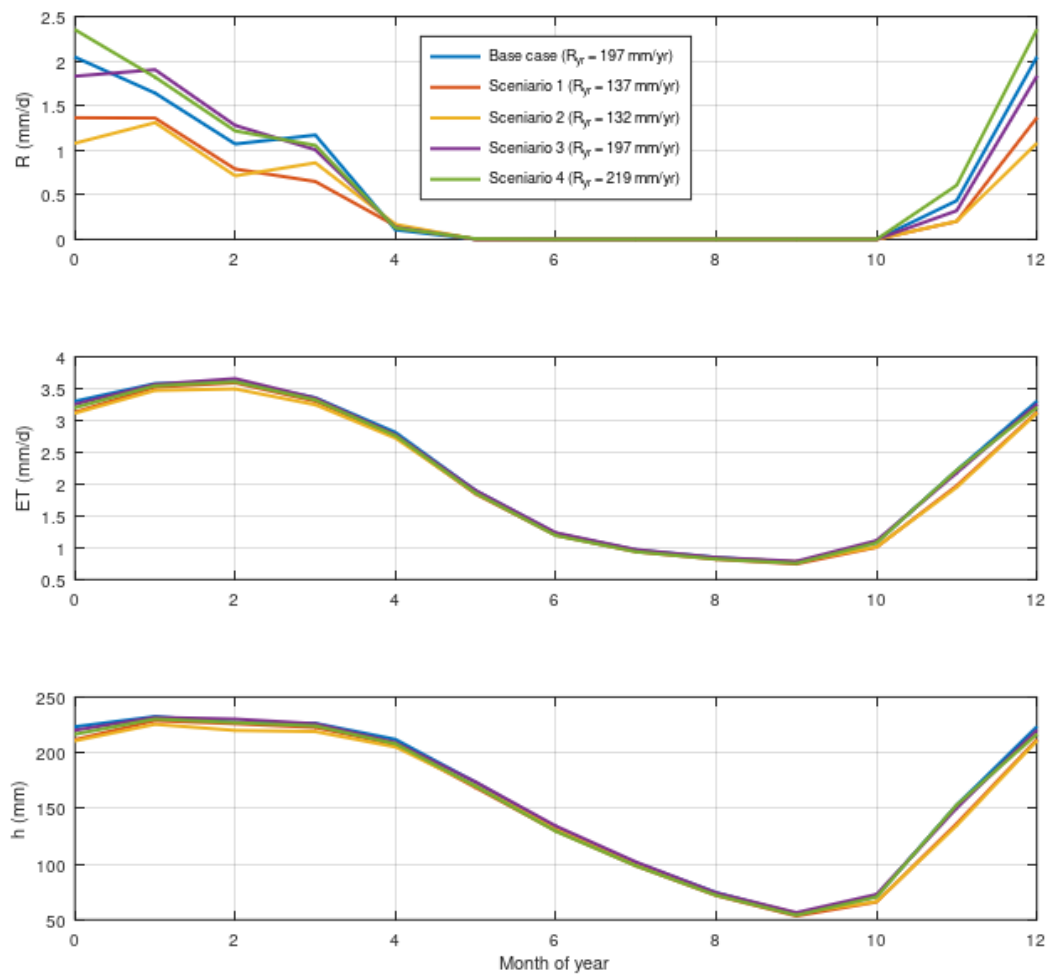


Figure S7. Same as Figure 9, but for Arrojado station.

ARROJOLÂNDIA STATION

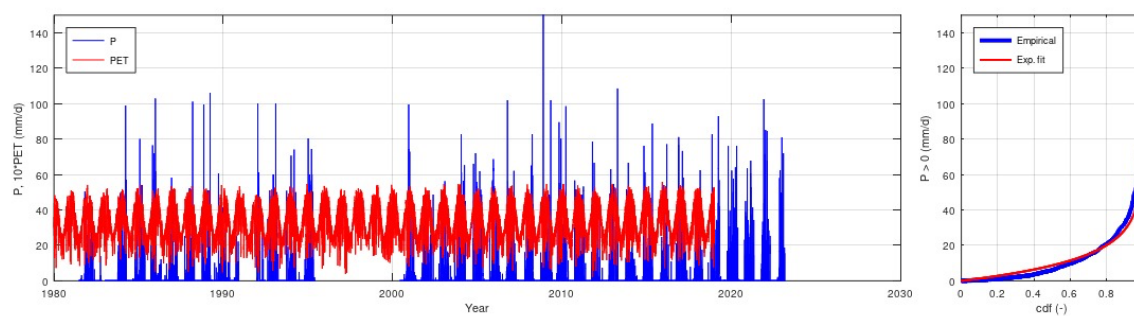


Figure S8. Same as Figure 2, but for Arrojolândia station.

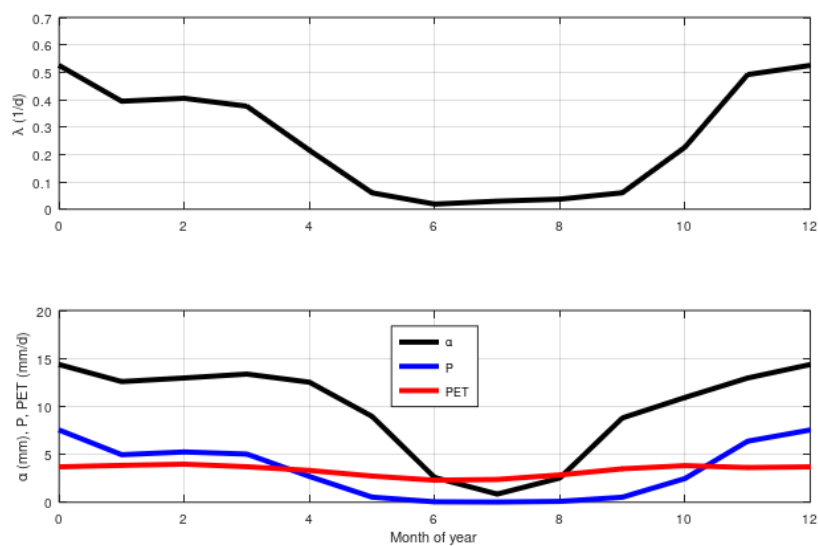


Figure S9. Same as Figure 3, but for Arrojolândia station.

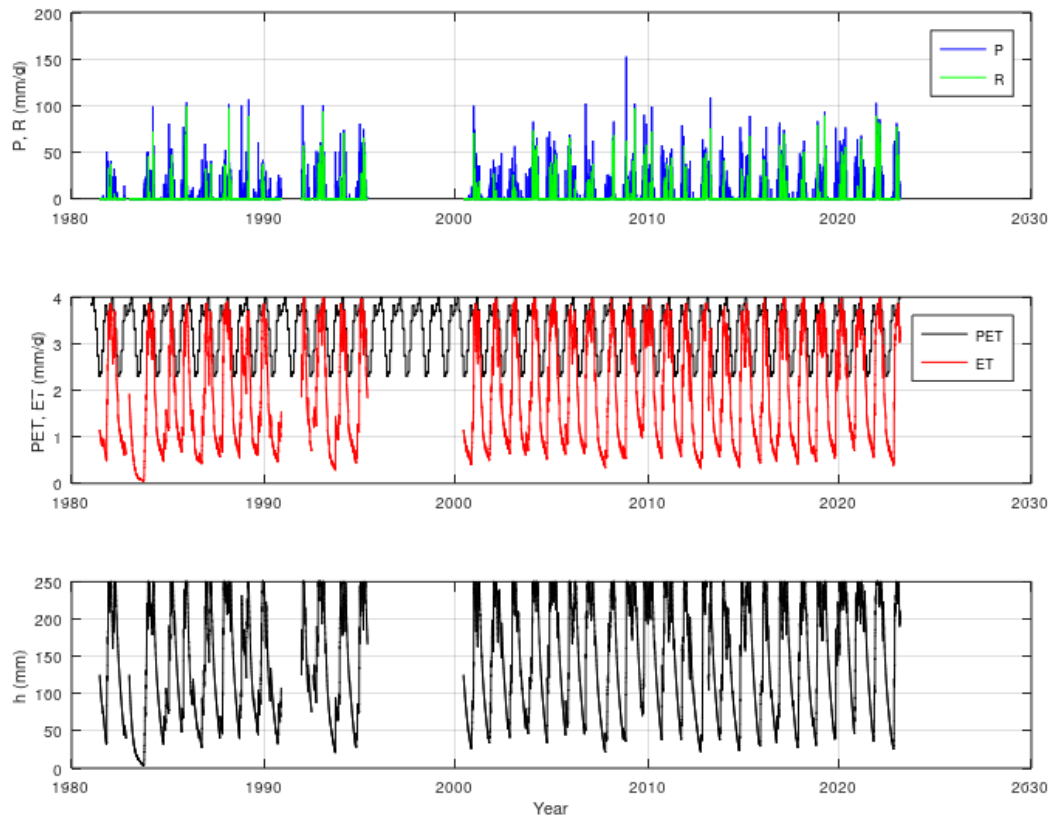


Figure S10. Same as Figure 5, but for Arrojolândia station.

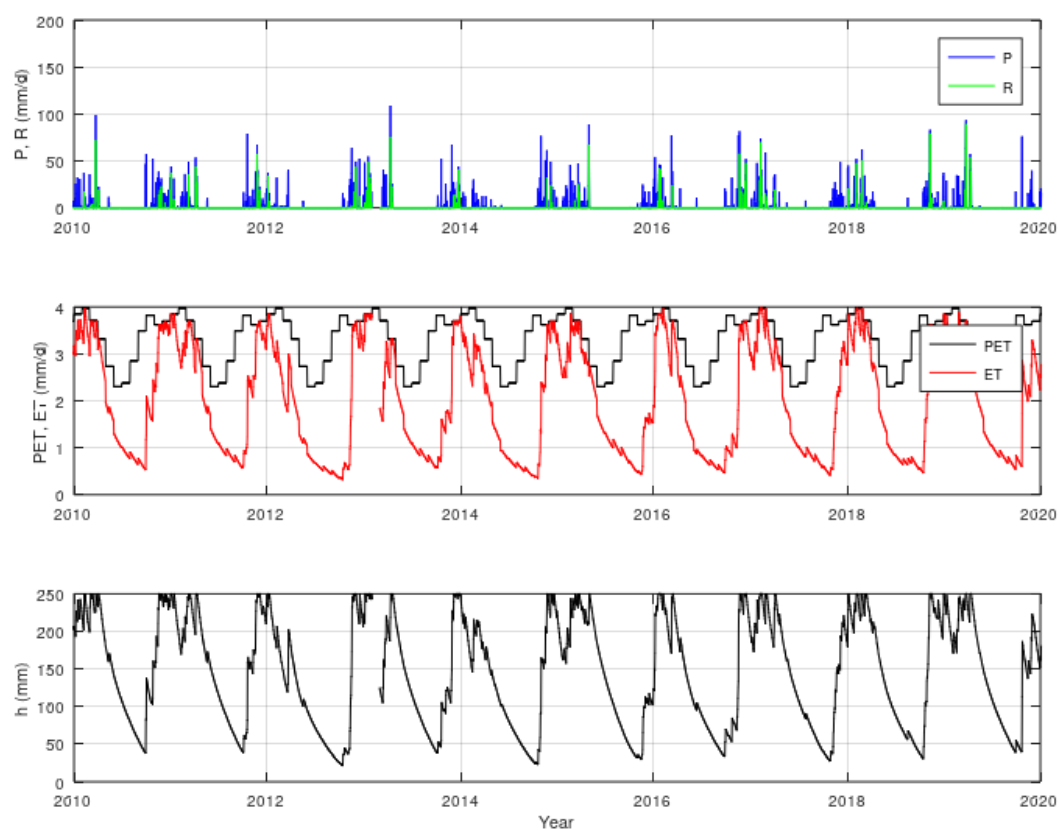


Figure S11. Same as Figure 6, but for Arrojolândia station.

