



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Mudanças ambientais e climáticas na área de concentração urbana de Macapá e Santana/AP na Amazônia Oriental/Brasil

Deuzinete Cunha Lima¹, Alessandro dos Santos Reis², Pedro Hugo Oliveira Moreira³, Everaldo Barreiros de Souza⁴, Alan Cavalcanti da Cunha⁵

¹Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical, Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), Rodovia Josmar Chaves Pinto, km 02, s/n, CEP 66900-000, Jardim Marco Zero, Macapá, Amapá. deuzinetecunhalima@gmail.com. ²Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical, Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), Rodovia Josmar Chaves Pinto, km 02, s/n, CEP 66900-000, Jardim Marco Zero, Macapá, Amapá. alexbahia_3@hotmail.com. ³Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia (Bionorte-AP), Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), Rodovia Josmar Chaves Pinto, km 02, S/N, CEP 66900-000, Jardim Marco Zero, Macapá, Amapá. ⁴Doutor em Meteorologia, Professor Titular, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará (UFPA), Rua Augusto Correa, 1, Guamá, CEP 66075-110 Belém, Pará. everaldo@ufpa.br. ⁵Dr. Engenharia Civil - Hidráulica e Saneamento, Professor Associado IV, Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), Rodovia Josmar Chaves Pinto, km 02, s/n, CEP 66.900-000, Jardim Marco Zero, Macapá, Amapá. alancunha@unifap.br

Artigo recebido em 06/12/2024 e aceito em 21/08/2025

RESUMO

O estado do Amapá, embora proporcionalmente seja o mais protegido do Brasil, enfrenta perdas progressivas de cobertura vegetal com impactos no microclima local, especialmente em áreas urbanas. Esta pesquisa analisa a variação do uso e cobertura da terra (UCT) e áreas urbanizadas (CURB) nos dois principais municípios do estado (Macapá e Santana), visando quantificar as relações (impactos) entre as transformações ambientais e as variáveis do clima local no domínio geográfico desses municípios. A metodologia de investigação incluiu as seguintes etapas: análise de séries temporais mensais dos elementos climáticos (37 anos), medidos *in situ* pela estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia, tais como temperatura do ar máxima e mínima, umidade relativa e precipitação, que serviram como referência e parâmetro climático; análise espaço-temporal da evolução do UCT e CURB e sua correlação com a mudança do microclima, utilizando os dados digitais mapeados pelo MapBiomas e reanálise ERA5; análise integrada dos regimes climáticos sazonais, avaliando-se quais das variáveis climáticas explicam os efeitos espaço-temporais de UCT e CURB ($p < 0,05$), sobretudo nas áreas onde a biodiversidade vegetal é mais vulnerável. Os resultados sugerem que as mudanças de UCT e CURB, particularmente a expansão agropecuária e perda da vegetação campestre, impactam diretamente o microclima, apresentando forte aderência aos elementos climáticos investigados. Isso sugere especial atenção aos impactos antrópicos no equilíbrio microclimático e consequências ao meio ambiente e à biodiversidade tropical.

Palavras-chave: Amazônia oriental, Uso e Cobertura da Terra, Clima local, Urbanização, Ambiente amazônico.

Environmental and climate change in the urban concentration area of Macapá and Santana/AP in eastern Amazonia/Brazil

ABSTRACT

The state of Amapá, although proportionally the most protected in Brazil, has experienced progressive losses of vegetation cover with impacts on the local microclimate, especially in urban areas. This research analyses the variation of land use and land cover (LULC) and urbanized areas (CURB) in the two main municipalities of the state (Macapá and Santana), aiming to quantify the relationships (impacts) between the environmental transformations and local climate variables in the geographic domain of these municipalities. The methodology included the following steps: analysis of monthly time series of climate elements (37 years), measured *in situ*

by the conventional meteorological station from the National Institute of Meteorology, such as maximum and minimum air temperature, relative humidity and precipitation, which served as reference and climate parameter; spatiotemporal analysis of the evolution of LULC and CURB and their correlation with microclimate change, by using digital data mapped by MapBiomas and ERA5 reanalysis; integrated analysis of seasonal climate regimes, assessing which climate variables explain the spatiotemporal effects of LULC and CURB ($p < 0.05$), especially in areas where biodiversity is more vulnerable. The results suggest that changes in LULC and CURB, particularly agricultural expansion and loss of grassland vegetation, directly impact the microclimate, showing strong adherence to the climatic elements investigated. This suggests special attention to anthropogenic impacts on the microclimatic balance and consequences for the environment and tropical biodiversity.

Keywords: Eastern Amazon, Land Cover/Land Use, Local climate, Urbanization, Amazon environment.

Introdução

O mundo atual se encontra em plena transformação econômica, social e ambiental, no qual alguns processos de exploração de recursos naturais têm ocorrido de forma extremamente rápidas e insustentáveis, na maioria das vezes sem o devido planejamento ou conhecimento das consequências para o equilíbrio ecológico e avaliação do comprometimento da própria qualidade de vida da humanidade (Gutierrez et al., 2022).

Tais mudanças têm sido frequentemente observadas em regiões da Amazônia Oriental, no estado do Amapá e Pará. Destacam-se, por exemplo, o aumento dos riscos climáticos nos pequenos municípios, justamente os mais vulneráveis do ponto de vista dos fenômenos extremos (Souza et al., 2024). Além disso, tem sido observada uma tendência consistente da elevação do nível do mar que vem afetando tanto as zonas costeiras oceânicas quanto as estuarinas do estado do Amapá, impactando diversos níveis da dinâmica e do equilíbrio ecossistêmico. Destacam-se o transporte e a recirculação de nutrientes, dinâmica das correntes e marés nas zonas costeiras (Crizanto et al., 2024), mudanças da paisagem, da geomorfologia de canais naturais, dos processos de salinização e até conexão/desconexão entre rios e lagos costeiros (Cunha e Sternberg, 2018). Todos estes fatores citados têm emergido como evidência de ameaça aos ecossistemas amazônicos (Gutierrez et al., 2022; Souza et al., 2024).

No Estado do Amapá, foco da presente pesquisa, foram abordados alguns problemas ambientais que têm alterado sistematicamente o uso e a cobertura da terra e seus impactos na paisagem natural, em decorrência da expansão urbana e agropecuária, com suas consequências ligadas ao clima local. Assim, o presente artigo destaca as variações espaço-sazonais da temperatura do ar e a intensificação da precipitação do estado do Amapá, no regime chuvoso e seco, considerados tópicos relevantes a serem

considerados para o planejamento de longo prazo e para a elaboração de estratégias avançadas de mitigação de seus impactos em ecossistemas tropicais (Gutierrez et al., 2022). Este cenário inclui potenciais riscos ambientais que estão se acentuando, mesmo em regiões costeiras consideradas ainda conservadas ou pouco antropizadas, como é caso da maioria dos municípios do estado do Amapá (Silva et al., 2021; Cunha e Sternberg, 2018, Souza et al., 2024).

Em nossa avaliação a intensa utilização de recursos naturais associada ao deficiente planejamento estratégico do setor de desenvolvimento econômico tendem a agravar a vulnerabilidade ambiental e dificulta a capacidade do ambiente em manter seu equilíbrio, resistência e a manutenção de serviços ecossistêmicos e ambientais, mesmo em áreas consideradas ambientalmente conservadas (Souza et al., 2024; Silva et al., 2021). Isso porque, nas últimas décadas, as pressões antrópicas sobre os ecossistemas têm modificado a composição, estrutura e serviços destes a uma taxa sem precedentes (Souza et al., 2020; Lautenbach et al., 2011). Uma das primeiras respostas físicas para estes impactos é a mudança no microclima local, pois este é significativamente influenciada pelas transformações de uso e ocupação desordenada da terra (UCT). E, em função desta dinâmica de exploração econômica, as sociedades buscam adaptações e soluções que aumentem sua resiliência perante as mudanças do clima. (Souza et al., 2024; Sousa et al., 2024).

Assim, as mudanças na cobertura vegetal provocadas pelo adensamento de áreas urbanas são fatores relevantes que afetam o equilíbrio hídrico, térmico e dinâmico de uma região, geralmente alterando as variáveis microclimáticas (Chen; Chi, 2022). Deste modo, a compreensão do processo de perda de cobertura vegetal causada pelo uso e ocupação do solo (LULC - Land Use/Land Cover) e seus potenciais impactos no clima é de extrema importância para a sociedade, especialmente para diagnosticar e prever estratégias de manutenção do

bem-estar humano e conservação da biodiversidade, sendo mais necessárias em áreas urbanas dispersas em todo o planeta. Por exemplo, os impactos ambientais como a mudança climática, têm progressivamente afetado os ecossistemas terrestres e aquáticos, afetando a qualidade e a sustentabilidade do próprio homem, em uma retroalimentação positiva de efeitos negativos do clima sobre os ecossistemas e vice-versa (Souza et al., 2024; Gutierrez et al., 2022).

Desta forma, um conjunto de indicadores desses efeitos são úteis nas análises integradas de risco (extremos climáticos em cenários futuros), tais como: exposição (população diretamente afetada) e vulnerabilidade (subdimensões de suscetibilidade e capacidade de enfrentamento e adaptação aos impactos) (IBGE, 2022; Souza et al. (2024). Esta abordagem serve para quantificar, por exemplo, o risco atual e futuro de desastres naturais na região, o que tem sido evidenciado pela intensificação da Curva de Risco na maioria dos pequenos municípios amazônicos (< 50 mil habitantes) nos próximos períodos de 25 anos (Souza et al., 2024).

Em termos urbanos os riscos climáticos têm sido observados por outros autores na Amazônia. Na presente pesquisa destacamos o Município de Macapá em franca e desordenada expansão, cujas consequências são observadas por vários indicadores microclimáticos (Moreira et al. 2023; Moreira et al. 2021; Moreira et al. 2020; Santos et al. 2012), especialmente evidenciando a formação de potenciais “ilhas de calor”, intensificação do desconforto térmico, oscilações interdecadais das tendências de aumento das temperaturas máximas, mínimas e médias, além da redução de noites frias, umidade relativa e aumento dos impactos sobre o padrão da intensidade do vento (brisas).

As maiores proporções de risco (R) climático nos municípios da Amazônia (total de municípios afetados) sugerem aqueles pertencentes aos estados do Amazonas, Roraima, Pará e Maranhão (Souza et al., 2024). Destacam-se os municípios e estados sob ameaça de incêndios florestais, exploração desordenada de recursos naturais e aguda devastação de áreas indígenas (Oliveira et al., 2023; Santos et al., 2024).

Esses exemplos refletem categorias projetadas de alto risco climático na atualidade e, conseqüentemente, no futuro próximo (2015 a 2039), e com altas probabilidades num futuro mais distante (2040 a 2064). Souza et al. (2024) e Gutierrez et al. (2022) alertam ainda que esta suscetibilidade ao risco climático tem sido

negligenciada pelas políticas públicas. Provavelmente devido às dificuldades ou incapacidade da sociedade atual para o enfrentamento/adaptação às ameaças do clima, dentre as quais citam alguns dos principais indicadores de agravamento do grau de vulnerabilidade, destacando-se a economia, precariedade da infraestrutura urbana, serviços médicos, comunicação e mobilidade urbana.

No estado do Amapá, é possível observar alguns estudos que demonstram problemas correlatos, tais como alagamentos ou secas intensas com impactos na saúde pública e saneamento básico (Viegas et al., 2024; Sousa et al., 2021). Todos estes fatores, quando combinados, têm revelado um perfil de pobreza generalizado nos pequenos municípios amazônicos. E a pobreza geralmente está associada aos conflitos sociais, interesses econômicos, perda de biodiversidade e impactos ambientais de diversos matizes (Silva et al., 2021). Portanto, tais fatos científicos motivaram nossa investigação sobre o tema.

