



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**

SABRINA DE ANDRADE OLIVEIRA SANTOS

**RELAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA E O ARMAZENAMENTO DE
CARBONO NA ÁREA URBANA DE SALVADOR-BA: EVOLUÇÃO TEMPORAL DE
1985 A 2023 E CENÁRIO PARA 2040**

Salvador
2025

SABRINA DE ANDRADE OLIVEIRA SANTOS

**RELAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA E O ARMAZENAMENTO DE
CARBONO NA ÁREA URBANA DE SALVADOR-BA: EVOLUÇÃO TEMPORAL DE
1985 A 2023 E CENÁRIO PARA 2040**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso
de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade
Federal da Bahia, como requisito parcial à obtenção
do grau de Bacharel em Geografia.

Orientadora: Prof^a Dr^a Erika do Carmo Cerqueira

Salvador
2025

S237r Santos, Sabrina de Andrade Oliveira

Relação do uso e cobertura da terra e o armazenamento de carbono
na área urbana de Salvador-BA: evolução temporal de 1985 a 2023 e
cenário para 2040 / Sabrina de Andrade Oliveira Santos. - Salvador, 2025.
70 f.: il.

Orientadora: Professora Dra. Erika do Carmo Cerqueira.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade
Federal da Bahia, Instituto de Geociências, 2025.

1. Uso e Cobertura da Terra. 2. Armazenamento de carbono. 3. Área
urbana. 4. Mudanças climáticas. I. Cerqueira, Erika do Carmo. II.
Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 711.14(813.8)

SABRINA DE ANDRADE OLIVEIRA SANTOS

RELAÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA E O ARMAZENAMENTO DE CARBONO NA ÁREA URBANA DE SALVADOR-BA: EVOLUÇÃO TEMPORAL DE 1985 A 2023 E CENÁRIO PARA 2040

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Geografia da Universidade Federal da Bahia como pré-requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Geografia pela seguinte banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ERIKA DO CARMO CERQUEIRA
Data: 18/07/2025 10:22:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Erika do Carmo Cerqueira
Orientadora – Universidade Federal da Bahia

Documento assinado digitalmente
 MARIA DAS GRACAS BORJA GONDIM DOS SANTOS
Data: 21/07/2025 20:11:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Maria das Graças Borja Gondim dos Santos Pereira
Membro interno - Universidade Federal da Bahia

Documento assinado digitalmente
 MATHEUS SILVA CABRAL
Data: 18/07/2025 20:21:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ms. Matheus Silva Cabral
Membro externo - Assistente de Resiliência Regional
no ICLEI América do Sul

AGRADECIMENTOS

Para aqueles que tornaram este caminho tanto mais suave...

Ao mais importante, Deus, por ouvir minhas orações noturnas. Por me tornar forte e resiliente. Por me dar a sabedoria necessária. Por me proporcionar realizar os meus maiores sonhos.

Aos meus pais, meu porto seguro, que vieram do interior do meu Nordeste e buscaram na metrópole, área desta pesquisa, melhores oportunidades de vida. Um tributo a eles que, manobrando carros, vendendo lanches e cuidando de idosos, me fizeram chegar até aqui com uma educação de excelência, familiar e profissional. A minha maior referência feminina, minha mãe, pelo seu jeito destemido e terno, que me impulsiona a voar mais longe. Eu sei, sou protegida pela sua oração diária, às 4h da manhã, em meio aos seus plantões, pedindo que Maria passe à frente, livrando-me das dificuldades e das energias ruins. Ao meu pai, um homem especial que nunca deixou nada faltar, mesmo que faltasse para ele. Que foi muitas vezes meu abrigo, dono das palavras de aconchego. Que aprendeu a sorrir e a abraçar com o passar dos anos e se tornou frágil e amoroso. A minha irmã e amiga, aquela que me incentivou a ser a melhor, para que eu me tornasse sua referência. Ela que, com palavras duras e claras, me fez enxergar a direção correta. Ao meu amor, que deu um novo sentido a esta vida, que amaciou este caminho acadêmico. A ele que foi minha força quando as coisas ficavam mais difíceis, que me ajudou a redirecionar as estratégias da vida e que nunca me deixou sozinha nas noites em claro. Aos meus avós maternos, minha segunda referência familiar, que, mesmo distantes, nunca deixaram de olhar e orar por mim. Aos meus avós paternos, que pouco tive a chance de conviver, mas que sinto presentes em espírito. A minha tia, que me forneceu apoio junto com meus pais, para que tivesse as ferramentas necessárias desde o início da vida acadêmica.

Além do cerne familiar, pude contar com apoios inestimáveis nessa trajetória acadêmica. Nesse quesito, meu agradecimento mais que especial vai à professora Dra. Érika de Carmo, pela orientação, não só na construção desta pesquisa, mas em toda a minha trajetória acadêmica. Com sua forma de traduzir e encantar os conteúdos, me fez *reescolher* a Geografia. És a minha maior referência neste segmento. Ao grupo de pesquisa "Situações de Risco em Salvador e Região Metropolitana", responsável pela conexão com o tema desta pesquisa, com vocês foi possível superar desafios e conectar conhecimentos. Em especial à professora Dra. Graça Pereira e ao Mr.

Matheus Cabral, que trabalharam neste grupo junto comigo e hoje avaliam este trabalho. Aos meus amigos de faculdade que tornaram o percurso mais leve, a vocês devo os risos fáceis e as histórias que levarei por toda a minha vida.

Por fim, tenho a gratidão e a certeza de que este processo me proporcionou momentos mais especiais do que desafiadores. Me sinto impulsionada a chegar mais longe. Por vocês, mas principalmente por mim.

SANTOS, Sabrina de Andrade Oliveira. **Relação do uso e cobertura da terra e o armazenamento de carbono na área urbana de Salvador-BA: evolução temporal de 1985 a 2023 e cenário para 2040.** 70 f. 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2025.

RESUMO

Com a importância das cidades no contexto global e a necessidade de um olhar direcionado aos centros urbanos no enfrentamento da crise climática, o presente trabalho objetiva-se relacionar as mudanças de uso e cobertura da terra e a capacidade de armazenamento de carbono de 1985, 2023 e 2040 para a área urbana de Salvador. O trabalho é estruturado em duas etapas, “evolução do uso e cobertura da terra” e “evolução dos níveis de armazenamento de carbono”, atendendo separadamente as metodologias, onde os resultados, apesar de fragmentados, estabelecem correlações entre si. No que se refere ao uso e cobertura da terra, os dados referentes aos anos de 1985 e 2023 foram extraídos do MapBiomas (Coleção 9) e selecionados por representarem os extremos temporais da série histórica disponibilizada. Para a projeção futura, utilizou-se o plugin MOLUSCE para simular as mudanças com base em dados temporais e variáveis espaciais. Para o armazenamento de carbono, foram utilizados o software *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* (InVEST), especificamente o módulo *Carbon Storage and Sequestration*. Na manipulação dos dados obtidos nas duas etapas, ambos em formato raster, utilizou-se o Sistema de Informação Geográfica (SIG), especificamente o software QGIS 3.32.2. Com o suporte dessa ferramenta, foram desenvolvidas tabelas e figuras que permitiram estabelecer correlações entre a abrangência quantitativa (km^2) e a sua abrangência espacial, tanto dos usos e coberturas da terra quanto do armazenamento de carbono da área de estudo. Conclui-se que há uma relação diretamente proporcional entre as áreas verdes e altos níveis de armazenamento de carbono, observada ao longo dos anos na área urbana de Salvador. Além disso, nota-se que a conversão das áreas verdes em ambientes construídos ao longo desses anos impôs significativas transformações espaciais que impactaram diretamente a disposição dos serviços ecossistêmicos oferecidos, dentre eles a regulação de gases, com impacto direto na regulação climática. Visto isso, a construção da resiliência urbana deve passar pelo planejamento territorial e principalmente por ações baseadas na natureza, onde se desenvolvam planos de ações climáticas que dialoguem com a realidade espacial da área urbana do município.

Palavras-chave: uso e cobertura da terra; armazenamento de carbono; mudanças climáticas; área urbana de Salvador-BA.

SANTOS, Sabrina de Andrade Oliveira. **Land use and land cover relationship with carbon storage in the urban area of Salvador-BA: temporal evolution from 1985 to 2023 and scenario for 2040.** 70 f. 2025. Undergraduate thesis – Institute of Geosciences, Federal University of Bahia, Salvador, 2025.

ABSTRACT

Given the importance of cities in the global context and the need for a focused look at urban centers in tackling the climate crisis, this study aims to relate changes in land use and cover to carbon storage capacity in the urban area of Salvador for the years 1985, 2023, and 2040. The study is structured in two stages, “evolution of land use and cover” and “evolution of carbon storage levels”, addressing the methodologies separately. Although the results are presented separately, they establish correlations between them. Regarding land use and cover, data for the years 1985 and 2023 were extracted from MapBiomass (Collection 9) and were selected because they represent the temporal extremes of the available historical series. For the future projection, the MOLUSCE plugin was used to simulate changes based on temporal data and spatial variables. For carbon storage, the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) software was used, specifically the Carbon Storage and Sequestration module. To process the data obtained in both stages, which are in raster format, a Geographic Information System (GIS) was used, specifically the QGIS 3.32.2 software. With the support of this tool, tables and figures were developed to establish correlations between quantitative land cover (km^2) and its spatial distribution, for both land use and cover and carbon storage in the study area. It is concluded that there is a directly proportional relationship between green areas and high levels of carbon storage, observed over time in the urban area of Salvador. Furthermore, the conversion of green areas into built environments over the years has imposed significant spatial transformations that have directly impacted the provision of ecosystem services, including gas regulation, with a direct impact on climate regulation. Therefore, building urban resilience must involve territorial planning and, above all, nature-based solutions, with climate action plans that engage with the spatial reality of the municipality's urban area.

Keywords: land use and land cover; carbon storage; climate change; urban area of Salvador, Bahia, Brazil

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Localização da área de estudo.....	16
Quadro 1	- Exemplo dos valores (ID) do MapBiomas relacionado às respectivas classes.....	28
Quadro 2	- Classes encontradas na área de estudo em 1985 e 2023 e sua descrição detalhada.....	28
Figura 2	- Mapa de Uso e Cobertura da Terra para os anos de 1985, 2023 e 2040.....	35
Gráfico 1	- Classes de Uso e Cobertura da Terra que tiveram mais variações na área urbana de Salvador entre 1985 e 2023.....	36
Gráfico 2	- Classes de Uso e Cobertura da Terra que tiveram/terão mais variações na área urbana de Salvador entre 2023 e 2040.....	38
Gráfico 3	- Classes de Uso e Cobertura da Terra que tiveram (ão) variações menos expressivas na área urbana de Salvador entre 1985, 2023 e 2040.....	39
Quadro 3	- Modelos InVEST versão 3.14.0.....	44
Quadro 4	- Compatibilização das classes de uso e ocupação da terra.....	49
Figura 3	- Mapa da Capacidade de Armazenamento de Carbono na Área Urbana de Salvador, para os anos de 1985, 2023 e 2040.....	54
Figura 4	- Armazenamento de Carbono total na região da instalação do Aterro Metropolitano Centro, entre 1985 e 2023.....	55
Figura 5	- Recorte do mapeamento de Armazenamento de Carbono em 1985 e 2023.....	56
Figura 6	- Mudanças do Armazenamento de Carbono na região de Patamares e Pituaçu (1985, 2023 e 2040).....	57
Figura 7	- Recorte do Armazenamento de Carbono na área da APA Bacia do Cobre / São Bartolomeu.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Valores de Índice Kappa.....	33
Tabela 2	- Evolução do Uso e Cobertura da Terra para os anos de 1985, 2023 e 2040 em Km ²	34
Tabela 3	- Modelo da tabela de 'pools'.....	47
Tabela 4	- Tabela de pools com valores de biomassa de carbono nas diferentes classes de uso e cobertura da terra, segundo Pavani (2013).....	48
Tabela 5	- Armazenamento total de Carbono (InVEST) para os anos de 1985, 2023 e 2040 em Km ²	51

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AEM	- Avaliação Ecossistêmica do Milênio
AGB	- Aboveground biomass
BGB	- Belowground biomass
CCUS	- Ações de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono
CH ₄	- Metano
CO ₂	- Dióxido de carbono
DOM	- Dead organic matter
GEE	- Gases do Efeito Estufa
H ₂ O	- Água
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICLEI	- Governos Locais pela Sustentabilidade
IMATERRA	- Instituto Mão da Terra
INVEST	- Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs
IPCC	- Intergovernmental Panel on Climate Change
LULC	- Uso e Cobertura da Terra
MOLUSCE	- Module for Land Use Change Evaluation
N ₂ O	- Óxido nitroso
PMAMC	- Plano de Mitigação e Adaptação às Mudanças do Clima
SBN	- Soluções baseadas na Natureza
SEEG	- Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SEI	- Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia
SIG	- Sistemas de Informação Geográfica
SOM	- Soil organic
T/ha	- Tonelada por hectare
UNFCCC	- Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas
WWF	- World Wide Fund for Nature

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CONTEXTO DA ÁREA URBANA DE SALVADOR.....	15
2.1	Diretrizes e ações relacionadas ao uso da terra e armazenamento de carbono.....	18
3	ANÁLISE SOBRE A EVOLUÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA NA ÁREA URBANA DE SALVADOR-BA.....	22
3.1	Aspectos metodológicos sobre o mapeamento do uso da terra nos anos de 1985 e 2023.....	27
3.2	Aspectos metodológicos sobre a proposição de um cenário futuro para o ano de 2040.....	29
3.3	Resultado da evolução do mapeamento de uso e cobertura da terra para a área urbana de Salvador-BA.....	33
4	EVOLUÇÃO DOS NÍVEIS DE ARMAZENAMENTO DE CARBONO NA ÁREA URBANA DE SALVADOR – BA.....	41
4.1	Avaliação do armazenamento de carbono a partir do software InVEST.....	42
4.2	Metodologia do mapeamento de armazenamento de carbono na área urbana de Salvador – BA	46
4.3	Resultado do mapeamento de armazenamento de carbono para os anos de 1985, 2023 e 2040	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
	REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

As áreas urbanas, embora vistas como locais de concentração populacional, desenvolvimento econômico e inovação, surgem como um dos principais atores na crise climática global. As transformações espaciais e a expansão das construções são alguns dos principais fatores nas áreas urbanas que impactam diretamente a capacidade de armazenamento de carbono da região. O aumento da concentração de Gases do Efeito Estufa (GEE), em especial o dióxido de carbono (CO_2), enfatiza a urgência em compreender como o uso e cobertura da terra influenciam o armazenamento de carbono. Entender essas interações é essencial para dimensionar a contribuição das áreas urbanas para o aquecimento gradual do planeta e planejar estratégias de combate e mitigação das mudanças climáticas.

Para entender essas alterações climáticas, é necessário compreender o efeito estufa e a sua relação com Gases do Efeito Estufa, essenciais para a manutenção da vida na terra. Como um fenômeno natural, o efeito estufa captura parte da energia solar por meio dos GEE como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e vapor d'água (H_2O). Essa captura de calor permite a temperatura adequada para que a vida floresça e se mantenha na terra (ICLEI África, 2020). Entretanto, quando ocorre o desequilíbrio na concentração desses gases, o balanço de energia é modificado e sua presença elevada se retém na atmosfera, provocando o aquecimento gradual do planeta. O aumento na concentração de GEE, principalmente do dióxido de carbono (CO_2) a ser trabalhado nesta pesquisa, está relacionado pós-revolução industrial, a atividades humanas, seja principalmente pelas contribuições históricas do uso insustentável da energia, ou ainda pelo uso da terra e das mudanças no uso da terra (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

O primeiro relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) publicado em 1990 já indicava que as emissões provenientes de atividades humanas intensificam o efeito estufa natural e o aumento da temperatura global (ICLEI África, 2020). As publicações seguintes trouxeram contribuições que reafirmam essa premissa. Com base nesses relatórios, foram sendo desenvolvidos acordos ou quadros de ações internacionais em busca da estabilização de emissões de gases do efeito estufa. Um desses é a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (UNFCCC), que entrou em vigor em 1994, o Protocolo de Quioto, instrumento jurídico complementar a UNFCCC, adotado em 1997, entrando em vigor somente em

2008 (Macedo, 2010) e o Acordo de Paris que fortalece a resposta global às mudanças climáticas (ICLEI África, 2020).

É nesse contexto de compromissos globais que o Brasil também fez seu conjunto legal, com destaque a Lei Federal número 12.187/2009, que criou a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). Essa lei pretende diminuir as emissões de gases de efeito estufa e fazer a adaptação aos efeitos da mudança do clima no país. Além disso, o Plano Nacional sobre Mudança do Clima mostra as formas e ações para cumprir as metas postas por essa política, buscando orientar os esforços em várias frentes, incluindo o uso da terra. Esses marcos legais e acordos são essenciais para guiar a resposta global e do Brasil às mudanças climáticas. Eles determinam as bases legais e as diretrizes para que cada país, estado ou cidade possa fazer suas próprias ações para mitigação e adaptação, auxiliando na diminuição de emissões de Gases do Efeito Estufa e na promoção da sustentabilidade de várias formas, incluindo o uso e a cobertura da terra.

Nesse cenário de esforços no Brasil, grande parte das emissões são provenientes justamente das mudanças no uso da terra, reforçando a relevância desse fator no contexto nacional. Um levantamento realizado pelo Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), reforça essa constatação. Em 2023, a maioria das emissões brutas brasileiras foram relacionadas ao setor “Mudança de Uso da Terra e Floresta”, responsável por 46% das emissões no país (Tsai *et al.*, 2024). Seguindo este panorama, as áreas urbanas emergem como importantes atores no combate às mudanças climáticas. Elas atuam como grandes emissoras de GEE devido à alta concentração de pessoas, com a maioria dos ativos construídos e das atividades econômicas (Salvador, 2020). A própria expansão urbana e outras mudanças no uso e cobertura da terra, principalmente na conversão de áreas verdes em superfícies construídas, são fatores que influenciam diretamente no aumento de emissões e comprometem a provisão de serviços ecossistêmicos¹ essenciais para a qualidade de vida urbana. Além disso, as cidades são locais de alta vulnerabilidade aos impactos climáticos, como temperatura, pluviosidade, elevação do nível do mar, ondas de calor e tempestades (Pavani, 2013). Sua exposição a eventos extremos possui maior incidência sobretudo em grandes centros populacionais, com presença de áreas costeiras e com características geomorfológicas como encostas íngremes, terras baixas e próximas a margens de rios desprotegidos.

¹ Serviços ecossistêmicos é o nome dado aos benefícios concretos e intangíveis que os ecossistemas oferecem à sociedade humana. São estes processos que mantêm o bem-estar humano e contribuem com o desenvolvimento econômico (Ma, 2005 *apud* Salvador, 2020; Bahia, 2015 *apud* Salvador, 2020).

Se enquadram nessas características a área urbana da cidade de Salvador, localizada no estado da Bahia, e a região alvo desta pesquisa. Os impactos das mudanças climáticas já são registrados no elevado número de desastres naturais, principalmente em períodos chuvosos. Somado a isto, o processo de urbanização e o grande contingente populacional de baixa renda são um dos fatores que agravam o risco climático da região (Salvador, 2020). Considerando todos esses aspectos, para que os governos locais possam promover ações eficazes diante desse cenário é de extrema importância que estejam embasados com informações que subsidiem a tomada de decisão, bem como no planejamento de metas e agendas de curto, médio e longo prazo, que atendam às necessidades de resiliência urbana, mitigação e combate às mudanças climáticas. Sendo assim, serão analisados nesta pesquisa a relação do uso e cobertura da terra com o armazenamento de carbono nos anos de 1985, 2023 e uma projeção para 2040, com base nos padrões dos últimos anos. Para isso, serão utilizados como fonte principal os dados de uso e cobertura da terra do MapBiomass, junto ao MOLUSCE para projeção futura e o Software InVEST para modelagem de armazenamento de carbono.

Diante das informações levantadas acima, a questão desta pesquisa, necessária para o direcionamento teórico e metodológico é: Qual a relação entre as mudanças de uso e cobertura da terra e a capacidade de armazenamento de carbono de 1985, 2023 e 2040 para a área urbana de Salvador?