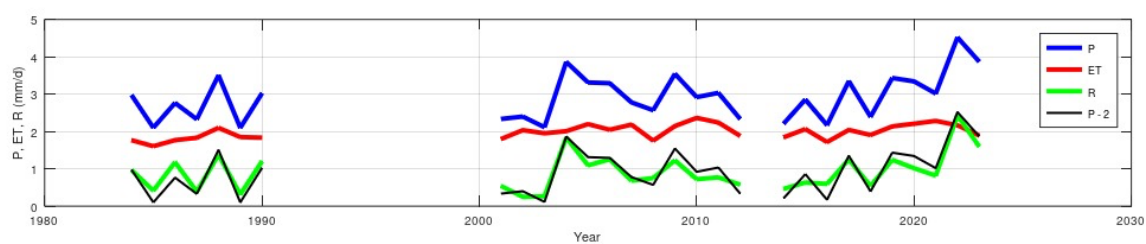


Figure S12. Same as Figure 7, but for Arrojolândia station.

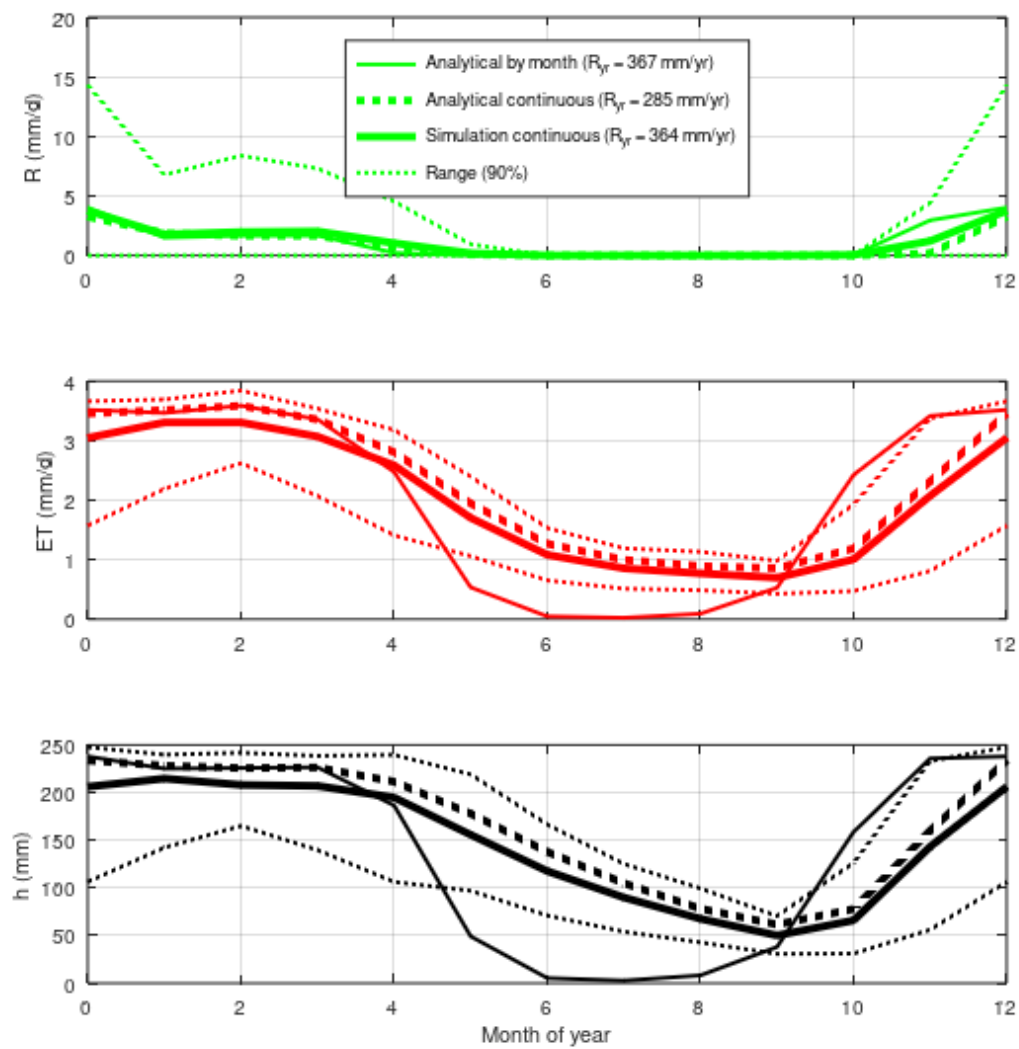


Figure S13. Same as Figure 8, but for Arrojolândia station.

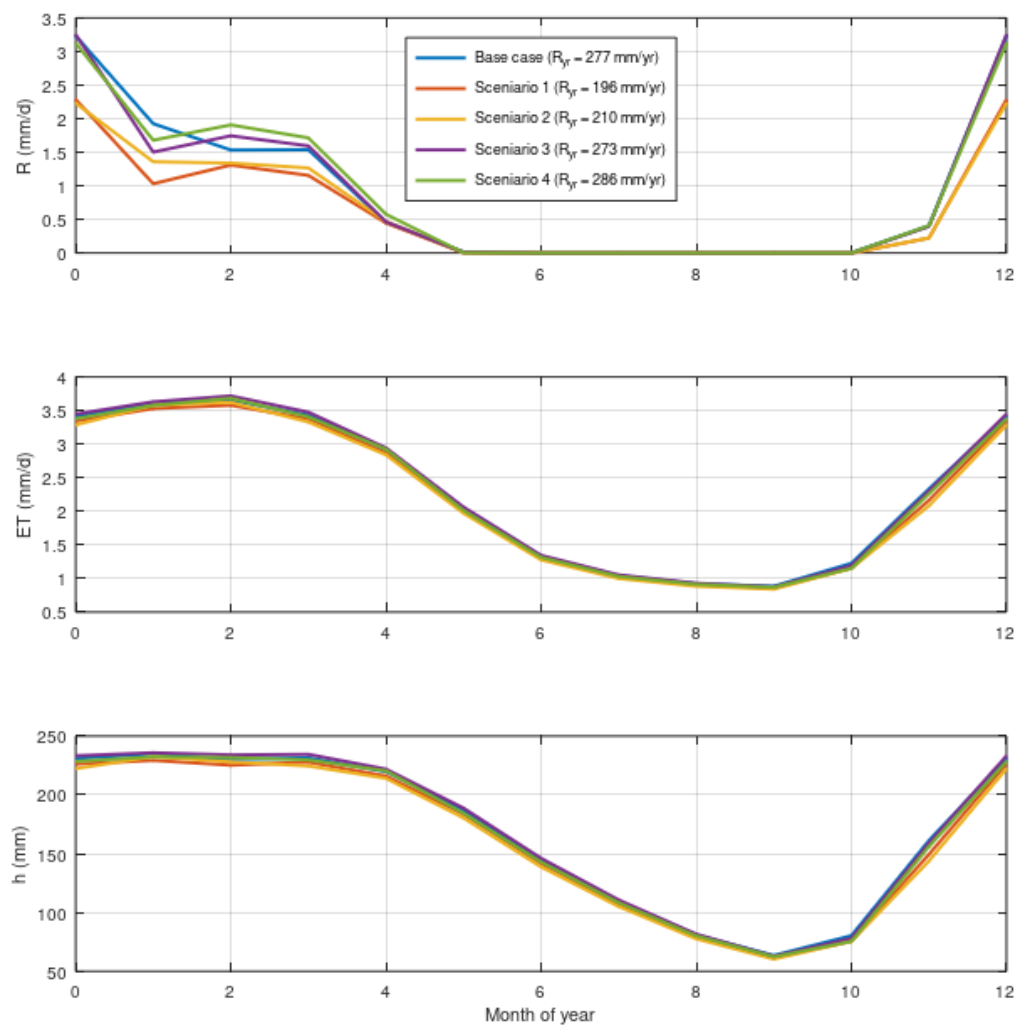


Figure S14. Same as Figure 9, but for Arrojolândia station.

CORRENTINA STATION

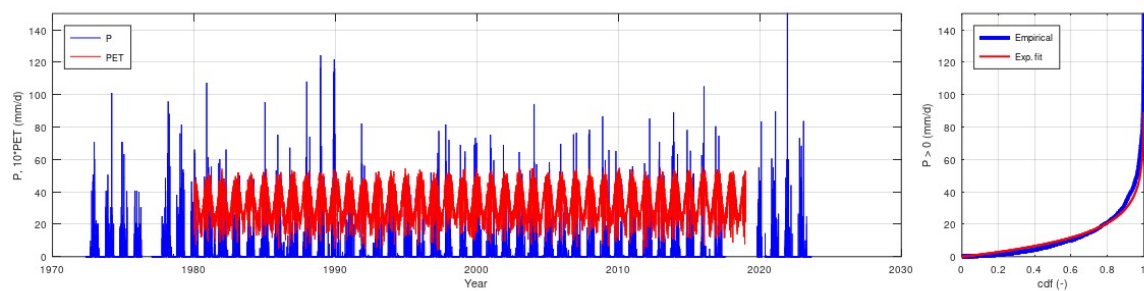


Figure S15. Same as Figure 2, but for Correntina station.

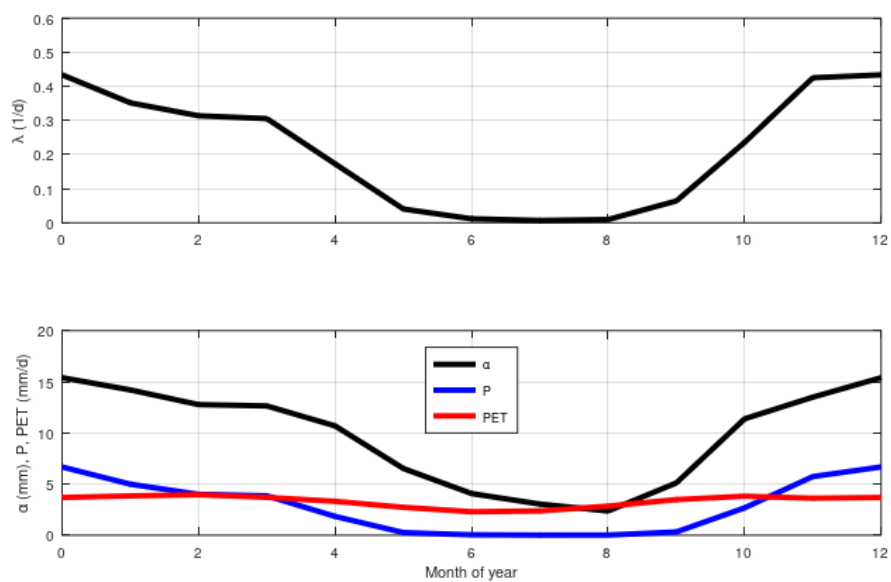


Figure S16. Same as Figure 3, but for Correntina station.

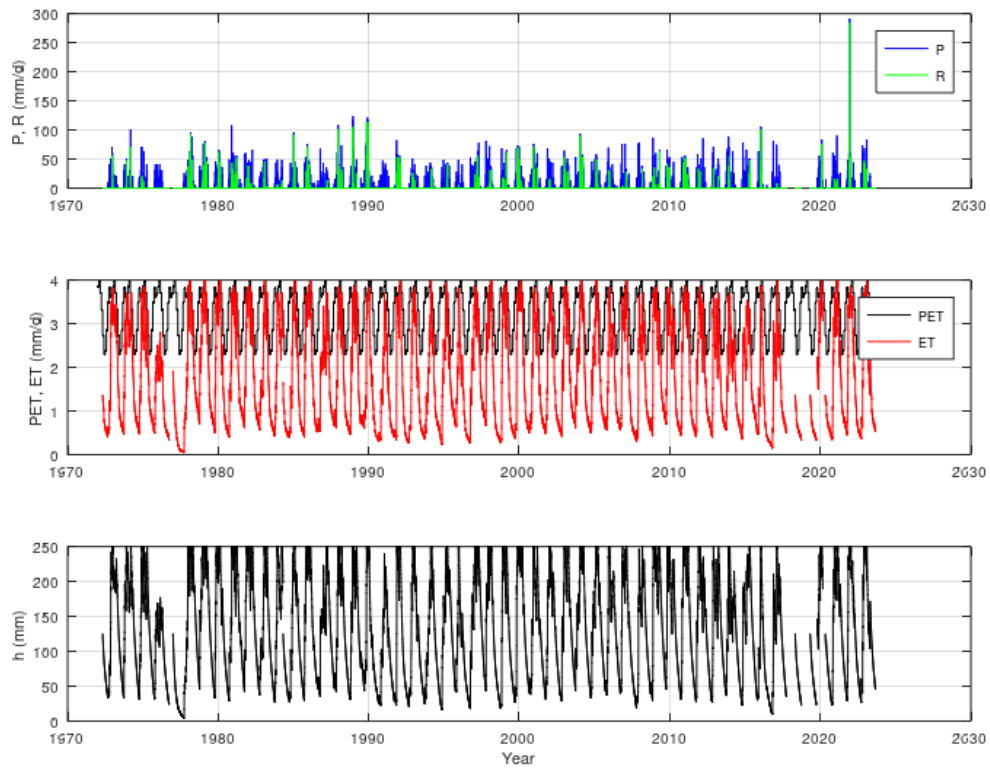


Figure S17. Same as Figure 5, but for Correntina station.