Embora o estado do Amapá seja reconhecido como o de maior proporção de áreas protegidas do Brasil (72%) (Silva et al., 2021), seus municípios têm enfrentado um processo preocupante de perda irreversível da cobertura vegetal e até de mudanças de superfícies de água (Sousa et al., 2024; Santos et al., 2024; Oliveira et al., 2023). E por ser um estado genuinamente costeiro, parte dos mangues e das várzeas no estuário amazônicos também estão sob ameaça da elevação do nível do mar (Crizanto et al., 2024; Sousa et al., 2024; Cunha e Sternberg, 2018) e perda da cobertura vegetal, seguidos por processos erosivos que reconfiguram rapidamente essas regiões e acarretam mudanças na biodiversidade.

Por outro lado, as áreas protegidas (APs) são os instrumentos de política pública mais eficazes para proteger os ecossistemas naturais e os conseqüentes serviços que tais ecossistemas podem fornecer à sociedade (Silva et al., 2021). No estado do Amapá os domínios florestais do estado representam mais de 70% da cobertura original e podem ser classificados em tipologias distintas conforme suas formações geológicas, costeiras, altitudes e fatores florísticos estruturais (Silva et al., 2021; Souza et al., 2024, Crizanto et al., 2024).

A ocupação e o uso da terra sem planejamento são geralmente evidenciadores da perda de cobertura da terra e em mudanças acentuadas de superfícies hídricas. A perda do solo, o desflorestamento, incêndios florestais, mudanças geomorfológicas, alteração da dinâmica e variação de superfícies hídrica e da atmosfera são ameaças

que comprometem a qualidade original dos ecossistemas terrestres e aquáticos.

Neste contexto, o uso de geotecnologias, que medem taxas de mudança no uso e cobertura da terra (UCT, CURB, LULC, etc), juntamente com o emprego de dados hidroclimáticos em escalas espaço-sazonais diferenciadas, são aliados importantes na análise de cenários climatológicos atuais e na perspectiva de cenários futuros (Félix et al., 2020; Cunha e Sternberg, 2018; Souza et al., 2024; Crizanto et al., 2024, Santos et al., 2024; Oliveira et al., 2023).

Na presente pesquisa adotamos a classificação do IBGE (2022) para tratar dos municípios definidos pelo IBGE (2016) como áreas de Concentração Urbana (CURB), cujo trabalho foi atualizado no Censo 2022. No estado do Amapá, a região de CURB abrange apenas os municípios de Macapá (a capital do estado) e Santana (a segunda maior sede urbana do estado), sendo este o motivo para delimitar o domínio espacial utilizado para o desenvolvimento da presente pesquisa.

Do ponto de vista do ineditismo da presente pesquisa (pelo nosso conhecimento), não foram reportados trabalhos com esta abordagem sobre as mudanças climáticas para Macapá e Santana, especialmente com a base de dados ERA5. Vale ressaltar que só existe no Amapá a estação meteorológica de Macapá (Fazendinha) apresenta uma série de dados históricos disponível para estudos climatológicos urbanos de longo prazo (Moreira et al., 2023, 2021, 2020). Portanto, esta estação foi utilizada como referência para o caracterizar o clima local e compararmos os parâmetros utilizados no presente estudo com as demais fontes de dados para as análises espaço-temporais.

Nossa principal hipótese é que as mudanças no uso e cobertura da terra (UCT) são resultantes principalmente da urbanização e da expansão agropecuária nos municípios de Macapá e Santana-AP. Assim, os seus consequentes impactos sobre o microclima local podem ser evidenciados pela elevação da temperatura, redução da umidade relativa do ar (UR), como o efeito potencial da “ilha de calor urbana”, alteração no regime hidrológico, possivelmente agravando o estresse ambiental em Macapá e Santana-AP.

As em detalhes, as seguintes hipóteses então foram testadas: 1) a variabilidade da resposta climática apresenta uma relação de linearidade entre a expansão da urbanização e o aumento da temperatura do ar próximo à superfície (TMAX, TMED e TMIN), sendo este efeito similar, porém menor na zona rural; 2) a expansão da agropecuária

resulta no maior impacto sobre o clima, tornando-o mais quente e seco, tanto na zona urbana quanto na zona rural ($p < 0.05$).

Para testar estas hipóteses, o objetivo principal deste trabalho é avaliar as mudanças espaço/temporais de UCT no domínio geográfico da CURB nos municípios de Macapá e Santana – AP, incluindo a análise integrada dos respectivos impactos/efeitos sobre os regimes microclimáticos sazonais. Isto é, a abordagem inclui a escala local do entorno destes municípios, para demonstrar a existência de uma relação linear entre a expansão da urbanização e o aumento sistemático da temperatura do ar próximo à superfície. Um segundo objetivo é avaliar em que nível e escala regional (todo o domínio da CURB) a expansão das áreas de agropecuária tem impactado direta e indiretamente o clima local, gerando condições mais quentes e secas ao longo do tempo.

Material e métodos

Área de estudo

Os municípios de Macapá e Santana (Figura 1) estão localizados na região sudeste do Estado do Amapá, Região Norte Amazônica, sendo Macapá a capital do estado do Amapá, com população estimada de 442.933 pessoas, e extensão territorial de 6.563,849 km². Santana, por sua vez possui população estimada em 112.218 habitantes e uma área de 1.599,70 km² e também só há uma pequena unidade de conservação, a REVECOM (17,18 ha) (IBGE 2022).

Ambos os municípios apresentam áreas com características ambientais preservadas e altos índices de riqueza da biodiversidade tropical, abrangendo o Bioma Amazônico, manchas de Savana Amazônica, Várzeas, Mangues, entre outros (Sousa et al., 2021; Silva et al., 2021).

Macapá e Santana destacam-se por seus desenhos urbanos complexos, caracterizados por terrenos de terra firme e várzeas que interagem e se vinculam (Costa e Samora 2023). Estudos recentes indicam que a influência antrópica ocorrida nessas áreas atua como um acelerador de impactos ambientais, potencializando a degradação e a consequente perda de solos, cobertura vegetal e variações de superfícies hídricas, a partir de práticas como remoção da cobertura vegetal para diferentes finalidades, como a agricultura, obras civis, urbanização, criação de canais artificiais etc. (Santos et al., 2022).

Para a obtenção dos dados de uso e cobertura de terra foi utilizado a plataforma

Mapbiomas

(<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>). O Mapbiomas é uma iniciativa que congrega uma rede colaborativa com diversos especialistas no campo de biomas, sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica, usos de terra e ciência da computação. Por meio de classificados automatizados desenvolvidos e operados a partir da plataforma *Google Earth Engine* é possível gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso de terra do Brasil. No Mapbiomas é disponibilizado informações de UCT no período de 1985 até 2022. O período selecionado abrange esse intervalo temporal e foi utilizado como base para a análise. O mapeamento é realizado através de imagens de satélite Landsat, com resolução espacial de 30 x 30 m. E a partir destas informações é possível produzir mapas anuais de UCT para todo o território brasileiro, abrangendo todos os seis biomas oficiais do país: Amazônia, Mata Atlântica, Caatinga, Cerrado, Pampa e Pantanal.

A Figura 1a ilustra as áreas de CURB no território da Amazônia Legal Brasileira, com destaque para o estado do Amapá na porção setentrional, o qual será nosso objeto focal de pesquisa. A Figura 1b apresenta a área de estudo no domínio geográfico da CURB abrangendo os municípios de Macapá e Santana, notadamente sobre a região costeiro-estuarina do sudeste do estado do Amapá (Sousa et al., 2024). No mapa observa-se que a topografia é relativamente plana e varia entre 10 e 30 m na maior parte da região (exceto no setor noroeste e centro com elevações de até 50 m). Em regiões tropicais de topografia plana, a Organização Meteorológica Mundial considera que a representação espacial de uma estação meteorológica seja de 10 a 20 km (OMM, 2024). Na Figura 1b ilustram-se os círculos concêntricos com raio de 10 e 20 km no entorno da estação (Fazendinha-AP), cuja área engloba a mancha urbana (destacada pelas áreas em vermelho) mapeada pelo IBGE (2019) sobre as sedes municipais de Macapá e Santana.

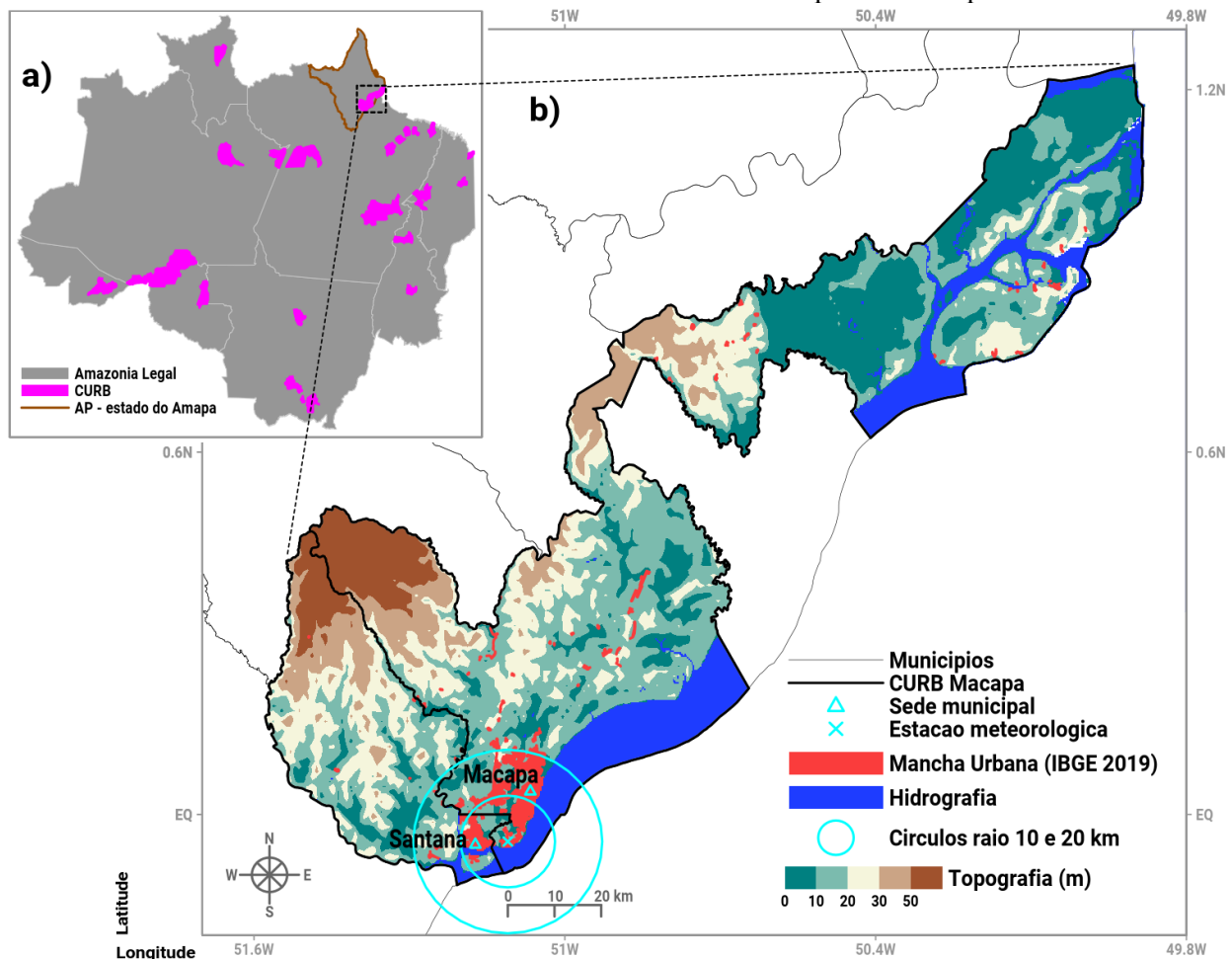


Figura 1. a) Domínio geográfico da Amazônia Legal Brasileira e as localizações das CURB, com destaque para a do estado do Amapá; b) Mapa com a topografia e hidrografia da área de estudo na CURB Macapá e Santana. Os símbolos indicam as localizações das sedes municipais e os círculos mostram a área com raio de 10 e 20 km centrados na estação meteorológica do INMET (Macapá/Fazendinha-AP).