A partir desse questionamento, foi estabelecido o objetivo geral desta pesquisa: analisar a evolução do uso e cobertura da terra e seu impacto no serviço ecossistêmico de armazenamento de carbono nos anos de 1985 e 2023, bem como numa projeção para o ano de 2040 para a área urbana de Salvador. Pensando em abranger as etapas para responder à questão desta pesquisa, o estudo se desmembra nos seguintes objetivos específicos:

- Analisar a evolução do uso e cobertura da terra entre os anos de 1985 e 2023 utilizando a plataforma do MapBiomass.
- Desenvolver e analisar uma projeção do uso e cobertura da terra para o ano de 2040, utilizando a modelagem do MOLUSCE.
- Calcular e analisar a quantidade de armazenamento de carbono para os anos de 1985, 2023 e a projeção de 2040, utilizando a plataforma InVEST.

Esta pesquisa se estrutura com um contexto teórico geral do problema analisado e, em sequência, são apresentadas as metodologias e resultados em duas etapas da pesquisa, evidenciados

na forma de estudos independentes, porém complementares para o objetivo geral. A opção por essa forma de apresentação visa sua estruturação no formato de artigo científico, tendência adotada por diversas universidades em programas de pesquisa visando a organização dos resultados em forma de produto com uma estrutura mais objetiva e sintética.

Sendo assim, a fim de responder às questões dessa pesquisa, o capítulo 2 aborda a relação da cidade com as mudanças climáticas, relacionado às mudanças de uso e cobertura da terra e os impactos no ambiente urbano. A apresentação do espaço em análise trará a identificação da área de estudo e o conceito de espaço urbano associado às mudanças espaciais que emergem nesse contexto. Também serão discutidos os planos e ações estipulados pela prefeitura municipal de Salvador às mudanças climáticas, associadas ao contexto em análise. Após a compreensão da área de estudo, bem como dos planejamentos municipais no combate às mudanças climáticas, será introduzido no capítulo 3, um breve histórico do uso e cobertura da terra no Brasil, trazendo o contexto da utilização de “Uso da Terra”, bem como a importância desse tipo de mapeamento ao longo dos anos, até os dias atuais. Serão tratados os aspectos metodológicos dos mapeamentos de uso e cobertura da terra para os anos de 1985 e 2023, extraídos do MapBiomas e a projeção futura de uso e cobertura da terra para 2040. Por fim, serão analisadas as mudanças de uso e cobertura da terra nos três anos na área urbana do município de Salvador.

Compreendendo as mudanças no uso e cobertura da terra, será discutido no capítulo 4 o conceito de armazenamento de carbono, com um breve contexto sobre o software a ser utilizado, seguido da apresentação da estrutura metodológica, desta vez, para utilização do software InVEST. Os resultados serão apresentados, estabelecendo correlações com o capítulo 3. O capítulo 5 trará reflexões relacionando as mudanças no uso e cobertura da terra na área urbana do município e as mudanças de armazenamento de carbono na região. Por fim, serão discutidos os principais desafios e perspectivas desta pesquisa.

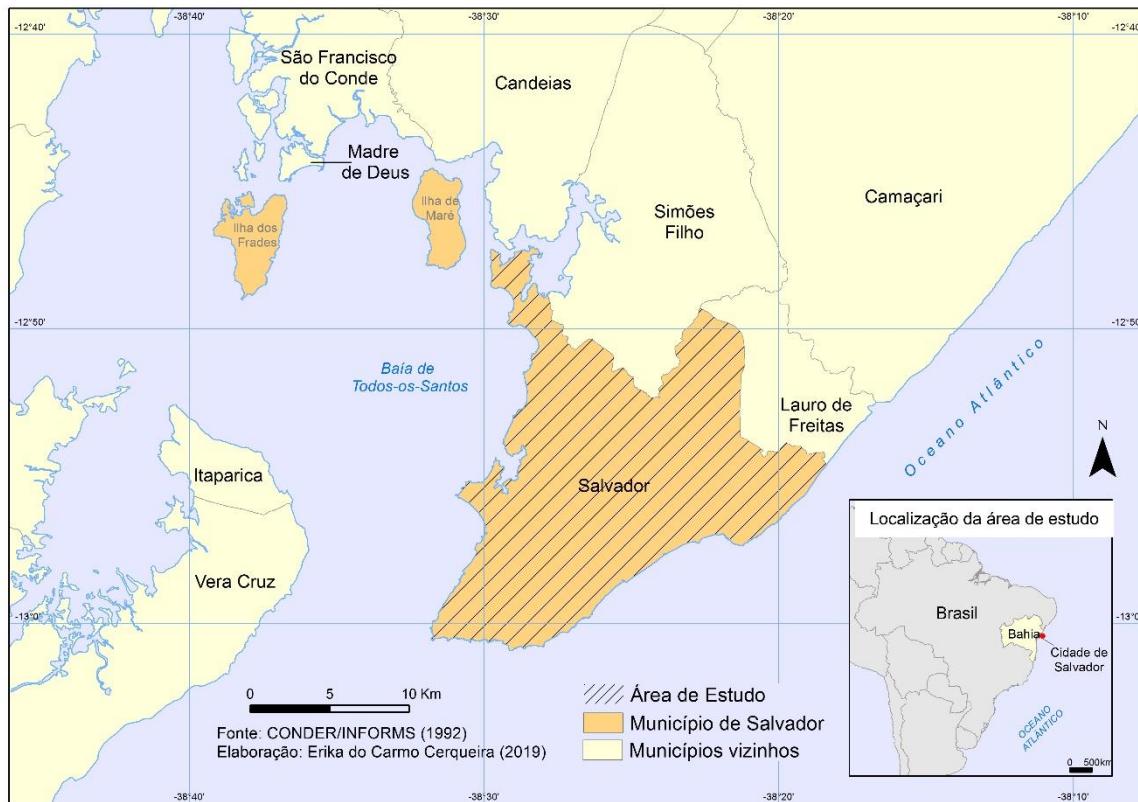
2 AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CONTEXTO DA ÁREA URBANA DE SALVADOR

No ambiente urbano, as discussões contemporâneas também dialogam com agendas globais em busca de compreender melhor a dinâmica dos ecossistemas e sua relação direta com a regulação climática. Nos centros urbanos, também se torna necessário o entendimento dos impactos referentes às mudanças de uso e cobertura da terra, associadas à perda de serviços ecossistêmicos locais. Apesar de possuírem apenas 2% de ocupação da superfície terrestre, as áreas urbanas comportam mais da metade da população mundial (Cerqueira; Puebla Rentería; Carvalho, 2014) e são responsáveis em 70% pelas emissões de carbono (Salvador, 2020). Segundo o IPCC, a expansão urbana tende a acontecer principalmente em países em desenvolvimento, como o Brasil, que em 2015 já possuía mais de 85% da população residente em meio urbano (IPCC, 2014d *apud* Ribeiro; Santos, 2016). Essa população também tem enfrentado com maior severidade eventos climáticos extremos, como ondas de calor, chuvas torrenciais, movimentos de massas, etc., sentindo o impacto das mudanças do clima na saúde e na qualidade de vida. Devido a essa dupla influência, como agentes e vulneráveis, as cidades se tornam um elemento chave, direcionando os esforços globais também para a escala local.

Em novembro de 2024, por exemplo, o município de Salvador registrou fortes chuvas, com 116 solicitações de emergência relacionadas a movimentos de massa, desabamentos, queda de árvores e ameaças de novas ocorrências, além do registro de uma morte (Tíssia *et al.*, 2024). Essas ocorrências são exemplos das consequências já sentidas pela capital baiana, por isso, compreender a relação entre serviços ecossistêmicos e o uso e cobertura da terra torna-se um pilar fundamental para subsidiar decisões dos atores sociais e institucionais sobre os impactos que as mudanças nos ecossistemas causam ao bem-estar humano (MEA, 2005 *apud* Mosquera Muñoz; Freitas, 2017).

O presente estudo analisa a área urbana do município de Salvador-Ba (Figura 1), não abrangendo nesta pesquisa a área rural, constituída pelas ilhas de Maré, dos Frades, Bom Jesus dos Passos, de Santo Antônio e pelas ilhotas dos Santos e dos Coqueiros (Cerqueira, 2019). Na Figura 1 é possível visualizar a dimensão municipal e a seleção apenas da área em análise.

Figura 1 - Localização da área de estudo



Fonte: Cerqueira (2019).

O município de Salvador, a atual capital do estado da Bahia, localiza-se entre as latitudes de 12°14' a 13°8'S e longitudes de 37°52' a 38°48' W. Com um clima tropical, a região abriga 34,22 km² de Mata Atlântica remanescente, o que corresponde a 4,94% da área original (Salvador, 2019). É reconhecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) como metrópole e assume atualmente o papel central entre 12 municípios em seu entorno que compõem a Região Metropolitana de Salvador (RMS), concentrando juntos aproximadamente 25% da população do Estado da Bahia (Entidade Metropolitana da Região Metropolitana de Salvador, [20--?]).

Considerada como uma das cidades mais populosas do país, Salvador exerce sua influência regional no cenário nacional e carrega inúmeros problemas urbanos, reflexo de sua densidade, como desigualdade econômica, social e espacial. De acordo com dados do censo do IBGE de 2022 o município conta com uma população de 2.417.678 habitantes e uma densidade demográfica de 3.486,49 habitantes por quilômetro quadrado (hab/km²), tornando-se a 1º no estado e 5º no país quando comparado sua população a de outros municípios (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, c2023).

Como cidade histórica do Brasil, Salvador carrega heranças no século XXI impressas até hoje na ocupação e expansão urbana municipal. A cidade surge com a intenção portuguesa em ocupar e proteger a colônia na América, projetada na falha geológica de Salvador. Com a evolução do cenário urbano e socioeconômico, especialmente a partir do século XX, o município redefiniu sua estrutura e dinâmica espacial, reflexo também do desenvolvimento das cidades no entorno. A implantação da Petrobrás (1953) no Recôncavo Baiano e a construção de complexos industriais (1967 e 1976) como Centro Industrial de Aratu e o Complexo Petroquímico de Camaçari, influenciaram a atração de fluxos migratórios, ocupando ao longo da orla Atlântica de Salvador (Andrade; Brandão, 2009).

Outras centralidades foram se desenvolvendo ao longo do tempo, impactando na redução das áreas naturais. Essa redução se deu devido ao grande crescimento urbano e à construção de estruturas, em função do aumento do fluxo de passageiros e veículos. A modificação da Rodoviária do centro de Cayru é um desses exemplos, localizava-se próximo à região do Comércio Portuário e foi realocada para uma região de fácil acesso às principais vias da cidade, como a BR-324. Na avenida Antônio Carlos Magalhães, a nova rodoviária fomentou a construção de diversos centros comerciais, modificando as dinâmicas urbanas para o miolo da cidade. Segundo Andrade e Brandão (2009, p. 77), o “miolo” de Salvador é o espaço interior, margeado pela “Av. Paralela (Luiz Viana Filho) e pela BR 324” onde corresponde aos “espaços de ocupação tardia da cidade”. Não obstante, uma nova centralidade, prevista para 2025, será desenvolvida com a previsão da nova mudança da rodoviária de Salvador para o bairro de Águas Claras, às margens da BR-324. Segundo autores como Andrade e Brandão (2009, p. 13):

O espaço urbano é uma síntese das ações do homem acumuladas, ao longo do tempo, a partir das suas expressões concretas, marcando nas formas das cidades, estilos, tendências, perspectivas e dinâmicas de períodos passados. No meio urbano a primeira natureza é praticamente substituída pelas formas da ação antrópica, formas artificiais/técnicas ou mesmo natureza “domada”, artificializada (segunda natureza).

Os autores oferecem uma perspectiva valiosa sobre o espaço urbano, motivo de discussões levantadas nesta pesquisa. Eles o conceituam, processos citados anteriormente, como um registro das intervenções antrópicas acumuladas ao longo do tempo, síntese do espaço urbano, onde as áreas naturais são progressivamente modificadas por elementos artificiais (Andrade; Brandão, 2009). Por esse mesmo motivo que a área urbana de Salvador, oferece um interessante campo de análise, dada a sua relação entre os padrões de desenvolvimento urbano, uso e cobertura da terra e os impactos a serem dimensionados quanto ao armazenamento de carbono.

2.1 Diretrizes e ações relacionadas ao uso da terra e armazenamento de carbono

A cidade vem tentando construir nos últimos anos uma agenda ambiental com o lançamento do Plano de Mitigação e Adaptação às Mudanças do Clima (PMAMC), feito em parceria com os Governos Locais pela Sustentabilidade (ICLEI) (Salvador, 2020). Ele aborda medidas para adaptação climática, justiça social e desenvolvimento sustentável. O plano propõe 57 ações de curto, médio e longo prazo atreladas à redução de emissão de gases do efeito estufa e ao enfrentamento às mudanças climáticas, divididas em quatro eixos principais: “Salvador Inclusiva”, “Salvador Verde-Azul”, “Salvador Resiliente” e “Salvador de Baixo Carbono”. Os eixos ‘Salvador Resiliente’ e ‘Salvador Inclusiva’ não serão abordados com detalhe nesta pesquisa, pois não apresentam uma relação direta e fundamental com os objetivos em análise. Entretanto, os eixos ‘Salvador de Baixo Carbono’ e ‘Salvador Verde-Azul’ abrangem diretamente o tema em estudo e possuem ações voltadas à emissão de GEE, à preservação, manutenção ou ampliação de áreas verdes.

Os eixos são divididos em diretrizes. Essas diretrizes se subdividem em ações estipuladas pela prefeitura, que compõem o plano de ação climática (Salvador, 2020). O eixo ‘Salvador de Baixo Carbono’ é a primeira temática associativa que se relaciona a esta pesquisa. Nela são mencionadas 05 diretrizes, compondo 20 ações no total. As diretrizes e ações que possuem relação direta com o uso e cobertura da terra e, consequentemente, com o Armazenamento de Carbono são apenas a:

1. Diretriz para Transporte e Mobilidade Urbana:

- Ação 38: Ampliar e fomentar o uso da rede cicloviária.

A diretriz e suas respectivas ações (37 a 41) estão focadas em reduzir outras fontes de emissões de GEE na atmosfera, provenientes de outras origens de emissões, sem associar a origem relacionada às mudanças no uso e cobertura da terra. Entretanto, a ação 38 cita em sua sub-ação o plantio de árvores ao redor da rede cicloviária, única medida que amplia as áreas verdes como forma de reduzir as emissões de gases do efeito estufa, como o CO₂ (Salvador, 2020). As demais diretrizes, como ‘Esgotamento Sanitário’, ‘Resíduos Sólidos’ e ‘Para Energia’ são temáticas que possuem ações que diminuem o impacto de emissão de carbono associado aos seus respectivos temas, sem mencionar propostas atreladas ao uso e cobertura da terra. É válido citar que não há

referência no eixo de ‘Baixo Carbono’ a políticas específicas de plantio de árvores ou recuperação de áreas degradadas, além da ação 38, mencionada acima.

Por sua vez, tais iniciativas de reflorestamento são destacadas como estratégias do eixo “Salvador Verde-Azul” com diretrizes relacionadas a serviços ecossistêmicos e soluções baseadas na natureza (Salvador, 2020), as quais se destacam:

2. Diretriz para Serviços Ecossistêmicos

- Ação 10: Criar e implementar um programa de pagamentos por serviços ambientais;

Esta ação traz valor econômico para a manutenção de áreas verdes no município, incentivando o governo local, responsável pelo domínio do maior contingente de áreas verdes da região, a promover a proteção ambiental.

- Ação 11: Criar um banco e formas de compensação de créditos de carbono.

Nesta ação, o banco de compensação de créditos de carbono serviria como um mercado de aquisição de créditos de carbono, movimentando esse mercado na capital. Uma proposta desafiadora, principalmente porque o município enfrenta a presença de poucas e isoladas áreas verdes, em sua maioria, associadas a unidades de conservação.

3. Diretriz para Soluções Baseadas na Natureza.

- Ação 12: Criar novos parques, unidades de conservação e espaços verdes;

A prefeitura fez a previsão de criação de 4 parques: (1) Pedra de Xangô; (2) Refúgio de Vida Silvestre Vale Encantado; (3) Parque Lagoa da Paixão/ Pirajá; e (4) Parque da Mata Escura.

- Ação 13: Implementar corredores ecológicos;

No município, as áreas verdes existentes encontram-se isoladas e cercadas por edificações, estruturas e asfalto. Nesta ação está o desafio em propor, na prática, a integração desses espaços verdes.

- Ação 14: Ampliar a arborização urbana.

Ação 14 finaliza as ações da diretriz baseadas na natureza. A ação busca expandir e fortalecer a arborização em projetos públicos e privados, urbanizações e edificações com o objetivo de reduzir o impacto das ondas de calor. No plano, eles mencionam as qualidades relacionadas ao sombreamento na diminuição de temperatura local, mas não somente. Esta medida está relacionada ao aumento da capacidade de sequestro e armazenamento de carbono, na ampliação dessas áreas

verdes. Se efetivo, há ganhos significativos relacionados à melhora da qualidade do ar, redução do efeito “ilhas de calor”, aumento da permeabilidade do solo e do bem-estar da população local.

4. Diretriz para Zona Costeira e Baía de Todos os Santos

Esta diretriz compõe ações de 15 a 18, sendo importante mencionar, neste contexto a:

- Ação 16: Criar um sistema de gerenciamento costeiro;

Esse sistema visa, para além da capacidade de suporte nas praias, a preservação de faixas de areia e a proteção de manguezais e recifes de corais. Os Manguezais, segundo dados de Pavani (2013), na área urbana de Salvador possui o segundo maior índice de armazenamento de carbono em toneladas por hectare.

5. Diretriz para Vales dos Rios e Córregos

A diretriz compõe as ações 19 a 21 e cita os benefícios de mitigação e adaptação. Cita-se como ação relevante neste estudo:

- Ação 19: Adotar o conceito de infraestrutura verde-azul nos projetos da cidade;

Visa-se a promoção de margens verdes nos rios, com integração das políticas de água urbana e de áreas verdes, a fim de reduzir as ilhas de calor.

O plano apresenta soluções necessárias e atreladas aos objetivos estipulados pela prefeitura. Nota-se que a principal ação associada aos gases do efeito estufa e ao uso da terra estão relacionadas ao eixo “Salvador Verde-Azul” com destaque as diretrizes “Soluções Baseadas na Natureza” e “Serviços Ecossistêmicos” (Salvador, 2020). Apesar da meta audaciosa do eixo de ‘Baixo Carbono’ em neutralizar as emissões de gases de efeito estufa até 2049, não é abordado com tanta clareza a influência das áreas verdes nesse processo e as mudanças no uso e cobertura da terra como parte destas ações.

O planejamento inclui a construção de uma trajetória de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE), fortalecimento da adaptação da cidade às mudanças do clima e promoção da justiça climática com ações de curto, médio e longo prazo (Salvador, 2020). Salvador apresenta um desafio maior na redução de gases de efeito estufa, em função da densa ocupação do território e a baixa cobertura vegetal que abrange isoladas regiões da área urbana. Por isso, é fundamental que ações baseadas na natureza sejam uma prioridade para garantir a transição ecológica e um planejamento territorial eficiente, mitigando os impactos das mudanças climáticas e aliviando a

pressão exercida pelo sistema econômico sobre o meio ambiente (Painel de Indicadores de Mudanças Climáticas Curitiba; Observatório Sistema FIEP, 2024).

3 ANÁLISE SOBRE A EVOLUÇÃO DO USO E COBERTURA DA TERRA NA ÁREA URBANA DE SALVADOR-BA

Após os devidos contextos estabelecidos sobre a área de estudo, neste capítulo iremos abordar a evolução do uso e cobertura da terra na área urbana de Salvador-BA. Para isso, alguns conceitos são extremamente importantes de serem analisados. O primeiro deles refere à diferença entre mapa de Uso do Solo e mapa de Uso da Terra.

Para entender melhor essa relação, Casimiro (2007) analisa algumas definições a fim de entender a semântica e tradução das terminologias “*Land Use*” e “*Land Cover*”, utilizadas erroneamente como definições similares. De forma resumida, o autor conclui que “*Land Cover*” trata-se do Uso da Terra, pois refere-se à descrição física do que está sobre a superfície, como vegetação, água, terras de cultivo e estruturas humanas. Já para “*Land Use*”, o autor assume um conceito semelhante ao Uso do Solo, que segundo Fao (1996 *apud* Casimiro, 2007, p. 25), caracteriza-se pela ligação direta entre “*Land Cover*” e as ações humanas no ambiente, atrelada à estratégia de gestão. Ou seja, uma área visualmente classificada como “pastagem” (Uso da Terra) pode ser reclassificada em áreas destinadas à “pecuária” (Uso do Solo).

