

Análise do Balanço Hídrico da Reserva Refúgio de Vida Selvagem Mata Engenho Uchôa - Metropolitana Sul

Antonny Vinicius Feliciano de Mendonça*, Isis Dolores Lima de Melo**, Júlio César Pereira de Lima***,
Lívia Helena Monteiro de Assis****, Matheus Henrique Gadelha dos Santos*****

* à ***** Graduandos do curso de Licenciatura em Geografia do Departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife/PE - Brasil; (antonny.mendonca@ufpe.br; isis.dlmelo@ufpe.br; julio.cplima@ufpe.br; livia.helena@ufpe.br; matheus.gadelha@ufpe.br)

Received 6 December 2020; accepted 20 May 2021

RESUMO

A Bacia Metropolitana Sul - 33, localizada na Região Metropolitana do Recife, com 30,94 km², representa um importante sistema hidrológico e ecológico, embora esteja sob intensa pressão devido ao crescimento urbano acelerado. Esse contexto reflete problemas como degradação ambiental, poluição dos corpos d'água e aumento da vulnerabilidade social. A bacia possui ecossistemas relevantes, como áreas de manguezais e restinga, que são cruciais para a biodiversidade e a regulação climática. No entanto, a ocupação desordenada e as mudanças no uso do solo têm levado à perda significativa desses habitats e aumentado os riscos de enchentes e deslizamentos, especialmente em comunidades vulneráveis. O estudo concentrou-se na sub-bacia 33, situada em parte da Mata Atlântica de Pernambuco, e analisou dados de séries temporais diárias entre 1963 e 2023, fornecidos pelo modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool). Foram avaliadas variáveis como precipitação, teor de água no solo, evapotranspiração (real e potencial) e descarga de águas subterrâneas. Os resultados mostraram que aproximadamente 47% da precipitação é perdida por evapotranspiração, enquanto 13,5% é percolada e 32% corresponde ao fluxo superficial. A precipitação média anual é de 2.180 mm, com variações sazonais que afetam significativamente os padrões hídricos da região. Os períodos históricos analisados indicam uma redução dos eventos extremos de precipitação desde os anos 2000, possivelmente relacionada a mudanças climáticas e ao manejo sustentável das bacias. Fenômenos como El Niño e La Niña desempenham papéis determinantes na variabilidade hídrica, enquanto a urbanização intensifica o escoamento superficial e reduz a infiltração, alterando o ciclo hidrológico. A evapotranspiração também reflete a interação entre clima, vegetação e disponibilidade hídrica, com padrões anuais que destacam os impactos de eventos climáticos e alterações no uso do solo. O objetivo desta pesquisa foi analisar a dinâmica hidrológica da sub-bacia 33 e identificar os impactos das mudanças climáticas e da urbanização sobre o ciclo hidrológico, com foco no balanço hídrico e nos desafios da gestão sustentável dos recursos hídricos. Os resultados ressaltam a necessidade de políticas públicas integradas que equilibrem conservação ambiental e desenvolvimento urbano, promovendo segurança hídrica e qualidade de vida para as comunidades locais.

Palavras-Chave: SUPER; Sub-bacia; Preservação ambiental; Mudanças climáticas.

Analysis of the Water Balance of the Mata Engenho Uchôa Wildlife Refuge Reserve - Metropolitana Sul

ABSTRACT

The Southern Metropolitan Basin - 33, located in the Metropolitan Region of Recife, with 30.94 km², represents an important hydrological and ecological system, although it is under intense pressure due to accelerated urban growth. This context reflects problems such as environmental degradation, pollution of water bodies and increased social vulnerability. The basin has important ecosystems, such as mangrove and restinga areas, which are crucial for biodiversity and climate regulation. However, disorderly occupation and changes in land use have led to the significant loss of these habitats and increased the risks of floods and landslides, especially in vulnerable communities. The study focused on the 33 sub-basin, located in part of the Atlantic Forest of Pernambuco, and analyzed daily time series data between 1963 and 2023, provided by the SWAT (Soil Water Assessment Tool) model. Variables

such as precipitation, soil water content, evapotranspiration (actual and potential) and groundwater discharge were evaluated. The results showed that approximately 47% of precipitation is lost through evapotranspiration, while 13.5% is percolated and 32% corresponds to surface flow. The average annual precipitation is 2,180 mm, with seasonal variations that significantly affect the region's water patterns. The historical periods analyzed indicate a reduction in extreme precipitation events since the 2000s, possibly related to climate change and sustainable management of the basins. Phenomena such as El Niño and La Niña play determining roles in water variability, while urbanization intensifies surface runoff and reduces infiltration, altering the hydrological cycle. Evapotranspiration also reflects the interaction between climate, vegetation and water availability, with annual patterns that highlight the impacts of climate events and changes in land use. The objective of this research was to analyze the hydrological dynamics of sub-basin 33 and identify the impacts of climate change and urbanization on the hydrological cycle, focusing on the water balance and the challenges of sustainable water resource management. The results highlight the need for integrated public policies that balance environmental conservation and urban development, promoting water security and quality of life for local communities.