A estação meteorológica de Fazendinha (centro do círculo) é a mais antiga e confiável do estado do Amapá, sendo justificado seu uso como a principal fonte de dados observacionais de superfície relacionados com temas de clima urbano e rural. Alguns exemplos destes estudos são referentes às mudanças de tendência de indicadores climáticos, índice de conforto térmico, índices de calor etc. (Moreira et al., 2023; Moreira et al., 2021; Moreira et al., 2020).

Para a análise temporal dos parâmetros climáticos nós utilizamos as séries de dados mensais de precipitação (PREC), umidade relativa do ar (UR), temperatura do ar máxima (TMAX) e mínima (TMIN) medidos *in situ* pela estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), cuja localização (símbolo x) encontra-se na Figura 1b. Os dados foram obtidos no portal público do Banco de Dados do INMET (<https://bdmep.inmet.gov.br>) com a série histórica disponível para o período de 1985 a 2022.

Nós utilizamos também a base da reanálise ERA5 (Hersbach et al., 2020) com dados digitais em alta resolução espacial de 0.1° (pixel de ~ 11 km) com os dados de PREC e temperatura do ar média (TMED) também disponíveis para o período de 1985 a 2022. É importante frisar que o uso desta base para Macapá e Santana neste tipo de estudo é inédita no estado do Amapá, haja vista que outras bases possuem resolução que não estão adequadas para a escala dos municípios. Portanto, é uma contribuição significativa para os setores de ciências ambientais e de conservação da biodiversidade no estado do Amapá.

Os métodos e procedimentos de análise adotados neste trabalho são descritos a seguir. Inicialmente, nós calculamos as médias climatológicas mensais no período de 1985 a 2022 para as variáveis PREC, UR, TMIN e TMAX da estação meteorológica do INMET, com a finalidade de descrever o ciclo climatológico anual na região. Com base na média anual, foram definidos os regimes sazonais, com o período chuvoso caracterizado no período de janeiro a junho (RegCHUV), enquanto o período seco foi definido entre julho à dezembro (RegSECO) (Figura 2).

Posteriormente foram gerados gráficos e mapas climatológicos para ilustrar as variações sazonais das variáveis analisadas, compreendendo as tendências de longo prazo, descrevendo espacialmente os regimes sazonais e identificando áreas com padrões distintos de precipitação e temperatura.

Para a caracterização ambiental, foram utilizados os mapas de Cobertura e Uso do Solo do Brasil da Coleção 8 do MapBiomias (2023). As imagens, compreendendo o período supracitado, foram baixadas e tratadas no *software* de código aberto QGIS (versão 3.34.10), conforme a composição RGB disponibilizada na plataforma. Com base nos dados extraídos, foram elaborados mapas de UCT focados nas transformações ocorridas ao longo de 37 anos da série. Para cada período analisado, calcularam-se os percentuais das mudanças em diferentes classes de UCT, como florestas, campos, agropecuária e áreas urbanizadas/antropizadas para avaliar os impactos antrópicos no ambiente natural (MapBiomias, 2023) e no microclima.

Nas relações quantitativas entre as mudanças de UCT e climáticas local e regional, nós aplicamos correlações estatísticas entre variáveis ambientais e elementos climáticos, as quais permitiram identificar os respectivos impactos da urbanização e da expansão da agropecuária sobre o clima local (Crawley, 2007).

Após a tabulação e organização das séries temporais, foram realizadas descritivas e inferenciais para analisar e testar estatisticamente as variações espaço-temporais dos parâmetros UCT, CURB e climatológicos (TMAX, TMED, TMIN, UR e PREC). O objetivo foi permitir a análise sobre o quanto a mudança do uso e ocupação do solo impactou o clima nas zonas urbanas e rurais dos dois municípios mais urbanizados do estado do Amapá e quais seriam as intensidades das respostas climáticas a estas mudanças, tanto nas zonas urbanas quanto rurais.

Resultados e discussão

Ciclo climatológico anual e regimes sazonais

A Figura 2 exhibe o ciclo anual (médias climatológicas mensais de 1985 a 2022) da estação meteorológica de Macapá. Observa-se claramente um comportamento sazonal pronunciado, com os meses do regime chuvoso – RegCHUV (chuva mensal abaixo da média anual de 220 mm) entre janeiro e junho, enquanto o regime seco – RegSECO se manifesta entre julho à dezembro. A umidade relativa segue praticamente o mesmo padrão de variação que a precipitação. Observa-se que a TMAX apresenta um comportamento sazonal oposto ao da UR e PREC. Mas, no caso da TMIN, há uma breve singularidade em relação a TMAX, entre junho e julho.

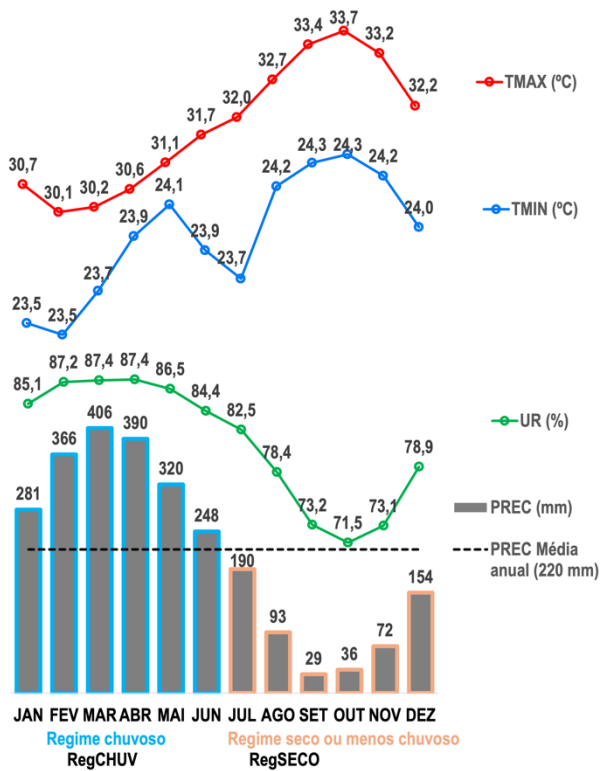


Figura 2. Ciclo climatológico anual das variáveis climáticas na estação meteorológica de Macapá, destacando os meses dos regimes sazonais. As variáveis e unidades encontram-se na legenda à direita.

Na Figura 3 são apresentados os padrões espaciais climatológicos de PREC e TMED do

ERA5, tanto no período chuvoso RegCHUV quanto no período seco RegSECO. É possível observar também os valores climatológicos de PREC e TMED utilizando-se os dados das séries históricas da Estação meteorológica do INMET (Fazendinha – Macapá/AP) e do banco de dados do ERA5, exatamente no ponto geográfico da Sede municipal e na CURB. No presente caso, incluímos todos os pontos de grade do domínio municipal em ambos os regimes climatológicos (RegCHUV, com PREC em volta dos 340 mm e RegSECO, com PREC por volta dos 98 mm). Do mesmo modo, em relação a TMED, em ambos os regimes climatológicos RegCHUV apresentou TMED em volta dos 26,3 °C e em RegSECO TMED ficou por volta dos 27,6 °C. No caso de TMED especializada (ERA5) observamos que as diferenças entre as temperaturas médias e máximas alcançam valores $\approx 1,5$ °C, com destaque para as áreas urbanas (CURB em relação ao entorno). Entretanto, durante o período chuvoso (RegCHUV) as diferenças são menos pronunciadas, devido provavelmente a presença dos grandes sistemas convectivos associados à Zona de Convergência Intertropical - ZCIT) (Sousa et al., 2009). De modo contrário, no período seco (RegSECO), as diferenças entre as temperaturas de superfícies são mais acentuadas, respondendo de forma mais rápida e intensa à radiação solar.

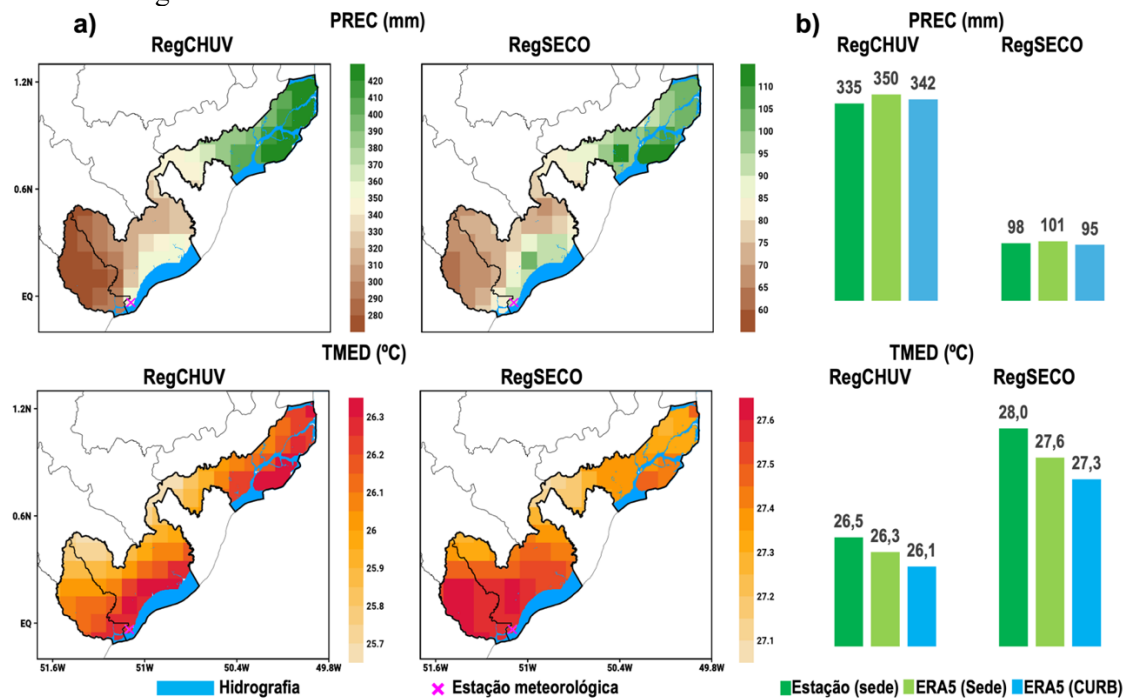


Figura 3. a) Padrões espaciais climatológicos de PREC e TMED do ERA5 no RegCHUV e RegSECO; b) Valores climatológicos de PREC e TMED para os dados da Estação meteorológica e do ERA5 no ponto geográfico da Sede municipal e na CURB (todos pontos de grade) no RegCHUV e RegSECO.

Mudanças ambientais de UCT sobre a CURB entre 1985 e 2022

A Figura 4 mostra as séries temporais anuais das cinco classes de UCT no domínio da CURB. Notadamente as classes de AGROPECUÁRIA e URBANIZAÇÃO se destacam como as variáveis que apresentaram aumento contínuo e sistemático ao longo das últimas quatro décadas. No período de 1985 a 2000 as coberturas de FLORESTA (exceto em 1994) e de CORPO-D'ÁGUA apresentaram ampliação de área, enquanto a VEG-CAMPESTRE sofreu redução significativa. Por exemplo, a partir de 2005 até 2022 a FLORESTA exibe decaimento persistente, principalmente a partir de 2000. Verifica-se um breve declínio da variação da VEG-CAMPESTRE, de 1985 até 2000. A partir desta data, houve certa regularidade na variação da VEG-CAMPESTRE entre 2001 e 2019, e posteriormente ocorreu uma forte tendência ao declínio entre 2020 e 2022. A área de CORPO-D'ÁGUA diminui até 2015, mas depois aumenta significativamente até 2022. É relevante destacar que, em relação à variação hídrica, Sousa et al., (2024) registraram que estas variações espaço-temporais na superfície da água ocorreram em toda a área costeira do Amapá (estuarina e oceânica). Por exemplo, mostrando aumentos significativos da superfície hídrica entre 1985 e 2022. Os referidos autores

acrescentam que tais variações foram maiores na área costeira oceânica ($\approx 35,57\%$) do que na área costeira estuarina ($\approx 32,63\%$), onde estão concentrados os municípios de Macapá e Santana.