Essa diferença é reflexo da escala analisada, pois, ao observar a superfície terrestre, quando adotamos escalas cartográficas pequenas, estamos afastados do alvo e identificamos as classes de forma mais genérica. Ao aumentarmos a escala cartográfica, possibilita-se distinguir com maior exatidão os usos e gestão do território. No exemplo prático, o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013, p. 17, 38) associa o seu mapeamento de Uso da Terra a escalas exploratórias ou regionais, que abrangem extensas áreas. Já o Uso do Solo, devido à escala de análise, está associado em diversas pesquisas a áreas urbanas, que trazem o sentido de parcelamento/ordenamento. A partir da compreensão da usabilidade desses termos, pode-se agora explorar nesta pesquisa como a análise e o entendimento do Uso da Terra evoluíram no contexto brasileiro ao longo do tempo.

A evolução do Uso da Terra no Brasil começa a possuir melhores características a partir do século XX nas academias e com o surgimento de instituições como IBGE. Os trabalhos voltados a esta temática começaram a ser desenvolvidos junto a outras instituições governamentais, como o INPE e a Embrapa (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013, p. 26). Entretanto, essas pesquisas possuíam um enfoque local e direcionado a estudos específicos (Instituto Brasileiro de

Geografia e Estatística, 2013, p. 26). O projeto RADAM, iniciado em 1970, e RADAMBrasil, tornaram-se marco histórico para o reconhecimento do território nacional, trazendo como um dos seus produtos o mapeamento do Uso Potencial da Terra em 1980 para todo o território brasileiro (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013).

Nesse estudo, iniciou-se as análises voltadas para o reconhecimento de padrões de uso e cobertura da terra e, por influência externa, foram incorporadas técnicas de sensoriamento remoto, iniciando uma nova era no reconhecimento do território. O projeto de 1980 utilizou “interpretação analógica de fotografias aéreas e imagens de média resolução espectral” e tinha foco em apoiar os “estudos de análises integradas da paisagem” (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013, p. 27). Após esses projetos, o IBGE e outros órgãos governamentais demonstraram avanços metodológicos e tecnológicos no mapeamento das mudanças territoriais associadas ao uso e cobertura da terra. É válido ressaltar que a compreensão feita acima visa sintetizar a importância em atrelar o termo “Solo” ou “Terra” de forma assertiva, estabelecendo sua correlação com a escala de análise. Apesar de utilizarmos neste primeiro momento questões relacionadas ao uso (seja do solo ou da terra) adotaremos nesta pesquisa um conceito mais amplo de Uso e Cobertura, assim como o IBGE.

Além destes, organizações não governamentais tornaram-se importantes neste cenário, como o MapBiomass. O projeto surgiu em julho de 2015, no formato colaborativo entre ONGs, universidades, laboratórios e startups de tecnologia, para realização do mapeamento de uso e cobertura da terra do território nacional, baseado em imagens de satélite com classificação automática. Seu intuito era produzir, de forma eficiente, acessível e atualizada, mapas anuais de uso e cobertura da terra, amparados por métodos já existentes. Além disso, buscava-se recuperar o histórico das últimas décadas (MapBiomass, c2025). Uma iniciativa audaciosa que se tornou possível com a utilização sistemática de imagens da linha de satélites Landsat. O mapeamento apresenta uma escala cartográfica aproximada de 1:100.000, adequada para análises regionais², com uma metodologia unificada, ampla temporalidade (dados anuais entre 1985 e 2023) e padronização cartográfica .

² O mapeamento de Uso e Cobertura da Terra realizado pelo MapBiomass adota a classificação de imagens de satélite Landsat com resolução de 30 metros. A escala de uma imagem de satélite Landsat é uma definição aproximada baseado pela resolução espacial, que pode variar de acordo com o sensor e a banda analisada. Segundo dados fornecidos pelo MapBiomass, são utilizadas 5 bandas multiespectrais de 30m, sem mencionar a utilização da banda pancromática (disponível a partir do satélite Landsat 7 (MapBiomass, c2025). Com isso, define-se que, com pixel de 30m a resolução permite análises compatíveis com uma escala cartográfica aproximada de 1:100.000.

O mapeamento de uso e cobertura da terra é uma ferramenta valiosa no diagnóstico do uso de recursos naturais e da organização do espaço de forma racional, apropriadas ao bem-estar humano e às atividades humanas inseridas neste meio. Segundo Santos e Silveira (2004, p. 20 *apud* Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013, p. 32), para discutir o território é necessário compreender que os Usos da Terra refletem as diferentes extensões do espaço em um determinado tempo. A visão conjunta deste mapeamento, mais comprometida com questões teóricas, devem utilizar-se da temporalidade, para discutir as mudanças de uso em diversos momentos históricos. Compreendendo este mapeamento como uma análise do espaço e a importância da temporalidade, o sensoriamento remoto é um potencial dado que ampara o tema e possibilita o acompanhamento das mudanças espaciais. Para Nascimento e Motti (1992), o mapeamento deve ser dinâmico, tornando-se um instrumento precioso para a tomada de decisões seguras, a fim de acompanhar as mudanças espaciais.

Contudo, como uma das dificuldades da cartografia, o mapeamento do uso e cobertura da terra também é impactado por problemas muito comuns, como a dificuldade de atualização cartográfica, baixa disponibilidade pública de dados geoespaciais atualizados e padronização cartográfica conflituosa (classes, escala, método etc.). Essas limitações prejudicam análises temporais em um território predefinido e em escalas maiores.

Em um cenário ideal, para a análise das mudanças espaciais na área urbana de Salvador, deveriam ser considerados mapas de uso e cobertura do solo em escala de detalhe, com metodologia padronizada e dados temporais que permitissem uma análise comparativa da evolução das classes. Nada obstante, a falta de mapeamento em grandes escalas que mantivessem os padrões mencionados direciona esta pesquisa à utilização do mapeamento de uso e cobertura da terra do MapBiomass. Mesmo com uma área de estudo pequena, a consistência, padronização e amplo recorte temporal, tornaram o MapBiomass uma ferramenta robusta para análises temporais, objeto desta pesquisa.

Entretanto, apesar do território analisado neste estudo referir-se ao espaço urbano de Salvador, utilizaremos a terminologia de uso e cobertura da terra, pois serão consumidos como dados de referência o mapeamento do MapBiomass, que abrange todo o território nacional. Portanto, quando neste trabalho estivermos nos referindo ao mapeamento e uso e cobertura da área urbana de Salvador, estaremos aqui utilizando o termo de uso e cobertura da terra em função da fonte teórica utilizada do MapBiomass.

Neste âmbito, um dos objetivos nesta pesquisa é analisar as mudanças espaciais dos anos de 1985 e 2023 na área urbana de Salvador, avaliando os impactos das mudanças no uso e cobertura da terra nestes dois recortes temporais. Dentro de um contexto mais amplo, a Região Metropolitana de Salvador (RMS) já vem sofrendo nos últimos anos com a perda de serviços ecossistêmicos devido a modificações significativas no uso e cobertura da terra, reflexo da alta densidade populacional da capital baiana.

Essas modificações justificam a escolha do MapBiomas que possibilita monitoramento das transformações espaciais ao longo do tempo. O objetivo desse monitoramento é identificar as potenciais ações futuras, dado que a diminuição de áreas verdes vem dando cada vez mais espaço às áreas edificáveis. Segundo os dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas Globais (IPCC), o aumento da frequência de eventos climáticos extremos tende a comprometer serviços ecossistêmicos como a regulação térmica, a qualidade do ar e a biodiversidade urbana (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023, p. 31, 64).

A relação entre serviços ecossistêmicos e Uso e Cobertura da Terra (LULC) tem se intensificado após a Avaliação Ecossistêmica do Milênio (AEM), um programa internacional desenvolvido para subsidiar dados e informações aos *stakeholders* sobre os impactos que as mudanças nos ecossistemas causam ao bem-estar humano (MEA, 2005 *apud* Mosquera Muñoz; Freitas, 2017). Além disso, a rede global de Governos Locais pela Sustentabilidade (ICLEI) vem atuando fortemente nos últimos anos para engajar governos locais no combate ao aquecimento global, por meio de campanhas e guias. O avanço da urbanização nas grandes cidades, impulsionada pelo crescimento populacional pós-revolução industrial, impactou significativamente a conversão das áreas verdes, principalmente no Bioma da Mata Atlântica. Com a supressão de vegetação e as alterações antrópicas do território, além da liberação do dióxido de carbono armazenado, a região perde a capacidade de sequestro por fotossíntese dessas mesmas áreas.

É nesse ponto que se torna crucial a atuação de instrumentos de gestão territorial robustos e eficazes, como o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (PDDU). Contudo, em Salvador, a complexidade dessa gestão tem sido um desafio constante.

O PDDU se estabelece como um instrumento legal municipal para estabelecer diretrizes sobre a expansão urbana. A versão anterior do PDDU, sancionada em 2016 (Lei Municipal n.º 9.069/2016), foi concebida sob a premissa de convocação da sociedade civil organizada para a

participação em audiências públicas. Além disso, estabelecia como Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS) as áreas destinadas à regularização fundiária e a produção, manutenção e qualificação de moradia, e buscava conjugar as demandas sociais e econômicas de espaço com as necessidades de conservação do ambiente e valorização da paisagem urbana. Entretanto, à elaboração do PDDU de 2016 houve falhas metodológicas fundamentais, como a ausência de cenários estratégicos prospectivos sobre ambientes econômicos, políticos, tecnológicos, sociais e ecológicos. Esses fatores deixaram de lado de áreas de proteção ambiental e a regulamentação de instrumentos de defesa da função social da propriedade urbana. Neste cenário de atualização, o prazo para o envio de uma nova proposta de revisão do PDDU era até junho de 2024, mas já há um ano de atraso, sem entrega até a data desta pesquisa.

Reflexo dessas falhas de planejamento e da priorização de interesses específicos na legislação anterior, a cidade de Salvador tem sofrido nos últimos 30 anos com impactos relevantes em suas áreas naturais, constantemente ameaçados por especulações imobiliárias. A exemplo disso, em 2023, Salvador registrou o aumento de 10% no valor do metro quadrado, segundo a Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias (ABRAINC), evidenciando o crescimento acelerado e a valorização imobiliária (Ferreira, 2024). Essas mudanças influenciam na ocupação dos espaços naturais disponíveis impactando negativamente nos potenciais de sequestro de carbono quanto a oferta de serviços ecossistêmicos de regulação climática, controle de alagamentos e conforto térmico em áreas urbanizadas.

Os diagnósticos, por si só, são insuficientes no contexto de mudanças climáticas, por isso, visa-se nesta pesquisa não apenas analisar temporalmente mudanças espaciais nos anos de 1985 e 2023, mas projetar mudanças futuras para 2040, projeção nove anos antes a data que foi definida a meta para neutralização das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE) (2049) pelo Plano de Ação Climática de Salvador (PMAMC). Deve-se compreender o histórico para projetar e evitar padrões que agravam a crise climática. Segundo o Macedo:

A prioridade agora é impedir que as florestas desapareçam. Plantar mais florestas e árvores pode ter um impacto relativamente pequeno, mas ainda assim valioso para mitigar o aquecimento global, em função de sua capacidade de absorção, ou "sequestro" de carbono durante o período de crescimento (Macedo, 2010, p. 55).

Mosquera, Muñoz e Freitas (2017) enfatizam a necessidade de construir cenários futuros e direcionados às realidades urbanas, desenvolvendo a longo prazo ações que orientem estratégias locais voltadas à resiliência climática e à conservação de serviços ecossistêmicos. A modelagem

de cenários “são usados para explorar emissões futuras, mudança do clima, impactos e riscos relacionados” além de definir possíveis estratégias de mitigação e adaptação (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023). Essa é uma etapa fundamental para formular estratégias eficazes de gestão de espaços verdes e para o avanço da neutralidade de carbono.

3.1 Aspectos metodológicos sobre o mapeamento do uso da terra nos anos de 1985 e 2023

A seguir, detalham-se as etapas metodológicas que guiaram esta fase da pesquisa, destacando a utilização dos dados do mapeamento de uso e cobertura da terra (1985 e 2023) e a formulação da projeção futura para 2040.

Para operacionalizar a análise das transformações espaciais, esta pesquisa se apoia na metodologia do projeto MapBiomass, lançado em julho de 2015 que visa contribuir para a compreensão das mudanças do Uso e Cobertura da Terra (LULC) no Brasil, por meio do sensoriamento remoto e classificação automatizada na plataforma *Google Earth Engine* (MapBiomass, 2024).

A disponibilização do mapeamento se dá em formato *raster*, onde o valor de cada pixel (30x30m) corresponde a uma classe de Uso e Cobertura da Terra. Foram desenvolvidas pelo MapBiomass 09 coleções anuais de LULC, utilizando como método o uso de imagens do satélite Landsat de 1985 até 2023, ano mais atual, publicado em 21 de agosto de 2024. Por este motivo, utilizaremos a Coleção 09 dos mapas de 1985 e 2023. À medida que as coleções mudam, novas classes podem surgir, se modificar ou até mesmo serem extintas, devido ao avanço nos métodos de classificação. Logo, ao analisar temporalmente dados de Uso da Terra do MapBiomass é necessário utilizar uma mesma coleção a fim de compatibilizar metodologias e facilitar a compreensão da evolução de classes ao longo dos anos.

Os produtos do MapBiomass, disponibilizados em sua plataforma, utilizam o classificador automático *Random Forest*, amplamente adotado em classificações de uso e cobertura da terra por sua alta acurácia, mesmo com dados multiespectrais heterogêneos, que operam em nuvem Google (MapBiomass, 2024). Esse sistema se baseia no aprendizado da máquina, treinando os modelos com amostras de referência específicas para classificar cada pixel em uma classe de LULC. A partir do

comportamento espectral de cada pixel, são definidas métricas referentes às sete bandas espetrais do satélite, as quais irão definir a classe à qual cada pixel pertence.

No quadro 1 é possível visualizar como esse produto em formato *raster* se apresenta. Na imagem exemplo foi realizado uma ampliação, a fim de evidenciar os pixels e destacar algumas classes, no qual cada cor, com base no ID do pixel representa uma classe.

Quadro 1- Exemplo dos valores (ID) do MapBiomas relacionado às respectivas classes

Legenda			Imagen exemplo
ID	Classe	Cor	
1	Floresta	Verde	
24	Área Urbanizada	Vermelha	
21	Mosaico de Usos	Amarela	

Fonte: Adaptado da Legenda do MapBiomas (2024).

As classes do MapBiomas identificadas em 1985 e 2023 variaram entre 12 tipos de uso e cobertura na área urbana de Salvador. Cada coleção do MapBiomas cria uma legenda detalhada onde cada classe possui uma descrição. Classes relacionadas a “Floresta”, “Formação Natural não Florestal”, “Mosaico de Usos” e “Outras Áreas não Vegetadas” variam sua descrição por bioma. No quadro 2 foram consideradas as descrições referentes ao bioma da Mata Atlântica.

Quadro 2 - Classes encontradas na área de estudo em 1985 e 2023 e sua descrição detalhada

Uso e Cobertura da Terra – MapBiomas (Coleção 9)

Classe	Descrição detalhada das classes da legenda da coleção 9
Área Urbanizada	Áreas com significativa densidade de edificações e vias, incluindo áreas livres de construções e infraestrutura.
Formação Florestal	Floresta Ombrófila Densa, Aberta e Mista e Floresta Estacional Semi-Decidual, Floresta Estacional Decidual e Formação Pioneira Arbórea.*
Mosaico de Usos	Áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura. Pode incluir áreas de ocupação periurbana, como chácaras, sítios e condomínios.*
Pastagem	Áreas de pastagem plantadas, diretamente relacionadas à atividade agropecuária. As áreas de pastagem natural, por sua vez, são predominantemente caracterizadas como formações campestres ou campo alagado, podendo ser submetidas ou não a práticas de pastejo. Na Amazônia, podem ocorrer áreas desmatadas recentemente, sem ainda ter iniciado a atividade agropecuária.
Outras Áreas não Vegetadas	Áreas de superfícies não permeáveis (infra-estrutura, expansão urbana ou mineração) não mapeadas em suas classes. *
Mangue	Formações florestais e/ou arbustivas, densas, sempre-verdes, frequentemente inundadas pela maré e associadas ao ecossistema costeiro de Manguezal

Campo Alagado e Área Pantanosa	Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre.*
Restinga Herbácea	Vegetação herbácea que se estabelece sobre solos arenosos ou sobre dunas costeiras com influência fluviomarinha*
Praia, Duna e Areal	Cordões arenosos, de coloração branco brilhante, onde não há o predomínio de vegetação de nenhum tipo.
Mineração	Áreas referentes a extração mineral de porte industrial ou artesanal (garimpos), havendo clara exposição do solo por ação antrópica. Somente são consideradas áreas próximas a referências espaciais de recursos minerais do CPRM (GeoSGB), da AhkBrasilien (AHK), do projeto DETER (INPE), do Instituto Socioambiental (ISA) e de FL Lobo et al. 2018.
Rio, Lago e Oceano	Rios, lagos, represas, reservatórios e outros corpos d'água
Aquicultura	Área referente a lagos artificiais, onde predominam atividades aquícolas e/ou de salicultura.

Fonte: MapBiomas (2024).

Nota: Descrição da legenda da coleção 9.

A adoção de uma metodologia unificada, baseada em sensoriamento remoto, aprendizado de máquina e dados espectrais consistentes, contribui para a padronização dos mapeamentos ao longo do tempo. Essa padronização é o que viabiliza comparações temporais robustas, um diferencial do MapBiomas em relação a outras bases, sendo necessário, porém, extrair (recortar) seus dados para o território em estudo. Para esta manipulação de dados foram utilizadas ferramentas para análise do *raster* no software QGIS 3.32.2, software de Sistema de Informações Geográficas (SIG) de código aberto.

3.2 Aspectos metodológicos sobre a proposição de um cenário futuro para o ano de 2040

Para além da análise retrospectiva, possibilitada pelos dados do MapBiomas de 1985 e 2023, tornou-se relevante explorar as possíveis trajetórias futuras do uso e cobertura da terra na área urbana de Salvador. Objetiva-se neste capítulo descrever a metodologia utilizada na projeção deste cenário por meio do “*Module for Land Use Change Evaluation*” (MOLUSCE). Este trata-se de um módulo adicional do QGIS, que permite a modelagem e simulação futura com base em dados históricos e variáveis espaciais. Segundo Khawaldah *et al.* (2020 *apud* Cardoso, 2024, p. 13), “o plugin tem algoritmos bem conhecidos para análise de mudança de uso/cobertura do solo, análise urbana e projetos e aplicações florestais”.

Utilizando a ferramenta para o planejamento e a tomada de decisões futuras, a metodologia de cenários futuros se apresenta como uma ferramenta valiosa para identificar as possíveis transformações do uso e cobertura da terra na área urbana de Salvador.

Essa perspectiva ganha ainda mais relevância quando consideramos a crítica de Ikematsu (2022, p. 28), ao analisar a Macro metrópole Paulista. Ela argumenta que abordagens meramente históricas não são suficientes para uma análise completa da dinâmica espaço-temporal dos serviços ecossistêmicos. Essa visão reforça a importância da metodologia de cenários futuros, conforme adotado nesta pesquisa, onde a própria autora explicita. Entretanto, Mouchet *et al.* (2014 *apud* Ikematsu, 2022) também enfatizam a importância de haver múltiplos cenários para identificar incertezas e a complexidade das mudanças ambientais.

A simulação de cenários futuros também é útil, pois revela as relações entre os serviços ecossistêmicos como consequências dos efeitos compostos de múltiplos fatores e é uma das formas de avaliar os impactos de decisões políticas e administrativas no fornecimento desses serviços (Mouchet *et al.*, 2014 *apud* Ikematsu, 2022, p. 29).

Nesta pesquisa é realizada a projeção para 2040, com base nos mapas de uso e cobertura da terra de anos anteriores a variáveis espaciais, que serão tratadas neste capítulo. O módulo MOLUSCE oferece alguns métodos estatístico de projeção/simulação de cenários futuros, mas neste estudo, foi utilizado a modelagem por Redes Neurais (*perceptron* multicamada), para gerar a curva de aprendizagem responsável pela projeção de uso e cobertura da terra, a qual utiliza inteligência artificial com interações entre as unidades de processamento da rede (Universidade de São Paulo, [20--]). Assim, são técnicas computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência (Universidade de São Paulo, [20--]).

Apesar da importância dos múltiplos cenários, conforme enfatizado por Mouchet *et al.* (2014 *apud* Ikematsu, 2022, p. 29), esta pesquisa limita-se à previsão de apenas um cenário, visto a limitação da ferramenta e do tempo da pesquisa, bem como a utilização de variáveis de dados oficiais, sem qualquer manipulação.