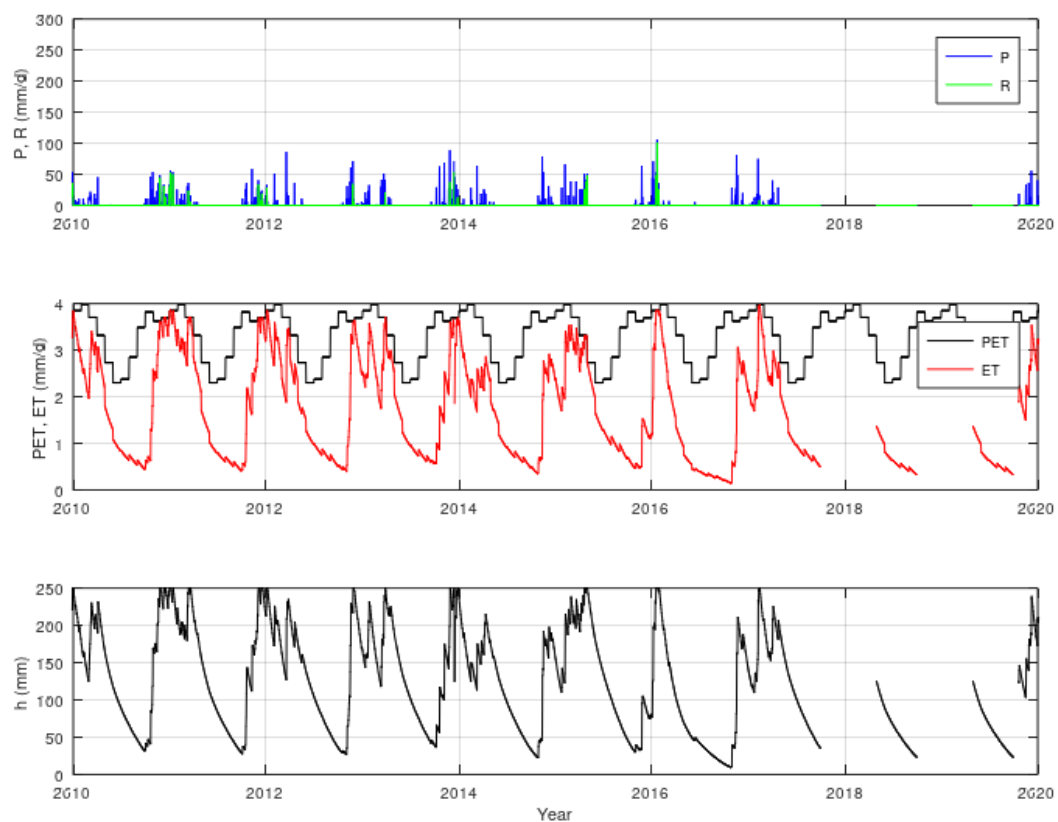


Figure S18. Same as Figure 6, but for Correntina station.

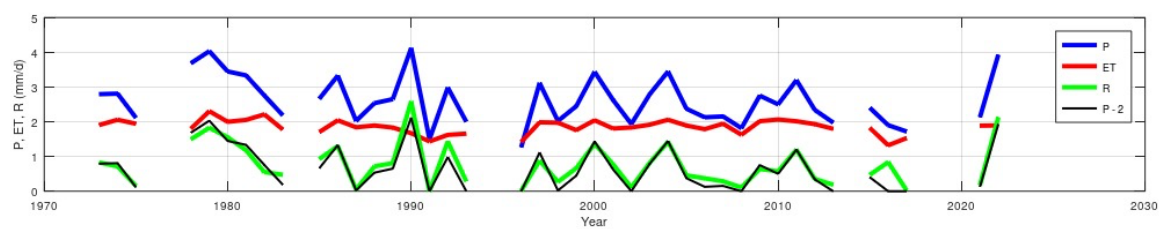


Figure S19. Same as Figure 7, but for Correntina station.

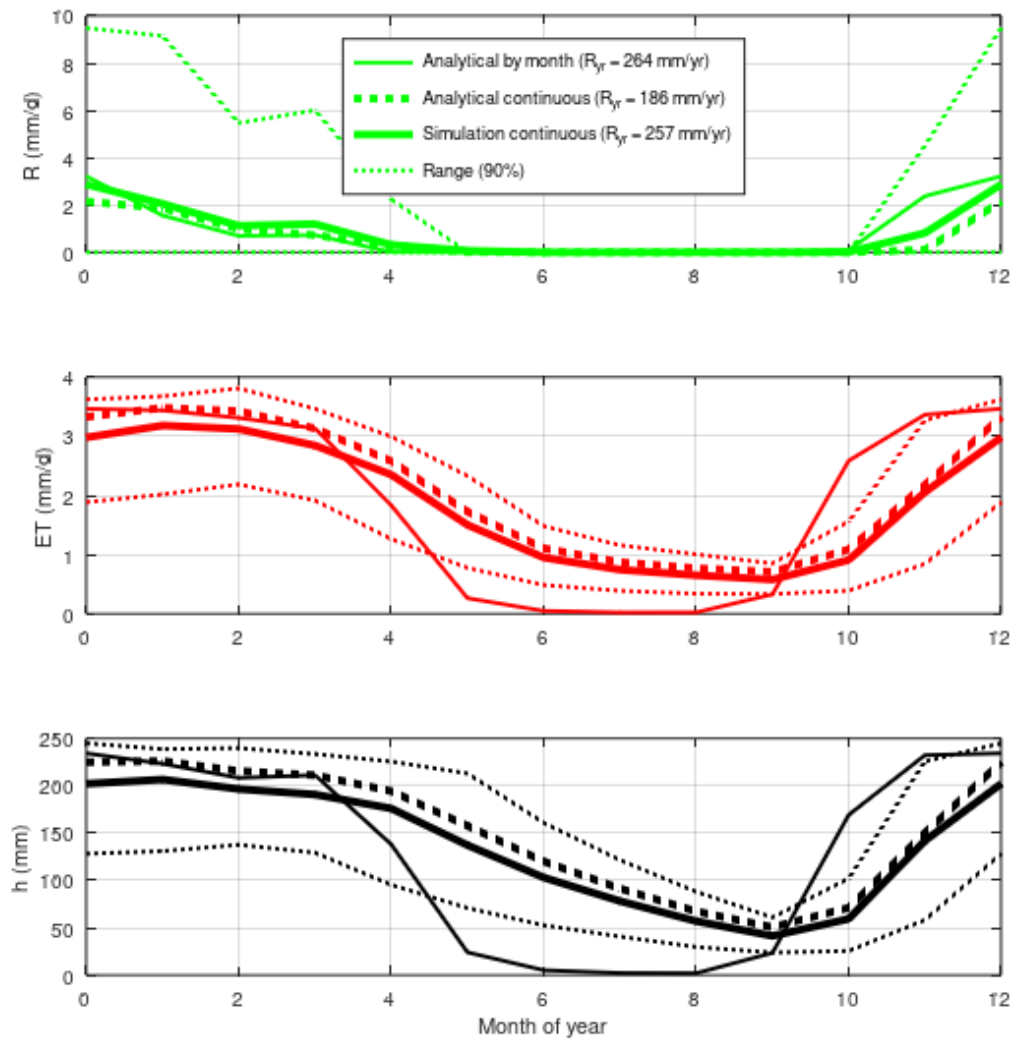


Figure S20. Same as Figure 8, but for Correntina station.

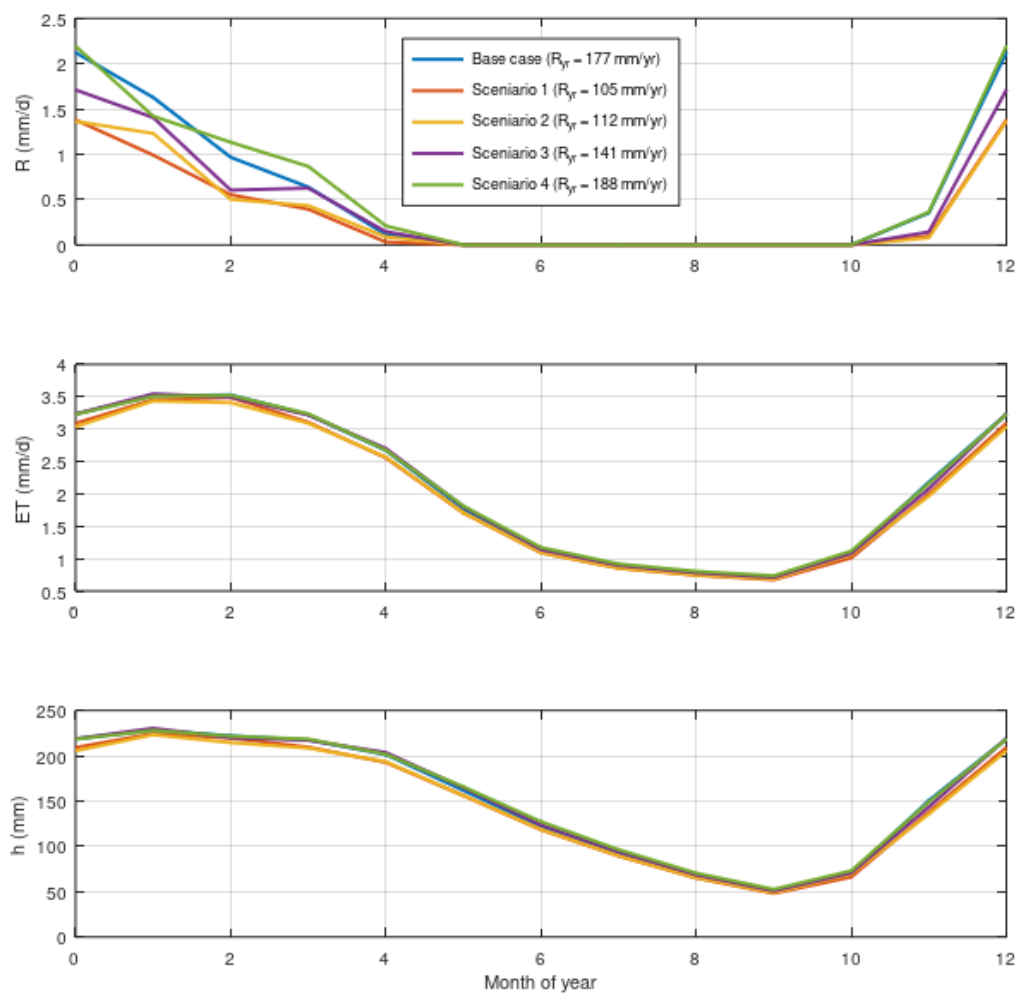


Figure S21. Same as Figure 9, but for Correntina station.