Um segundo exemplo seria o município costeiro estuarino de Cutias do Araguari, o qual experimentou o maior aumento absoluto da área da superfície da água ao longo do período analisado ($\approx 86,39\%$ em relação ao estágio inicial de monitoramento). Em segundo lugar, foi o município costeiro oceânico de Calçoene ($\approx 73,47\%$, em comparação ao estágio inicial). Todavia, chama a atenção de que essas variações da área da superfície hídrica foram influenciadas por variáveis antropogênicas, especialmente a área plantada com soja. Por outro lado, fatores hidroclimáticos tiveram relativa influência, com destaque para a elevação média do nível do mar. Mas, para os municípios de Macapá e Santana, entre 1985 e 1990, também houve um crescimento acentuado e positivo dessas superfícies hídricas. E entre 1990 e 2000 essa variação foi pronunciada, com aumento/diminuição oscilantes das superfícies hídricas. E finalmente, entre 2000 e 2020, houve novamente um acentuado declínio das superfícies hídricas, com uma oscilação simultânea neste intervalo, a partir do qual ocorreu novamente uma tendência acentuada de declínio até 2022.

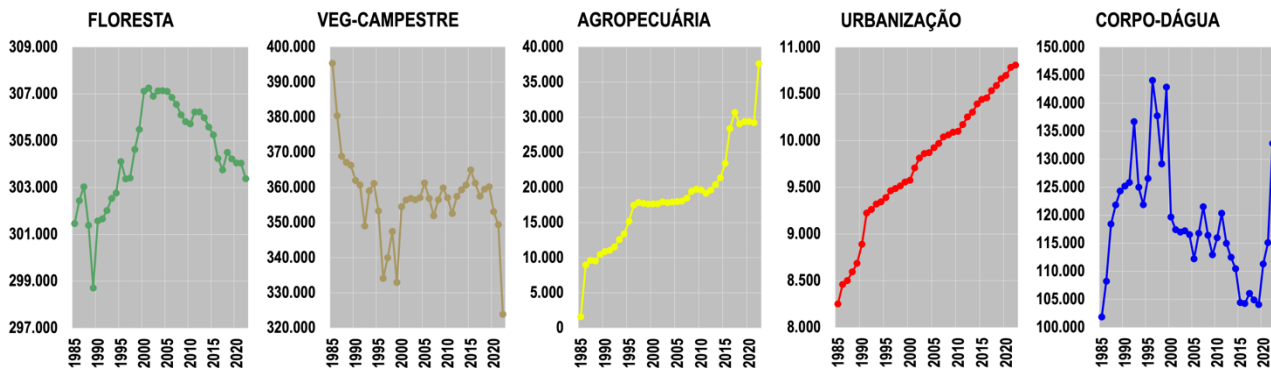


Figura 4. Séries temporais anuais das classes de UCT no domínio da CURB de Macapá/Santana. Todas variáveis são expressas em unidade de área (ha).

A análise espaço/temporal das mudanças ambientais representadas pelos mapas de UCT e respectivos gráficos percentuais a cada 5 anos é apresentada nos painéis da Figura 5. Para complementar a interpretação desses resultados, a Tabela 1 enumera os valores quantitativos das mudanças percentuais a cada 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 37 anos. Na Figura 5 os padrões espaciais da classe de URBANIZAÇÃO (áreas em vermelho) são claramente restritos nas sedes municipais de

Macapá e de Santana, sendo que a expansão em todo o período (variação de 37 anos, 1985 a 2022) é de 0,32% (Tabela 1). Particularmente, a AGROPECUÁRIA (áreas em amarelo) é uma das classes que apresenta mudanças visualmente perceptíveis nos mapas de UCT da Figura 5, com prevalência de expansão crescente na faixa estreita do município que liga a parte central ao setor nordeste (principalmente na BR 156 e AP 340, onde compreende o trecho que inicia no

entroncamento com a Rodovia AP-070 até a entrada do município de Itaúbal em todo o período. A partir de 2015 até 2022, essa área se expande para a parte mais central de Macapá no período de 1985 (Rodovia do Curiaú – AP 340). Nessas regiões é notória a supressão da classe de VEG-CAMPESTRE (áreas em marrom). De acordo com Sousa et al. (2023) o município de Macapá e Itaúbal estão se transformando em uma área de produção intensa de plantio de soja, apresentando correlação positiva e significativa com variações de superfícies hídricas e até elevação do nível do mar (Crizanto et al., 2024). No levantamento de Pires (2019), Macapá, Tartarugalzinho e Itaúbal são os principais produtores de soja do estado do Amapá.

E esta expansão espacial foi demonstrada pela evolução da AGROPECUÁRIA no estado. É relevante observar na Tabela 1 que a variação sazonal por classe de UCT, com a redução no nível de detalhamento dos intervalos sazonais (número de anos), a interpretação de cada intervalo vai se definindo, tornando-se diferente para cada linha. Isto é, conforme o intervalo de monitoramento aumenta, a variação da UCT torna-se também mais definida. Por exemplo, na última linha, para o intervalo de análise de 37 anos consecutivos, o resultado da variação foi: FLO = 0,24%; CAMP = -8,84%; AGRO = 4,45%; URB = 0,32% e ÁGUA = 3,83%.

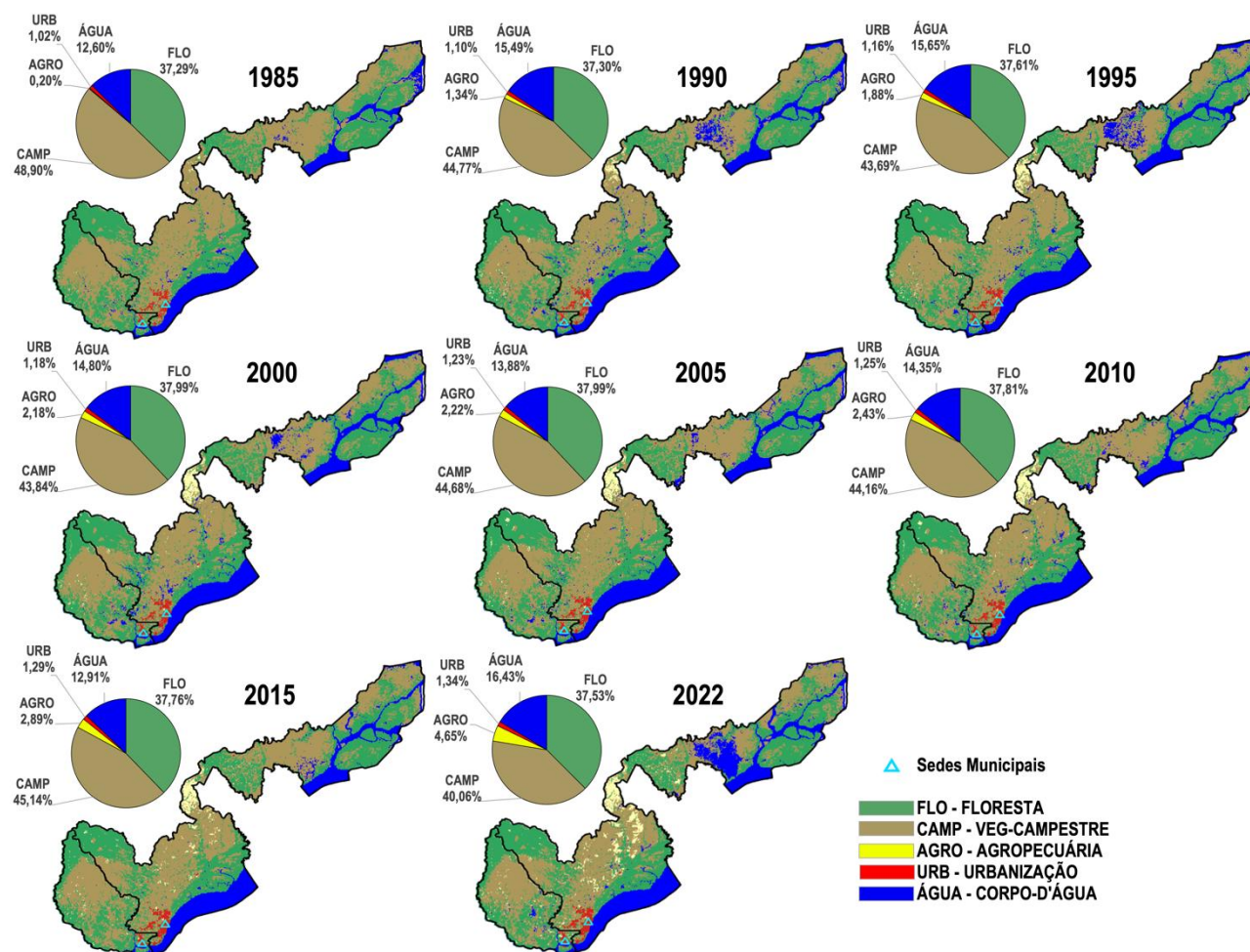


Figura 5. Gráficos percentuais e mapas das classes de UCT no domínio da CURB Macapá/Santana na sequência temporal de 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2022.

Tabela 1. Mudanças percentuais das classes de UCT a cada 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 37 anos. A variação das cores mais claras ao mais escuro em vermelho e azul denotam valores mais negativos e positivos, respectivamente.

variação 5 anos	1990 e 1985	1995 e 1990	2000 e 1995	2005 e 2000	2010 e 2005	2015 e 2010	2022 e 2015
FLO	0,01%	0,31%	0,37%	0,00%	-0,17%	-0,06%	-0,23%
CAMP	-4,13%	-1,08%	0,15%	0,84%	-0,52%	0,98%	-5,08%
AGRO	1,15%	0,54%	0,31%	0,04%	0,21%	0,47%	1,76%
URB	0,08%	0,06%	0,02%	0,04%	0,02%	0,04%	0,05%
ÁGUA	2,89%	0,17%	-0,85%	-0,92%	0,47%	-1,43%	3,51%
variação 10 anos	1995 e 1985	2000 e 1990	2005 e 1995	2010 e 2000	2015 e 2005	2022 e 2010	
FLO	0,33%	0,69%	0,37%	-0,17%	-0,23%	-0,29%	
CAMP	-5,21%	-0,92%	0,99%	0,32%	0,46%	-4,10%	
AGRO	1,68%	0,84%	0,35%	0,25%	0,67%	2,22%	
URB	0,14%	0,08%	0,07%	0,06%	0,06%	0,09%	
ÁGUA	3,06%	-0,69%	-1,77%	-0,45%	-0,97%	2,08%	
variação 15 anos	2000 e 1985	2005 e 1990	2010 e 1995	2015 e 2000	2022 e 2005		
FLO	0,70%	0,68%	0,20%	-0,23%	-0,46%		
CAMP	-5,05%	-0,09%	0,47%	1,30%	-4,62%		
AGRO	1,99%	0,88%	0,55%	0,71%	2,43%		
URB	0,16%	0,13%	0,09%	0,11%	0,11%		
ÁGUA	2,20%	-1,61%	-1,31%	-1,89%	2,55%		
variação 20 anos	2005 e 1985	2010 e 1990	2015 e 1995	2022 e 2000			
FLO	0,70%	0,51%	0,14%	-0,46%			
CAMP	-4,22%	-0,61%	1,45%	-3,79%			
AGRO	2,03%	1,09%	1,02%	2,47%			
URB	0,21%	0,15%	0,13%	0,15%			
ÁGUA	1,28%	-1,14%	-2,74%	1,63%			
variação 25 anos	2010 e 1985	2015 e 1990	2022 e 1995				
FLO	0,53%	0,45%	-0,09%				
CAMP	-4,74%	0,37%	-3,63%				
AGRO	2,23%	1,55%	2,77%				
URB	0,23%	0,19%	0,18%				
ÁGUA	1,75%	-2,57%	0,77%				
variação 30 anos	2015 e 1985	2022 e 1990					
FLO	0,47%	0,22%					
CAMP	-3,75%	-4,71%					
AGRO	2,70%	3,31%					
URB	0,27%	0,24%					
ÁGUA	0,32%	0,94%					
variação 37 anos	2022 e 1985						
FLO	0,24%						
CAMP	-8,84%						
AGRO	4,45%						
URB	0,32%						
ÁGUA	3,83%						