No MOLUSCE, para obtenção da projeção de Uso da Terra do ano de 2040, é necessário utilizar nas camadas de entrada os mapas de uso e cobertura da terra do MapBiomass em formato *raster*. Para que isso seja possível, as camadas de entrada adicionadas no *input* devem representar intervalos de tempo regulares. O último dado disponibilizado na coleção 9 do MapBiomass é do ano de 2023. Como o objetivo é realizar a projeção para o ano de 2040, contou-se um intervalo de 17 anos, assim, foram utilizados os dados do MapBiomass de 1989 e 2006 de modo que fossem mantidos intervalos regulares de 17 anos entre os anos históricos e o ano-alvo de projeção (2040).

Importante ressaltar que os produtos gerados nos anos de 1989 e 2006, não são objetos de análise dessa pesquisa. São bases de dados produzidas apenas para o processamento, que servirá como calibração do modelo, visando treinar o algoritmo a partir de padrões temporais regulares e, assim, projetar o cenário de uso e cobertura da terra almejado, que é o ano de 2040.

Além dos mapeamentos LULC, o modelo exige que sejam incluídas variáveis espaciais que impactam diretamente a dinâmica de mudanças de uso da terra. Dessa forma, uma importante parte deste trabalho foi a realização de diversos testes com diferentes variáveis e combinações no intuito de avaliar quais seriam as melhores opções para a modelagem em análise. Esses testes consistem em propor diferentes tipos de dados espaciais, com diferentes combinações, que juntamente com os mapas dos anos de 1989 e 2006 devem gerar uma espacialização do Uso da Terra para o ano de 2023. Essa projeção para um ano que já existe, tem o intuito de calibrar o sistema e verificar qual resultado seria o mais pertinente e parecido quando comparado com o mapeamento real do ano de 2023, obtido diretamente do MapBiomas. Ou seja, esses testes almejavam ensinar o sistema a projetar cenários baseados em dados geoespaciais da área de estudo.

O critério de escolha das variáveis espaciais adotadas para a elaboração do cenário para o ano de 2040, foram justamente os dados no qual o resultado apresentou a maior similaridade entre o Uso da Terra projetado e o real. Assim, foram adotados como camadas de entrada na modelagem para o cenário futuro de 2040 as seguintes variáveis espaciais (Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, c2021):

- Trechos de massa d'água;
- Arruamentos, Rodovias e Ferrovias;
- Vegetação.

A Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (SEI) é um órgão responsável pela “elaboração de estudos e pesquisas que subsidiam o planejamento governamental” e apresenta uma cartografia de referência de todo o estado da Bahia (Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, [202-]). A Diretoria do Serviço Geográfico (DSG) em cooperação técnica com a SEI publicou em 2010 “1.284 folhas topográficas do Mapeamento Sistemático Brasileiro em escala 1:25.000” (Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, c2021). A escolha deste dado secundário se deu por três fatores como a melhor resolução espacial em relação ao dado primário de referência, cuja escala é de 1:100.000, a confiabilidade do dado e a abrangência no território de análise.

Cabe ressaltar que o modelo não aceita dados vetoriais, por esse motivo foi necessário a conversão das variáveis espaciais mencionadas acima para o formato *raster*. Essa conversão foi realizada em duas etapas, sendo (1) a conversão direta de vetor para *raster* através da ferramenta do QGIS “*rasterizar*” e (2) a para melhor interação do modelo foi realizada a manipulação para um *raster* de “Proximidade”, nome da própria ferramenta do QGIS. Essa ferramenta gera um novo *raster* que calcula a distância de cada célula (*pixel*) em relação ao *raster* da primeira etapa. Os resultados visuais se assemelham a um mapa de calor, mas com metodologia diferente. Além disso, é necessário que esses *rasters* estejam em coordenadas projetadas e que todos os dados tenham a mesma resolução espacial (número de linhas e colunas) e codificação (*integer* 16-bit) para garantir a compatibilidade com os algoritmos do sistema computacional. Essas especificações deverão ser aplicadas tanto aos dados de entrada quanto às variáveis espaciais.

Este módulo realiza as análises em etapas, que são divididas em “abas”, onde na fase final é gerado a projeção futura, sendo todas processadas na versão do QGIS 3.32.2:

- Entrada;
- Avaliação da correlação;
- Territórios em mudança;
- Modelação do potencial de transição;
- Simulação de autômatos celulares e validação.

Com os dados de entrada (LULC de 1989 e 2006) e as variáveis espaciais definidas, a primeira etapa é superada, se todas as camadas atenderem as especificações acima mencionadas. Na segunda aba (avaliação da correlação), as variáveis espaciais serão avaliadas por meio do método de correlação de Pearson, para calcular as interações e o nível de influência entre si. Na terceira etapa (Territórios em Mudança), é feita a correlação entre as camadas de entrada de uso e cobertura da terra, avaliando as mudanças entre os anos, a “Estatística de classes” e a “Matriz de transição”. Na etapa “Modelação do Potencial de Transição” foi escolhido o método Rede Neural Artificial (RNA), mostrando sua curva de aprendizagem. Segundo o NextGIS ([2025]), desenvolvedor do MOLUSCE, o índice Kappa “permite verificar a precisão da simulação”.

O MOLUSCE possui uma ferramenta denominada índice Kappa, uma medida estatística utilizada para avaliar o grau de concordância entre as classificações. Nesse contexto ele é usado para medir a acurácia entre a simulação feita pelo plugin (projeção de 2023) e os dados reais (mapeamento original do MapBiomas de 2023). Por isso é indicado treinar o modelo com um dado que exista, para depois realizar a projeção futura. De acordo com Cardoso (2024, p. 19) o índice

Kappa é: “Amplamente aplicado em análises de imagem e geoprocessamento, o índice avalia a precisão de classificações automáticas ou manuais, comparando as classificações reais com as previstas”.

Na última etapa (Validação) é permitido verificar a precisão da simulação. O índice geral obtido nos testes foi de 0,88, o que corresponde a uma concordância “excelente”, segundo a classificação proposta por Landis e Koch (1977 *apud* Nery *et al.*, 2013). A tabela 1 mostra os níveis de classificação de 0 a 1 do índice Kappa e seu nível de concordância:

Tabela 1 - Valores de Índice Kappa

Índice kappa (K)	Concordância
< 0,00	Sem concordância
0,00 - 0,19	Pobre
0,20 - 0,39	Fraca
0,40 - 0,59	Moderada
0,60 - 0,79	Forte
0,80 - 1,00	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977 *apud* Nery *et al.*, 2013).

Vale salientar que os índices Kappa obtidos nos diferentes testes variaram entre 0,73, 0,75, 0,77 e 0,88, ou seja, variando entre "Forte" e "Excelente", segundo a tabela apresentada. Com o treinamento do modelo feito para 2023 e a calibragem das variáveis espaciais, foi obtido um índice kappa possível para seguir com a projeção para o ano de 2040. Para esta projeção, mantém-se as mesmas variáveis espaciais. Será alterado apenas os dados de entrada de uso e cobertura da terra (em formato *raster*), para o ano 2006 (inicial) e 2023 (final), ambos obtidos diretamente do MapBiomass.

3.3 Resultado da evolução do mapeamento de uso e cobertura da terra para a área urbana de Salvador-BA

Analizando as variações de uso e cobertura da terra entre 1985, 2023 (obtidos do MapBiomass) e 2040 (obtido da simulação do MOLUSCE) foi possível avaliar quantitativamente as transformações espaciais ocorridas na área de estudo.

Na tabela 2, observa-se que as principais alterações territoriais de alteração de classes de uso da terra ocorrem entre 1985 e 2023, e em menor quantidade entre 2023 e 2040. Isso se justifica principalmente por: (i) a discrepância temporal entre os dois intervalos, o primeiro abrangendo 38

anos e o segundo 17 anos; (ii) as intensas transformações urbanas que ocorreram no espaço urbano de Salvador-BA no primeiro período, em razão das transformações da estrutura urbana discutidas em Carvalho (2014) e Cerqueira (2019); e (iii) o fato da expansão da cidade ter alcançado quase que a totalidade do seu território no ano de 2023, o que restringe novas expansões e intensifica a ocupação em áreas naturais remanescentes.

Tabela 2 - Evolução do Uso e Cobertura da Terra para os anos de 1985, 2023 e 2040 em Km²

Uso e Cobertura da Terra	Área (Km ²)/Ano			Variação (Km ²)	
	1985	2023	2040	1985/2023	2023/2040
Classe MapBiomas					
Área Urbanizada	94,83	175,87	184,15	81,04	8,28
Formação Florestal	50,92	42,53	47,27	-8,39	4,74
Mosaico de Usos	106,93	41,69	31,44	-65,24	-10,25
Pastagem	1,12	4,64	3,24	3,52	-1,40
Outras Áreas não Vegetadas	2,40	1,87	1,54	-0,53	-0,33
Mangue	0,27	0,31	0,30	0,04	-0,01
Campo Alagado e Área Pantanosa	2,21	0,30	0,25	-1,91	-0,05
Restinga Herbácea	0,36	0,89	0,92	0,53	0,03
Praia, Duna e Areal	10,45	5,55	5,22	-4,90	-0,33
Mineração	0,45	1,85	1,85	1,40	0,00
Rio, Lago e Oceano	9,38	3,82	3,81	-5,56	-0,01
Aquicultura	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Desconhecido*	0,16	0,16	0,13	0,00	-0,03

Fonte: elaboração própria (2025).

Entre 1985 e 2023, a expansão urbana foi um fator notável no aumento em área da classe “Área urbanizada”. Segundo Andrade e Brandão (2009), no início do século XX Salvador apresentava um “miolo” ainda desocupado, apenas alguns assentamentos com funções rurais. Com o passar dos anos, houve diferentes transformações nas atividades econômicas, transacionando para uma economia centralizada em serviços, como turismo, cultura e principalmente o dinâmico mercado imobiliário (Andrade; Brandão, 2009). Além disso, nesse período, tivemos significativos avanços na disponibilização de bens de serviços, com destaque para a implantação do sistema metroviário, ampliação de corredores de transporte (como o BRT), construção de viadutos e requalificação de vias estruturantes. Tais investimentos contribuíram para reorganizar o espaço urbano e impulsionar a ocupação de áreas antes pouco acessíveis. Essa urbanização se distribui espacialmente na área em estudo, mas principalmente no miolo de Salvador, no subúrbio e no entorno da Avenida Luís Viana Filho (Bairros de Mussurunga, São Cristóvão, Bairro da Paz, etc.).

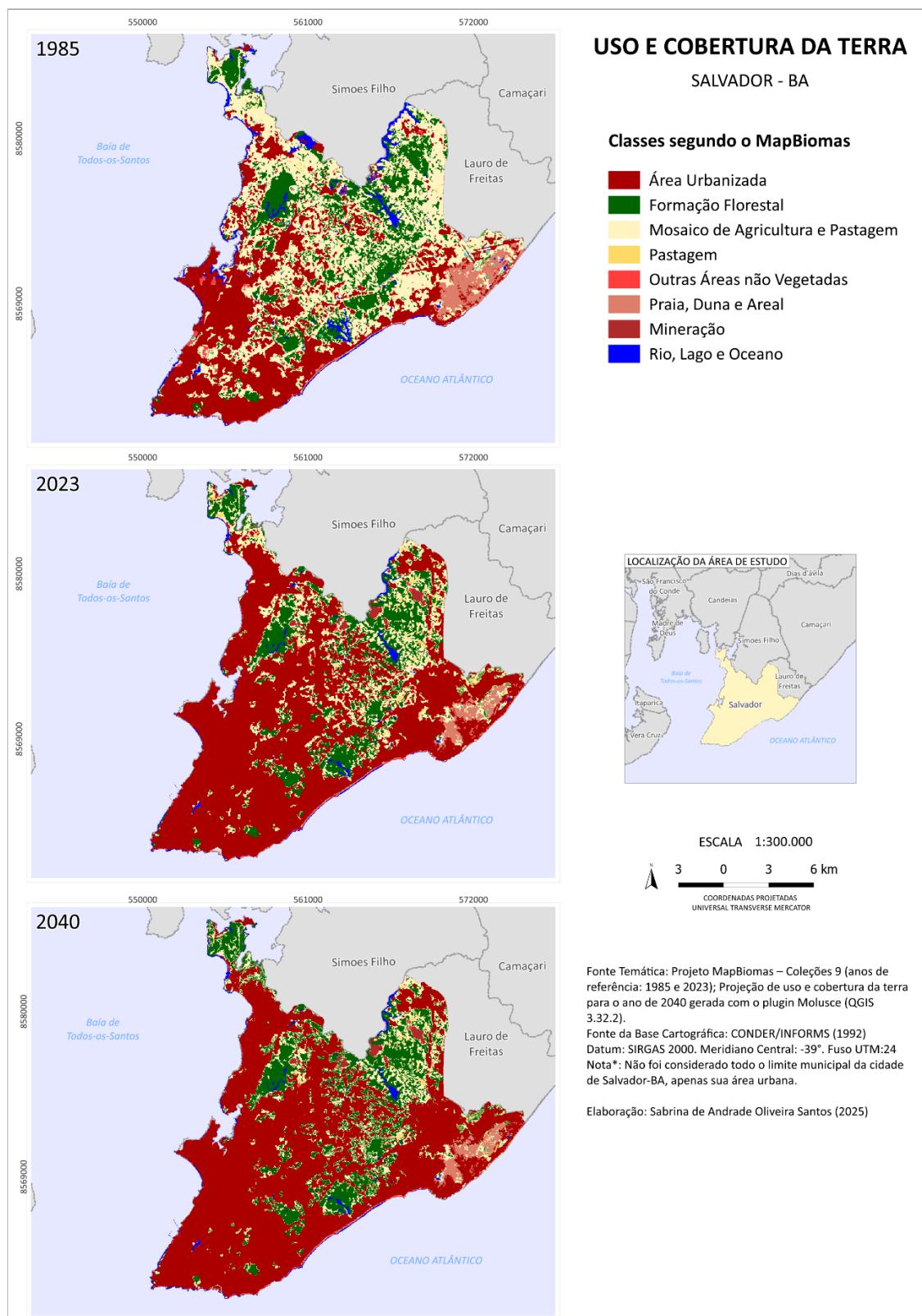
Diante desses processos, não só foram ocupadas áreas com “funções rurais”, mas também áreas naturais, com uma redução de aproximadamente 8 km² em “Formação Florestal”. Se

comparado com a perda de “Mosaico de Usos”, com uma redução aproximada de 65 km², a diminuição de áreas verdes parece pequena. Porém, além de representar uma área de vegetação mais densa do que o mosaico de usos, se considerarmos as medidas de um campo de futebol oficial, 8 km² equivalem à perda em área de aproximadamente 1.120 campos de futebol [1] de área vegetada.

Entre 2023 e 2040, observa-se um menor avanço dessa urbanização, com aumento de apenas 8,28 km², essa menor variação pode estar relacionada com a diminuição demográfica de 9,6% do município no censo de 2022. Embora o segundo intervalo (2023-2040) represente quase duas décadas, o ritmo de urbanização, obviamente, será menor do que se observou entre 1985 e 2023 e o modelo de projeção futura de uso e cobertura da terra interpreta bem essa desaceleração. Ele comprehende a impossibilidade de extrapolação dos limites intermunicipais e a limitação de áreas de expansão intramunicipal.

Na Figura 2, é possível comparar espacialmente essas mudanças nos anos de 1985 e 2023, com projeções para 2040. É evidente que a área urbana de Salvador já se expandiu até seus limites e ocupou a grande maioria do seu território, sobrando os corpos hídricos e áreas destinadas à preservação. Reflexo disso é o crescimento imobiliário nas regiões metropolitanas de Salvador e a movimentação da população soteropolitana residente na capital para os municípios do entorno, sem perder a centralidade exercida pela metrópole. Não obstante, temos o reposicionamento da metrópole de 3º para 5º mais populosa, reflexo da perda populacional que sofreu entre os censos de 2010 e 2022 (Cabral, 2023). Com uma queda de 9,6% entre 2010 e 2022, Salvador apresentou o maior recuo populacional entre as capitais brasileiras e a segunda mais intensa entre todos os municípios do país.

Figura 2 - Mapa de Uso e Cobertura da Terra para os anos de 1985, 2023 e 2040



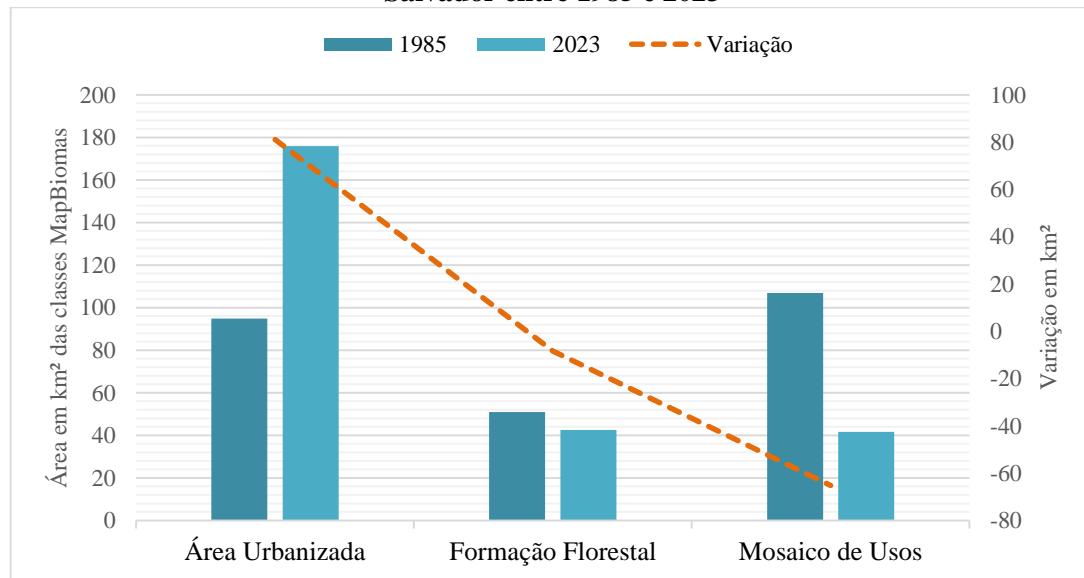
Fonte: elaboração própria (2025).

Nota: não foi considerado todo o limite municipal da cidade de Salvador-BA, apenas sua área urbana.

Embora esses dados mais recentes do IBGE tenham causado surpresa, estudos anteriores do Núcleo Salvador do Observatório das Metrópoles já indicavam essa estagnação no crescimento populacional (Pereira; Fernandes; Díaz Mosquera, 2023). Essa transformação ocorreu mais rapidamente do que era previsto, antecipando para 2022 as previsões feitas para 2030. As projeções populacionais foram realizadas pelo Núcleo Salvador neste estudo “levaram em conta tendências do passado” (Pereira; Fernandes; Díaz Mosquera, 2023, p. 1), sem considerar fenômenos como a Covid-19, que segundo os autores, aceleraram a tendência.

No gráfico 1 é possível comparar essa alteração entre os anos de 1985 e 2023, e se destaca a classe ‘Mosaicos de Usos’³, que mais sofreu redução, passando de 106,93 km² para 41,69 km². Nessa classe não é possível identificar exatamente o tipo de cobertura existente, podendo se caracterizar como um misto entre pastagem, agricultura, ou até mesmo áreas de transição entre zonas urbanas e rurais, conhecidas como franjas urbanas ou de ocupação esparsa. Percebe-se que foi exatamente nesse tipo de uso e ocupação que houve o maior nível de transformação, e no qual houve o maior crescimento das áreas urbanas (Figura 2 e Gráfico 1).

Gráfico 1 - Classes de Uso e Cobertura da Terra que tiveram mais variações na área urbana de Salvador entre 1985 e 2023



Fonte: elaboração própria (2025).

³ Consultar definição de Mosaico de Usos no Quadro 2.

Infere-se que essa classe se tratava de espaços “negociáveis” para a instalação de infraestruturas, bem como para a aceleração da ocupação urbana, que cresce proporcionalmente à densidade demográfica do município durante este período. A exemplo disso, temos a construção e ocupação da Avenida Luís Viana Filho, comumente chamada pelos soteropolitanos de “Paralela”, que, com a abertura dos acessos e a produção de novas centralidades possibilitaram o desenvolvimento de grandes empreendimentos de comércio e moradia. Nesse processo, a expansão urbana tem promovido, de forma inversamente proporcional, a redução dos espaços que garantem serviços ecossistêmicos para a área de estudo.