FAZENDA PLANALTO STATION

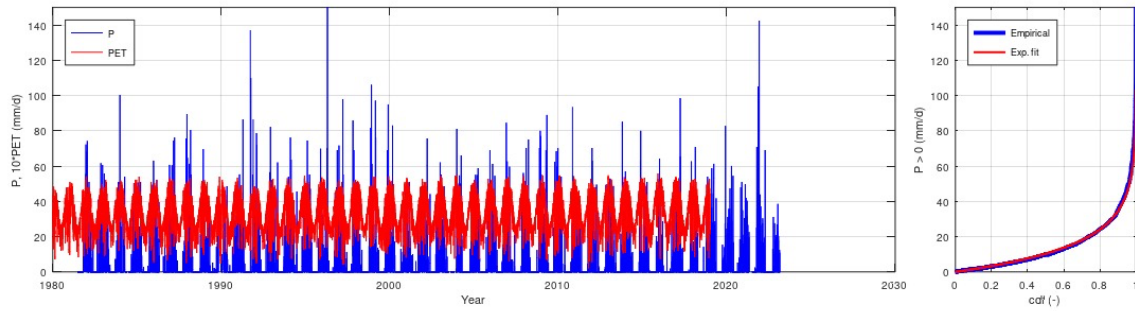


Figure S22. Same as Figure 2, but for Fazenda Planalto station.

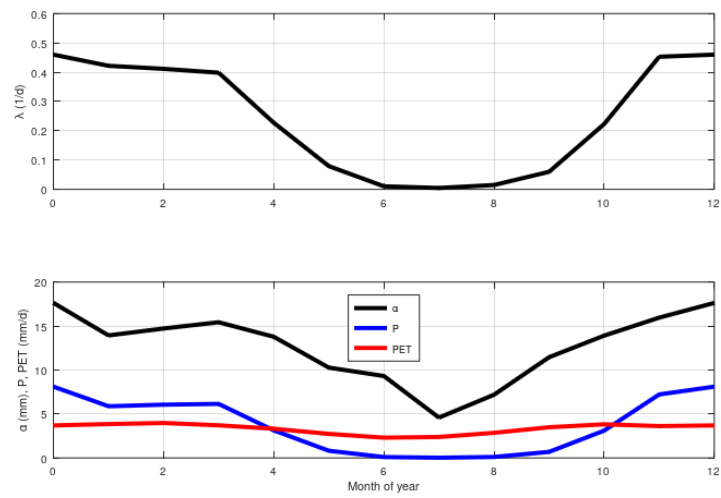


Figure S23. Same as Figure 3, but for Fazenda Planalto station.

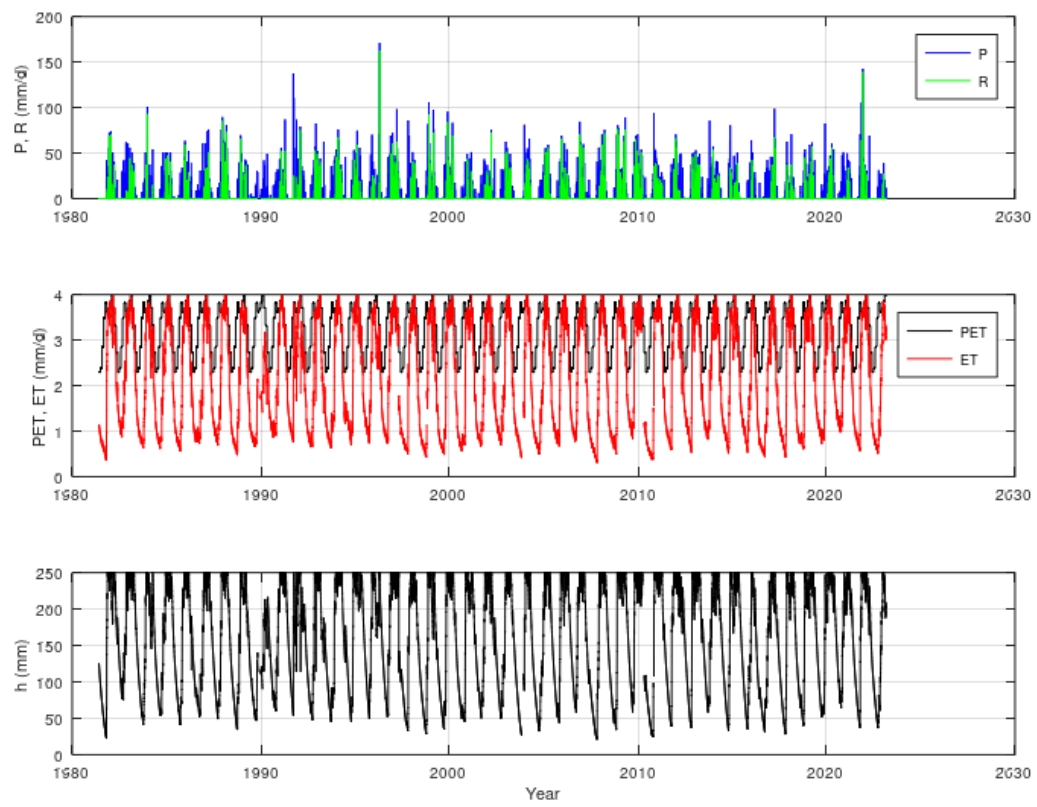


Figure S24. Same as Figure 5, but for Fazenda Planalto station.

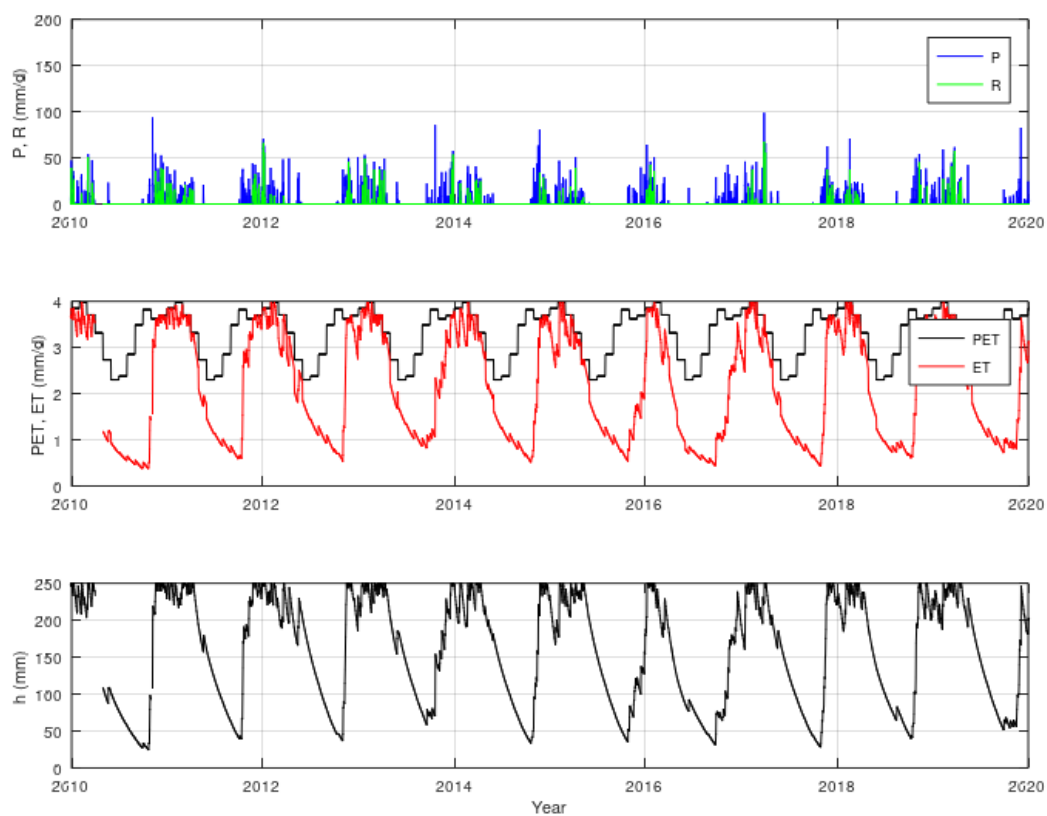


Figure S25. Same as Figure 6, but for Fazenda Planalto station.

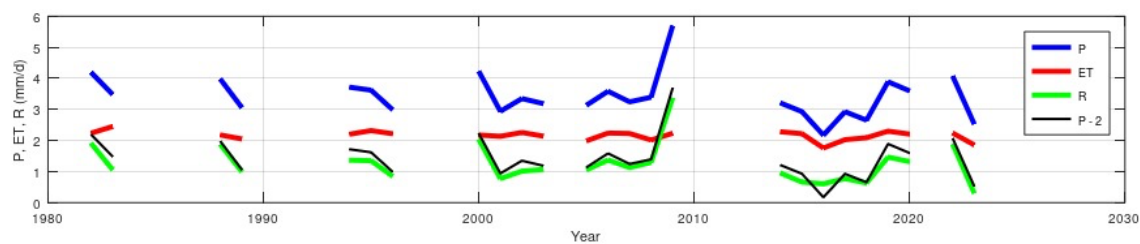


Figure S26. Same as Figure 7, but for Fazenda Planalto station.

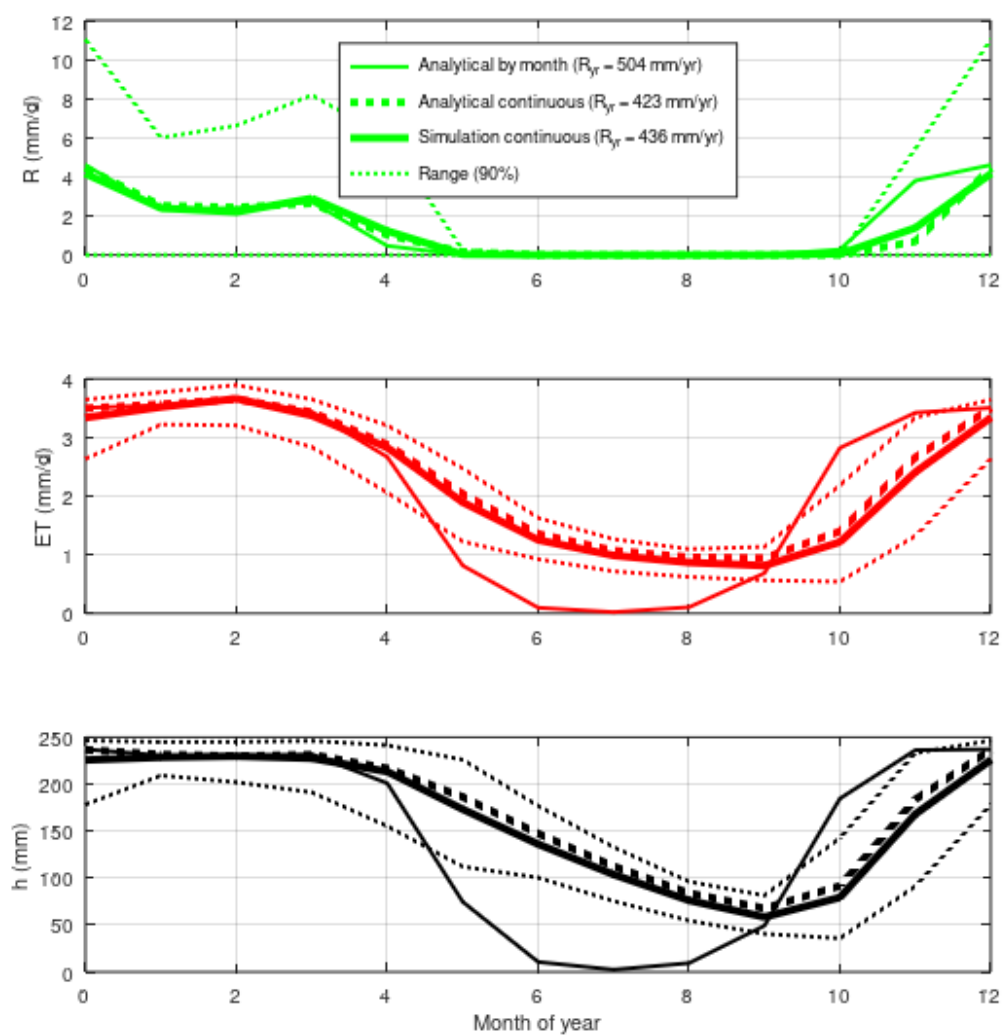


Figure S27. Same as Figure 8, but for Fazenda Planalto station.