Impactos/efeitos da urbanização no clima local (entorno das sedes municipais)

Observando a Figura 6 nota-se que a Capital, Macapá já vem registrando historicamente alterações do clima, como recentemente observado por Moreira et al., (2023; 2021 e 2020). Nestes termos, é possível avaliar que o clima em Macapá está efetivamente se alterando, resultando em um “novo normal” (Sousa et al., 2024). E neste

contexto, a ciência do clima tem sido crucial para a compreensão sistêmica das mudanças climáticas locais/regionais e globais atuais e futuras, uma vez que tendem a intensificar fenômenos atmosféricos/oceânicos extremos (Sousa et al., 2024; Crizanto et al., 2024; Sousa et al., 2025), comprometendo diretamente o bem-estar humano. Na presente pesquisa, nossos resultados estão em direta concordância com a literatura do clima

urbano de Macapá (Moreira et al., 2023; 2021 e 2020;).

Na Tabela 2 durante o período chuvoso (RegCHUV) observamos correlações negativas do crescimento urbano com a precipitação ($r = -0,27$) e umidade relativa ($r = -0,75$), ocorrendo o mesmo para o período seco (RegSECO), mas em menor grau. Isto é, para a precipitação $r = -0,04$ e para a umidade relativa ($r = -0,70$). E em relação à TMAX e TMIN os resultados foram positivos, com $r = 0,74$ para TMAX e $r = 0,58$ para TMIN no período chuvoso (RegCHUV). Da mesma forma, seguindo uma tendência similar, porém mais significativa, os resultados foram de $r = 0,78$ para TMAX e $r = 0,82$ para TMIN no período chuvoso (RegSECO). Estes resultados, no entanto, podem ser interpretados da seguinte forma: a) No período chuvoso, a precipitação é mais independente dos fenômenos termodinâmicos locais, e assim os sistemas de grande escala sempre preponderam em relação a pequena escala ou perturbações locais (Sousa et al., 2009); b) Por outro lado, no período seco, as temperaturas máximas e mínimas são mais dependentes dos fenômenos termodinâmicos locais, e assim preponderam sobre as grandes

escalas e refletem seus efeitos imediatos com mais evidência (Sousa et al., 2009; Moreira et al., 2023, 2021, 2020). Tais efeitos ficam mais evidentes observando o comportamento e a tendência das curvas da Figura 6, onde a inclinação das curvas de variação das temperaturas máximas e mínimas é maior que as de variação de precipitação.

No que tange a temperatura, os dados seguem uma curva de tendência similar ao encontrado por Moreira et al. (2021), em que as TMAX e TMIN tanto no regime seco quanto no chuvoso, apresentam um aumento significativo. Mas isto pode ser explicado pela expansão da malha urbana macapaense e santanense, associadas a redução da vegetação, o que provoca uma alteração do balanço de radiação na CURB. A redução nos índices de vegetação em Macapá, associado a uma maior urbanização e utilização de superfícies impermeáveis, reduzem a evaporação e a dissipação de calor. Todavia, um conjunto de fatores tendem a trazer como resultado um aumento do armazenamento de calor na malha urbana: o aumento do calor antropogênico e do saldo de radiação, uma redução da corrente de ventos e da evaporação.

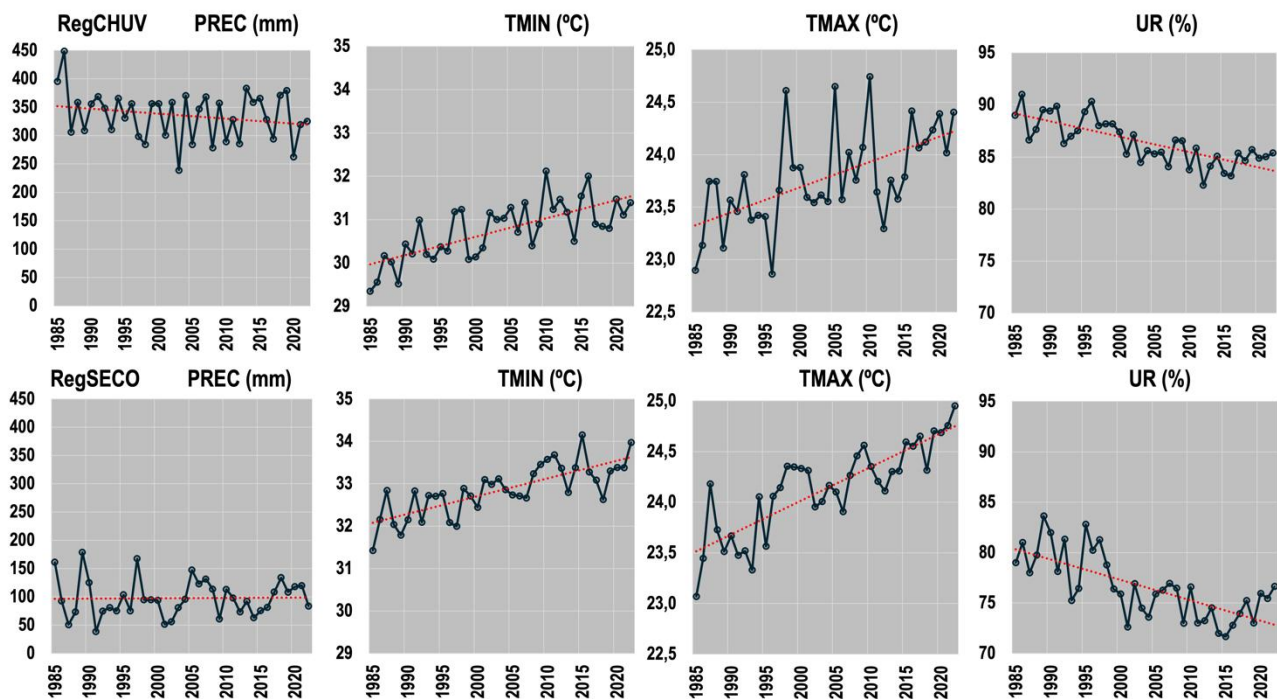


Figura 6. Séries temporais de 1985 a 2022 da PREC (mm), TMIN (°C), TMAX (°C) e UR (%) para a estação meteorológica de Macapá nos regimes RegCHUV e RegSECO.

Tabela 2. Correlações entre os dados anuais de URBANIZAÇÃO e os dados sazonais de PREC, TMAX, TMIN e UR nos regimes RegCHUV e RegSECO.

	RegCHUV	RegSECO
PREC	-0,27	-0,04
TMAX	0,74	0,78
TMIN	0,58	0,82
UR	-0,75	-0,70

A Figura 7 indica significância estatística relevante ao correlacionar o aumento da temperatura máxima no período seco ($R^2=0,55$) e chuvoso ($R^2=0,61$) com a expansão urbana. O mesmo ocorre com a temperatura mínima no regime seco ($R^2=0,67$). Outro fator que deve ser destacado é o aumento da temperatura mínima na CURB, tendo significância estatística relevante especialmente no período seco, cujo fator microclimático é mais dependente de fatores meso e macroclimáticos. Estes dados podem indicar um aumento do desconforto térmico e da probabilidade da existência do fenômeno da Ilha de Calor Urbana (Moreira et al., 2023; Moreira et al., 2020), aspectos estes evidenciados em diversas cidades da região amazônica, como descrito por Costa et al. (2013), que afirmam ocorrer uma tendência de estresse bioclimático nas cidades tropicais no período seco e recomenda a utilização de estratégias para inclusão de materiais de construção de edifícios e de pavimentação que possam ampliar os níveis de refletância solar e emissividade térmica. Quanto à umidade relativa do ar, tanto no clima seco (REGSECO) quanto no chuvoso (REGCHUV) apresentam tendência de queda, o que indica que as cidades de Macapá e Santana tendem a ser mais secas no tempo. Na tabela 3 fica

evidente esta queda, ao se comparar o período entre 2008 e 2022 com o período entre 1985 e 1999. Nota-se assim que o primeiro teve uma queda de 5,4% no período seco e 3,7% no período chuvoso. Em relação a precipitação, em concordância com o encontrado em trabalhos anteriores, não apresentou significância estatística (Tabela 3), evidenciando a necessidade de pesquisas que investiguem principalmente fatores meso e macroclimáticos que expliquem bem o índice de chuvas e sua correlação com a CURB. Na Figura 7 é possível analisar as tendências dos parâmetros climáticos em função ao crescimento urbano de Macapá e Santana. Observa-se que para a precipitação a correlação é sempre negativa com a urbanização para ambos os períodos sazonais (RegCHUV e RegSECO), porém mais dispersas no período seco (r de correlação menor do que no período chuvoso). De modo contrário, todos os parâmetros de temperatura, máximas e mínimas, as correlações tendem a ser positivas, com maior aderência para o período seco, indicando novamente que os efeitos termodinâmicos são mais evidentes no período seco, onde as trocas térmicas são mais significativas no período seco. Observa-se que TMIN do RegCHUV ($r=0,67$) e TMAX de RegSECO ($r=0,60$) ocorreram os maiores valores de coeficientes de correlação (aderência). Na Tabela 3 é possível observar um resumo dos parâmetros estatísticos descritivos, tais como as médias das amostras de 5 anos (1985 a 1999 e 2008 a 2022) e suas respectivas inclinações relacionadas com as taxas de mudanças na PREC, TMAX, TMIN e UR (estação meteorológica de Macapá – INMET). Observe que os símbolos indicam o resultado do teste de significância.

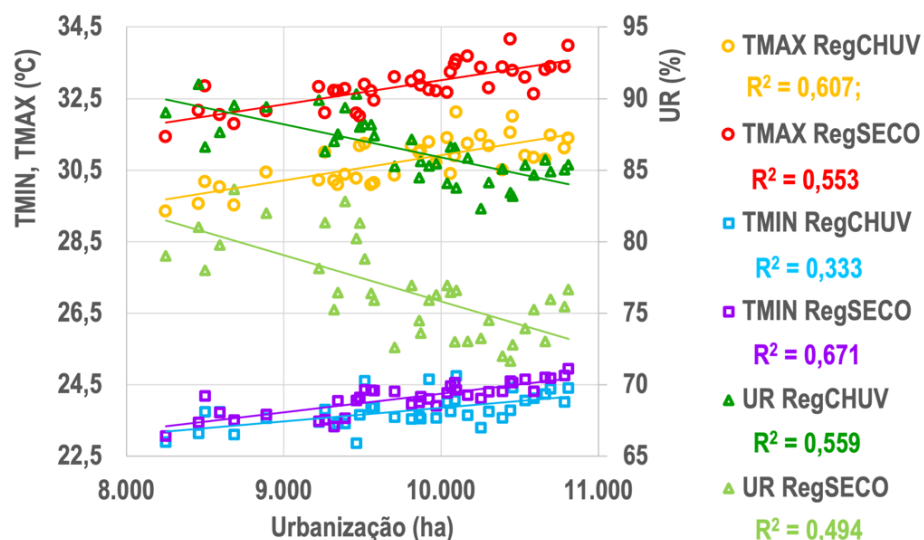


Figura 7 – Tendências temporal dos parâmetros meteorológicos em função da expansão da urbanização em Macapá e Santana (1985 a 2022).