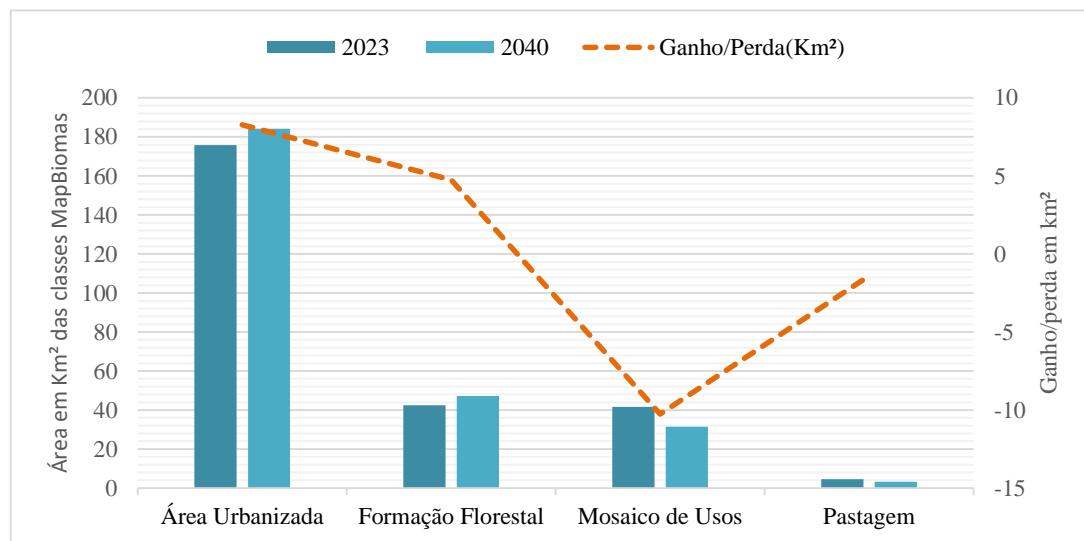
A classe “Formação Florestal” sofreu uma redução de 8,39 km²⁴ entre 1985 e 2023 e essa perda está associada, muitas vezes à ocupação urbana de áreas verdes, à abertura de áreas de lazer em áreas preservadas, como no Parque da Cidade, à pressão urbana no entorno das áreas de proteção, como o Horto do bairro do Cabula, conhecido como “Horto do Cabula”.

Na sequência, vamos analisar o intervalo de tempo entre os anos de 2023 a 2040, que, como já citado, corresponde ao cenário elaborado via modelo matemático do MOLUSCE e que também estão espacializados na Figura 2. Vale salientar que não foram incorporadas ao modelo variáveis populacionais, logo, seu resultado se baseia exclusivamente nos padrões de uso e cobertura da terra observados nos períodos anteriores, e, portanto, o cenário projetado reflete mudanças espaciais históricas e não projeções demográficas.

O gráfico 2 ilustra as mudanças territoriais nas classes de uso da terra em análise. De antemão, percebe-se que as variações territoriais de ganhos e perdas entre as classes de uso da terra são bem mais discretas que as do período anterior. Esse resultado, justifica-se, como já mencionado, em razão de que a simulação de uso e cobertura da terra para 2040 baseia-se no treinamento do modelo a partir dos padrões anteriores e nas variáveis disponibilizadas, o que, portanto, corresponde à universo hipotético e que dada sua complexidade impõe limites de precisão e exige estudos complementares posteriores.

⁴ Valor obtido pela diferença de “Formação Florestal” entre 2023 e 1985 (dados presentes na tabela 2).

Gráfico 2 - Classes de Uso e Cobertura da Terra que tiveram/terão mais variações na área urbana de Salvador entre 2023 e 2040



Fonte: elaboração própria (2025).

Apesar dessas ressalvas, os dados produzidos (Figura 2 e Gráfico 2) permitem perceber que as classes de uso e cobertura da terra que mais variaram no período de 2023 e 2040 também foram os “Mosaicos de Uso”, “Formação Florestal” e “Área Urbanizada”. A classe Mosaicos de Uso manteve a tendência de redução do período anterior e foi a que apresentou na projeção de 2040 uma alteração na ordem de 31,44 km², o que permite inferir a conversão dessas áreas para outros usos, especialmente para as áreas urbanizadas.

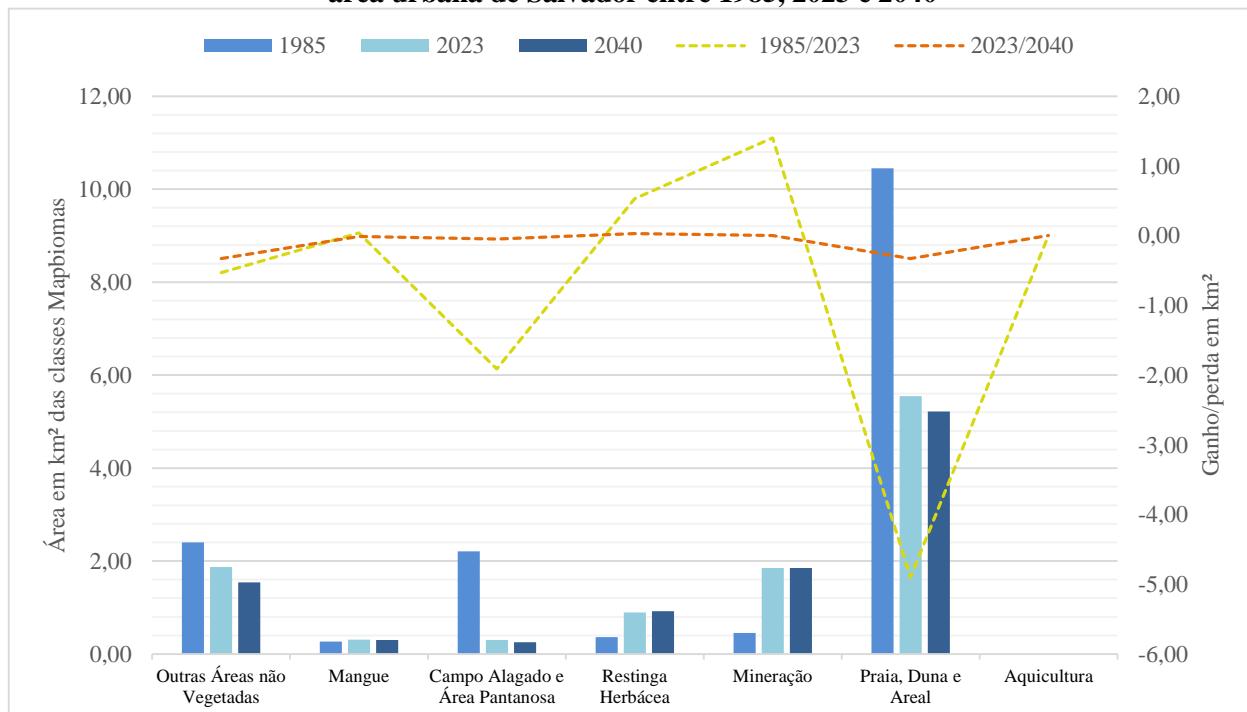
É notável que a previsão para 2040, feita pelo modelo do MOLUSCE, mostrou um aumento de 4,74 km² na categoria da "Formação Florestal". Essa tendência que inicialmente se constata como um “dado curioso”, diante da dinâmica geral de expansão urbana vista entre 1985 e 2023, necessita de estudos mais aprofundado sobre o início dessa pequena variação e a interpretação do modelo como “tendência” a ser replicada. Essa análise específica que não foi o foco principal desse trabalho, principalmente por causa das restrições do tempo desta pesquisa. No entanto, algumas hipóteses podem ser levantadas para entender esse comportamento projetado.

Em segundo lugar, aprofundar a calibração e os parâmetros específicos do MOLUSCE seria essencial, visto que o modelo, ao identificar padrões de transição de "mosaico de usos" para "formação florestal" em áreas menos urbanizadas, os replicou na simulação como tendência. Com uma melhor calibração o modelo poderia ignorar conversões mínimas e projetar melhor a predisposição das classes futuras. Em segundo lugar a diferença entre as escalas de trabalho pode

ter afetado o resultado; enquanto o uso da terra foi mapeado em uma escala de 1:100.000, as variáveis espaciais do modelo estavam em uma escala de 1:25.000, o que pode trazer inconsistências na leitura do algoritmo. Por fim, a projeção parece indicar um aumento da formação florestal em áreas rarefeitas com proximidade da vegetação existente, sugerindo que o algoritmo interpretou que essas condições favoreceriam o adensamento vegetal. Esse fenômeno foi observado majoritariamente nos bairros de Nova Esperança e Cassange entre os dados de entrada, a ocorrência na projeção 2040 se deu no mesmo local. No entanto essa lógica não é compatível com a ocupação urbana em algumas cidades onde, a pressão humana sobre áreas verdes, mesmo as que restaram mesmo em remanescentes e menos densas tende a ser contínua. Essas observações fortalecem necessidade de mais pesquisas para verificar e compreender corretamente essas dinâmicas projetadas.

O MOLUSCE usa métodos de aprendizado de máquina (redes neurais) para inferir tendências. Esse resultado tende a reproduzir algum padrão identificado nas camadas de entrada, mesmo que contradiga o contexto analisado. Por fim, o Gráfico 3 ilustra as alterações das classes de uso e cobertura da terra que tiveram as menores variações e por isso não foram objetos de análise detalhada.

Gráfico 3 - Classes de Uso e Cobertura da Terra que tiveram (ão) variações menos expressivas na área urbana de Salvador entre 1985, 2023 e 2040



Fonte: elaboração própria (2025).

Dentre estas, a classe ‘Praia, Duna e Areal’ apresentou uma perda considerável de 4,90 km² entre 1985 e 2023, o que se torna relevante considerando sua pequena abrangência no território analisado e ao mesmo tempo, sua importância como área amortecedora do aumento do nível do mar e como sistema de equilíbrio para o aumento de temperatura. Essa relação também pode indicar o recuo da linha de costa, reflexo da ocupação urbana sobre a região costeira, fenômeno evidenciado por Freitas (2016) entre o Rio Vermelho e a Pituba, bairros da orla de Salvador. Para 2040 projeta-se uma pequena tendência na redução de 0,33 km².

Além disso, iniciou-se a ocupação de grandes empreendimentos próximos a áreas úmidas e lagoas, nas regiões de Patamares, que impactam não somente o uso de ‘Praia, Duna e Areal’, mas também ‘Campo Alagado e área pantanosa’. Essa classe sofre com decréscimo de 1,91 km² entre 1985 e 2023 e de 0,05 km² entre 2023 e 2040. A despeito da preocupante tendência, emerge como um ponto de esperança a atuação de grupos como o coletivo SOS Vale Encantado, que mobilizou esforços para preservação de “remanescentes de Mata Atlântica localizados no entorno da Av. Luís Viana Filho (Avenida Paralela), [...] composto por floresta ombrófila, restinga, lagoas e brejos” (Instituto Mão da Terra, c2021).

Após a análise de todos os dados conclui-se que desde 1985 as áreas verdes da área urbana da cidade de Salvador foram sendo reduzidas e o processo de urbanização ocupou quase todo o território urbano da cidade. Para ampliar a possibilidade de armazenamento de carbono e mitigar as ações das mudanças climáticas é necessária uma inversão nas políticas públicas, um processo de re-vegetação e manutenção das áreas verdes ainda existentes. Como pode-se perceber pelo cenário de 2040, o território analisado já se encontra muito ocupado, as alterações são muito poucas. A iminente mudança climática exige ações mais radicais e por isso a necessidade de políticas públicas que alterem o padrão de Uso e Ocupação da Terra, para estarmos preparados para os efeitos das mudanças climáticas.

4 EVOLUÇÃO DOS NÍVEIS DE ARMAZENAMENTO DE CARBONO NA ÁREA URBANA DE SALVADOR – BA

Diversos estudos têm buscado analisar o uso e cobertura da terra associada ao armazenamento de carbono, em diferentes escalas geográficas. Pesquisas como as de Pavani *et al.* (2013), Pavani (2018) no Litoral Norte de São Paulo e Tao *et al.* (2023) em Pequim (China) buscaram, a partir de diferentes contextos metodológicos, analisar a relação das mudanças espaciais em áreas urbanas associada aos serviços ecossistêmicos de armazenamento e sequestro de carbono. O aumento desses estudos ganhou força com a incorporação das áreas urbanas como importante ator das mudanças climáticas, além do aumento de impactos climáticos manifestados nas cidades.

Tal cenário é reflexo da degradação e perda de serviços ecossistêmicos definidos por Constanza *et al.* (1997), como regulação de gases, regulação climática e regulação de perturbações⁵. Essa perda no contexto urbano é acelerada pelas tendências de edificações que moldam esses espaços densamente povoados na conversão dos espaços naturais em áreas construídas. É por meio desse processo que ocorre a liberação de carbono armazenado na vegetação, elevando as emissões e diminuindo o potencial de sequestro daquela região.

É importante frisar que não se trata somente da liberação de CO₂ armazenado, mas também da perda da capacidade daquela localidade em capturar carbono futuro da atmosfera. Por esse motivo, reconhecer áreas naturais e medir a quantidade de carbono armazenado nesses locais, permite quantificar o valor ecológico e a contribuição desses ecossistemas para a mitigação das alterações climáticas. Além disso, estas informações tornam-se dados motores para reconhecer os sumidouros de carbono de um território, que embasarão planos de ação climática mais eficientes.

Diante dessa centralidade nas discussões mundiais, são desenvolvidas soluções que visam reduzir as emissões de CO₂ na atmosfera. Dentre elas são mencionados as Soluções baseadas na Natureza (SBN), relacionadas à conservação e reflorestamento de áreas verdes e Ações de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS), com soluções baseadas na tecnologia e engenharia para capturar e armazenar CO₂, com intuito de equivaler a função natural, por meios tecnológicos. Essa tendência aplica-se principalmente no sistema energético e industrial, onde impede a liberação de carbono, ao qual não iremos adentrar nesta pesquisa.

⁵ “Proteção contra tempestades, controle de enchentes, recuperação de secas e outros aspectos da resposta do habitat à variabilidade ambiental, controlados principalmente pela estrutura da vegetação” (Constanza *et al.*, 1997, p. 254).

O IPCC menciona em seu relatório uma explicação mais detalhada sobre as soluções baseadas na natureza (ou ecossistema, como mencionado abaixo na ecologia urbana):

Abordagens de adaptação baseada em ecossistemas como ecologia urbana, restauração de áreas úmidas e ecossistemas florestais a montante reduzem uma série de riscos da mudança do clima, incluindo riscos de enchente, calor urbano e proporcionam múltiplos cobenefícios. Algumas opções de adaptação baseadas na terra/no solo proporcionam benefícios imediatos (por exemplo, conservação de turfeiras, áreas úmidas, serras, manguezais e florestas); enquanto o florestamento e o reflorestamento, a restauração de ecossistemas de alto carbono, o agroflorestamento e a recuperação de solos degradados levam mais tempo para produzir resultados mensuráveis (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023, p. 24).

Essas ações subdivididas em benefícios imediatos e a longo prazo são medidas interdependentes, mas complementares que visam adaptar-se aos impactos percebidos e desenvolver soluções que serão colhidas no futuro. Nesse sentido, é importante tanto a adaptação imediata aos efeitos já sentidos das mudanças climáticas em áreas urbanas como temperatura, pluviosidade, elevação do nível do mar, ondas de calor e tempestades (Pavani, 2013), como, a restauração de áreas verdes e recuperação de áreas degradadas, medidas de longo prazo.

Assim como o IPCC, o ICLEI também ressalta a importância das ações baseadas na natureza em zonas urbanas costeiras, dado que essas práticas preservam “a saúde e o funcionamento dos recursos naturais costeiros e oferece aos governos locais a oportunidade de capitalizar os serviços gratuitos que eles oferecem” (ICLEI África, 2020, p. 26). Essas são abordagens muito mais econômicas do que as tecnológicas de CCUS e trazem benefícios tanto socioeconômicos quanto para o meio ambiente (ICLEI África, 2020). Dito isso, e embasado por fontes que apoiam esse tipo de ação no contexto urbano, será considerado nesta pesquisa apenas as ações baseadas na natureza.

4.1 Avaliação do armazenamento de carbono a partir do software InVEST

Neste tópico iremos analisar a capacidade de armazenamento de carbono na área urbana de Salvador-BA, utilizando como principal ferramenta o software *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs* (InVEST), especificamente o módulo *Carbon Storage and Sequestration*. Neste modelo será estimado a quantidade de carbono armazenado em toneladas por hectare (t/ha), associado ao tipo de uso e cobertura da terra. Para compreender os resultados obtidos é importante primeiramente trazer o contexto da discussão e da ferramenta utilizada nesta pesquisa.

O software InVEST tem como intuito “mapear e valorizar os bens e serviços da natureza que sustentam e realizam a vida humana” (Natural Capital Project, 2023). Criado em 2006 pela organização *The Natural Capital Project* em parceria com o *World Wide Fund for Nature* (WWF) e Universidades como Stanford, Minnesota, The Nature Conservancy, Academia Chinesa de Ciências e o Centro de Resiliência de Estocolmo. Este grupo desenvolveu de forma colaborativa o software InVEST, de código aberto, que busca identificar compensações e a compatibilidade entre benefícios ambientais, mapeando e avaliando diversos serviços ecossistêmicos.

Sua interface é bastante amigável, entretanto, é necessário compreender as potencialidades de cada modelo que integra o software, assim como identificar a padronização dos arquivos de entrada. Essa ferramenta permite que tomadores de decisões avaliem qualitativa e quantitativamente os serviços ecossistêmicos projetados num espaço de análise. Além do módulo *Carbon Storage and Sequestration*, utilizado nesta pesquisa, o InVEST apresenta um catálogo de modelos matemáticos que mapeiam e quantificam os diversos benefícios fornecidos pelos sistemas terrestres, de água doce e marinhos.

Na descrição fornecida pelo projeto os modelos são agrupados da seguinte forma:

Agrupamos modelos no InVEST em duas categorias principais: 1) modelos de serviços ecossistêmicos finais e de suporte e 2) ferramentas adicionais para apoiar a análise de serviços. Os serviços de apoio sustentam outros serviços ecossistêmicos, mas não fornecem benefícios diretos às pessoas. Os serviços finais fornecem benefícios diretos às pessoas (Natural Capital Project, 2023).

No quadro abaixo, são apresentados todos os modelos fornecidos pela ferramenta na versão 3.14.0 e suas respectivas traduções:

Quadro 3 – Modelos InVEST versão 3.14.0.

Nome do Módulo InVEST	Tradução (Português)
Annual Water Yield	Produção Anual de Água
Carbon Storage and Sequestration	Armazenamento e Sequestro de Carbono
Coastal Blue Carbon Preprocessor	Pré-processador de Carbono Azul Costeiro
Coastal Blue Carbon	Carbono Azul Costeiro
Coastal Vulnerability	Vulnerabilidade Costeira
Crop Pollination	Polinização de Culturas
Crop Production: Percentile	Produção de Culturas: Percentil
Crop Production: Regression	Produção de Culturas: Regressão
DelineateIt	Delinear (Delimitar/Traçar)
Forest Carbon Edge Effect	Efeito de Borda no Carbono Florestal
Habitat Quality	Qualidade do Habitat
Habitat Risk Assessment	Avaliação de Risco ao Habitat
Nutrient Delivery Ratio	Razão de Fornecimento de Nutrientes
RouteDEM	Roteamento DEM (Modelo Digital de Elevação)
Scenario Generator: Proximity Based	Gerador de Cenários: Baseado em Proximidade
Scenic Quality	Qualidade Cênica
Seasonal Water Yield	Produção de Água Sazonal
Sediment Delivery Ratio	Razão de Entrega de Sedimentos
Urban Cooling	Resfriamento Urbano
Urban Flood Risk Mitigation	Mitigação do Risco de Inundação Urbana
Urban Nature Access	Acesso à Natureza Urbana
Urban Stormwater Retention	Retenção de Águas Pluviais Urbanas
Visitation: Recreation and Tourism	Visitação: Recreação e Turismo
Wave Energy Production	Produção de Energia de Ondas
Wind Energy Production	Produção de Energia Eólica

Fonte: Adaptado de Natural Capital Project (2025).

Esses modelos são divididos como aplicativos independentes dentro do software e para visualizar seus resultados é necessário a utilização de um SIG, como o QGIS. Ainda é possível analisar em diferentes escalas, tendo como referência a escala dos dados de entrada. Cada um desses modelos possui potencialidades específicas a depender da temática de seu interesse, entretanto, conforme mencionado acima, todos eles possuem um mesmo objetivo que é localizar a

oferta de serviços ecossistêmicos e direcionar a tomada de decisão assertiva (Natural Capital Project, 2025).