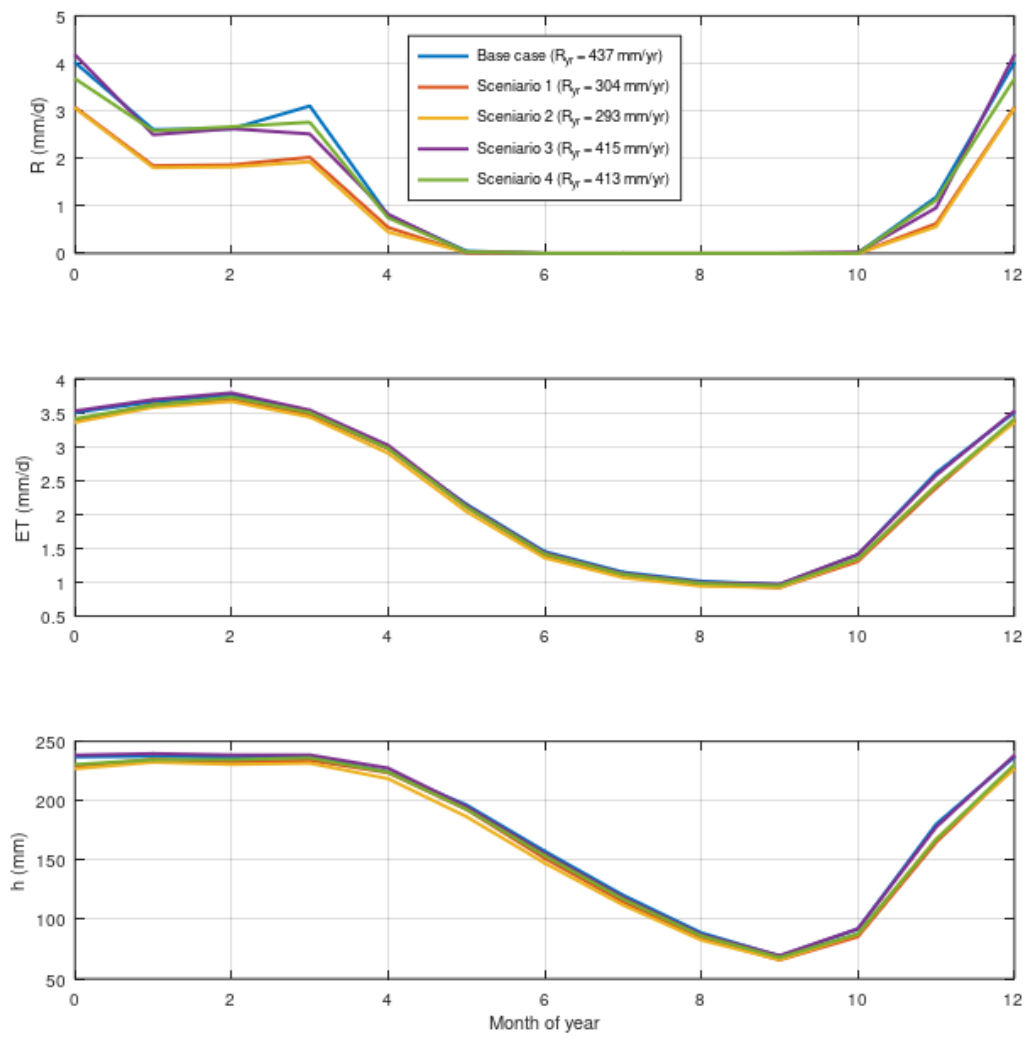


Figure S28. Same as Figure 9, but for Fazenda Planalto station.

MONTHLY MAPS OF PRECIPITATION P

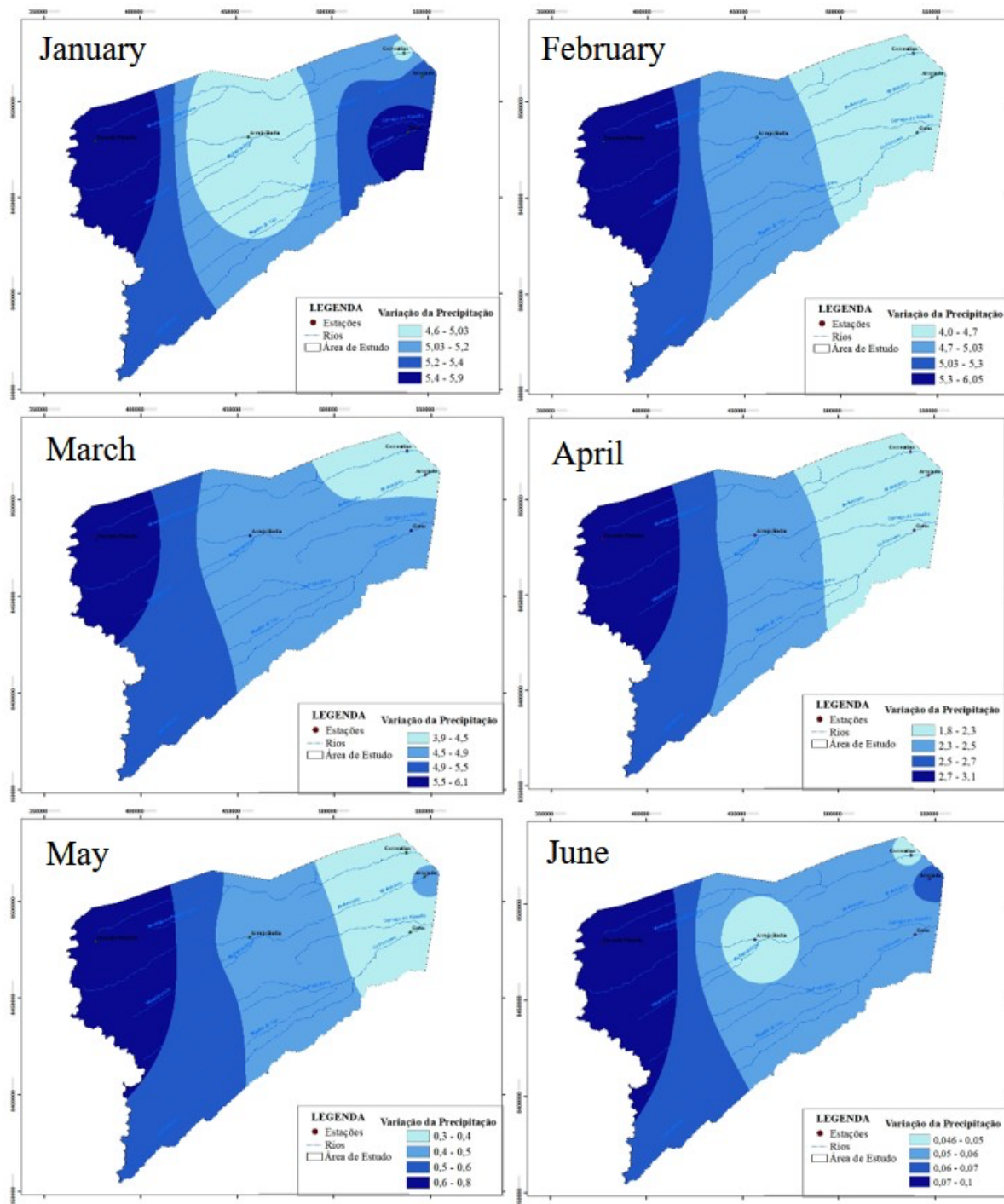


Figure S29. Monthly maps of precipitation P in mm/d.

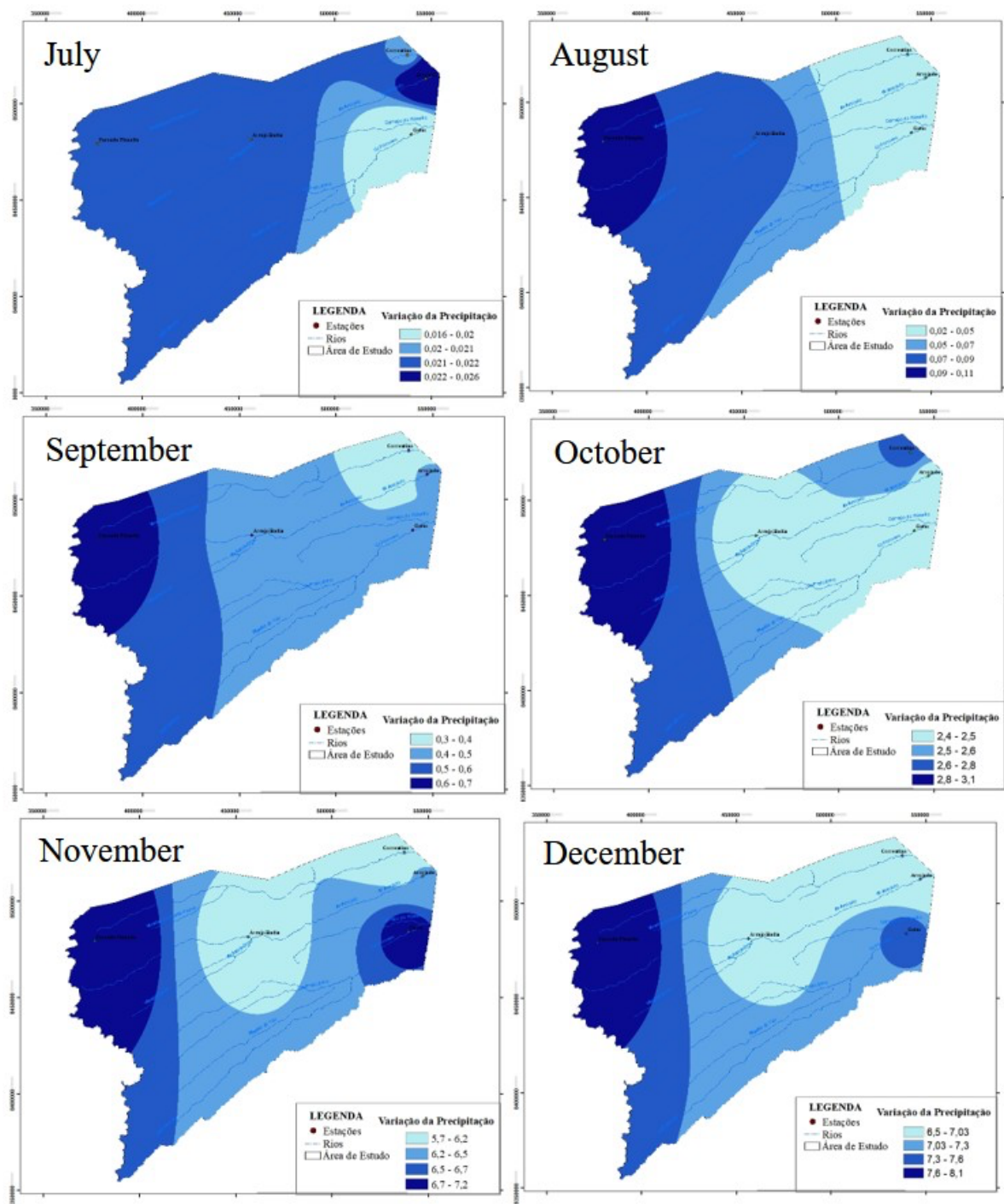


Figure S29 (continued). Monthly maps of precipitation P in mm/d.