1. Introdução

No Brasil, diversas regiões enfrentam sérios problemas relacionados aos recursos hídricos, chegando, em alguns casos, a situações de escassez extrema. No Nordeste, em particular, a necessidade de uma gestão eficiente e racional dos recursos hídricos se torna imperativa, uma vez que a região é caracterizada pela irregularidade na distribuição das precipitações e por longos períodos de estiagem. Essa condição climática, somada a fatores socioeconômicos e ambientais, agrava os desafios relacionados ao acesso à água e à sua qualidade. Entretanto, além das interações naturais, também há a influência das ações humanas sobre os recursos hídricos, que podem intensificar os impactos ambientais, comprometendo tanto a disponibilidade quanto a qualidade da água.

A Bacia Metropolitana Sul - 33, localizada na Região Metropolitana do Recife (RMR), no Nordeste do Brasil, abrange uma área de aproximadamente 30,94 km². Essa bacia tem grande importância para a compreensão da dinâmica socioambiental da RMR, uma vez que engloba bairros como Cavaleiro, Sancho e Coqueiral, além de uma parte significativa da Mata do Engenho Uchôa. A região tem experimentado um crescimento urbano acelerado e desordenado, resultando em impactos significativos sobre o meio ambiente, a economia e a qualidade de vida das populações locais. Os recursos hídricos da bacia desempenham um papel crucial nesse contexto, pois influenciam diretamente as condições de saneamento, abastecimento de água e sustentabilidade ambiental da área.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), a Região Metropolitana do Recife é a segunda mais populosa do Nordeste, com uma população superior a 4 milhões de habitantes. Esse crescimento demográfico tem gerado uma pressão crescente sobre a infraestrutura urbana e os serviços públicos essenciais, como saúde, saneamento básico e abastecimento de água. A sub-bacia 33 reflete esse cenário de desafios, pois enfrenta problemas como a

degradação ambiental, a poluição dos corpos d'água e o aumento da vulnerabilidade social. Nos bairros de Cavaleiro e Sancho, por exemplo, há registros de baixa qualidade de vida, agravada por fatores como vulnerabilidade a desastres naturais – enchentes e deslizamentos e escassez de recursos naturais devido ao crescimento desordenado e ao planejamento urbano inadequado.

O crescimento urbano acelerado e sem planejamento adequado tem provocado transformações significativas nos ecossistemas naturais da bacia. Áreas de grande importância ambiental, como manguezais e restingas, estão sendo degradadas ou eliminadas para dar lugar à expansão da malha urbana. Essa perda compromete a regulação do microclima local e reduz a capacidade natural da bacia de filtrar e armazenar água. Além disso, a intensificação da impermeabilização do solo impede a infiltração da água, aumentando a erosão e o escoamento superficial. Esse fenômeno, por sua vez, eleva o risco de enchentes e deslizamentos de terra, ameaçando ainda mais as populações que vivem em áreas vulneráveis.

A gestão inadequada dos recursos hídricos também interfere no balanço hídrico da bacia. Fenômenos climáticos como El Niño e La Niña influenciam diretamente a variabilidade hídrica da região, alterando os padrões de precipitação e de temperatura. Contudo, sua influência é exacerbada por ações humanas, como a retirada excessiva de água para abastecimento urbano, a poluição causada por despejos de efluentes domésticos e industriais e a supressão da vegetação nativa. Esses fatores reduzem a capacidade da bacia de armazenar e recarregar seus mananciais, comprometendo a sustentabilidade do sistema hídrico e aumentando a vulnerabilidade da população a eventos climáticos extremos.

Outro aspecto relevante é a presença da Mata Atlântica na área da Bacia Metropolitana Sul - 33. Esse bioma, que já foi amplamente devastado ao longo do tempo, continua sendo ameaçado pelo avanço da urbanização e pela falta de políticas eficazes de

conservação. A Mata Atlântica desempenha funções ambientais fundamentais, como a regulação climática, a proteção dos solos e a manutenção da biodiversidade. Sua fragmentação e degradação resultam na perda de serviços ecossistêmicos essenciais, afetando não apenas o meio ambiente, mas também a qualidade de vida das populações humanas que dependem desses recursos naturais.

O aumento do escoamento superficial e a consequente redução da infiltração de água no solo têm impactos diretos sobre a disponibilidade hídrica da bacia. Com a redução da recarga dos aquíferos, há um aumento da dependência dos sistemas de abastecimento público, que muitas vezes não conseguem atender à demanda crescente da população. Além disso, as enchentes frequentes resultantes do escoamento superficial exacerbado causam danos materiais e sociais significativos, afetando principalmente as populações de baixa renda, que vivem em áreas de risco e possuem menor capacidade de adaptação a esses eventos.

A poluição dos corpos d'água na Bacia Metropolitana Sul - 33 é outro problema crítico. O despejo irregular de esgoto doméstico e resíduos industriais nos rios e córregos da região compromete a qualidade da água, tornando-a imprópria para consumo e aumentando os riscos de doenças de veiculação hídrica. A falta de infraestrutura adequada para o tratamento de esgoto e o manejo inadequado dos resíduos sólidos agravam ainda mais esse quadro, evidenciando a necessidade de investimentos urgentes em saneamento básico e políticas ambientais eficazes.