Adentrando especificamente no modelo utilizado nesta pesquisa, o “Armazenamento e Sequestro de Carbono” (*Carbon Storage and Sequestration model*) é considerado um serviço ecossistêmico final, que estima a quantidade atual de carbono armazenado em um território. Este modelo matemático foi utilizado para valorar o serviço ecossistêmico de armazenamento e sequestro de carbono na área urbana de Salvador. Em seus dados de entrada são utilizados mapas de uso da terra e dados de estoques em quatro *pools* de carbono (ou compartimentos) para estimar a quantidade de carbono armazenado em uma paisagem (Natural Capital Project, 2025).

Segundo Pavani (2013), a biomassa total é a soma desses quatro compartimentos (*pools*), o qual se baseiam na compreensão da composição e estrutura da floresta, sendo eles:

1. Biomassa viva acima do solo (floresta),
2. Biomassa viva abaixo do solo (raízes),
3. Biomassa viva do solo (matéria orgânica viva presente no solo),
4. Biomassa de matéria orgânica morta acima do solo (folhas secas e outros materiais orgânicos mortos).

Dentre os *pools*, destaca-se a Biomassa viva acima do solo, uma das principais reservas de carbono que compreende toda a vegetação viva na superfície terrestre. Essas categorias ajudam a compreender como o carbono armazenado é distribuído em diferentes partes do ecossistema, bem como a importância do papel da vegetação no enfrentamento das mudanças climáticas.

É válido destacar que, apesar do módulo *Carbon Storage and Sequestration model* do InVEST fornece estimativas detalhadas do armazenamento de carbono por compartimento, a presente pesquisa optou por analisar apenas o valor total de carbono estocado. Reconhece que a análise por compartimentos poderia trazer uma maior riqueza de detalhes na compreensão específica sobre a ciclagem do carbono em ecossistemas individuais. Entretanto, essa decisão metodológica leva em consideração a resolução dos dados de entrada de uso e cobertura da terra do MapBiomas, em uma escala cartográfica pequena, bem como a falta de um mapeamento de uso da terra detalhado, que impede uma valoração precisa por compartimentos em escala local.

Além disso, a autora de referência deste trabalho ratifica em sua metodologia que, quando valores de carbono por classe de uso da terra apresentaram valores agrupados para dois ou mais compartimentos, foi escolhido apenas um dos compartimentos, deixando os demais com valores

nulos, a fim de atender os padrões do InVEST (Pavani, 2013, p. 89-90). Dito isso, a generalização para o carbono total torna esta abordagem mais consistente com a resolução dos dados de entrada disponíveis⁶ e os valores de carbono adotados.

4.2 Metodologia do mapeamento de armazenamento de carbono na área urbana de Salvador – BA

Conforme mencionado, no desenvolvimento desta etapa foi utilizado o software InVEST, mais especificamente o módulo *Carbon Storage and Sequestration model* (Armazenamento e Sequestro de Carbono), que calcula, para cada classe de uso e cobertura da terra, dados quantitativos sobre o carbono estocados. Por isso, o mapeamento de uso e cobertura da terra é a camada principal deste módulo e deve estar em formato *raster*. Da mesma forma, o resultado final também será gerado em formato *raster*, onde cada pixel representa o valor em tonelada por hectare (t/ha) do armazenamento de carbono. Todavia, é importante ressaltar que esse valor de Carbono total (*tot_c_cur*), é também desmembrado em subtotais nas seguintes categorias de biomassa:

- Densidade de carbono da biomassa acima do solo (*above*),
- Densidade de carbono da biomassa abaixo do solo (*below*),
- Densidade de carbono da matéria morta (*dead*)
- Densidade de carbono do solo (*soil*).

Dessa forma, o modelo estima o valor de armazenamento de carbono a partir das características das classes de uso e cobertura da terra.

Entretanto, para que o modelo entenda qual o valor exato de carbono de cada uso, é obrigatório inserir no *input* do modelo uma tabela em formato .csv (valores separados por vírgula) com os valores de carbono armazenados para as quatro biomassas descritas acima (*above*, *bellow*, *dead* e *soil*). Essa planilha .csv é denominada de tabela de “pools”.

Na tabela de ‘pools’ a coluna ‘*lucode*’ é a identificação de cada pixel na imagem, a coluna ‘*LULC_Name*’ refere-se ao nome das classes e as colunas seguintes possuem os valores de carbono (t/ha) acima do solo, abaixo do solo, de matéria morta e do solo. Um exemplo da tabela de ‘pools’ pode ser visualizado na tabela 3.

⁶ No tópico 3 é detalhado a escala de Uso e Cobertura da Terra do MapBiomas. Esse dado, apesar de não condizer com a escala da área de estudo, apresenta questões potenciais para esta pesquisa, como metodologia unificada e a temporalidade de mapeamentos disponíveis.

Tabela 3 - Modelo da tabela de 'pools'

lucode	LULC_Name	C_above	C_below	C_soil	C_dead
1	Ag	5	0	0	0
2	AU	0	0	0	0
4	FODII	113.21	22.54	234	14.39
6	Lag	0	0	0	0
7	Mang	76.09	22.07	59.2	0
8	Min	0	0	0	0
9	Past	8.7	0	0	0
10	Rest	79.824	14.656	50.2	0
11	Silv	55.4	0	0	0
15	Baren	0	0	0	0
16	Desconhecido	0	0	0	0

Fonte: elaboração própria (2025).

Nota: os valores de carbono, bem como as classes 'LULC' são extraídas de Pavani (2013).

O InVEST disponibiliza aos seus usuários uma série de classes com valores de carbono para adoção na tabela de “pools”, ou seja, nessas tabelas exemplo são disponibilizadas classes de uso e cobertura da terra e os valores carbono para cada tipo de biomassa. Entretanto, as classes e valores de carbono estão baseados na realidade do território norte-americano, não atendendo a diversidade dos usos e coberturas da terra em outros locais.

Desta maneira, a fim de buscar um resultado com melhor aderência à realidade dos ecossistemas e biomas do Brasil, utilizamos como referência o padrão aplicado por Pavani (2013). A autora construiu em sua metodologia uma base de dados com os estoques de carbono em cada compartimento de biomassa para diversos tipos de uso e cobertura da terra do Litoral Norte de São Paulo, área de estudo da autora. Segundo Pavani (2013, p. 89-90), os

[...] valores foram extraídos de diversas publicações que quantificam os valores de biomassa e de carbono armazenados em diferentes usos e ocupações da terra, como exemplo, inventários florestais e de emissão de gases do efeito estufa. Algumas dessas publicações contêm valores agrupados para dois ou mais compartimentos, assim, este valor foi apontado para um dos compartimentos e os compartimentos complementares foram considerados nulos.

A tabela 4 ilustra as classes de uso do solo, baseadas no Manual de Uso da Terra do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013), e os respectivos valores de carbono subdivididos em: biomassa viva acima do solo (aboveground biomass - AGB), biomassa viva subterrânea (belowground biomass - BGB), biomassa do solo (soil organic - SOM), biomassa morta acima do solo (dead organic matter - DOM), adotadas por Pavani (2013) na sua região de estudo.

Tabela 4 – Tabela de pools com valores de biomassa de carbono nas diferentes classes de uso e cobertura da terra, segundo Pavani (2013)

Classe	InVEST	Classe (sigla)	AGB	BGB	SOM	DOM	Carbono Total
Agricultura	1	Ag	5 ¹	0 ¹	0 ¹	0 ¹	5
Área Urbana	2	AU	0 ²	0 ²	0 ²	0 ²	0
FOD de terras baixas	3	FODI	126,72 ³	28,28 ³	281 ³	21,77 ³	457,77
FOD submontana	4	FODII	113,21 ³	22,54 ³	234 ³	14,39 ³	384,14
FOD montana	5	FODIII	94,28 ³	19,38 ³	187 ³	14,62 ³	315,28
Lago	6	Lag	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴	0
Mangue	7	Mang	76,09 ⁵	22,07 ⁵	59,20 ⁶	0 ⁵	157,36
Mineração	8	Min	0 ²	0 ²	0 ²	0 ²	0
Pastagem	9	Past	8,70 ¹	0 ¹	0 ¹	0 ¹	8,70
Restinga	10	Rest	79,824 ⁷	14,656 ⁸	50,2 ⁶	0 ⁸	144,68
Silvicultura	11	Silv	55,40 ⁶	0 ⁶	0 ⁶	0 ⁶	55,40
Veg. Secundária < 4 anos	12	VSa	3,1 ⁹	0 ⁹	0 ⁹	30,9 ⁹	34
Veg. Secundária 4 a 10 anos	13	VSB	6,7 ⁹	1,7 ⁹	3,7 ⁹	34 ⁹	46,1
Veg. Secundária > 10 anos	14	VSc	18,4 ⁹	5,1 ⁹	5,3 ⁹	31,9 ⁹	60,7

Fonte: Pavani (2013, p. 92).

A proposta da tabela de *pools* acima ilustrada é muito mais alinhada com a realidade da área urbana de Salvador, se comparado à tabela de pools disponibilizada pelo INVEST. Contudo, ainda foi necessária uma compatibilização tendo em vista que Pavani (2013) utilizou as classes de uso do solo em escala de detalhe de acordo com o Manual de Uso da Terra do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013), já o presente trabalho utilizou os mapeamentos de uso e ocupação da terra numa escala mais generalista com base no material disponível no MapBiomass (2024) para os anos de 1985, 2023 e cenário proposto para 2040.

Destarte, algumas classes presentes em Pavani (2013) foram desconsideradas por não haver correspondência com as classes definidas pelo MapBiomass ou por não haver a classe na área de estudo (especialmente ‘Veg. Secundária < 4 anos’, ‘Veg. Secundária 4 a 10 anos’ e ‘Veg. Secundária > 10 anos’). O Quadro 4 apresenta a compatibilização das classes de uso e cobertura da terra da área urbana de Salvador, obtidos pelo MapBiomass, com as classes propostas no modelo InVEST e as classes utilizadas em Pavani (2013).

Quadro 4 - Compatibilização das classes de uso e ocupação da terra

Projeto MapBiomas – utilizado nesta pesquisa		Ferramenta InVEST		Pavani (2013)	
Classes	Grupo	Classe	Grupo	Classe	
Formação Florestal	Forest	Upland Forest Semi-closed mixed	Formação Florestal	FOD subm ontana (FODII)	
Mangue	Water	Wet shrub	Água	Mang	
Campo Alagado e Área Pantanosa	Water	Flooded/marsh	Água	Mang	
Pastagem	Agriculture	Pasture	Agricultura	Past	
Mosaico de Usos	Agriculture	Field crop	Agricultura	Ag	
Praia, Duna e Areal	Unknown	Barren	-	-	
Área Urbanizada	Built	Residential & Commercial	Construído	AU	
Outras Áreas não Vegetadas	Unknown	Rural non-vegetated unknown	Construido	AU	
Mineração	-	Não teve compatibilização	Mineração	Min	
Rio, Lago e Oceano	Water	Permanent lentic water	Água	Lag	
Restinga Herbácea	Shrubland	Natural shrub	Restinga	Rest	

Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2025).

Nota: Para as classes sem compatibilização com Pavani (2013), Pereira *et al.* (2025) adotou classes e valores fornecidos pelo InVEST e o mesmo seguiu-se nesta pesquisa, ocorrendo somente com a classe “Praia, Duna e Areal”. Sua equivalência com “Unknown” (classe do InVEST) incorpora seus valores *pools* para cada compartimento de biomassa.

Essa compatibilização é necessária para integrar valores de carbono adotados por Pavani (2013), adaptando as fitofisionomias semelhantes à área de estudo. Isso se deve ao fato de que, os mapas de uso e cobertura da terra são incorporados em formato *raster*, onde a cada pixel corresponde a uma classe específica. Na coluna “InVEST” da Tabela 4 é indicado os valores pixel de cada classe utilizados pela autora, associado aos valores de biomassa de carbono. Portanto, como foi utilizado como referência a tabela *pools* de Pavani (2013), também se utilizou os valores de pixels correspondentes a cada classe. Com isso, a fim de que o software funcione, a tabela de *pools* deverá ter nos valores da coluna *lulcode* todos os valores de *pixel* existentes no *raster* de uso e cobertura. Isso assegurará a correlação adequada, ao utilizar o software, entre os diferentes tipos de uso e os valores de carbono. Vale ressaltar que, para a classe que não teve compatibilidade, como é o caso de “Praia, Duna e Areal”, utilizou-se valores de carbonos com a classe com maior correspondência no InVEST e o valor do *pixel* segue a sequência numérica da Tabela 4.

Para que o software funcione, os “*inputs*” mínimos para o modelo de armazenamento e sequestro de carbono são o *raster* de uso e cobertura da terra, reamostrado com os valores de pixel associado a tabela de *pools* e a tabela de “*pools*” em formato *csv*, com os valores de carbono. Para esta pesquisa, esse processo se deu em três etapas, para cada um dos anos de estudo. Foram realizadas as análises de armazenamento de carbono para 1985, 2023 e o cenário de 2040 para área urbana de Salvador e possuíam como input mapeamento do MapBiomas compatibilizado, em formato *raster*, e a tabela de *pools* com seus valores. Apenas no caso de 2040 que o mapeamento se trata de uma projeção futura realizada pelo MOLUSCE.

Os resultados do processamento no módulo de ‘Armazenamento e Sequestro de Carbono’ foram imagens *raster* para os anos citados, *onde* cada *pixel* é associado a valores de carbono, definido a partir da tabela de “*pools*”. Para melhor compreensão desses dados, utilizou-se a reclassificação *raster* em cinco classes utilizando o método de definição de intervalo de classes denominado “*Natural Breaks (Jenks)*”.

Essas classes são baseadas em agrupamentos por similitude inerentes aos dados. As quebras de classes são criadas de forma a agrupar valores semelhantes e maximizar as diferenças entre elas. E para cada classe os valores representam o total de carbono em toneladas por hectares (t/ha) armazenados nas diferentes classes de uso da terra.

4.3 Resultado do mapeamento de armazenamento de carbono para os anos de 1985, 2023 e 2040

Este subcapítulo apresenta os resultados do armazenamento de carbono para a área urbana de Salvador nos anos de 1985, 2023 e a projeção de 2040. Baseando-se nas análises de uso e cobertura da terra detalhadas no capítulo 3 e na metodologia do modelo *Carbon Storage and Sequestration* do InVEST, conforme detalhado na seção 4.1, este capítulo busca quantificar o armazenamento de carbono total, bem como identificar a variação desse serviço ecossistêmico ao longo dos anos citados.

A compreensão dessas transformações propõe-se não somente identificar as localidades de maior ou menor armazenamento de carbono, mas fornecer subsídios para o planejamento e gestão do território. Essa abordagem ganha ainda mais relevância quando se considera o papel estratégico das cidades, conforme destacado no Relatório Síntese do IPCC, quanto coloca os sistemas urbanos

como pontos “críticos para alcançar reduções profundas de emissões e promover o desenvolvimento resiliente ao clima” (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023, p. 46). Ele ainda promove o planejamento do uso do solo um dos principais elementos de adaptação e mitigação às mudanças climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

Para iniciar a apresentação dos resultados, a Tabela 5 detalha os dados do armazenamento de carbono em toneladas por hectare (t/ha), pelo método de quebras naturais para os três anos em discussão, 1985 e 2023 e o cenário de 2040. Para cada ano calcula-se a extensão em área (km²) correspondente a cada faixa de armazenamento de carbono.

Tabela 5 - Armazenamento total de Carbono (InVEST) para os anos de 1985, 2023 e 2040 em Km²

Armazenamento de Carbono total		Classes de Uso da Terra	Área (Km ²)			Variação (Km ²)	
Índices	(t/ha)		1985	2023	2040	1985/2023	2023/2040
Nulo	0	Áreas cobertas por concreto, superfícies exportas ou áreas naturais sem cobertura vegetal	112,16	185,38	199,89	73,22	14,51
Muito Baixo	0,001 - 0,45	Mosaico de Usos	117,51	52,85	30,12	-64,66	-22,73
Baixo	0,451 – 0,783	Pastagem	1,00	3,49	4,53	2,49	1,04
Médio	0,784 – 14,162	Ecossistemas úmidos e costeiros	2,47	1,34	1,43	-1,13	0,09
Alto	14,163 – 34,573	Vegetação	46,46	36,52	45,35	-9,93	8,83

Fonte: elaboração própria (2025).

A Tabela 5, apresentada acima, estabelece índices norteadores que se baseiam nos valores de carbono em tonelada por hectare, variando entre “nulo”, para valores de carbono iguais a zero a “alto” para os maiores valores de carbono identificados na área urbana de Salvador. O índice nulo representa locais que não possuem valores carbono armazenado, em sua maioria “correlacionados às áreas urbanas, construções ou superfícies impermeáveis, resultando no menor sequestro de carbono e, consequentemente, em uma maior temperatura” da superfície (Nascimento, 2024). A descrição do índice “nulo” faz essa mesma correlação, indicando áreas cobertas por concreto, superfícies expostas ou áreas naturais sem cobertura vegetal e que abrange as classes “Área Urbanizada”, “Praia, Duna e Areal”, “Outras Áreas não Vegetadas”, “Mineração” e “Rio, Lago e Oceano” de uso e cobertura da terra, com armazenamento total de carbono igual a zero. O índice “muito baixo” representa os “Mosaico de Usos”, definido como “áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura, incluindo áreas de ocupação periurbana” (MapBiomass, 2024). Essa categoria, associada com Pavani (2013) a classe de agricultura (Ag),

assume um baixo potencial de armazenamento principalmente devido a sua natureza de aração que limita, nas práticas de preparação do solo, acumulações de matéria orgânica e consequentemente de carbono no solo. Em contrapartida, regiões de “Pastagem” apresentaram uma pequena elevação no armazenamento de carbono (índice “baixo”), comparado a classe anterior. Segundo Pavani (2013, p. 43), esse tipo de uso e cobertura, apesar de possuir biomassa lenhosa nula ou quase nula, armazena carbono subterrâneo e por isso, permite um acúmulo mais estável de matéria orgânica.

O uso atrelado a ecossistemas úmidos e costeiros, que são representados pelas classes “Mangue”, “Campo alagado e área pantanosa” e “Restingas Herbácea” é a segunda maior classe de armazenamento da área em estudo. De acordo com o IPCC, a conservação desses ecossistemas úmidos tem impacto imediato na regulação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023, p. 106) e junto com áreas verdes, citado como alto índice, apresentam importantes soluções de regulação climática em áreas urbanas. A Mata Atlântica, bioma da área desta pesquisa, “apresenta as maiores capacidades de armazenamento de carbono dos usos e ocupações do solo estudados” (Pavani, 2013, p. 90). Sendo assim, essa tabela possibilita associar de forma mais intuitiva o armazenamento de carbono total, bem como ter evidente quais tipos de uso e cobertura da terra estão correlacionados.

Compreendida a estrutura e o propósito da Tabela 5, o foco agora se volta para a interpretação dos dados brutos, tanto para valores apresentados quanto na distribuição espacial desses índices.

Os dados de variação na Tabela 5 possibilita acompanhar as tendências de ganhos e perdas nos quatro índices. A princípio, já se nota que, entre 1985 e 2023 houve um aumento de áreas da classe “nulo”, correspondente a um aumento de 73,22 km² de áreas sem armazenamento de carbono no território urbano de Salvador. Um dos motivos desse aumento do índice “nulo” é a redução de aproximadamente 1.120 campos de futebol de área vegetada entre os anos citados. Isso repercutiu muito na diminuição de armazenamento de carbono, onde observou-se a redução de 9,93 km² do índice “Alto”, área com maior potencial em armazenamento de carbono da área de estudo.

O aumento do índice “nulo” também acontece nos dados da variação entre 2023 e 2040, porém, com um aumento menor de 14,51 km² de áreas com índice “nulo” de armazenamento total de carbono.

As tendências de aumento de área urbanizada, analisadas no capítulo 3, para os dois intervalos, se concretizam aqui ao analisar o movimento inversamente proporcional, com a

diminuição do armazenamento de carbono total e de serviço ecossistêmico de regulação de gases e regulação climática.

