

Análise da influência de Soluções Baseadas na Natureza (SBN) em relação a qualidade do ar em zonas industriais – Estudo de caso em Bragança-PT

Renata Kércia Moreira Martins

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau
de Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação com o Centro
Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)*

Orientada por:

Professor Doutor Artur de Jesus Gonçalves

Professor Doutor Manuel Joaquim Sabença Feliciano

Professor Doutor Daniel Brianezi

Bragança

2023

Renata Kércia Moreira Martins

**Análise da influência de Soluções Baseadas na Natureza (SBN), em
relação a qualidade do ar em zonas industriais – Estudo de caso em
Bragança-PT**

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança em cumprimento parcial dos requisitos para o grau de Mestre em Ciências em Tecnologia Ambiental em cooperação com o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) no âmbito do programa de duplo diploma.

Supervisores:

Artur de Jesus Gonçalves (IPB)

Manuel Joaquim Sabença Feliciano (IPB)

Daniel Brianezi (CEFET-MG)

Bragança

2023

Não é questão de crença; a atitude científica que se deve adotar em qualquer assunto é a verdade... O cosmos seria positivamente um caos se suas leis só pudessem funcionar mediante a aprovação da crença humana.

Sri Yukteswar

AGRADECIMENTOS

Na vida eu aprendi que a “Felicidade só é verdadeira se partilhada”, então eu dedico esse espaço para àqueles com quem eu quero compartilhar a alegria e a felicidade, de concluir mais uma etapa nessa caminhada louca que chamamos de vida.

Em primeiro lugar agradeço a todos que de algum jeito contribuíram para esta pesquisa: ao professor Artur Gonçalves por toda orientação ao longo desse ano; ao meu co-orientador professor Manuel Feliciano por toda ajuda na interpretação dos resultados; ao professor José Castro por todo auxílio com a parte de arquitetura urbanística; ao Felipe Alves, pela ajuda e luz no meu caminho inicial dessa jornada; e ao professor Daniel Brianezi, meu professor do Brasil que sempre esteve presente na minha vida acadêmica e que nunca saiu da lista das pessoas que me inspiram!

Além disso, meus sinceros agradecimentos ao CEFET, que com certeza foi um agente importante para realização dos meus sonhos. Um deles, inclusive, foi realizado devido ao IPB, que me proporcionou viver uma experiência incrível no exterior.

Dizem que a família é a base de tudo, por isso agradeço aos meus pais, Nilda e Clever, pelo apoio. É muito mais fácil se aventurar no mundo quando sabemos que temos alguém para nos dar segurança. Ao meu irmão, Lucas, agradeço as incontáveis ligações de vídeo. Isso sempre fez com que eu me sentisse um pouco presente no Brasil.

Mudar de país, de faculdade, de amigos, de vida é um desafio, mas tudo fica mais fácil quando encontramos pessoas especiais para compartilhar essa experiência. E da lista que compõe a “Equipa” que hoje ocupa um lugar especial no meu coração, Vitor é o que está no topo. Obrigada por tanto, viver tudo isso com você fez as coisas serem infinitamente mais fáceis, divertidas e singulares. Sou muito grata de compartilhar minha felicidade com você diariamente.

O resto dessa lista é ocupada por pessoas que marcaram minha vida verdadeiramente: Débora, Freitas, João e Nath, eu não poderia ter desejado compartilhar casa com um bonde melhor. Vocês são incríveis família, meus dias foram muito mais felizes com vocês! Ana, Júlia e Paloma, ter a amizade de vocês é uma dádiva, me sinto honrada, por isso, meu muito obrigada também! Ana Letícia, Gui, Jeff e Larinha, vocês foram marcantes desde o início, e mesmo distantes ainda se fizeram presentes.

Atravessando o oceano, lembrando daqueles de fé, meus preferidos que mesmo distantes nunca saíram do meu lado, Arthur, Bubu, Luisa e Nando, as conversas com vocês me fizeram por muitas vezes chorar de saudade. Não vejo a hora de chorar de alegria no abraço de vocês.