Diante desse cenário, a pesquisa sobre a Bacia Metropolitana Sul - 33 tem como objetivo principal compreender as dinâmicas que influenciam o balanço hídrico, a qualidade da água e os impactos das mudanças climáticas e antrópicas sobre a região. Além disso, o estudo busca propor estratégias de gestão que assegurem a sustentabilidade dos recursos hídricos e promovam melhorias na qualidade de vida das comunidades locais. A análise de séries temporais de dados climáticos e hídricos entre 1963 e 2023 permitiu a identificação de padrões e tendências que oferecem subsídios para a formulação de políticas públicas mais eficazes.

Os resultados preliminares da pesquisa indicam que aproximadamente 47% da precipitação na bacia é perdida por evapotranspiração, enquanto apenas 13,5% se convertem em água percolada e 32% correspondem ao fluxo superficial. Esses dados revelam a complexidade da dinâmica hídrica da região e demonstram a necessidade de medidas que otimizem a gestão dos recursos hídricos, levando em consideração

os impactos das atividades humanas e das mudanças climáticas.

A sub-bacia 33, sendo uma área representativa das dinâmicas ambientais e urbanas da RMR, também pode ser vista como um microcosmo das tensões existentes entre conservação ambiental e desenvolvimento econômico. Os desafios identificados reforçam a necessidade de um planejamento territorial mais integrado e de ações efetivas que garantam a segurança hídrica e a resiliência das populações locais frente aos impactos ambientais e sociais. A implementação de soluções baseadas na natureza, como a restauração de áreas degradadas, a criação de zonas de amortecimento e a ampliação das áreas de proteção ambiental, pode contribuir para mitigar os efeitos negativos do crescimento urbano sobre os recursos hídricos.

Portanto, a importância deste estudo reside em evidenciar os principais fatores que ameaçam a sustentabilidade da bacia e, ao mesmo tempo, em propor soluções que promovam o equilíbrio entre os diversos usos da água e a conservação dos ecossistemas. A busca por um modelo de gestão hídrica mais eficiente e sustentável deve envolver não apenas o poder público, mas também a sociedade civil, as universidades e o setor privado, garantindo uma abordagem participativa e integrada na construção de soluções.

Somente por meio de uma gestão territorial responsável, que leve em conta as especificidades locais e regionais, será possível promover um desenvolvimento urbano mais equitativo e sustentável na Região Metropolitana do Recife. A preservação dos recursos hídricos da Bacia Metropolitana Sul - 33 é essencial para garantir a qualidade de vida das populações atuais e futuras, reforçando a importância de políticas públicas que aliem desenvolvimento econômico e conservação ambiental de maneira harmoniosa e eficaz.

2. Material e métodos

2.1. Caracterização da área de estudo

Este estudo foi realizado na sub-bacia 033 da Bacia Metropolitana Sul do Recife (Figura 1), localizada dentro do bioma Mata Atlântica no estado de Pernambuco. A sub-bacia 033 cobre uma área de aproximadamente 30,94 km² e desempenha um papel fundamental no regime hídrico da região. A escolha dessa sub-bacia se deve à sua representatividade em termos de cobertura vegetal remanescente e influência dos processos de urbanização e industrialização, que têm

causado significativas transformações ambientais, incluindo desmatamento e alterações no regime de chuvas. O clima da região é tropical, com alta umidade devido ao elevado volume de precipitação ao longo do ano. No entanto, estudos como os de Pereira e Lima (2018) indicam que as mudanças climáticas têm impactado os padrões de precipitação na área, resultando em eventos extremos e alterações na sazonalidade das chuvas. Essas variações afetam a biodiversidade e a saúde das florestas locais, que desempenham um papel essencial no equilíbrio ambiental.

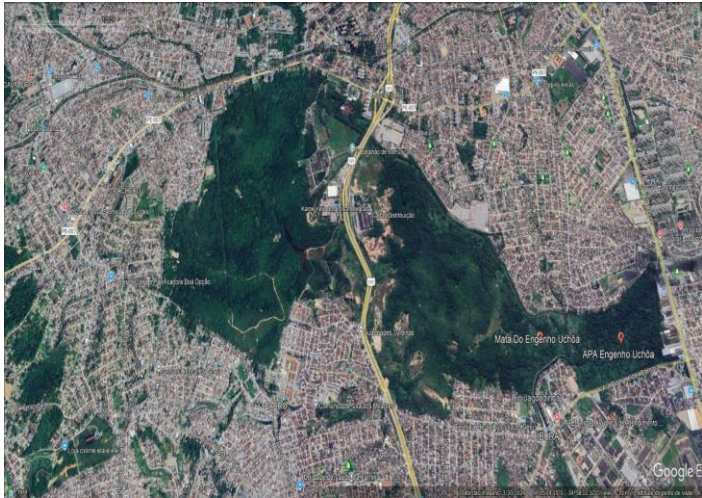


Figura 1: Área da sub-bacia 033, Metropolitana Sul, extraída do Google Earth

A sub-bacia 033 apresenta uma diversidade pedológica característica da Mata Atlântica do Recife, composta por Latossolos, Argissolos e Cambissolos. De acordo com a Embrapa (2013), os Latossolos apresentam grande profundidade e boa drenagem, mas são altamente ácidos, o que pode limitar a disponibilidade de nutrientes. Os Argissolos possuem alta concentração de argila, o que favorece a retenção de água. Os Cambissolos são considerados solos jovens, com boa fertilidade natural, alta presença de matéria orgânica e potencial para a agricultura.