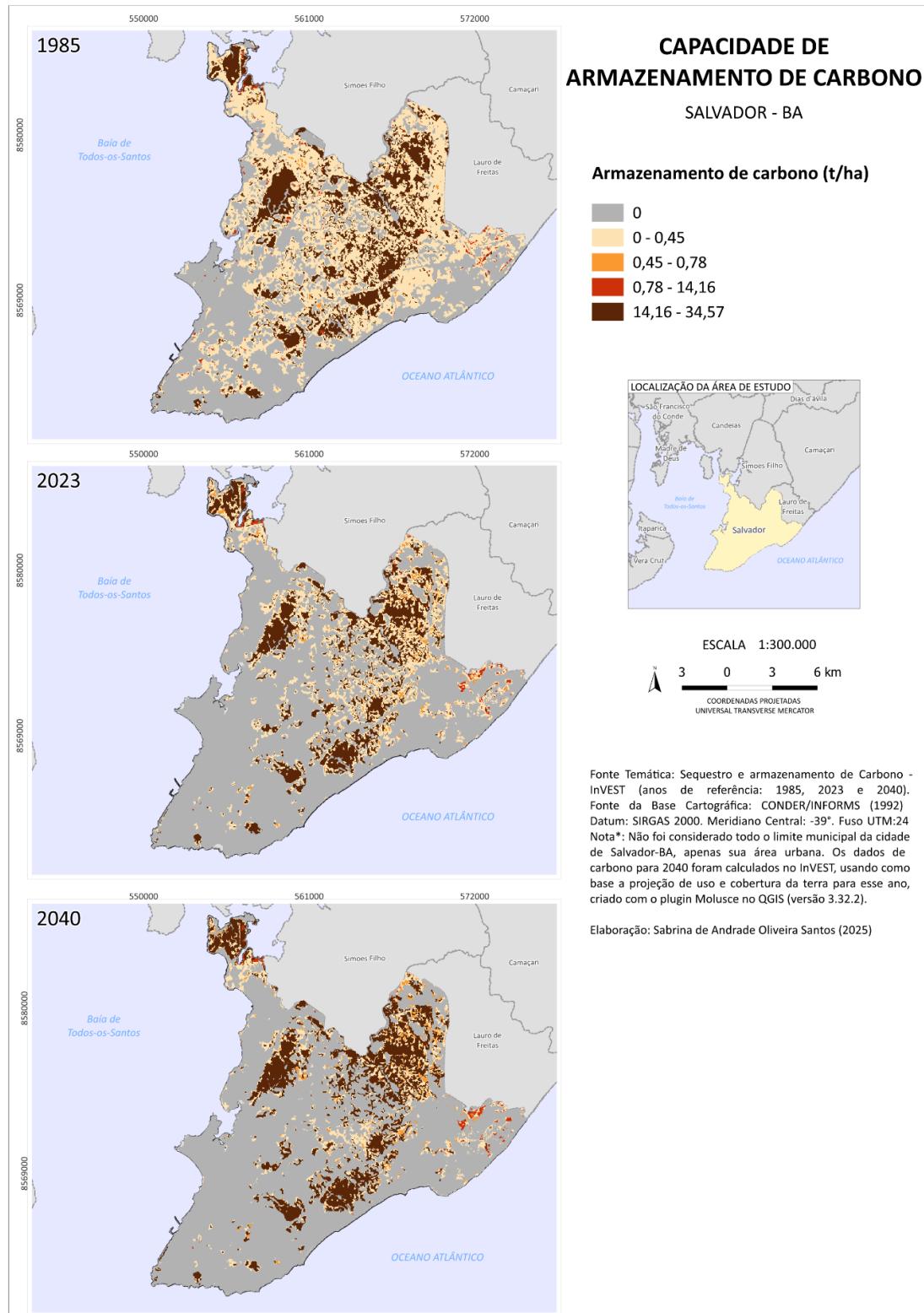
A faixa de valores de carbono que representam a classe de uso e cobertura “Mosaico de Usos”, teve uma perda significativa nos dois intervalos, sendo entre 1985 e 2023 uma perda de 64,66 km² e entre 2023 e 2040 com uma perda menor de 22,73 km², ambos de área com índices “muito baixo” em carbono total armazenado. A perda de áreas com valores “muito baixo” de carbono armazenado, foi em muitos casos, convertido para valores “nulos”, o que ampara o seu aumento significativo nos dois intervalos temporais, conforme citado anteriormente. A terceira faixa de valores que mais variou foi a de “alto” índice de carbono, entretanto, comparado as duas primeiras variações, esta é muito pouco significativa. Entre 1985 e 2023 houve uma perda de 9,93 km² em áreas com alto índice de armazenamento de carbono. Embora nesse primeiro intervalo tenha notado uma queda dessas áreas, entre 2023 e 2040 projeta-se a recuperação de 8,83 km² em áreas com alto armazenamento de carbono, o que praticamente equivale à perda de 1985 e 2023. Esse dado apresenta-se na contramão das tendências de ganhos e perdas, é explicado no tópico 3 quando se analisou o aumento de áreas verdes em 2040. Observou-se que o modelo utilizado para projetar cenários futuros, identificou conversão de mosaico de usos para formação florestal em alguns pontos e definiu esta tendência pelo algoritmo e replicado na simulação, esta que serviu como dado de entrada para a projeção de armazenamento de carbono total para 2040. Mesmo com o modelo tendo identificado em seu processo esse reflorestamento, que seja em pequena escala, a simulação deixa de fora diversos aspectos políticos e sociais que fazem parte da tomada de decisão que fortaleça os processos de reflorestamento.

Todavia, Salvador assinou e se comprometeu com diversos pactos e iniciativas relacionados às mudanças climáticas. Colocar em prática estratégias estipuladas no PMAMC (Salvador, 2020), principalmente relacionada a neutralidade de carbono é a chance do município em correr atrás dos compromissos feitos e das metas estipuladas e acompanhar a projeção de recuperação de áreas com altos índices de carbono.

Na figura 3, o gradiente de cores indica os níveis de armazenamento de carbono na área urbana de Salvador, em uma escala que vai do mais claro ao mais escuro, representando um aumento progressivo. O bege claro corresponde a valores entre 0,001 e 0,45 t/ha (muito baixo) o laranja aos valores entre 0,451 e 0,783 t/ha (baixo), o vermelho queimado aos valores entre 0,784

e 14,162 t/ha (médio) e o Marrom os valores entre 14,163 e 34,573 t/ha (alto). Logo, quando mais escura encontra-se a tonalidade na figura, maior o armazenamento de carbono total.

Figura 3 – Mapa da Capacidade de Armazenamento de Carbono na Área Urbana de Salvador, para os anos de 1985, 2023 e 2040

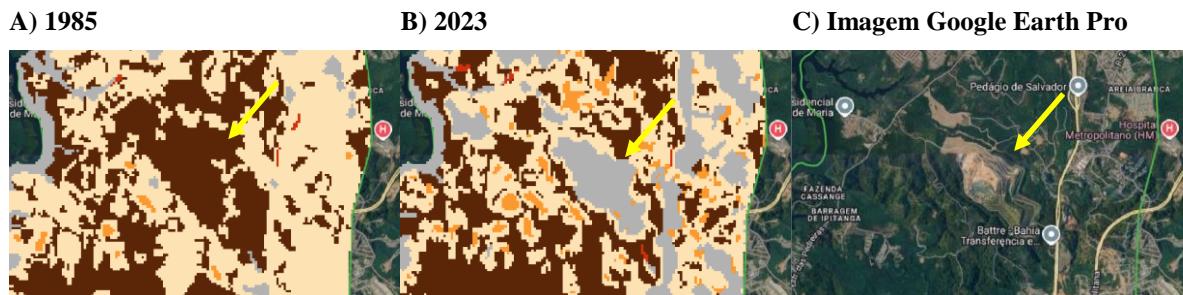


Fonte: elaboração própria (2025).

Tendo em vista a metodologia visual de representação acima, será analisado o armazenamento de carbono total nos anos de 1985, 2023 e projeção para 2040, bem como sua distribuição e mudanças na área analisada.

Na figura 3 é possível notar significativamente as modificações entre 1985 e 2023, com a perda da capacidade de armazenamento de carbono no miolo da área de estudo. Esses resultados foram marcados por uma redução substancial no armazenamento de carbono em alguns pontos chaves da área urbana de Salvador. Os impactos mais significativos, ou seja, de maior tamanho agregado, referem-se às regiões onde hoje ocupam o Aterro Metropolitano Centro e um centro logístico em Porto Seco Pirajá. Em 1985 essas áreas possuíam alto potencial de armazenamento de carbono, entretanto, em 2023 essa capacidade foi significativamente reduzida, tornando estoques nulos ou muito baixos. Na Figura 4 é possível observar a delimitação precisa desse aterro em 2023 e a mudança nos níveis de armazenamento na região de sua instalação e em seu entorno.

Figura 4 - Armazenamento de Carbono total na região da instalação do Aterro Metropolitano Centro, entre 1985 e 2023



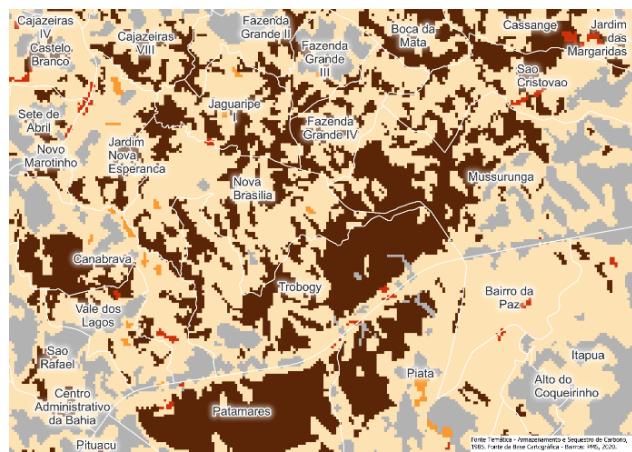
Fonte: elaboração própria (2025).

A própria expansão e consolidação da ocupação urbana também representaram um vetor significativo para a perda de armazenamento de carbono em maior escala. No miolo de Salvador fica evidente na Figura 3 a diminuição da capacidade de armazenamento entre 1985 e 2023, relacionada à ocupação urbana que abrange os bairros de Águas Claras, Cajazeiras (II, IV, V, VI, VII, X, XI), Vale dos Lagos, Canabrava, Novo Marotinho, Sete de Abril, Castelo Branco, Vila Canaria, Jardim Cajazeiras, Pau da Lima, São Marcos, São Rafael, Dom Avelar, Sussuarana (e Nova Sussuarana), Mata Escura, Valeria, Piatã, Fazenda Grande (I, III, IV), Boca da Mata e Pirajá. Esse dado demonstra a intensa urbanização nesses 38 anos, especificamente nas regiões citadas.

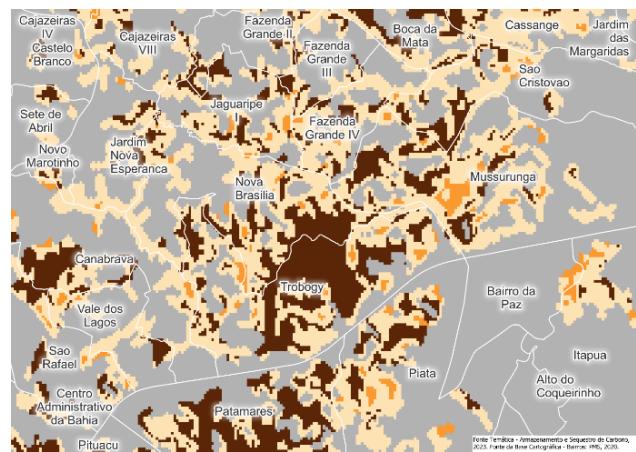
Na Figura 5, foi realizado um recorte que abrange parcialmente das áreas mencionadas, para que seja observado, com maior proximidade, essas mudanças.

Figura 5 - Recorte do mapeamento de Armazenamento de Carbono em 1985 e 2023

A) 1985



B) 2023



Fonte: elaboração própria (2025).

As superfícies construídas, dominadas pelo concreto, comprometem significativamente os serviços ecossistêmicos de sequestro e armazenamento de carbono. A supressão vegetal e a impermeabilização do solo, impedem o funcionamento as trocas gasosas entre a atmosfera e diferentes níveis de biomassa. A “Formações Florestal” em contrapartida são conhecidas como “excelentes sumidouros de carbono e sua conservação”, considerada como uma estratégia para a redução da emissão de gases de efeito estufa (Guimarães *et al.*, 2022, p. 41). A conversão dessas áreas verdes para outros tipos de uso e cobertura, impactam tanto a capacidade de armazenamento do município, que se converte em bem-estar para a população, quanto na liberação do carbono antes armazenado e a sua liberação para a atmosfera. Esse processo contribui para um efeito estufa desequilibrado, aumentando a temperatura global bem como a sensação térmica da região.

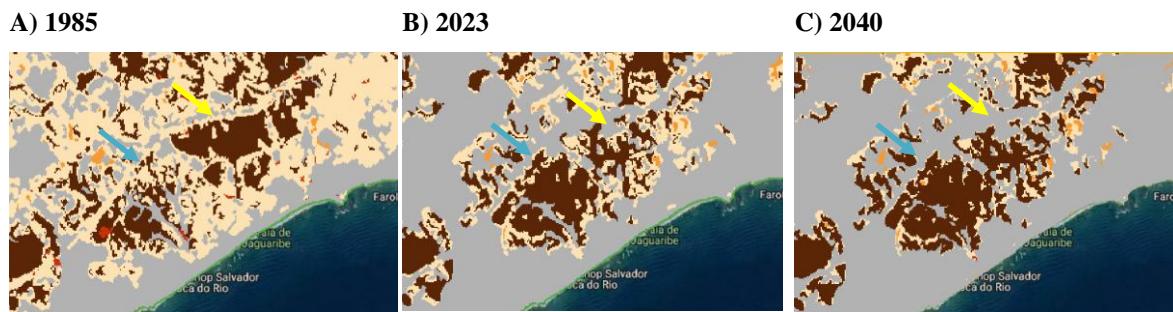
Junto à perda da “Formação florestal”, já mencionada anteriormente em Porto Seco Pirajá, no Aterro Metropolitano Centro e na ocupação urbana no miolo de Salvador, observa-se o mesmo padrão ao redor do Vale Encantado, localizado no bairro de Patamares. Uma região de Remanescente de Mata Atlântica, “composto por floresta ombrófila, restinga e zonas úmidas, abrigando espécies animais raras, endêmicas da Mata Atlântica e ameaçadas de extinção” (Instituto Mão da Terra, c2021). A localidade, ao longo do tempo foi sendo cercada por empreendimentos

de alto padrão como o residencial Alphaville I e o aumento dessa ocupação gerou, pelas suas características naturais relevantes, atenção às ameaças a uma das poucas áreas verdes ainda existentes na área urbana de Salvador. O Coletivo SOS Vale Encantado surge em busca de ações efetivas para proteção dessas áreas enfrentando a resistência de construtoras. É importante frisar que o reconhecimento do Vale Encantado como Unidade de Conservação está citado no PMAMC de Salvador, especificamente nas ações baseadas na natureza, apesar de não terem sido oficialmente reconhecidas. Serpa (2023, p. 1382), descreve sobre a mobilização e contradições de uma cidade resiliente:

Em janeiro de 2020, entidades científicas recomendaram a criação do Refúgio de Vida Silvestre do Vale Encantado. Milhares assinaram petição online apoiando a iniciativa. O movimento de mobilização (sobretudo de classe média) pela criação desta área de conservação em Salvador mostra as contradições de uma cidade que faz parte da rede Cities for Forests e, ao mesmo tempo, destrói sua vegetação em função de interesses imobiliários e de projetos de mobilidade como o BRT (Bus Rapid Transit) e o Metrô.

Apesar das ações em prol da conservação dessas áreas, entre 1985 e 2023 é notável a dinâmica de expansão urbana, no entorno do Vale Encantado (Figura 6). Essa região, que apresentava em 1985 uma maior área agregada, com altos índices de carbono armazenado, dando espaço a baixos índices na conversão de áreas verdes em área urbanizada. Na Figura 6, foi realizado recorte, ampliando a escala de análise, para que fosse visível (seta amarela) a perda dos tons mais escuros de 1985, dando espaço em 2023 aos tons cinza e bege claro.

Figura 6 - Mudanças do Armazenamento de Carbono na região de Patamares e Pituaçu (1985, 2023 e 2040)

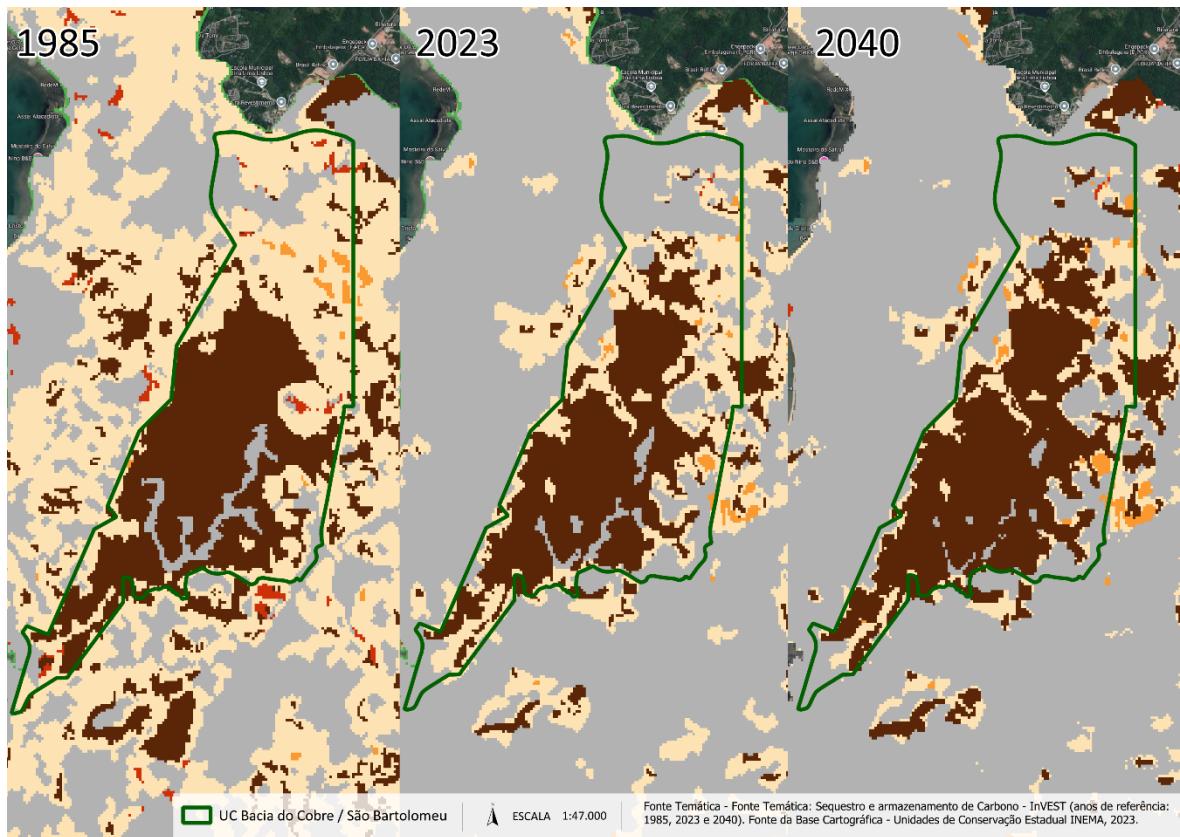


Fonte: elaboração própria (2025).

Em contraste a dinâmica observada no Vale Encantado, o Parque Metropolitano de Pituaçu, parque regulamentado, apresenta um cenário distinto em termos de armazenamento de carbono. Entre 1985 e 2023 houve um notável aumento do alto potencial de armazenamento de carbono, concomitante a um aumento na “Formação Florestal”. No entanto, dada a metodologia de mapeamento via imagens de satélite, esse aumento se dá de forma significativa pela identificação de matéria orgânica flutuante ou submersa na represa do Parque de Pituaçu, sendo classificada erroneamente como áreas verdes. Entretanto, mesmo considerando essa interpretação equivocada ainda se nota um aumento de armazenamento de carbono no parque, gerado pela concentração e adensamento das áreas de vegetação entre 1985 e 2023.

Apesar do reflorestamento no Parque Metropolitano de Pituaçu, o reconhecimento oficial como Unidade de Conservação nem sempre é o suficiente para blindar essas áreas da pressão urbana e da especulação imobiliária. Até mesmo o Parque de Pituaçu, devido a sua proximidade com avenidas como a Luís Viana Filho, avenida de intenso fluxo, sofre com ocupação urbana indevida. Outro exemplo é a Área de Proteção Ambiental (APA) Bacia do Cobre/São Bartolomeu. Em 1985, apesar da APA não possuir em todo o seu limite elevados índices de carbono, há uma significativa concentração de altos índices de armazenamento no interior da UC. Em 2023 nota-se que essa concentração começa a se fragmentar, além disso, todo o seu entorno já se encontra majoritariamente em cinza (Figura 7), indicando que em 2023 seu entorno convergiu para características em sua maioria nulas de armazenamento de carbono, tornando a APA cada vez mais “ilhada”. Na figura abaixo, é possível visualizar os pontos mencionados, principalmente a redução de áreas verdes, refletido na diminuição de armazenamento de carbono, principalmente dentro da Unidade de Conservação Bacia do Cobre / São Bartolomeu.