RESUMO

As Soluções Baseadas na Natureza (SBN), definidas como ações inspiradas em sistemas naturais e que possuem a finalidade de promover os benefícios ecossistêmicos, podem ser utilizadas como uma forma de mitigar os efeitos adversos gerados pela expansão e desenvolvimento das zonas industriais urbanas. Nesse sentido, esta pesquisa buscou analisar a influência das SBN, com foco nos efeitos da vegetação arbórea, da zona industrial de Bragança (PT), na absorção de carbono e na qualidade do ar, a partir de modelações e simulações microclimáticas em dois *software*, i-Tree e ENVI-met, podendo-se assim comparar o uso de ambas as ferramentas. A metodologia da pesquisa baseou-se na criação e simulação de três cenários: Cenário 0, que não incluiu a presença do elemento arbóreo; Cenário 1, correspondente à situação atual da área de estudo; e Cenário 2, que representa uma proposta de introdução de uma zona verde no local. Assim, a partir dos dados primários coletados em campo e dados secundários meteorológicos, foram realizadas simulações para o ano de 2022 e para o ano de 2052, a fim de se comparar os efeitos da vegetação ao longo do tempo. Os resultados obtidos comprovaram que a existência de vegetação arbórea em áreas industriais contribui para a absorção e armazenamento de CO₂, assim como para a melhoria da qualidade do ar, em especial a amenização da temperatura e remoção de poluentes atmosféricos. Também se comprovou que quanto maior o grau de desenvolvimento da vegetação urbana, maiores os benefícios ecossistêmicos alcançados. Em termos quantitativos, as simulações mostraram que a inserção de vegetação em zonas industriais pode duplicar a remoção de poluentes e a absorção de CO₂ anual, e incrementar em aproximadamente 40% o armazenamento de CO₂. Já em termos de fluxo de CO₂, estima-se que a absorção de um determinado local pode alcançar um incremento de até 200%. Em relação ao uso dos dois *software*, constatou-se que a comparação direta dos resultados não é facilmente alcançável, pois enquanto o i-Tree fornece análises globais, anuais e mensais, a partir de uma interface mais simples e acessível, o ENVI-met permite a simulação horária de cada dia do ano a partir de um sistema mais complexo, robusto, fornecendo resultados mais detalhados. O uso de cada um deles dependerá do objetivo da pesquisa, sendo que ambos podem ser utilizados para mensuração dos benefícios da vegetação urbana.

Palavras-chave: Soluções baseadas na natureza; árvores; qualidade do ar; modelação; simulação; i-Tree; ENVI-met.

ABSTRACT

Nature-Based Solutions (NBS), defined as actions inspired by natural systems and intended to promote ecosystem benefits, can be used as a way to mitigate the adverse effects generated by the expansion and development of urban industrial zones. In this sense, this research sought to analyze the influence of SBN, with a focus on tree vegetation, in the industrial zone of Bragança (PT), in relation to carbon sequestration and air quality, by using modelling and microclimatic simulations from the use of two *software*, i-Tree and ENVI-met, thus being able to compare the use of both tools. The research methodology was based on the creation and simulation of three scenarios focused on the simulations: Scenario 0, which does not consider the tree element; Scenario 1, which reflects the current situation of the study area; and Scenario 2, which consists in implementation of an additional green zone on the site. Thus, from primary data collected in the field and secondary meteorological data, simulations were performed for the years 2022 and 2052, in order to compare the effects of vegetation over time. The results obtained proved that the existence of arboreal vegetation in industrial areas contributes to the improvement of air quality, especially for the absorption and storage of CO₂, reduction of temperature and removal of pollutants. It was also proven that the higher the degree of development of urban vegetation, the greater the ecosystemic benefits achieved. In quantitative terms, the simulations showed that the insertion of vegetation in industrial zones can improve by approximately 100% the removal of pollutants and the annual CO₂ absorption, and approximately 40% the CO₂ storage. In terms of CO₂ flux, the absorption of a given site can reach an increase of up to 200%. Regarding the use of the two *software*, it was found that a direct comparison of the results is not easily achievable because while i-Tree provides annual and monthly global analyses from a simpler and more accessible interface, ENVI-met allows hourly simulation of each day of the year from a more complex, robust system, providing more detailed results. The use of each *software* will depend on the research objective, but both can be used to measure the benefits of urban vegetation.

Keywords: Nature-based solutions; trees; air quality; modelling; simulation; i-Tree; ENVI-met.