2.2. Procedimentos metodológicos

Para este estudo, utilizou-se uma série temporal diária de dados hidrológicos da sub-bacia 033, abrangendo o período de 1963 a 2023, totalizando 60 anos de análise. Os dados foram extraídos do Sistema de Unidades Hidrológicas de Respostas de Pernambuco, acessível via SUPER-HAWQS, que emprega o modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT), versão 2012. O

modelo SWAT foi selecionado devido à sua capacidade de simular processos hidrológicos, como balanço hídrico, precipitação, evapotranspiração e infiltração de água no solo. No entanto, é importante destacar algumas limitações do modelo, tais como dependência de calibração e validação dos dados para garantir maior confiabilidade nas simulações, possíveis incertezas associadas à qualidade e resolução dos dados de entrada e limitações na representação de fenômenos extremos, como enchentes e secas prolongadas.

Os resultados foram obtidos a partir de gráficos gerados pelo sistema SUPER-HAWQS (Figura 2), contemplando os seguintes parâmetros hidrológicos: precipitação, distribuição e variabilidade sazonal da chuva; teor de água no solo, avaliação do armazenamento de água no solo ao longo do tempo; evapotranspiração real e potencial, relação entre a perda de água para a atmosfera e a disponibilidade hídrica; e descarga de águas subterrâneas, comportamento das águas subterrâneas e sua contribuição para o balanço hídrico da bacia. Os dados foram organizados em séries temporais e analisados estatisticamente para identificar tendências, padrões e possíveis correlações entre os diferentes parâmetros. Esse método permitiu uma compreensão detalhada da dinâmica hidrológica da sub-bacia 033 e os impactos das mudanças climáticas na região.

Para garantir a reprodutibilidade dos resultados, todas as etapas do processamento dos dados foram documentadas, incluindo os critérios de seleção dos dados, os parâmetros configurados no modelo SWAT e as técnicas estatísticas utilizadas na análise. Futuras pesquisas podem considerar a incorporação de dados de sensoriamento remoto e medições em campo para complementar as simulações realizadas.

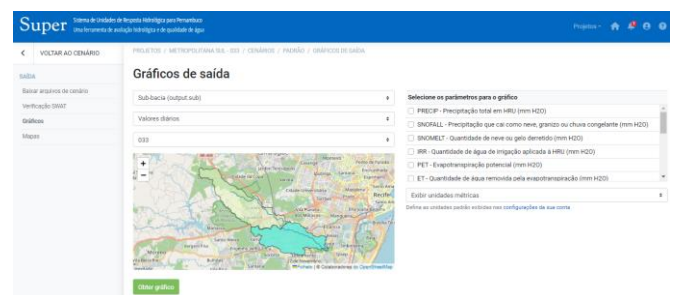


Figura 2 - Obtenção dos gráficos no site do SUPER

3. Resultados e discussão

O balanço hídrico médio anual da sub-bacia 33, bacia Metropolitana Sul, apresenta as seguintes razões:

aproximadamente 47% da precipitação é perdida por evapotranspiração. Aproximadamente 13,5% da precipitação é percolada e 32% do fluxo total da bacia é superficial. A precipitação média anual é de 2.180mm, evapotranspiração potencial de 1.454mm, evapotranspiração real de 1.020mm e tem um alto fluxo de retorno de 276mm, Figura 3.

de Temperatura da superfície (TS) realizados em Recife (Moreira e Galvêncio, 2007; Moreira, 2009; Oliveira, 2012). Moreira (2009), por exemplo, obteve máxima de temperatura da superfície de 33,1°C, utilizando imagem do sensor TM do Landsat 5 para o ano de 2007, o autor discute que sobre o Shopping Center Recife, localizado no bairro de Boa Viagem, as temperaturas de superfície registram valores máximos, com formação de ilha de calor no estacionamento do shopping

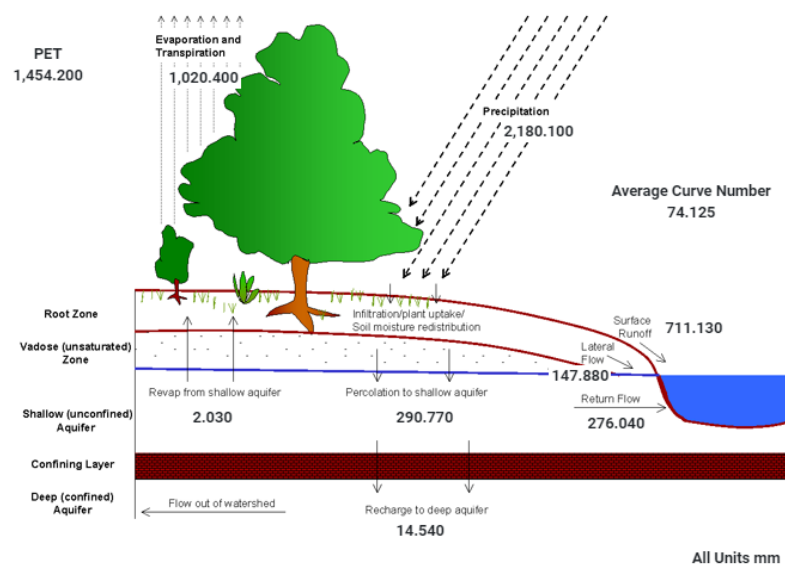


Figura 3 Ciclo hidrológico médio anual da sub-bacia 033 da bacia Metropolitana Sul.