Figura 7 - Recorte do Armazenamento de Carbono na área da APA Bacia do Cobre / São Bartolomeu



Fonte: elaboração própria (2025).

Na projeção para 2040 não houveram como um todo grandes perdas ou ganhos de armazenamento de carbono. Na Figura 7 a apenas a incorporação de alguns pixels de “nulo” e “baixo” para “alto” armazenamento total de carbono em 2040 para a APA. Em valores absolutos, notou-se, para toda área de estudo um aumento de 8,83 km² na classe de alto armazenamento de carbono. Isso se dá pela projeção para 2040 realizado pelo MOLUSCE, onde nota-se um indicativo de reflorestamento⁷. Pode-se notar que o aumento em quilômetros quadrados do índice “alto” deve-se ao adensamento nos limites de áreas com maior armazenamento de carbono já existentes, haja vista, para as classes com elevados níveis, a projeção para 2040 criou um buffer (~1 pixel) no entorno de áreas com altos níveis de armazenamento de carbono.

A partir das observações, conclui-se que, assim como citado por Pavani (2013) na sua área de pesquisa, para a área urbana de Salvador também é atribuído a classe “Formação Florestal”, ou

⁷ Indicado e explicado no tópico 3.

seja, aos fragmentos de Mata Atlântica, a maior capacidade de armazenamento de carbono dentre os usos e ocupações da terra estudados. Por isso, a influência das áreas verdes é essencial para que a pressão sobre o ecossistema, com soluções baseadas na natureza, reflita na diminuição efetiva das emissões de carbono.

Quanto às ações relacionadas à emissão de GEE associadas ao uso e cobertura da terra, serão necessárias medidas criativas para equilibrar a grande extensão de “Áreas Urbanizadas” junto a promoção das medidas de reflorestamento e conectividade das áreas verdes estipuladas no PMAMC (Salvador, 2020). Hoje, o armazenamento de carbono da área em estudo está muito limitado às unidades de conservação e a pequenas áreas verdes distribuídas e isoladas.

Também por isso, ações de manutenção das áreas verdes e preservação devem ser colocadas em prática, visto que, mesmo com amparo governamental, muitas dessas áreas continuam expostas à ocupação urbana e à degradação. Se a redução de armazenamento de carbono continuar a cair ao longo dos próximos anos, a área urbana de Salvador aumentará sua exposição aos eventos extremos, podendo potencializar esses impactos sobretudo em grandes centros populacionais e em áreas costeiras. Assim, o esforço de ações para regulação climática passa obrigatoriamente por ações baseadas na natureza, principalmente em centros urbanos como Salvador.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do cenário de mudanças climáticas e da urgência em buscar medidas mitigadoras, o entendimento das relações entre as mudanças de uso e cobertura da terra e a capacidade de armazenamento em ambientes urbanos, tornam-se informações indispensáveis para a tomada de decisão.

Esta pesquisa teve como foco avaliar as mudanças de uso e cobertura da terra e sua relação com o armazenamento de carbono, que encontrou materialidade na área urbana da cidade de Salvador, Bahia. Com uma trajetória marcada pelo acelerado crescimento populacional e adensamento das ocupações urbanas, exemplifica-se a pressão do meio exercida sobre o ambiente natural. Sua principal conclusão é que há uma relação diretamente proporcional entre as áreas verdes e altos níveis de armazenamento de carbono, observado ao longo dos anos na área urbana de Salvador.

Percebe-se que os objetivos dessa pesquisa foram alcançados ao analisar a relação direta do uso e cobertura da terra e seu impacto no armazenamento de carbono na área em estudo. Essa análise revelou significativas transformações nos padrões de uso e cobertura entre 1985 e 2023, refletindo as relações atreladas ao desenvolvimento urbano nesse período. Entretanto, a projeção para 2040 não apresentou grandes mudanças, comparada a 2023, variando hora entre tendências correspondentes, como o avanço da área urbanizada, hora não correspondentes, como o aumento das áreas verdes. Essas variações podem ser atribuídas a fatores como um intervalo temporal mais curto entre os dois momentos, os limites municipais estabelecidos e a extensa ocupação urbana existente.

Considera-se da mesma forma que os objetivos específicos foram atingidos, como forma de amparar as discussões associadas ao objetivo geral. A utilização da extensão em quilômetros quadrados (km^2) das classes e a atribuição do método de quebras naturais para visualização dos dados de carbono com índices relacionados cada um dos intervalos, foi essencial para responder à questão central desta pesquisa, “qual a relação entre as mudanças de uso e cobertura da terra e a capacidade de armazenamento de carbono de 1985, 2023 e 2040 para a área urbana de Salvador?”. As tabelas que quantificam a extensão dos dados e as figuras com mapas que especializam essas informações, revelaram uma intensa relação dos maiores índices de armazenamento a áreas verdes

e dados nulos a área urbanizada, que, por conta das estruturas de concreto inibem as trocas gasosas com a atmosfera, essenciais para regulação climática.

Além disso, a presente pesquisa, ao analisar a relação entre as mudanças de uso e cobertura da terra e a capacidade de armazenamento de carbono, incluindo uma previsão futura, alinha-se diretamente com as urgentes demandas por maior sustentabilidade e resiliência urbana em Salvador. A capital baiana tem demonstrado em seus relatórios, ações e compromissos a serem cumpridos com a agenda climática, estipulando entre eles a redução significativa de CO₂. Essas iniciativas junto a preservação e manutenção de áreas verdes contribui diretamente para a captura de carbono e a promoção de serviços ecossistêmicos. Os resultados desse estudo apresentam a gestão municipal e a sociedade civil um diagnóstico temporal claro das mudanças no uso da terra e seu efeito no meio ambiente. Essas informações são bases valiosas para as novas regras e políticas do PDDU equilibrando preservação de áreas verdes e expansão urbana.

Em contrapartida, se reconhece a fragilidade do cenário futuro, dado as limitações da ferramenta do MOLUSCE e a utilização de outro intervalo temporal (2006 e 2023) que se estipulou necessária para conseguir predefinir o uso e cobertura de 2040. Além disso, a utilização para a modelagem de variáveis espaciais inferiores a escala cartográfica ideal que também se caracteriza como limitador a um cenário futuro mais robusto. Essa limitação contribui para a fragilidade geral da pesquisa, especialmente no que tange a utilização dos mapeamentos extraídos do MapBiomass em escala regional resultando na representação menos precisa e completa do território. Esses fatores direcionaram na escolha de análise apenas do carbono total, não permitindo mensurar com exatidão, devido a escala os valores de carbono por compartimento. Além disso, Pavani (2013) em sua pesquisa que fornece valores de carbono, não identificou, para todas as classes de uso e cobertura valores divididos em compartimentos de biomassa, fornecendo apenas o valor total de carbono armazenado. Por esses motivos as análises de carbono se limitaram nesta pesquisa ao armazenamento total.

Entretanto, mesmo com a utilização de dados com escalas cartográficas inferiores, a sua padronização metodológica permitiu a comparação entre os períodos analisados, atingindo os objetivos desta pesquisa. Apesar da utilização de dados abrangentes serem um fator limitante para análises mais aprofundadas, este estudo oferece uma base fundamental e suas conclusões podem ser ampliadas para futuras pesquisas que identifiquem dados de maior qualidade cartográfica e que identifiquem fontes com dados mais precisos de armazenamento de carbono por biomassa.

Acredita-se que este trabalho ofereça a compreensão dos efeitos da urbanização na regulação de gases do efeito estufa, em especial o dióxido de carbono, e seu impacto nas mudanças climáticas e nos eventos extremos percebidos na área de estudo. Os produtos principais, tabelas e figuras, constituem ferramentas valiosas para o planejamento e gestão urbana de Salvador, permitindo a identificação das áreas que merecem maior atenção à conservação, devido a pressão urbana. A partir dessas compreensões pode-se definir com maior embasamento ações relacionadas ao aumento e a conexão das áreas verdes estabelecidas no PMAMC. São essas ações, mencionadas no capítulo 2, que irão capturar o carbono da atmosfera, atuando não só na “redução de emissões”, mas na capacidade de sequestro e armazenamento da cidade já emitido.

Em síntese, o futuro de mitigação das mudanças climáticas e a construção da resiliência, passará inevitavelmente pelo planejamento territorial, reconhecendo o valor do uso e cobertura da terra no armazenamento de carbono. Espera-se que esta pesquisa oriente o desenvolvimento de uma Salvador mais sustentável, verde e adaptada aos climáticos atuais.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Adriano Bittencourt; BRANDÃO, Paulo Roberto Baqueiro. **Geografia de Salvador**. 2. ed. Salvador: EDUFBA, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/bitstream/ufba/587/3/Geografia%20de%20Salvador%20.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- CABRAL, Umberlândia. De 2010 a 2022, população brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões. **Agência de Notícias IBGE**, Rio de Janeiro, 28 jun. 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>. Acesso em: 6 abr. 2025.
- CARDOSO, Kalynne Maria de Oliveira. **Avaliação da dinâmica da paisagem da bacia hidrográfica do rio Itapecuru, Maranhão, Brasil**. 2024. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Oceanografia) – Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024. Disponível em: https://monografias.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/8161/1/KALYNNE_M_O_CARDOSO_TCC.pdf. Acesso em: 23 fev. 2025.
- CASIMIRO, Pedro Cortesão. Acerca do conceito de uso do solo e mudança de uso do solo. **APOGEO**: revista da Associação de Professores de Geografia, Lisboa, n. 32, p. 23-31, abr. 2007. Disponível em: https://aprofgeo.org/apogeo/apogeo_32/files/apogeo_32.pdf. Acesso em: 24 maio 2025.
- CERQUEIRA, Bruna; PUEBLA RENTERÍA, Luciana; CARVALHO, Jussara (org.). **Sustentabilidade urbana: experiências na América Latina**. São Paulo: ICLEI: Fundação Konrad Adenauer, 2014. Disponível em: https://e-lib.iclei.org/wp-content/uploads/2017/06/SUSTENTABILIDADE_URBANA_PORT_FINAL.compressed.pdf. Acesso em: 28 jun. 2025.
- CERQUEIRA, Erika do Carmo. **Vulnerabilidade socioambiental na cidade de Salvador-BA**: análise espacial das situações de risco e ações de resiliência. 2019. 351 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/31931>. Acesso em: 26 out. 2024.
- COSTANZA, Robert *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, [s. l.], v. 387, p. 253-260, May 1997. Disponível em: https://www.esd.ornl.gov/benefits_conference/nature_paper.pdf. Acesso em: 13 abr. 2025.
- ENTIDADE METROPOLITANA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SALVADOR. **Sobre a RMS**. Salvador: EMRMS, [20--?]. Disponível em: <http://www.emrms.ba.gov.br/pt-br/content/sobre-rms>. Acesso em: 20 jun. 2025.

FERREIRA, Luciana. **Mercado imobiliário de Salvador registra crescimento de 21% no VGV e valorização de 10% no m² em 2023.** [S. l.], 8 jul. 2024. Disponível em: <https://www.abrainc.org.br/mercado-imobiliario/2024/07/08/mercado-imobiliario-de-salvador-registra-crescimento-de-21-no-vgv-e-valorizacao-de-10-no-m2-em-2023>. Acesso em: 30 maio 2025.

FREITAS, Breno Braga de Souza. **Políticas públicas, erosão costeira e ocupação urbana na linha de costa entre Rio Vermelho e Pituba, Salvador/Bahia.** 2016. 133 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/21038/1/Breno_Braga_Souza_Freitas_Dissertacao_Final.pdf. Acesso em: 16 ago. 2024

GUIMARÃES, Mariana Rocha Santos *et al.* Perspectivas para estimativa de biomassa viva e estoque de carbono acima do solo em áreas verdes urbanas do domínio Mata Atlântica, Brasil. **Revista Brasileira de Arborização Urbana**, Curitiba, v. 17, n. 4, p. 41-59, 2022. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revsbau/article/view/86446/47899>. Acesso em: 18 jul. 2024.

ICLEI ÁFRICA. **Adaptação às alterações climáticas e melhoria na capacidade de resiliência:** um manual para o desenvolvimento da capacidade de adaptação e resiliência aos impactos das alterações climáticas nas zonas urbanas costeiras. Cidade do Cabo: ICLEI África, 2020. Disponível em: https://africa.iclei.org/wp-content/uploads/2020/03/2020_Publication_WIOMSA_Adapting-to-climate-change-and-enhancing-resilience-training-manual_Portuguese.pdf. Acesso em: 31 maio 2025.

IKEMATSU, Priscila. **Dinâmica espaço-temporal da oferta de serviços ecossistêmicos na Macrometrópole Paulista.** 2022. 125 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106132/tde-21122022-181706/publico/Tese_PriscilaIkematsu_vf.pdf. Acesso em: 23 fev. 2025

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE Cidades:** Salvador: IBGE, c2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/salvador/panorama>. Acesso em: 26 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de uso da terra.** 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. (Manuais técnicos em geociências, 7). Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81615.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2025.

INSTITUTO MÃOS DA TERRA. **Coletivo SOS Vale Encantado:** estudo técnico desenvolvido pelo Instituto Mão da Terra (IMATERRA) em parceria com o Coletivo SOS Vale Encantado. Salvador: IMATERRA, c2021. Disponível em: <https://www.imaterra.org/sos-vale-encantado>. Acesso em: 31 maio 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Sections. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2023: synthesis report.* Geneva: IPCC, 2023. p. 35-115. Disponível em:

https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf. Acesso em: 27 out. 2024.

MACEDO, Laura Valente de (coord.). **Mudanças climáticas e desenvolvimento limpo: oportunidades para governos locais: um guia do ICLEI**. São Paulo: ICLEI, 2010. Disponível em: https://e-lib.iclei.org/wp-content/uploads/2018/10/guia_de_mudan%C3%A7as_clim%C3%A1ticas_e_desenvolvimento_limpo.pdf. Acesso em: 24 maio 2025

MAPBIOMAS. **MapBiomass General “Handbook”**: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD): collection 9. Version 2. [S. l.: s. n.], Sept. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.58053/MapBiomass/ICCL5B>. Acesso em: 26 jan. 2025.

MAPBIOMAS. **O Projeto**. [S. l.]: MapBiomass, c2025. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/o-projeto/>. Acesso em: 3 jul. 2025.

MOSQUERA MUÑOZ, Angelica Maria; FREITAS, Simone Rodrigues de. Importância dos serviços ecossistêmicos nas cidades: revisão das publicações de 2003 a 2015. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 89-104, maio/ago. 2017. Disponível em: <https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/10049/4742>. Acesso em: 7 set. 2024.

NASCIMENTO, Dária Maria Cardoso; MOTTI, Pascal. Mapa de uso atual da terra: instrumento do planejamento. **Bahia Análise & Dados**, Salvador, v. 2, n. 1, p. 72-74, jun. 1992.

NASCIMENTO, João Matheus Brito do. **O uso do sensoriamento remoto na análise da relação entre o sequestro de carbono e a variação da temperatura superfície do município de Belém/PA**. 2024. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2024. Disponível em: <https://bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/3748>. Acesso em: 28 jul. 2024.

NATURAL CAPITAL PROJECT. **InVEST**: Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs 3.14.0. Stanford: Stanford University, 2023.

NATURAL CAPITAL PROJECT. **InVEST**: Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs. Stanford, 2025. Disponível em: <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>. Acesso em: 3 nov. 2024.

NERY, César Vinícius Mendes *et al.* Avaliação das técnicas de classificação MAXVER, MAXVER – ICM e Distância Mínima Euclidiana de acordo com Índice Kappa. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, n. 2, p. 320-328, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/232998>. Acesso em: 20 abr. 2025.

NEXTGIS. **MOLUSCE 5.0**. [S. l.]: NextGIS, [2025]. Disponível em: https://docs.nextgis.com/docs_ngqgis/source/molusce.html. Acesso em: 26 nov. 2025.

PAINEL DE INDICADORES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS CURITIBA; OBSERVATÓRIO SISTEMA FIEP. **Transição ecológica: um desafio global**. Curitiba, 02 fev.

2024. Disponível em: <https://painedemudancasclimaticas.org.br/noticia/transicao-ecologica-um-desafio-global>. Acesso em: 11 maio 2024.

PAVANI, Bruna Fatiche *et al.* Estimating and valuing the carbon release in scenarios of land-use and climate changes in a Brazilian coastal area. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 226, p. 416-427, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479718309307?via%3Dihub>. Acesso em: 14 dez. 2023.

PAVANI, Bruna Fatiche. **Análise do balanço de carbono de remanescentes de Mata Atlântica em cenários de uso e ocupação do solo e mudanças climáticas para o Litoral Norte de São Paulo**. 2013. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/343050027_ANALISE_DO_BALANCO_DE_CARBO_NO_DE_REMANESCENTES_DE_MATA_ATLANTICA_EM_CENARIOS_DE_USO_E_OCUPACAO_DO_SOLO_E_MUDANCAS_CLIMATICAS_PARA_O_LITORAL_NORTE_DE_SAOPAULO. Acesso em: 14 dez. 2023.

PEREIRA, Gilberto Corso; FERNANDES, Claudia Monteiro; DÍAZ MOSQUERA, Carlos Andres. **Salvador em transformação**: dinâmica populacional recente da região metropolitana. Salvador: UFBA, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/38140/1/Salvador%20em%20transformac%cc%a7a%cc%83o_boletim.pdf. Acesso em: 20 abr. 2025.

RIBEIRO, Suzana Kahn; SANTOS, Andrea Souza (ed.). **Mudanças climáticas e cidades**: relatório especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: PBMC, 2016. 116 p. Disponível em: https://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/Relatorio UM_v10-2017-1.pdf. Acesso em: 13 abr. 2025.

SALVADOR. Secretaria de Sustentabilidade, Inovação e Resiliência. **Plano de Mitigação e Adaptação às Mudanças do Clima em Salvador (PMAMC Salvador)**. Salvador: SECIS, 2020. Disponível em: <https://americadosul.iclei.org/wp-content/uploads/sites/19/2021/01/salvador-plano-de-acao-climatica.pdf>. Acesso em: 27 out. 2024.

SALVADOR. Secretaria de Sustentabilidade, Inovação e Resiliência. **Salvador resiliente**. Salvador: SECIS, 2019. Disponível em: https://resilientcitiesnetwork.org/downloadable_resources/Network/Salvador-Resilience-Strategy-Portuguese.pdf. Acesso em: 27 out. 2024.

SERPA, Angelo. Parque do Vale Encantado: mobilização popular por uma área de conservação em ambiente metropolitano. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 33, n. 75, p. 1382-1397, out./dez. 2023. Disponível em: <https://periodicos.pucminas.br/geografia/article/view/31244/21303>. Acesso em: 7 jun. 2025.

SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Cartografia de Referência**: Cartografia 1:25.000: apresentação. Salvador: SEI, c2021. Disponível em:

<https://portal.geo.sei.ba.gov.br/portal/apps/sites/#/seigeo/pages/geoservicos-referencia> Acesso em: 25 maio 2025.

SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. Histórico. Salvador: SEI, [202-]. Disponível em: <https://www.ba.gov.br/sei/historico>. Acesso em: 25 maio 2025.

TAO, Peiyuan *et al.* Optimization of green spaces in plain urban areas to enhance carbon sequestration. **Land**, [s. l.], v. 12, n. 1218, p. 1-25, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/12/6/1218>. Acesso em: 7 jun. 2025.

TÍSSIA, Camila *et al.* Fortes chuvas causam morte, alagamentos e deslizamentos de terra em Salvador. **CNN Brasil**, São Paulo, 27 nov. 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/fortes-chuvas-causam-morte-alagamentos-e-deslizamentos-de-terra-em-salvador/>. Acesso em: 13 abr. 2025.

TSAI, David *et al.* **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970-2023.** [s. l.]: SEEG, 2024. Disponível em: https://oc.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/FINAL_SEEG_emissoes_2024_v7.pdf. Acesso em: 20 abr. 2025.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação. **Redes Neurais Artificiais**. São Carlos: USP/ICMC, [20--]. Disponível em: <https://sites.icmc.usp.br/andre/research/neural/>. Acesso em: 22 fev. 2025.

WORLD WILDLIFE FUND. **The Natural Capital Project**. Washington, DC, c2025. Disponível em: <https://www.worldwildlife.org/projects/the-natural-capital-project>. Acesso em: 7 jun. 2024.