MONTHLY MAPS OF DAILY RAINFALL PROBABILITY λ

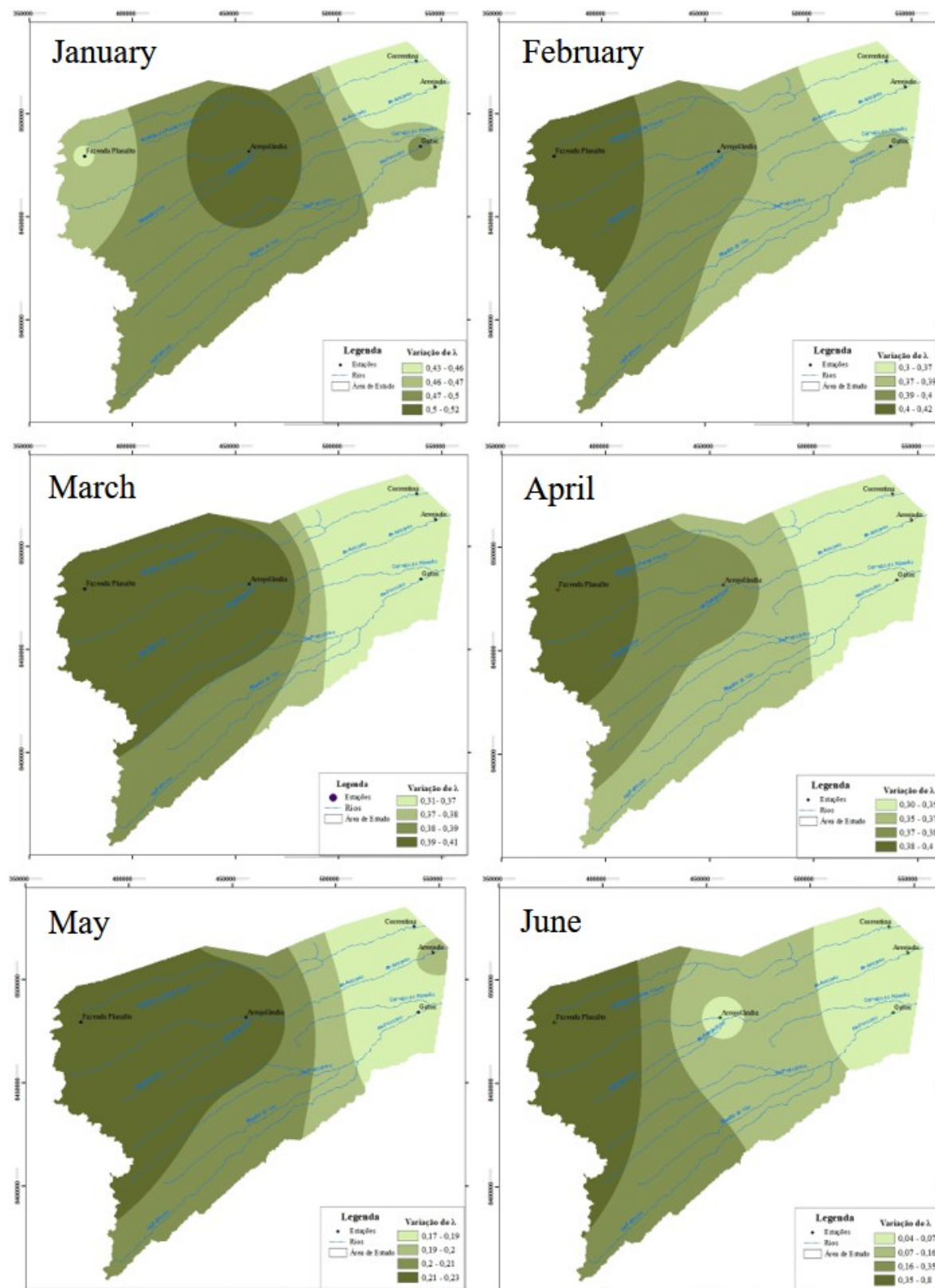


Figure S30. Monthly maps of daily rainfall probability λ in 1/d.

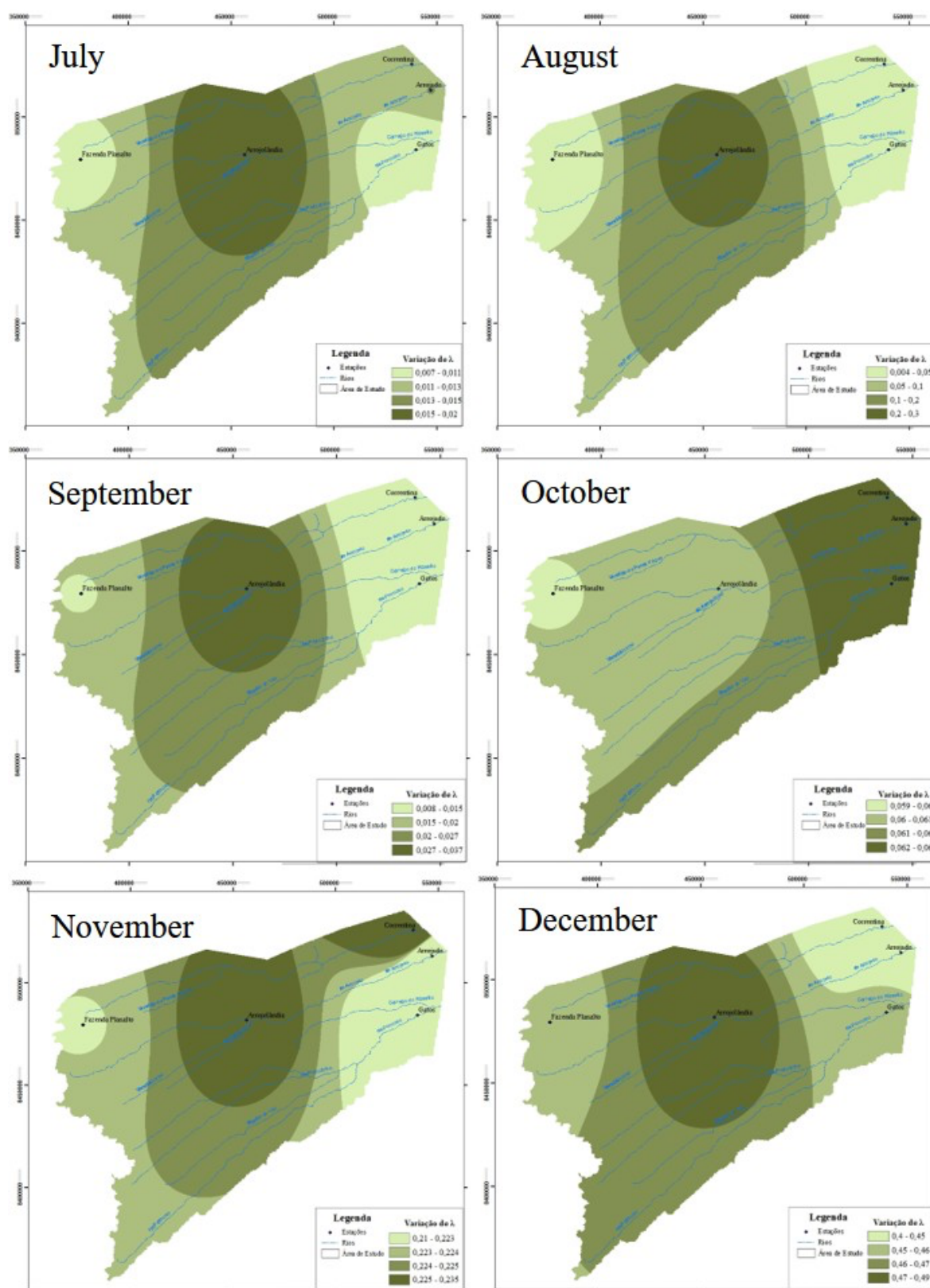


Figure S30 (continued). Monthly maps of daily rainfall probability λ in 1/d.

MONTHLY MAPS OF AVERAGE RAINFALL INTENSITY ON RAINY DAYS α

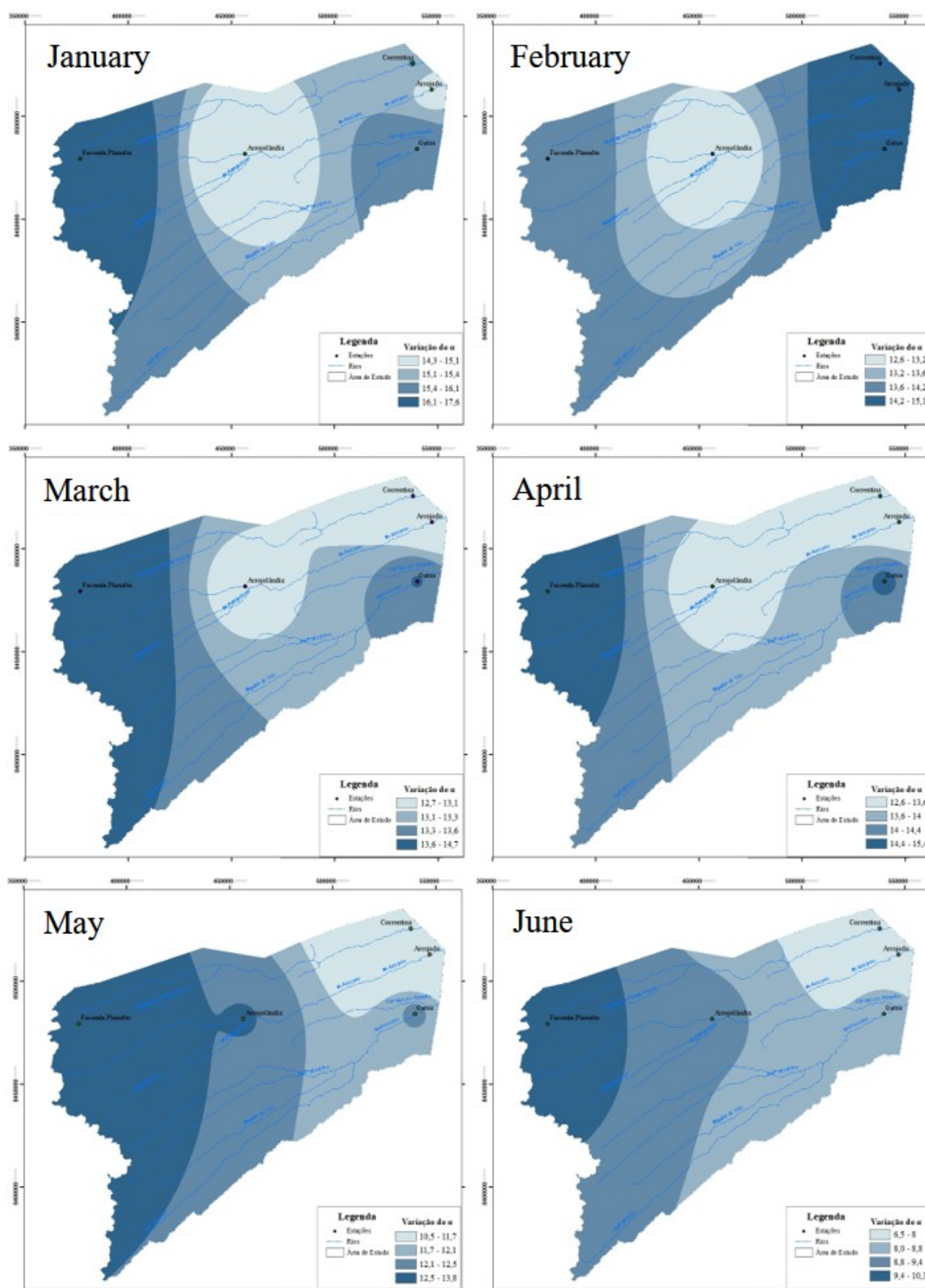


Figure S31. Monthly maps of average rainfall intensity on rainy days α in mm.