A análise da precipitação em uma sub-bacia hidrográfica requer uma avaliação detalhada tanto dos padrões de precipitação ao longo do tempo quanto das respostas hidrológicas associadas. Utilizando os gráficos do SUPER, é possível estruturar a análise considerando variações históricas de precipitação e os processos de redistribuição hídrica.

Tendências Gerais

- Período de 1960-1980: Durante essas décadas, há uma concentração maior de eventos extremos de precipitação, com picos que ultrapassam 300 mm/dia. Esses picos podem estar associados a eventos extremos de chuvas intensas, potencialmente ligados a variações sazonais ou fenômenos climáticos como El Niño ou La Niña.
- Período de 1980-2000: Observa-se uma diminuição gradual dos eventos extremos, com picos de precipitação em torno de 200 mm/dia. Esse comportamento pode estar associado a mudanças no

padrão atmosférico ou alterações no uso do solo que afetam o ciclo hidrológico local.

- Período de 2000-2020: As precipitações são menos intensas, com um número reduzido de eventos extremos. Isso pode indicar mudanças no clima regional ou esforços de manejo sustentável de bacias, que influenciam os padrões de precipitação e infiltração.

Impacto das Mudanças Climáticas:

As variações nos eventos extremos podem estar correlacionadas com mudanças globais e regionais no clima. O aumento da temperatura global e a modificação nos padrões de circulação atmosférica podem influenciar o regime de chuvas, afetando tanto a intensidade quanto a distribuição das precipitações.

Motivos para Precipitações Altas ou Baixas:

A variação nos índices de precipitação pode ser influenciada por uma série de fatores, como:

- Fenômenos como o El Niño, alterando os padrões de circulação atmosférica, aumentando a frequência de precipitações extremas. A Oscilação do Atlântico Sul também desempenha um papel fundamental, particularmente no Nordeste do Brasil.

- A substituição de vegetação natural por áreas urbanas ou agrícolas pode aumentar o escoamento superficial e reduzir a infiltração. Isso modifica o ciclo hidrológico da bacia.

- O aumento das temperaturas globais tem impactado o regime de chuvas, tornando-as mais irregulares, com episódios mais intensos e espaçados.

A análise da precipitação nesta sub-bacia hidrográfica revela importantes variações temporais e padrões de redistribuição hídrica. A interação entre as variáveis climáticas, as características do solo e a evapotranspiração influencia diretamente os fluxos de água na bacia. Eventos extremos de precipitação, especialmente nas décadas anteriores ao ano 2000, destacam a vulnerabilidade dessa região a enchentes e à saturação do solo, Figuras 4 e 5. A figura 4 de redistribuição hídrica reforça a importância da infiltração e da recarga de aquíferos, essenciais para a sustentabilidade hídrica da bacia.

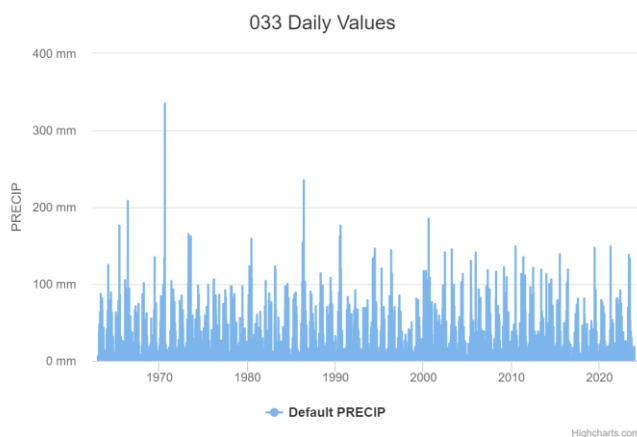


Figura 4 - Precipitação da sub-bacia 33, bacia Metropolitana Sul.

A cidade do Recife possui um clima tropical, com duas estações bem marcadas: uma estação mais chuvosa, que acontece entre o outono e o inverno, e uma estação mais seca, predominante na primavera e no verão. A alta precipitação anual, especialmente entre março e agosto, contribui para os picos de água no solo.

As variações sazonais de chuva na região explicam o padrão cíclico apresentado na Figura 5. Nos meses mais chuvosos, o solo retém mais água, elevando

os níveis para entre 400 e 450 mm. Durante os períodos mais secos, especialmente de outubro a dezembro, os níveis de água no solo (SW) frequentemente caem abaixo de 200 mm.

As altas temperaturas e umidade típicas de Recife aceleram o processo de evapotranspiração, resultando na perda mais rápida de água do solo, sendo evidenciada durante os períodos mais quentes, quando o solo e a vegetação perdem água com maior velocidade.

A cidade do Recife está exposta a chuvas torrenciais e enchentes, causando variações abruptas nos níveis de água do solo. Os picos repentinos de água podem estar associados a esses eventos de chuva intensa, que levam à saturação rápida do solo. A região do Ibura, predominantemente urbana, pode apresentar problemas de drenagem, alterando a capacidade do solo de reter água, assim, gerando oscilações acentuadas entre períodos de seca e saturação do solo, mesmo Recife sendo uma capital com alto índice de chuva.