ÍNDICE

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
Índice de Tabelas.....	xi
Índice de Figuras.....	xiii
Lista de Abreviaturas, Acrônimos e Unidades de Medida	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Fundamentação	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Estruturação da Dissertação.....	4
2 SIMULAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DAS SBN NO MICROCLIMA URBANO....	6
2.1 Clima Urbano.....	6
2.1.1 Escalas climáticas	7
2.1.2 Mudanças climáticas.....	9
2.2 Microclima.....	10
2.2.1 Variáveis Microclimáticas	10
2.2.1.1 Radiação Solar.....	11
2.2.1.2 Temperatura do Ar	13
2.2.1.3 Vento	13
2.2.1.4 Água	15
2.2.1.5 Humidade Relativa do Ar.....	15
2.2.1.6 Vegetação	16
2.2.1.7 Materiais.....	18
2.3 Qualidade do Ar e Poluição Atmosférica	19
2.4 Soluções Baseadas na Natureza	23

2.4.1	Princípios das SBN.....	25
2.4.2	Aplicabilidade das SBN	26
2.5	Modelação e Simulação de Sistemas Ambientais.....	28
2.5.1	I-Tree	29
2.5.2	ENVI-met	31
3	METODOLOGIA.....	34
3.1	Área de Estudo – Bragança-PT.....	34
3.1.1	Zona Industrial das Cantarias	34
3.2	Ferramenta i-Tree	36
3.2.1	Levantamento de Dados e Variáveis de Entrada.....	37
3.2.2	Trabalhando no i-Tree	39
3.2.3	Cenários trabalhados no i-Tree.....	41
3.3	Ferramenta ENVI-met	43
3.3.1	Construindo o modelo no ENVI-met	45
3.3.1.1	Cenário 0	46
3.3.1.2	Cenário 1	47
3.3.1.3	Cenário 2	48
3.3.2	Parâmetros de Entrada para Simulação	49
3.3.3	Trabalhando as simulações no ENVI-met.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1	Resultados i-Tree	54
4.1.1	Cenário 0	54
4.1.2	Cenário 1 atual.....	55
4.1.2.1	Composição e Estrutura	55
4.1.2.2	Remoção de Poluentes Atmosféricos.....	58
4.1.2.3	Absorção e Armazenamento de CO ₂	60
4.1.3	Cenário 1 previsão	63

4.1.3.1	Composição e Estrutura	63
4.1.3.2	Remoção de Poluentes Atmosféricos	65
4.1.3.3	Absorção e Armazenamento de CO ₂	66
4.1.4	Cenário 2 atual.....	67
4.1.4.1	Composição e Estrutura	68
4.1.4.2	Remoção de Poluentes Atmosféricos	70
4.1.4.3	Absorção e Armazenamento de CO ₂	71
4.1.5	Cenário 2 previsão	74
4.1.5.1	Composição e Estrutura	74
4.1.5.2	Remoção de Poluentes Atmosféricos	76
4.1.5.3	Absorção e Armazenamento de CO ₂	77
4.2	Comparação dos Cenários pelo i-Tree	78
4.3	Resultados ENVI-met	80
4.3.1	Cenário 0	80
4.3.1.1	Fluxo de CO ₂ das Plantas	81
4.3.1.2	Temperatura Potencial do Ar	83
4.3.2	Cenário 1 atual.....	84
4.3.2.1	Fluxo de CO ₂ das Plantas	84
4.3.2.2	Temperatura Potencial do Ar	86
4.3.3	Cenário 1 previsão	87
4.3.3.1	Fluxo de CO ₂ das Plantas	87
4.3.3.2	Temperatura Potencial do Ar	90
4.3.4	Cenário 2 atual.....	91
4.3.4.1	Fluxo de CO ₂ das Plantas	91
4.3.4.2	Temperatura Potencial do Ar	93
4.3.5	Cenário 2 previsão	95
4.3.5.1	Fluxo de CO ₂ das Plantas	95

4.3.5.2	Temperatura Potencial do Ar	97
4.4	Comparação dos Cenários pelo ENVI-met.....	99
4.5	Comparação dos <i>software</i> i-Tree e ENVI-met.....	100
4.6	Validação dos dados	102
5	CONCLUSÃO	103
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	ANEXOS	117