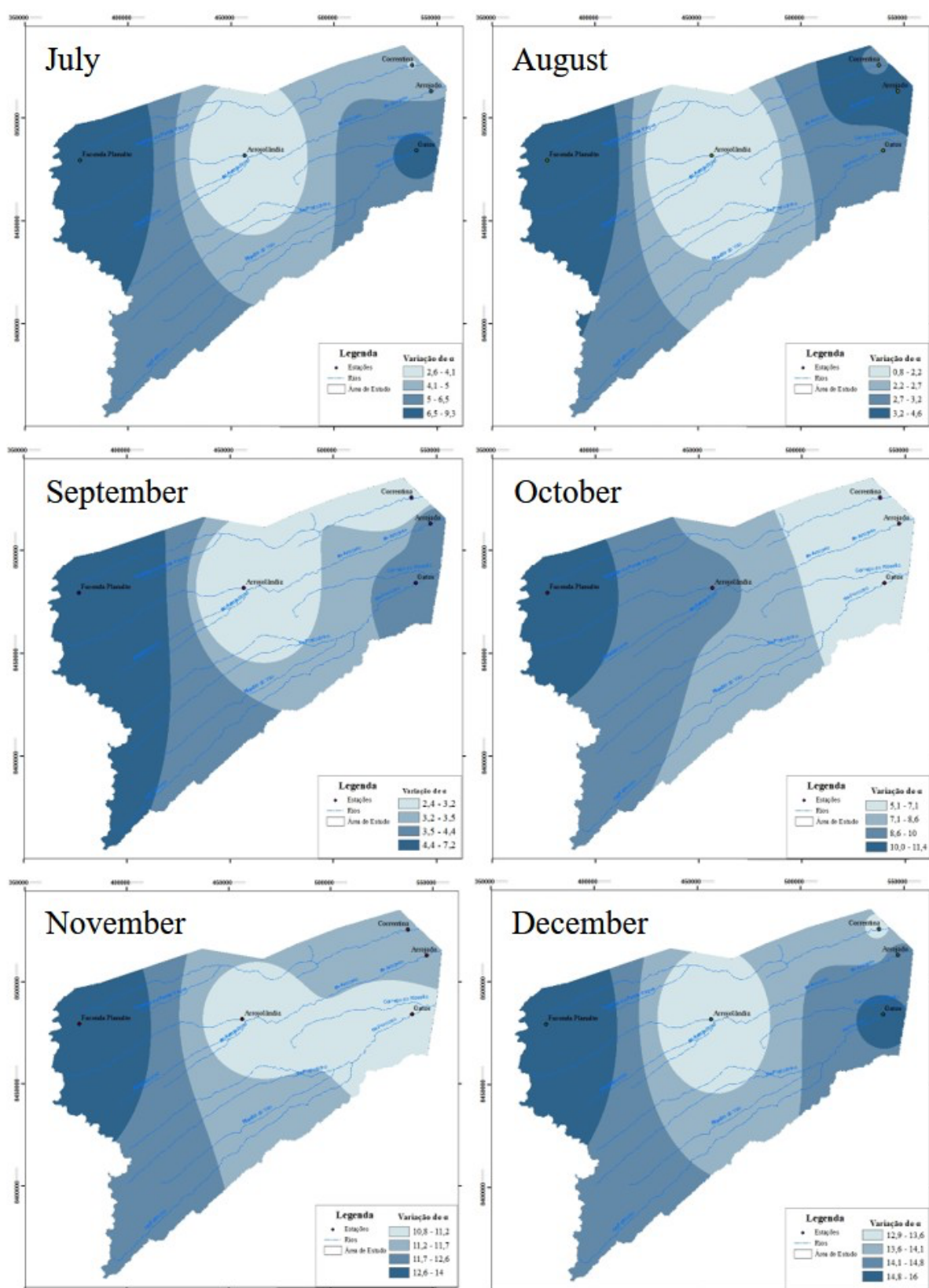


Figure S31 (continued). Monthly maps of average rainfall intensity on rainy days α in mm.

MONTHLY MAPS OF ESTIMATED RECHARGE R

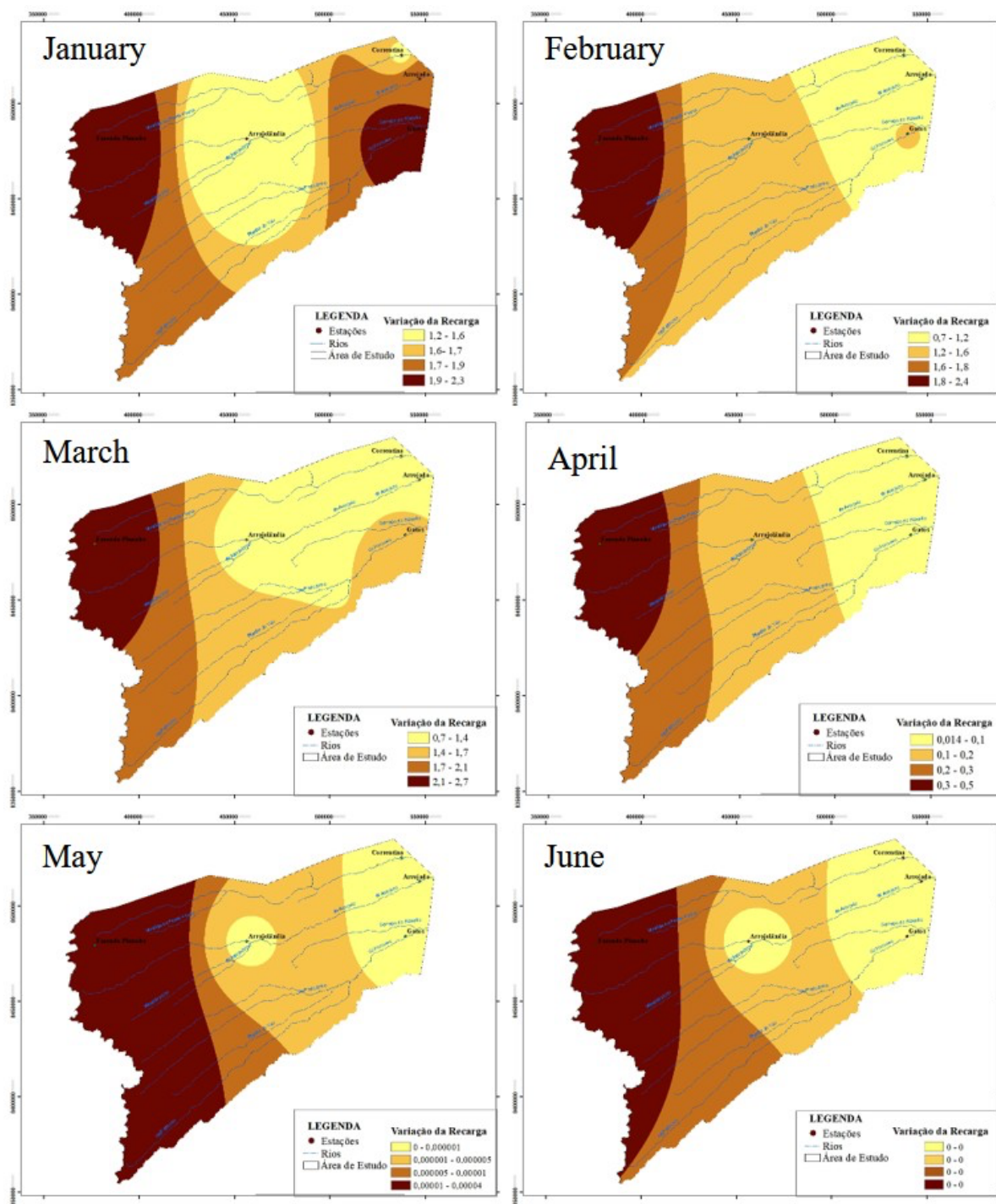


Figure S32. Monthly maps of estimated recharge R in mm/d.

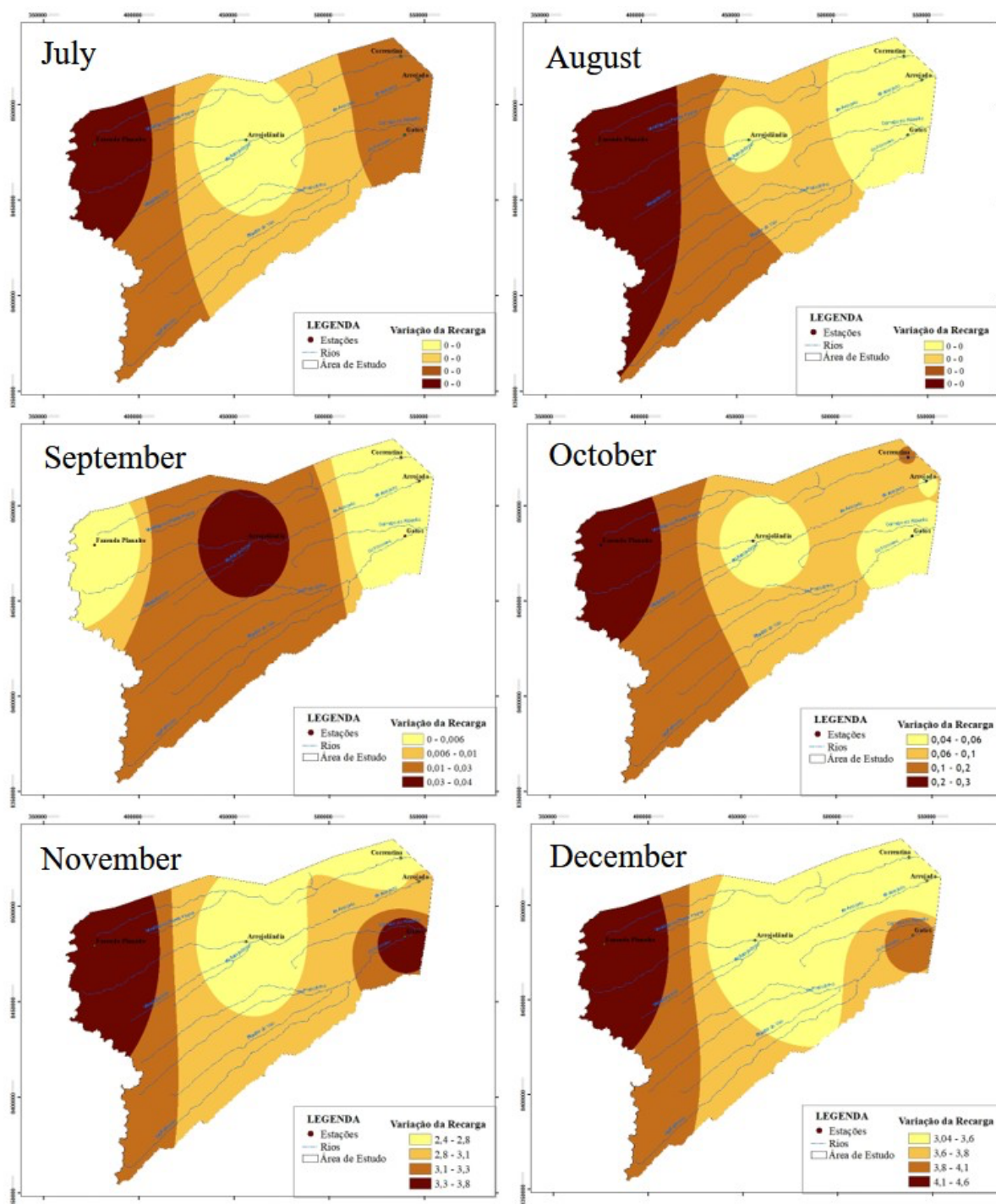


Figure S32 (continued). Monthly maps of estimated recharge R in mm/d.

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA AMBIENTE & ÁGUA

Condições para submissão

Os manuscritos submetidos devem ser originais, destinados exclusivamente à Ambi-Agua (Revista Ambiente & Água - Revista Interdisciplinar de Ciências Aplicadas).

Serão aceitas apenas submissões em inglês.

Todas as submissões deverão ser feitas via sistema, após leitura atenta de todas as instruções e cadastro em: <https://mc04.manuscriptcentral.com/ambiagua-scielo>

Os manuscritos encaminhados a esta revista serão avaliados pela Comissão Editorial e pelos Revisores, de acordo com sua especialidade, seguindo os critérios:

- a) Interesse científico internacional;
- b) Conteúdo técnico científico;
- c) Relevância científica;
- d) Clareza e qualidade do texto;
- e) Qualidade e adequação do conteúdo teórico.

Esteja ciente de que será considerado antiético retirar uma submissão antes da decisão final do Comitê Editorial.

Em cada número, a Comissão Editorial selecionará, dentre os manuscritos favoráveis, aqueles que serão publicados com base nos critérios acima. Não há compromisso com a sequência de submissão ou o tempo para a decisão editorial. Isso depende da resposta dos revisores e autores, bem como das tarefas e limitações administrativas.