O clima tropical úmido de Recife, junto com a sazonalidade das chuvas e a interferência humana (urbanização e mudanças no uso do solo), afeta significativamente a variação no teor de água do solo. A análise do Engenho Uchôa destaca a importância da precipitação e de uma boa gestão de recursos hídricos para manter o equilíbrio do solo, especialmente em áreas onde a infraestrutura é sensível às mudanças hídricas.

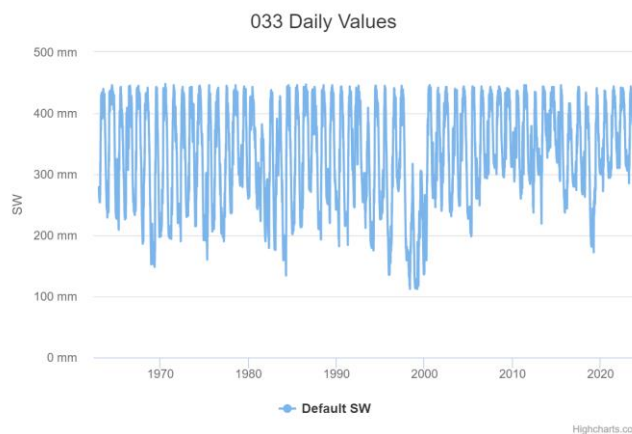


Figura 5 - Teor da água do solo da sub-bacia 033, bacia Metropolitana Sul.

A evapotranspiração real (ETR) também conhecida como evapotranspiração atual ou efetiva, refere-se a quantidade de água no solo e na vegetação que é refletida para atmosfera através de dois processos: evaporação, que é água da superfície do solo transferida para atmosfera e transpiração, a perda de água pelas plantas.

Os dados apresentados são da sub-bacia 33, Metropolitana Sul, que abrange grande parte do Refúgio de Vida Silvestre Mata do Engenho Uchôa (RVSMEU), Figura 6, como também outros bairros que serão influenciados pela evapotranspiração da bacia.

A evapotranspiração potencial diária esteve entre 2,7 a 5,5mm, Figura 7. A evapotranspiração real esteve entre 0,8 e 4,7mm diários, Figura 8. As mínimas da evapotranspiração seguiram um padrão, entre os meses de dezembro e janeiro variando abaixo de 1mm, mas sem chegar em 0mm. Logo, nesses meses há poucas precipitações, o que pode causar o estresse hídrico na planta, logo a diminuição da transpiração e a escassez de água na superfície do solo. vale ressaltar que esses meses são verão, portanto, sendo uma justificativa para baixas chuvas. A Partir dos anos 2000 vimos que mais anos ultrapassaram a máxima ETR de 5mm. Sendo eles: Fevereiro 2004; Março 2007; Março 2009, Março 2011; Março 2014; Março e Abril de 2015; Março 2016; Março 2017; Fevereiro de 2019; Abril de 2020; Janeiro e Março de 2021; Janeiro, Março e Abril 2022; Abril 2023;



Figura 6 - Refúgio de Vida Silvestre Mata do Engenho Uchôa (RVSMEU)

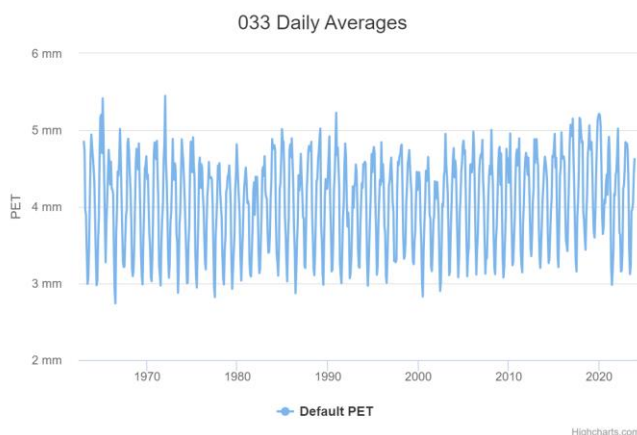


Figura 7 - Evapotranspiração Potencial da sub-bacia 33, bacia Metropolitana Sul.

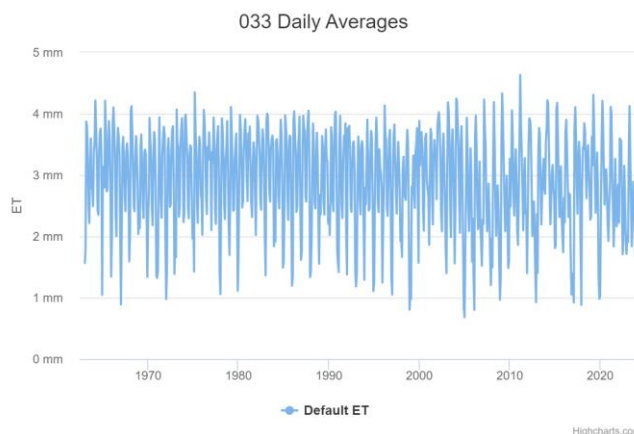


Figura 8 - Evapotranspiração Real da sub-bacia 33, bacia Metropolitana Sul.