Tabela 3. Médias das amostras de 5 anos (1985 a 1999 e 2008 a 2022) com as respectivas mudanças na PREC, TMAX, TMIN e UR para os dados da estação meteorológica de Macapá. Os símbolos indicam o resultado do teste de significância.

Variável	Regimes	Média 1985 a 1999	Média 2008 a 2022	Mudanças	p-valor
PREC	RegCHUV	346,5	328,7	-5,13% #	0,1080
	RegSECO	99,0	96,1	-2,95% #	0,4000
TMAX	RegCHUV	30,2	31,2	0,94 °C **	0,0004
	RegSECO	32,3	33,4	1,03 °C **	0,0002
TMIN	RegCHUV	23,5	24,0	0,51 °C *	0,0612
	RegSECO	23,8	24,5	0,74 °C **	0,0000
UR	RegCHUV	88,5	84,8	-3,7 % **	0,0006
	RegSECO	79,6	74,2	-5,4 % **	0,0009

sem significância; * significância 90%; ** significância 99%

Impactos/efeitos da supressão de vegetação campestre e expansão da agropecuária no clima em escala regional (domínio CURB)

Neste tópico analisamos o impacto local da supressão da vegetação campestre e agropecuária

nas sedes municipais de Macapá e Santana (CURB). Na Figura 8 são mostradas as séries e tendências temporais de 1985 a 2022 da PREC (mm) e TMED (°C) para o domínio da CURB (Macapá/Santana) nos regimes RegCHUV e RegSECO.

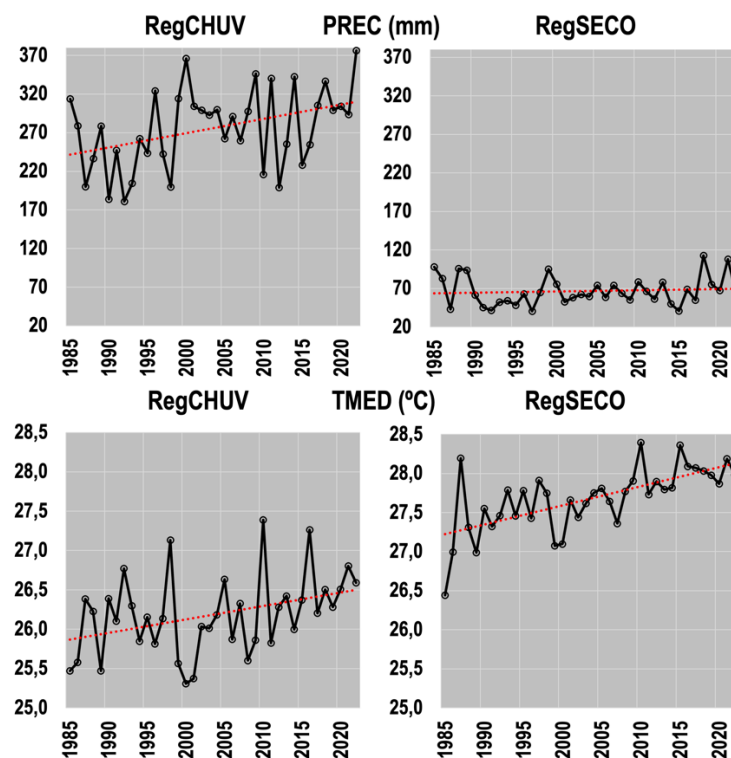


Figura 8. Séries temporais de 1985 a 2022 da PREC (mm) e TMED (°C) para o domínio da CURB (Macapá/Santana) nos regimes RegCHUV e RegSECO.

Na Tabela 5 observamos que a precipitação (PREC) do período chuvoso RegCHUV variou negativamente com CAMP ($r = -0,19$) assim como no período seco (RegSECO) ($r = 0,17$). Enquanto que AGRO variousempre positivamente, onde no período chuvoso ($r = 0,41$) e no período seco ($r = 0,07$). Por outro lado, observamos que a temperatura (TMED) do período chuvoso RegCHUV ($r = -0,19$) e seco RegSECO variou negativamente com CAMP ($r = -0,29$). E variou com AGRO positivamente ($r = 0,40$) e com o AGRO ($r = 0,40$) quanto AGRO ($r = 0,66$).

Tabela 5 – Correlações entre os dados anuais de VEG-CAMPESTRE E AGROPECUÁRIA e os dados sazonais de PREC e TMED nos regimes RegCHUV e RegSECO.

Variável	Regimes	CAMP	AGRO
PREC	RegCHUV	-0,19	0,41
	RegSECO	0,17	0,07
TMED	RegCHUV	-0,19	0,40
	RegSECO	-0,29	0,66

Na Tabela 6 estão descritas as médias das amostras de 5 anos (1985 a 1999 e 2008 a 2022) com as respectivas mudanças na PREC e TMED para os dados do ERA5 no domínio da CURB

(Macapá/Santana). Observa-se que a PREC variou positivamente em ambos os períodos chuvoso (RegCHUV, 18,45% - significativo, e seco RegSECO, 6,22%, porém não significativo). Do mesmo modo, para a temperatura média TMED houve um aumento de 0,30 °C chuvoso (RegCHUV, não significativo) e um aumento de 0,56 °C no período seco (RegSECO), mas no limite de significância ao nível de 90%.

Tabela 6. Médias das amostras de 5 anos (1985 a 1999 e 2008 a 2022) com as respectivas mudanças na PREC e TMED para os dados do ERA5 no domínio da CURB (Macapá/Santana). Os símbolos indicam o resultado do teste de significância.

Variável	Regime	Média 1985_1999	Média 2008_2022	Mudança	p-valor
PREC	Reg-CHUV	247,3 mm	292,9 mm	18,45 %	0,002
	Reg-SECO	65,3 Mm	69,3 mm	6,22%	0,311
TMED	Reg-CHUV	26,1 °C	26,4 °C	0,30 °C	0,110
	Reg-SECO	27,4 °C	28,0 °C	0,56 °C	0,095

sem significância; * significância 90%; ** significância 99%

Impactos das futuras mudanças climáticas globais em regimes sazonais mais quentes

Apesar dos resultados consistentes, a pesquisa possui algumas limitações que merecem ser destacadas nesta análise. Primeiramente, a base de dados utilizada (ERA5) tem também suas limitações quanto à captura de microclimas, especialmente em áreas de transição entre zonas urbanas e rurais. Além disso, embora o ERA5 forneça dados globais detalhados com alta resolução espacial e temporal, sua capacidade de representar microclimas específicos em ambientes heterogêneos, como transições urbano-rurais, é limitada. Isso ocorre devido à resolução relativamente “grosseira” como escala ainda não adequada para este tipo de análise ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$, cerca de 25 km) e à dificuldade de modelagem detalhada das características urbanas, como geometria da cidade, materiais de construção e vegetação (Nogueira et al., 2022).

Além disso, a análise climática foi baseada em dados secundários e modelos que, embora de alta precisão em relação a outras bases de dados, podem não captar todas as variações locais específicas decorrentes de eventos climáticos extremos. E tais eventos têm propriedades altamente variáveis em escalas locais, sendo difícil capturar todas as nuances devido à falta de dados observacionais e à resolução inadequada dos modelos (IPCC, 2014). Os modelos globais são mais confiáveis para projeções de médias climáticas de longo prazo do que para eventos extremos localizados. Muitos modelos enfrentam dificuldades em representar adequadamente a física de eventos de pequena escala, como ondas de calor intensas ou precipitações extremas (Met Office, 2020).

Outro ponto relevante é a ausência de análises mais detalhadas sobre os impactos socioeconômicos dessas mudanças climáticas, o que pode limitar o entendimento completo das consequências dessas variações para as populações locais. Isto é, estudos mostram que as mudanças climáticas têm impactos significativos nas condições socioeconômicas, com ênfase em como as populações vulneráveis são afetadas (World Bank, 2020, Souza et al., 2024; Sousa et al., 2024; Crizanto et al., 2024).

A ferramenta MapBiomas, embora extremamente útil no monitoramento de grandes mudanças de UCT, possui restrições relacionadas à sua resolução espacial de 30 m, podendo não captar variações sutis em áreas menores ou que

apresentem transições ambientais complexas, tais como bordas entre florestas e áreas urbanas, assim como também os erros de classificação automática, particularmente em zonas de uso misto, podendo impactar na precisão dos dados (Souza Junior et al., 2023; Sousa et al., 2024; MapBiomas 2024). Além disso, as atualizações em tempo real também não permitem o monitoramento em tempo real, o que pode ser uma limitação para análises mais dinâmicas e contínuas de mudanças rápidas, como eventos climáticos ou desmatamentos instantâneos (MapBiomas, 2023; ArcGIS Hub, 2024).

As transformações no uso e cobertura da terra, impulsionadas pela atividade humana, têm causado mudanças profundas na composição, estrutura e nos serviços prestados pelos ecossistemas terrestres, afetando-os a uma taxa sem precedentes. Esses processos de modificação do ambiente são frequentemente ligados às práticas de uso do solo, como a expansão agrícola, urbanização e exploração de recursos naturais (Bodnaruk et al., 2017), que resultam em desequilíbrios ecológicos e degradação Ambiental. Portanto, vários estudos apontam que tais mudanças afetam tanto a biodiversidade quanto a funcionalidade dos ecossistemas, prejudicando serviços essenciais como o controle do clima, o ciclo da água e a fertilidade do solo (Souza et al., 2020; McPhearson et al., 2015; Lautenbach, 2011).

O crescimento desordenado e a ocupação de áreas sensíveis têm levado à perda considerável de biodiversidade e à alteração de ecossistemas locais, tais como manguezais e outras zonas de vegetação natural (Sousa et al., 2024), o que também têm gerado pressões ambientais significativas mesmo para o estado do Amapá, considerado como proporcionalmente mais ecologicamente protegido do Brasil (Dias et al., 2016).

A expansão urbana e a proliferação de áreas construídas, juntamente com o aumento de novos empreendimentos industriais, pecuária e agricultura, resultaram em impactos notáveis ao longo dos anos mesmo nestas áreas de elevado grau de proteção ambiental. A expansão das áreas agrícolas, em especial, tem mostrado um crescimento expressivo, impulsionado por uma maior demanda de recursos naturais (uso da terra), como alimento, energia, água, minerais e fertilizantes. Esses fatores, conforme estudos de Talib e Randhir (2023) e Mallya et al. (2021), indicam que o aumento descontrolados da urbanização e da agropecuária tem sido coadjuvantes e alterado significativamente processos geomorfológicos e hidrológicos naturais

e até o aumento de incêndios florestais têm contribuído com perdas irreversíveis de paisagens e da rica biodiversidade tropical (Cunha e Sternberg, 2018, Oliveira et al., 2023).

Para futuros estudos, sugere-se uma análise mais aprofundada sobre os impactos do uso e ocupação do solo (UCT) em eventos climáticos extremos, como enchentes e secas severas, que são cada vez mais comuns na região amazônica. Principalmente a relação entre desmatamento, mudanças no uso da terra e a intensificação de eventos climáticos extremos, exploradas em diversos estudos, mesmo no estado do Amapá (Crizanto et al., 2024; Sousa et al., 2024; Moreira et al., 2020, 2021 e 2023). Além disso, as evidências sugerem que, em termos gerais, a perda de cobertura florestal e a alteração do uso do solo na Amazônia têm exacerbado eventos climáticos como secas (incêndios florestais) e inundações severas, com impactos nos ciclos hidrológicos e biodiversidade (Parsons et al., 2018).