Formatação do Texto: O manuscrito deve ser submetido em formato de texto (MS Office), sem restrição de senha para permitir a edição. A publicação final será em PDF, ePDF, HTML e XML. O manuscrito deve ser submetido com as seguintes características:

Idioma: Inglês (americano ou britânico)

Tamanho da página: equivalente ao tamanho de uma folha A4 (210 x 297 mm);

Margens (superior, inferior, esquerda e direita) : 2,5 cm;

Tipo de fonte: Times New Roman, 12, espaçamento simples entre linhas, em uma única coluna, parágrafos alinhados à esquerda e à direita;

Tamanho do manuscrito: o mais importante na avaliação é a qualidade e a contribuição científica da submissão. Normalmente, espera-se que um manuscrito tenha no mínimo 9

páginas, incluindo tabelas e figuras (máximo de cinco no total). A taxa de publicação do periódico será cobrada por página contada após o manuscrito ter sido aceito para publicação e o layout pronto. Todos os manuscritos também devem ter uma versão em português do título, resumo e palavras-chave.

Primeira página: deve conter apenas o título do manuscrito, sem o nome dos autores, afiliação institucional ou e-mail, seguido do resumo e das palavras-chave, separados por "dois pontos" e um ponto final.

Tabelas e Figuras: devem ser numeradas com algarismos arábicos consecutivos, citadas no texto imediatamente antes de aparecerem no manuscrito (primeira letra maiúscula). Portanto, devem aparecer no texto exatamente como o formato final dos artigos publicados (consulte artigos publicados anteriormente). A legenda das figuras deve aparecer na parte inferior com a primeira letra maiúscula, um espaço de um caractere, seguido do número de ordem, um ponto final e espaço (por exemplo, **Figura 1.** O solo seco...). Os títulos das Tabelas devem aparecer acima dela e precedidos pela palavra Tabela (observe a primeira letra maiúscula), um espaço, ordem dos números, um ponto e espaço de um caractere (por exemplo, **Tabela 1.** Concentrações de poluentes...). Sempre que Figuras e Tabelas tiverem uma fonte de referência, a palavra "Fonte:" deve aparecer na parte inferior, seguida da referência da fonte. Textos de Tabelas, Figuras e Fontes sempre terminam com ponto final. As figuras podem ser coloridas, com boas resoluções (300 dpi), entretanto, os autores devem explorar todas as possibilidades para reduzir o tamanho da memória do manuscrito, mas preservando a qualidade das figuras.

Você pode inserir imagens no artigo sem aumentar o tamanho do arquivo, basta seguir as dicas abaixo: Utilize arquivos de imagem nos formatos JPG, PNG ou GIF. Esses arquivos geralmente possuem bons padrões de qualidade e não consomem muito espaço em disco e memória; Para inserir as figuras no texto, não utilize Copiar/Colar (ou Ctrl+C/Ctrl+V); Salve no seu computador as imagens que deseja inserir no documento; Em seguida, acesse a opção de menu disponível para inserção da imagem do seu editor de texto (por exemplo, no MSWord, selecione Inserir/Imagem/Do Arquivo ou "Este Dispositivo") e localize a imagem que deseja inserir no documento. Por fim, insira a imagem selecionada no texto. Essas dicas serão úteis para que o manuscrito seja carregado com sucesso. É essencial que as tabelas estejam em formato de texto, não como figura ou imagem. Certifique-se de que elas possam ser editadas. Certifique-se de que as colunas sejam editadas como colunas e não separadas por espaço ou tabulação. Todas as colunas devem ter um título. Envie uma cópia adicional das tabelas em Excel. As figuras devem ter textos legíveis, utilizando letras maiúsculas/minúsculas conforme o caso e em alta resolução. Não use títulos por cima. Certifique-se de que eles permitam edições.

Estrutura dos manuscritos: manuscritos em INGLÊS devem ter a seguinte sequência: TÍTULO em inglês, seguido de um RESUMO (seguido de três palavras-chave, em ordem alfabética, que não reproduzam as palavras do título nem apareçam no resumo); Título do manuscrito em português; Resumo em português (seguido de palavras-chave, em ordem alfabética, em português); 1. INTRODUÇÃO (incluindo revisão bibliográfica); 2. MATERIAIS E MÉTODOS; 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO; 4. CONCLUSÕES; 5. AGRADECIMENTOS (se for o caso, incluir apenas agradecimentos às agências de fomento, incluindo o número da bolsa); e 6. REFERÊNCIAS (utilizar referências de periódicos de alto impacto, não utilizar anais de simpósios, teses e dissertações, a menos que sejam absolutamente essenciais e em número limitado).

Consulte o "Formulário de Avaliação" ([review_form.doc](#)) para verificar o conteúdo esperado de cada seção. Consulte os artigos já publicados para ver quais textos devem estar em negrito.

UNIDADES

Unidades de Medida: use unidades internacionais com um espaço após o número (ex.: 10 km h⁻¹, não km/h; verifique a consistência do texto), exceto % (ex.: 10%) e grau (ex.: °C).

Verifique cuidadosamente todos os caracteres e algarismos gregos.

Escreva os números de um a nove por extenso, exceto quando usados em unidades.

Deixe um único espaço entre as unidades: g L⁻¹, e não gL⁻¹, nem gL-1.

Use o sistema de tempo de 24 horas, com quatro dígitos para horas e minutos: 09h00; 18h30.

Títulos (RESUMO, 1. INTRODUÇÃO, 2. MATERIAIS E MÉTODOS, etc.): Utilizar letras maiúsculas, 14, negrito, alinhado à esquerda.

Subtítulos: se necessário, serão escritos com letras iniciais maiúsculas, precedidos de dois algarismos arábicos, separados e seguidos de ponto, 12, negrito, alinhado à esquerda.

Resumo: deve conter objetivos, metodologia, resultados e conclusões, devendo ser composto por uma sequência de frases em um único parágrafo, com no máximo 250 palavras.

Citações: No texto, as citações devem seguir as recomendações da ABNT-NBR 10520 com as seguintes especificidades:

Sobrenome do autor mencionado apenas com a primeira letra maiúscula, seguido do ano entre parênteses, quando o autor fizer parte do texto. Quando o autor não fizer parte do texto, entre parênteses, colocar o sobrenome, seguido do ano separado por vírgula. Quando houver mais de um autor, seus sobrenomes serão separados por “e”. As referências citadas devem ser, preferencialmente, publicadas recentemente na base SciELO (www.scielo.br ou www.scielo.org) ou em periódicos internacionais de alto impacto. De preferência, não citar mais de 15 referências.

Equações: Gráficos e figuras originados no MS Excel devem ser inseridos como objetos que podem ser editados. O mesmo para as equações (use o editor de equações, de preferência usando o MS Word 2010 ou mais recente ou use o MathType) que devem ser inseridas como objeto, não como uma imagem e numeradas dentro (parênteses). Os autores devem expressar as equações da maneira mais simples possível. Elas devem incluir apenas as equações necessárias, para que um leitor médio possa entender a base técnica do manuscrito. Os manuscritos não devem ter notação matemática excessiva.

Nota importante para manuscritos em inglês: Todos os manuscritos escritos devem ser submetidos em inglês. Autores que não têm o inglês como primeira língua, devem ter seus manuscritos revisados por um profissional com bom conhecimento de inglês para revisar o texto (vocabulário, gramática e sintaxe). As submissões podem ser rejeitadas com base na inadequação do texto sem exame de seu mérito científico.

Exemplos de como citar referências no texto: Jones (2015), Jones e Smith (2009) ou (Jones, 2015; Jones e Smith, 2009), dependendo da construção da frase. Mais de dois autores: Jones et

al. (2014) ou (Jones et al., 2014). Comunicações pessoais ou referências não publicadas não devem ser incluídas na lista de referências, mas sim no texto, entre parênteses (Jones, comunicação pessoal, 2015).

Lista de Referências: Deve seguir as recomendações da ABNT-NBR 6023, aqui exemplificadas:

Livros:

FALKNER, E. **Mapeamento Aéreo: métodos e aplicações**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. 322 p. Observe que a cidade e a editora da publicação são importantes!

Capítulos de livros:

WEBB, H. Criação de modelos digitais de terreno usando fotogrametria analítica e sua aplicação na engenharia civil. In: **Modelagem de Terreno em Topografia e Engenharia Civil**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1991. p. 73-84.

Revistas científicas:

MEYER, MP. O lugar da fotografia aérea de pequeno formato em levantamentos de recursos. **Journal of Forestry**, Washington, v. 80, n. 1, p. 15-17, 1982.

Manuscritos apresentados em eventos (artigo impresso) – Estas referências devem ser evitadas, mas se essenciais:

DAVIDSON, JM; RIZZO, DM; GARBELOTTO, M.; TJOSVOLD, S.; SLAUGHTER, G.W. Phytophthora ramorum e morte súbita de carvalhos na Califórnia: II Transmissão e sobrevivência. Em: SIMPÓSIO SOBRE FLORESTAS DE CARVALHO: CARVALHOS NA PAISAGEM EM TRANSFORMAÇÃO DA CALIFÓRNIA, 5. 23-25 de outubro de 2001, San Diego, **Anais...** Berkeley: Serviço Florestal do USDA, 2002. p. 741-749.

Manuscritos apresentados em eventos (eletrônicos) – devem ser evitados, mas se essenciais:

COOK, JD; FERDINAND, LD 2001. Fidelidade geométrica das imagens de Ikonos. Em: CONVENÇÃO ANUAL DA SOCIEDADE AMERICANA DE FOTOGAMETRIA E SENSORIAMENTO REMOTO, 23-27 de abril, St. Louis. **Anais...** St. Louis: ASPRS, 2001. 1 CD-ROM.

Teses e Dissertações – devem ser evitadas – em vez disso citar os artigos derivados em revistas científicas:

AFFONSO, AG **Caracterização de fisionomias vegetais na Amazônia oriental através de videografia aerotransportada e imagens LANDSAT 7 ETM+**, 2003, 120f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

Sites na internet (somente se absolutamente essenciais):

Estas referências devem ser evitadas, mas se forem essenciais ou se referirem a um periódico publicado eletronicamente:

WORLD WILD LIFE FUND. **Ecoregiões**. 2004. Disponível em:

< <http://www.worldwildlife.org/science/ecoregions.cfm> >. Acesso em março de 2016.

Observe que todas as iniciais do nome do autor têm um espaço entre elas.

NORMAS DE SUBMISSÃO

O arquivo submetido (upload) – o arquivo principal – **não deve conter nenhuma identificação dos autores**, portanto, sem os nomes, afiliação ou e-mail dos autores. As propriedades do arquivo que identificam o autor devem ser removidas. Dicas para isso:

Microsoft Word:

Em Arquivo (archive), clique em **Informações, verificando problemas, Inspeccionar documento** e, nesta janela, desmarque **Propriedades do documento e Informações pessoais**, **Fechar** e **Salvar**.

Todo o conteúdo dos artigos é de responsabilidade exclusiva dos autores.

Cada edição publicada pela Ambi-Agua apresenta uma imagem representativa de um artigo publicado naquela edição. Os autores são convidados a destacar na carta de apresentação que gostariam que uma figura específica fosse considerada cientificamente interessante e visualmente atraente para a capa do periódico. As imagens devem ter alta resolução (300 dpi) e tamanho 17 x 17 cm. As imagens devem ser originais e os autores concedem à Ambi-Agua a licença de publicação. Carregue a imagem como um arquivo suplementar adicional. O autor deve deter os direitos autorais da imagem enviada.

Em qualquer caso, os autores concedem à Revista Ambiente & Água a licença de uso de qualquer imagem do manuscrito publicado para ser usada como capa da edição, a menos que expressamente declarado o contrário.

ANEXO B – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO

ScholarOne Manuscripts

<https://mc04.manuscriptcentral.com/ambiagua-scielo> Revista Ambiente & Água Home Author

Submission Confirmation

 Print

Thank you for your submission

Submitted to

Revista Ambiente & Água

Manuscript ID

AMBIAGUA-2025-3129

Title**PROBABILISTIC ESTIMATION OF RECHARGE AND ITS SENSITIVITY TO CHANGING PRECIPITATION REGIMES FOR THE URUCUIA AQUIFER, BRAZIL****Authors**

Oliveira Souza, Ellen

Klammler, Harald

Leal, Luiz Rogério

Date Submitted

14-Oct-2025

[Author Dashboard](#)