Subentende-se que nesses anos (1965, 1966, 1968, 1985, 1991) a incidência solar foi alta sobre a sub-bacia 033, devido a seca e anos de El Niño, o que pôde fazer com que a evapotranspiração real ultrapassasse a média de 5 mm. Outra hipótese, é da biomassa da Mata engenho Uchoa (Figura 9), que durante essas 3 décadas teve um aumento significativo, chegando a 14.755 tons/ac, ou seja, aproximadamente 5,97 toneladas por hectares, em 1970.

Notamos um padrão, que se repete no mês de março durante esses anos. Neste caso, podemos descartar a hipótese da biomassa crescente que aumenta a ETR, pois observamos na Figura 9, que da década de 1993 até 2023 a biomassa está decrescendo. Logo, a hipótese mais aceitável é o alto índice de insolação e aquecimento da superfície e eventos climáticos como El Niño e La Niña.

Já as mínimas seguem o mesmo padrão da primeira análise da ETR, porém, intensificada, o que pode ser pela redução da biomassa e estresse hídrico.

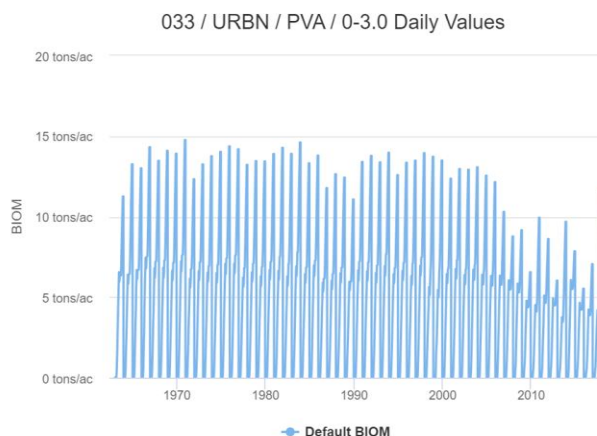


Figura 9 - Biomassa da sub-bacia 033, bacia Metropolitana Sul

O índice de descarga de água subterrânea ao alcance se refere ao fluxo da água acumulada nos reservatórios subterrâneos (aquíferos) que chegam à superfície. A sub-bacia 33 tem um importante papel como zona de descarga, inclusive estando ligada diretamente ao ecossistema localizado no Engenho Uchôa. Essas zonas de descarga são essenciais para manter vivo o fluxo dos rios e estão diretamente ligadas à permeabilidade do solo, onde o solo da região do Recife, por ser bastante poroso, facilita esse processo de descarga das águas subterrâneas.

Outro fator determinante para o processo é a pressão da água nesses reservatórios subterrâneos, onde é necessário que esta vença a pressão atmosférica e, assim, consiga fluir para a superfície. Para isso, é necessário que haja precipitação e infiltração no solo, para que a água chegue aos aquíferos. Portanto, pode-se notar na (Figura 10) uma baixa no índice exatamente nos anos de menor precipitação, ligado também diretamente aos anos de El Niño. Os anos de 1982 e 1983, no começo da década de 80, foram marcados pela forte atuação do El Niño, que resultou em um índice de precipitação menor e, por consequência, uma menor descarga das águas subterrâneas. Esse impacto foi sentido nos anos seguintes, até ser superado no final da década de 80, com outro forte evento climático, dessa vez um período de La Niña, que trouxe consigo um dos maiores picos do índice na série histórica, exatamente no ano de 1987, marcado pela intensa atuação da La Niña.

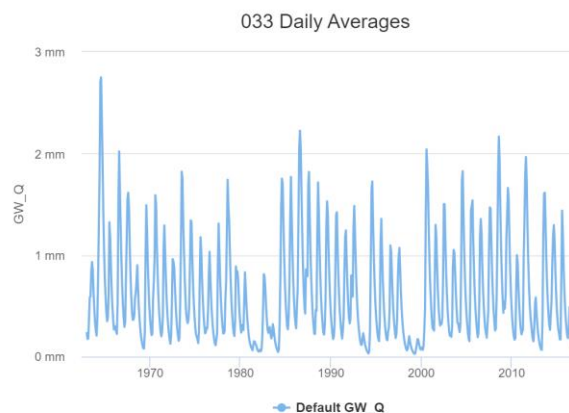


Figura 10 - Descarga de águas subterrâneas ao alcance da sub-bacia 33 - Metropolitana Sul

Comparação com Estudos Anteriores

Estudos anteriores sobre a Bacia Metropolitana Sul, como os de Pereira et al. (2015) e Lima et al. (2019), indicam que as mudanças no uso do solo e o aumento da urbanização alteraram significativamente o escoamento superficial e a infiltração da água na região. A diminuição de áreas vegetadas reduziu a capacidade da bacia de reter água, intensificando enchentes sazonais e dificultando a recarga dos aquíferos.

Impacto da Redução dos Eventos Extremos

A redução dos eventos extremos de precipitação desde os anos 2000 tem implicações ambientais importantes. Embora isso possa reduzir a frequência de enchentes repentinas, também pode afetar a recarga hídrica subterrânea, tornando a região mais vulnerável a períodos de seca prolongada. Esse fenômeno reforça a necessidade de estratégias adaptativas para gerenciar os recursos hídricos da sub-bacia.