Vargas Zepetello et al. (2022) desenvolveram projeções probabilísticas do número médio de dias por ano em que o Índice de Calor excederá níveis “perigosos” e “extremamente perigosos”, considerando emissões globais de CO₂ em escala de países e a sensibilidade climática transitória global. Os referidos autores projetam que a temperatura média global provavelmente se aproximará de 2 °C até 2050, com uma projeção mediana de 1,8 °C, caso a dinâmica recente do sistema climático permaneça estável. Em nossa pesquisa, focada em Macapá e Santana, no estado do Amapá, as projeções indicaram aumentos na TMED de até 1,7 °C nas áreas urbanas e 0,5 °C nas áreas rurais, alinhando-se aos cenários globais apresentados.

Nestes termos, é provável que, sem reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa (GEEs), notáveis porções dos trópicos e subtropicais globais devem experimentar níveis do Índice de Calor superiores aos considerados “perigosos” durante a maior parte do ano até o final do século. E esta evidência tem sido avaliada para os pequenos municípios da Amazônia Oriental (AP e PA) com resultados similares (Souza et al., 2024 e Sousa et al., 2025).

Portanto, sem medidas de adaptação, esse cenário indica que reduziria significativamente a resiliência dos serviços ecológicos (SEs) (Bodnaruka et al., 2017), além de aumentar a incidência de doenças relacionadas ao calor (Moreira et al., 2020, 2021 e 2023; Costa et al., 2013; Santos et al., 2012). Além disso, aumentaria o risco de incêndios florestais (Oliveira et al.,

2023), haveria alterações sérias do equilíbrio dos ecossistemas costeiros (Crizanto et al., 2024; Sousa et al., 2024) e reduziria a capacidade de trabalho humano ao ar livre em muitas regiões onde a agricultura/agropecuária e ou a pesca de subsistência são importantes.

Vargas Zepetello et al. (2022) afirmam ainda que regiões onde o limiar do Índice de Calor extremamente perigoso quase nunca é excedido, atualmente, poderão experimentar entre um e quinze dias por ano em que esse limite será ultrapassado até o final do século XXI. Esses locais incluirão grandes porções da Índia e da África Subsaariana, que, de acordo com as projeções demográficas da ONU para 2100, abrigarão cerca de 5,3 bilhões de pessoas, ou metade da população mundial naquela época. Tais projeções, no entanto, não consideram explicitamente possíveis retroalimentações do ciclo do carbono. Os autores referidos também alertam que, nas latitudes médias, onde as excedências do Índice de Calor “perigoso” são menos frequentes do que nos trópicos, ondas de calor de intensidade semelhante à registrada em Chicago em 1995, que causou centenas de mortes, passarão de eventos raros a ocorrências mais regulares. As consequências de temperaturas extremamente altas seriam profundas, impactando negativamente a saúde humana, especialmente de idosos, pessoas em situação de pobreza e trabalhadores ao ar livre, além de afetar ecossistemas, exigindo uma reorientação básica para lidar com os riscos do calor extremo, mesmo nessas regiões.

Outros tópicos que Vargas Zepetello et al. (2022) abordam é que as mudanças no Índice de Calor, impulsionadas pelas emissões antropogênicas de CO₂, aumentarão significativamente a exposição global a ambientes perigosos nas próximas décadas. Mesmo que a meta do Acordo de Paris de limitar o aquecimento global a 2 °C seja alcançada, a exposição em níveis perigosos do Índice de Calor pode aumentar entre 50% e 100% nos trópicos e de 3 a 10 vezes em muitas regiões das latitudes médias. Sem reduções mais agressivas de emissões, projeções indicam que até 2100 a maioria das pessoas vivendo em regiões tropicais enfrentará valores perigosamente altos do Índice de Calor na maior parte dos dias de cada ano típico, enquanto ondas de calor mortais, que hoje são raridades nas latitudes médias, poderão se tornar eventos anuais.

Em nossa pesquisa, estamos de acordo com o que sugere McPhearson et al., (2015) em que o planejamento, a gestão e a governança focados na resiliência serão atendidos com mais profundidade

ao incluir explicitamente os serviços ecossistêmicos (SEs) nas abordagens de resiliência. Melhorar a resiliência nos sistemas urbanos, tanto na pesquisa quanto na prática, exige um diálogo com a natureza complexa e as interações dentro dos sistemas socioecológicos urbanos. Incorporar as avaliações de valoração dos serviços ecossistêmicos e os benefícios de investir na capacidade dos ecossistemas urbanos oferece oportunidades para incorporá-los na governança para a resiliência. No entanto, os referidos autores reconhecem que os processos de política e planejamento são dependentes do contexto, com dinâmicas distintas que afetam as aspirações de integrar os serviços ecossistêmicos urbanos. É necessário cada vez mais defender o planejamento orientado para os serviços ecossistêmicos urbanos. Os referidos autores sugerem que é importante vincular a pesquisa sobre resiliência urbana aos serviços ecossistêmicos urbanos como um caminho seguro para melhorar a capacidade e a eficácia da governança urbana para a resiliência.

Além disso, neste contexto, é possível ampliar o escopo de estudo para incluir variáveis socioeconômicas (Souza et al., 2024), a fim de melhor entender como as mudanças ambientais e do clima afetam a biota e as comunidades locais (Souza et al., 2025), especialmente as que dependem diretamente dos recursos naturais. Um aspecto relevante e válido seria incorporar outras bases de dados climáticos e modelos de previsão, sendo possível comparar resultados e aumentar a precisão das análises (como já foi inicialmente incluída a base de dados ERA5).

A integração de dados socioeconômicos pode ajudar a compreender como as mudanças do clima impactam as comunidades e vice-versa, especialmente em áreas de alta dependência de recursos naturais, e facilitar a formulação de estratégias de adaptação mais eficazes. Além disso, a utilização de diversas bases de dados climáticos e modelos preditivos pode aumentar a precisão das análises, proporcionando uma visão mais holística dos desafios ambientais e socioeconômicos interconectados (Koo, 2024).

Por fim, a aplicação de resoluções ainda demanda mais aprofundamento em análise de áreas urbanas e maior expansão do estudo para outras regiões além do estado do Amapá. Preferencialmente em toda a região Amazônica, na qual poderia fornecer uma visão mais abrangente das dinâmicas de UCT e suas implicações climáticas sobre a biodiversidade tropical.

Conclusões

Com base nos dados obtidos durante a pesquisa, é possível confirmar as duas principais hipóteses de pesquisa: A primeira é de que há diferenças significativas nas respostas de variáveis climáticas impactadas pelas mudanças no uso e cobertura da terra (UCT e CURB) em Macapá e Santana, mesmo quando comparadas às áreas urbanas e rurais, economicamente, socialmente e ambientalmente relevantes do amapá. A Segunda hipótese também foi confirmada. Os parâmetros meteorológicos/climáticos indicaram elevação média de temperatura de até 1,7°C em áreas urbanas e 0,5°C em áreas rurais, evidenciando a influência da expansão urbana e dos diferentes usos rurais (agropecuária, floresta, campos arbustivos), com maior pressão antrópica na zona urbana.

A aplicação inédita da base de dados ERA5, com resolução aumentada para 0,1° (Lat, Lon), mostrou uma resposta espaço-temporal coerente em relação à UCT, apresentando correlações significativas com variáveis como Floresta (FLO), Campos Arbustivo (CAMP), Agropecuária (AGRO), Urbanização (URB) e Superfície de Água (ÁGUA). A UCT também mostrou boa resposta física em relação à evolução temporal (1985, 1990, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2024) para TMAX, TMED, TMIN, UR e PREC.

A ferramenta MapBiomas, embora útil no monitoramento de grandes mudanças de UCT, possui restrições de resolução espacial de 30 m, podendo não captar variações sutis em áreas menores ou com transições ambientais complexas, como bordas entre florestas e áreas urbanas, além de erros de classificação automática em zonas de uso misto, impactando a precisão dos dados. Além disso, as atualizações em tempo real também não permitem monitoramento dinâmico.

Apesar dos resultados consistentes, a pesquisa possui limitações: a base de dados ERA5 tem limitações na captura de microclimas, especialmente em áreas de transição urbano-rural; porque a análise climática baseou-se em dados secundários e modelos que podem não captar todas as variações locais de eventos climáticos extremos; e a ausência de análises detalhadas sobre os impactos socioeconômicos das mudanças climáticas limita o entendimento completo das consequências físicas para as populações locais.

Para futuros estudos, sugere-se uma análise mais aprofundada dos impactos do uso e ocupação do solo (UCT) em eventos climáticos extremos, como enchentes e secas severas, comuns na Amazônia. Além disso, seria interessante incluir

variáveis socioeconômicas para entender as mudanças ambientais que afetam as comunidades locais, especialmente aquelas dependentes dos recursos naturais. Adicionalmente, integrar o trabalho de campo objetivando validar informações para uma classificação dos usos de solo mais fidedignas a realidade e com maior representatividade.

Finalmente, seria válido incorporar outras bases de dados climáticos e modelos de previsão para comparar resultados e aumentar a precisão das análises. Assim, a aplicação de resoluções maiores em áreas urbanas e a expansão do estudo para outras regiões do Amapá e da Amazônia poderiam fornecer uma visão mais abrangente da dinâmica de UCT e suas implicações climáticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e o Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical (PPGBIO). Os autores são gratos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio através da Bolsa Produtividade PQ-2 (Processos 314830/2021-9 e 314809/2023-6); TEDPLAN-FUNASA 06/2018.

Referências

- ArcGIS Hub. (2024). *MapBiomass Land Use/Land Cover Time Series*. ArcGIS Hub. Redlands. Disponível em: <https://hub.arcgis.com/datasets/esri::mapbiomas-land-use-land-cover-time-series/about>
- Bodnaruka, E.W., Krolla, C.N., Yangb, Y., Hirabayashic S., Nowakd, D.J., Endrenya, T.A. (2017). Where to plant urban trees? A spatially explicit methodology to explore ecosystem service tradeoffs. *Landscape and Urban Planning*. 157, 457–467. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.016>
- Chen, W., Chi, G (2022). Urbanization and ecosystem services: The multi-scale spatial spillover effects and spatial variations. *Land Use Policy*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105964>.
- Costa, C.P., Samora, P.R. (2023). Formas urbanas para áreas de conflito socioambiental em APP's: Modelos para desafios das áreas de ressaca de Macapá-AP. *Revista de Morfologia Urbana*. 11: 2182-7214. <https://doi.org/10.47235/rmu.v11i1.297>
- Costa, A. C. L., Silva Junior, J. A., Cunha, A. C., Feitosa, J. R. P., Portela, B. T. T., Silva, G. G. C., Costa, R. F. (2013a). Índices de conforto térmico e suas variações sazonais em cidades de diferentes dimensões na Região Amazônica. *Revista Brasileira de Geografia Física* 6, 478–487. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v6.3.p478-487>
- Crawley, M. J. 2012. Classical Tests. In *The R Book*. Crawley, M. J. (Ed.). London, Imperial College, London at Silwood Park, UK. pp 344-387. <https://doi.org/10.1002/9781118448908.ch8>
- Crizanto, J. L. P., Abreu, C. H. M., Sousa, E. B., Cunha, A. C. (2024). Modeling the Impacts of Sea Level Rise Scenarios on the Amazon River Estuary. *Hydrology*, 11(6), 86. <https://doi.org/10.3390/hydrology11060086>
- Cunha, A.C., Sternberg, L.S.L. (2018). Using stable isotopes ^{18}O and ^2H of lake water and biogeochemical analysis to identify factors affecting water quality in four estuarine Amazonian shallow lakes. *Hydrol Process* 32:1188–1201. <https://doi.org/10.1002/hyp.11462>
- Dias, T.C.A.C., Cunha, A.C., Silva, J. M. C. (2016). Return on investment of the ecological infrastructure in a new forest frontier in Brazilian Amazonia. *Biological Conservation*, v. 194, p. 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.12.016>
- Félix, A.S., do Nascimento, J. W. B., De Melo, D. F., Furtado, D., Dos Santos, A.M. (2020). Análise exploratória dos impactos das mudanças climáticas na produção vegetal no Brasil. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*. v. 13(1), p. 397-409. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2020v13n1p397-409>
- Gutierrez, C.B.B., de Souza, E.B., Gutierrez, D.M.G. (2022). Global/Regional Impacts on Present and Near-Future Climate Regimes in the Metropolitan Region of Belém, Eastern Amazon. *Atmosphere*, 13, 1077. <https://doi.org/10.3390/atmos13071077>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2016). *Censo Demográfico*. Rio de Janeiro. Disponível em:

- <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/9497-ibge-divulga-as-estimativas-populacionais-dos-municipios-em-2016>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2019). *Censo Demográfico*. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ap/macapa/panorama>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2022). *Censo Demográfico*. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ap/macapa/panorama>
- IPCC (2014) *Relatório de Mudanças Climáticas 2014: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade*. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Genebra. Disponível em: AR5 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability — IPCC
- Koo, H. (2024). Economic and Social Implications of Biodiversity Loss: A Comprehensive Review. *Journal of Biodiversity and Endangered Species*. 12. <https://doi.org/10.37421/2332-2543.2024.12.548>
- Lautenbach, S., Kugel, C., Lausch, A., Seppelt, R. (2011). Analysis of historic changes in regional ecosystem service provisioning using land use data. *Ecological Indicators*. 11, 676–687. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.09.007>
- Mallya, C.L., Rwiza, M.J. 2021. Influence of land use change on nitrate sources and pollutant enrichment in surface and groundwater of a growing urban area in Tanzania. *Environ Earth Sci*. 80, 111. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09386-z>
- MapBiomas (2023). MapBiomas Collection 9: *Products and Updates*. Plataforma MapBiomas. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecao-9>. Acessado em 16 de novembro de 2024.
- MapBiomas (2024). *MapBiomas Brasil: Metodologia e Produtos*. Plataforma MapBiomas. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org>. Acessado em 16 de novembro de 2024.
- McPhearson, T.A.N., Andersson E., Elmqvist, T., Frantzeskaki, N. (2015). Resilience of and through urban ecosystem services. *Ecosystem Services* 12152–156. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.07.012>
- Met Office (2020). *Relatório sobre a Representação de Eventos Climáticos Extremos em Modelos Climáticos*. Met Office, Reino Unido. Disponível em: <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/weather-forecasting>
- Moreira, P.H.O., Costa, A. C. L., Silva Junior, J. A., Cunha, A. C. (2023). Variações sazonais do índice de temperatura efetiva (ITE) e índice de calor (IC) com o uso do solo em zona urbana na Amazônia Oriental. *Caminhos de Geografia*, v. 24, p. 01-17. <https://doi.org/10.14393/RCG249365649>
- Moreira, P.H.O., Cunha, A.C., Costa, A.C. (2021). Índice de Tendências Climáticas de Longo Prazo em Área Urbana na Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, p. 3372-3387. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.6.p3372-3387>
- Moreira, P.H.O., Cunha, A.C., Silva Jr, J.A., Costa, A.C.L (2020). Variação Microclimática em Sítios Urbanos com Diferentes Níveis de Cobertura Vegetal Como Subsídio à Formação de Ilha de Calor. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, p. 1-12. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3254-3274>
- Nogueira, M., Hurdac, A., Ermida, S., Lima, D. C. A., Soares, P. M. M., Johannsen, F., & Dutra, E. (2022). Assessment of the Paris urban heat island in ERA5 and offline SURFEX-TEB (v8.1) simulations using the METEOSAT land surface temperature product. *Geoscientific Model Development*, 15, 5949–5965. <https://gmd.copernicus.org/articles/15/5949/2022>
- Oliveira, G. de, Mataveli, G., Stark, S.C., Jones, M.W., Carmenta, R., Brunsell, N. A., Santos, Celso A.G., Da Silva Jr, C.A., Cunha, H.F.A., Da Cunha, A.C., Dos Santos, C.A.C., Stewart, H., Boanada, F.V., Hellenkamp, S., Artaxo, P., Alencar, A.A.C., Moutinho, P., Shimabukuro, Y.E. (2023). Increasing wildfires threaten progress on halting deforestation in Brazilian Amazonia. *Nature Ecology & Evolution*, v. 7, p. 1-2. <https://doi.org/10.1038/s41559-023-02233-3>
- Organização Meteorológica Mundial (OMM). (2024). Genebra. Disponível em: <https://wmo.int/es>

- Parsons, L. A., Leroy, S., Overpack, J. T., Bush, M., Cárdenes-Sandí, G. M., Saleska, S. (2018). The threat of Multi-year Drought in Western Amazonia. *Water Resources Research*, 54, 5890-5904. <https://doi.org/10.1029/2017WR021788>
- Pires, M.A.F., Silva, A.N., Rosa, D.S.M., Pinto, H.C.C., Pessoa, R.A., Araújo, R. C., Abreu, V. S. (2019). Levantamento de dados sobre a produção da soja no Estado do Amapá: Safra 2019. *Macapá: Governo do Estado do Amapá - RURAP*. Disponível em: [RURAP_6a471de69fba53aac346b78d6e611f93.pdf](https://doi.org/10.1029/2017WR021788)
- Santos, C.A.G., Santos, C.A., Cunha, H.F.A., Cunha, A.C., Hellenkamp, S., Silva, R.M. (2024). Protecting Amazon's Indigenous lands: a multidisciplinary approach. *Frontiers in ecology and the environment*, v. 22, p. 1-2. <https://doi.org/10.1002/fee.2796>
- Santos, E. S., Lopes, P. P. P., Nascimento, O. O., Pereira, H. H. S., Collin, R., Sternberg, L. S. L., Cunha, A. C. (2018) The impact of channel capture on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. *Sci Total Environ*. 624:887–899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.211>
- Santos, K. P. C., Cunha, A. C., Souza, E. S., Costa, A. C. L. (2012) Índices de Tendências Climáticas Associadas à “ilha de calor” em Macapá-AP (1968-2010). *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (online)*, 23, 1-16. Disponível: http://rbciamb.com.br/index.php/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/327. Acesso em: 03 out. 2024.
- Santos, V. F., Nobre Junior, B. B., Souza, F. M., Silva, L. M. A. (2022). Amapá: Um Estado Costeiro - Reflexões sobre Vulnerabilidades, Riscos e Adaptações a Mudanças Climáticas. In: Porto J. (ed) *Encontros e percepções geográficas: diálogos e provocações*, vol 1. Editora Uniedusul, Maringá, pp 110–132. <https://doi.org/10.51324/54180221.8>
- Silva, J.M.C., Dias, T.C.A.C., Cunha, A.C., Cunha, H.F.A. (2021). Funding deficits of protected areas in Brazil. *Land Use Policy*, v. 100, p. 104926-6. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104926>
- Souza, E.S.; Ferreira, D.B.S.; Anjos, L. J. S; Cunha, A. C.; Silva Jr, J. A.; Coutinho, E. C.; Sousa, A. M.L.; Souza, P.J.O.P.; Correa, W.P.M.; Dias, T. S. S.; Carmo, A. M. C.; Gutierrez, C. B. B.; Sodre, G. R. C.; Lima, A. M. M.; Rocha, E. P.; Moraes, B. C.; Pezzi, L. P.; Ambrizzi, T. (2025). Intensification of Natural Disasters in the State of Pará and the Triggering Mechanisms Across the Eastern Amazon. *Atmosphere*, 16, p. 1-21. <https://doi.org/10.3390/atmos1601000>
- Sousa E. B de.; Lopes, Marcio N.G., Rocha, Edson J.P. da, Souza, J., Ricardo, S. de, Cunha, Alan C. da ; Silva, Renato R. da, Ferreira, Douglas B.S., Santos, Daniel M., Carmo, A. M. C. do, Sousa, J. Raimundo A. de, Guimarães, Paulo L., Mota, M. Aurora S. da, Makino, Midori ; Senna, Renato C., Sousa, Adriano M.L. ; Mota, Galdino V., Kuhn, Paulo A.F. ; Souza, Paulo F. de S., Vitorino, M. Isabel ; Cunha, A. C. (2009). Precipitação sazonal sobre a Amazônia oriental no período chuvoso: observações e simulações regionais com o RegCM3. *Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso)*, v. 24, p. 111-124. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000200001>
- Sousa T.S., Cunha H.F.A., Cunha, A.C. (2021). Risco de alagamentos influenciados por fatores ambientais em zonas urbanas de Macapá e Santana/AP. *Revista Ibero Americana De Ciências Ambientais* 12:245–259. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0021>
- Souza, E.S., Silva, B.C.S., Serra, E.M.F., Ruiz, M.J.B., Cunha, A.C., Souza, P.J.P. O., Pezzi, L.P., Rocha, E.P., Sousa, A.M. L., Silva Junior, J.A., Carmo, A.M.C., Ferreira, D.B.S., Lima, A.M.M., Santos, F.A.A., Moraes, B.C., Ruivo, M., Toledo, P.M., Ambrizzi, T. Small municipalities in the Amazon under the risk of future 2 climate change. *Climate*, v. 12, p. 1-19, 2024. <https://doi.org/10.3390/cli12070095>
- Sousa T.S., Viegas C.J.T., Cunha, H.F.A., da Cunha, A.C. (2023). Drainage and preliminary risk of flooding in an urban zone of Eastern Amazon. *J Geosci Environ Prot* 11:1–16. <https://doi.org/10.4236/gep.2023.115001>
- Sousa, T.S.; Araújo, E. P.; Cunha, A. C. (2024). Water surface variability in oceanic and estuarine coasts of Amapá, Brazil. *Aquat Sci*, 86, 45. <https://doi.org/10.1007/s00027-024-01053-2>
- Souza Junior, C. M., Oliveira, L. A., Souza Filho, J. S., Ferreira, B. G., Fonseca, A. V., Siqueira, J. V. (2023). Landsat sub-pixel land cover dynamics in the Brazilian Amazon. *Frontiers in Forests and Global*

- Change*. 6.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1294552>
- Souza Junior, C. M., Shimbo, J. Z., Rosa, M. R., Parente, L. L., Alencar, A. A., Rudorff, B. F. T., Hasenack, H., Matsumoto, M., Ferreira, L. G., Souza-Filho, P. W. M., Oliveira, S. W., Rocha, W. F., Fonseca, A. V., Marques, C. B., Diniz, C. G., Costa, D., Monteiro, D., Rosa, E. R., Vélez-Martin, E., Weber, E. J., Lenti, F. E. B., Paternost, F. F., Pareyn, F. G. C., Siqueira, J. V., Viera, J. L., Neto, L. C. F., Saraiva, M. M., Sales, M. H., Salgado, M. P. G., Vasconcelos, R., Galano, S., Mesquita, V. V., Azevedo, T. (2020). Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sensing*. 12:2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- Souza, E.S., Silva, B.C.S., Serra, E.M.F., Ruiz, M.J.B., Cunha, A.C., Souza, P.J.P.O., Pezzi, L. P., Rocha, E.P., Sousa, A.M.L., Silva Junior, J.A., Carmo, A.M.C., Ferreira, D.B.S., Lima, A.M.M., Santos, F.A.A., Moraes, B.C., Ruivo, M., Toledo, P.M., Ambrizzi, T. Small municipalities in the Amazon under the risk of future climate change. *Climate* (2024), v. 12, p. 1-19. <https://doi.org/10.3390/cli12070095>
- Talib, A., Randhir, T.O. (2023). Long-term effects of land-use change on water resources in urbanizing watersheds. *PLOS Water* 2(4): e0000083. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000083>
- Vargas Zeppetello, L. R. V., Raftery, A. E., Battist, S. D. 2022. Probabilistic projections of increased heat stress driven by climate change. *Communications Earth & Environment*. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00524-4>
- World Bank. Climate Change and Poverty: A New Agenda for Action. World Bank. (2020). Washington. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/climatechange/overview>