Soluções para Redução do Escoamento Superficial

Para minimizar o escoamento superficial e melhorar a infiltração, algumas soluções podem ser implementadas:

- Adoção de Infraestruturas Verdes: telhados verdes, jardins de chuva e pavimentos permeáveis podem ajudar a aumentar a infiltração da água.
- Reflorestamento de Áreas Degradadas: a recuperação da vegetação nativa melhora a retenção hídrica e reduz a erosão do solo.

- Gestão Sustentável do Uso do Solo: políticas públicas que incentivem práticas agrícolas e urbanas sustentáveis podem minimizar impactos negativos sobre o ciclo hidrológico.

Dessa forma, a adoção dessas medidas pode mitigar impactos ambientais e melhorar a resiliência hídrica da sub-bacia 33, garantindo maior sustentabilidade para os ecossistemas locais.

5. Conclusões

Através desse estudo, percebeu-se que a sub-bacia 033, da bacia Metropolitana Sul, apresenta variações de precipitação ao longo das décadas, tendo uma diminuição dos eventos extremos desde os anos 2000. Isso reforça a importância da interação entre o clima e o uso adequado do solo para compreender a dinâmica hídrica da região. A influência de fenômenos climáticos, como o El Niño, e o alto índice de urbanização evidenciam a necessidade de um enfoque integrado na gestão dos recursos hídricos para minimizar impactos negativos sobre a população e o meio ambiente. Para mitigar os problemas identificados, é essencial implementar estratégias sustentáveis de manejo dos recursos hídricos. Infraestruturas verdes, como jardins de chuva e pavimentos permeáveis, podem aumentar a infiltração da água, reduzindo o escoamento superficial. O reflorestamento de áreas degradadas também é uma medida eficaz para melhorar a retenção hídrica e a qualidade do solo. Ademais, a gestão integrada das bacias hidrográficas, aliada a políticas de uso do solo mais sustentáveis, pode minimizar os impactos negativos da urbanização sobre o ciclo hidrológico.

Outro aspecto relevante que merece atenção é a qualidade da água na sub-bacia 033. Estudos futuros podem focar na análise da composição química e biológica dos corpos d'água, avaliando a presença de contaminantes e sua relação com o uso e ocupação do solo. Isso contribuiria para um melhor entendimento dos desafios ambientais e das estratégias necessárias para garantir a segurança hídrica na região.

Por fim, a educação ambiental desempenha um papel fundamental na gestão sustentável da água. A conscientização da população sobre o uso racional dos recursos hídricos e a adoção de boas práticas ambientais podem fortalecer a resiliência da sub-bacia 033 diante das mudanças climáticas e do crescimento urbano.

6. Referências

- Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). (2024). *Bacias hidrográficas – GL 2*. APAC. <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-gl-2/185-bacias-hidrograficas-gl-2/223-gl-2>
- Bruce, P., & Bruce, A. (2019). *Estatística prática para cientistas de dados: 50 conceitos essenciais*. Alta Books.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). (2013). *Classificação de solos do Brasil*. Embrapa.
- Ferreira, J. A., et al. (2020). Desafios da gestão de recursos hídricos na Região Metropolitana do Recife. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25(3), 1–12.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2018). *Mapa – Regiões geográficas: Estado de Pernambuco*. IBGE. <https://geoftp.ibge.gov.br/>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2021). *Censo demográfico 2021*. IBGE. <https://www.ibge.gov.br>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2024a). *Cidades@ – Cabo de Santo Agostinho, PE*. IBGE. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/cabo-de-santo-agostinho/panorama>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2024b). *Cidades@ – Recife, PE: Produto interno bruto dos municípios*. IBGE. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/pesquisa/38/47001>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Mudança do clima 2023: Relatório síntese*. IPCC. <https://www.gov.br/mcti/>
- Melo, J. C., & Silva, R. A. (2019). Ecossistemas da Bacia Metropolitana Sul do Recife: importância e ameaças. *Anais do Congresso Brasileiro de Ecologia*, 1(1), 45–57.
- Monteith, J. L. (1965). *Evaporation and environment*. In *The state and movement of water in living organisms* (Proceedings of the 19th Symposium of the Society for Experimental Biology). Cambridge University Press.
- Nações Unidas Brasil. (2015). *Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. Nações Unidas Brasil. <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>

- NASA Earth Observatory. (2023). *Global Precipitation Climatology Project (GPCP)*. NASA. <https://earthobservatory.nasa.gov>
- Organização Meteorológica Mundial (OMM). (1983). *Manual de normas meteorológicas internacionais*. OMM. <https://public.wmo.int>
- Pereira, M. A. S., & Lima, E. D. (2018). Mudanças climáticas e suas implicações para a Mata Atlântica: estudo de caso em Pernambuco. *Revista Brasileira de Meteorologia*.
- Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). (2024). *Keeping the promise: Annual report 2023*. PNUMA. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/4477>
- Santos, H. G., et al. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos* (5ª ed.). Embrapa.
- United Nations Water. (2024). *The United Nations world water development report 2024*. UNESCO. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2024>
- World Bank. (2023). *Water resources management: A global perspective*. World Bank. <https://www.worldbank.org/water>