Índice de Tabelas

Tabela 1: Poluentes atmosféricos e suas principais características.	20
Tabela 2 (continuação): Poluentes atmosféricos e suas principais características.	21
Tabela 3: Classificação do IQAr (APA, 2021a).	22
Tabela 4: Recursos do <i>software</i> ENVI-met (ENVI-met, 2022).	32
Tabela 5: Parâmetros utilizados na função <i>Forecast</i>	41
Tabela 6: Ferramentas existentes no ENVI-met.	44
Tabela 7: Elementos presentes da ferramenta "Spaces" do ENVI-met.	46
Tabela 8: Parâmetros das configurações gerais utilizados na "Mandatory Sections" do ENVI-guide.	50
Tabela 9: Parâmetros meteorológicos utilizados na "Mandatory Sections" do ENVI-guide.	50
Tabela 10: Valores de poluente adotados na seção de poluentes da "Optional Sections".	51
Tabela 11: Resumo da composição e estrutura das árvores do Cenário 1.	57
Tabela 12: Quantidade estimada pelo i-Tree de poluentes removidos pelas árvores do Cenário 1.	58
Tabela 13: Dados de absorção de CO ₂ do Cenário 1.	61
Tabela 14: Dados de armazenamento de carbono do Cenário 1.	62
Tabela 15: Total de poluentes removidos em 30 anos no Cenário 1, simulados pelo i-Tree.	66
Tabela 16: Resumo da composição e estrutura das árvores do Cenário 2.	69
Tabela 17: Quantidade estimada pelo i-Tree de poluentes removidos pelas árvores no Cenário 2.	70

Tabela 18: Dados de absorção de carbono do Cenário 2.....	72
Tabela 19: Dados de armazenamento de carbono do Cenário 2.....	73
Tabela 20 (continuação): Dados de armazenamento de carbono do Cenário 2.....	74
Tabela 21: Total de poluentes removidos em 30 anos do Cenário 2, simulados pelo i-Tree.....	77
Tabela 22: Comparação entre os cenários simulados no i-Tree.....	79
Tabela 23: Valores de absorção de CO ₂ pelo Cenário 0 às 15:00.....	82
Tabela 24: Valores de absorção de CO ₂ pelo Cenário 1 às 15:00.....	85
Tabela 25: Valores de absorção de CO ₂ pelo Cenário 1 previsto às 15:00.....	89
Tabela 26: Valores de absorção de CO ₂ pelo Cenário 2 no ano de 2022 às 15:00.....	93
Tabela 27: Valores de absorção de CO ₂ pelo Cenário 2 no ano de 2052 às 15:00.....	97
Tabela 28: Comparação entre os cenários simulados no ENVI-met.....	99
Tabela 29: Comparação entre o i-Tree e ENVI-met.....	101

Índice de Figuras

Figura 1: Radiação solar na Terra (Junges et al., 2018).	12
Figura 2: Efeitos da interação entre o vento e os edifícios (Hernández et al., 2013).	14
Figura 3: Balanço de energia entre edifícios (Vianna, 2018).	18
Figura 4: SBN e as abordagens ecossistêmicas (adaptado IUCN, 2016).	26
Figura 5: Estrutura do modelo do ENVI-met (adaptado ENVI-met, 2022).	33
Figura 6: Área de estudo.	35
Figura 7: Área de estudo específica (Google Earth, 2022).	36
Figura 8: Medição do DAP.	37
Figura 9: Medição da altura de uma árvore com a vara telescópica.	38
Figura 10: Metodologia de divisão da copa para medição de exposição à luz solar (i-Tree, 2021a).	39
Figura 11: Tipos de resultados disponibilizados pelo i-Tree (i-Tree, 2021b).	40
Figura 12: Mapa locacional da área proposta para sofrer intervenção.	42
Figura 13: Ferramentas da aba “ENVI-met”.	44
Figura 14: Ferramenta da aba "Data and Settings"	44
Figura 15: Representação 3D do Cenário 0.	47
Figura 16: Representação 3D do Cenário 1.	47
Figura 17: Representação 3D do Cenário 2.	48
Figura 18: Distribuição da população de árvores do Cenário 1.	56
Figura 19: Absorção bruta anual estimada de carbono (pontos) e valor associado (barras) do Cenário 1.	60

Figura 20: Armazenamento estimado de carbono (pontos) e valor associado (barras) do Cenário 1.	62
Figura 21: Evolução temporal do número de árvores do Cenário 1 até 2052, simulados pelo i-Tree.....	64
Figura 22: Evolução do crescimento da biomassa total de árvores do Cenário 1 até 2052, simulados pelo i-Tree.	64
Figura 23: Evolução temporal da remoção de poluentes do Cenário 1, simulados pelo i-Tree.....	65
Figura 24: Evolução temporal do total de absorção de carbono do Cenário 1, simulados pelo i-Tree.....	66
Figura 25: Evolução temporal de carbono armazenado do Cenário 1, simulados pelo i-Tree.....	67
Figura 26: Distribuição da população de árvores do Cenário 2.	68
Figura 27: Absorção bruta anual estimada de carbono (pontos) e valor associado (barras) do Cenário 2.	71
Figura 28: Armazenamento estimado de carbono (pontos) e valor associado (barras) do Cenário 2.	73
Figura 29: Evolução temporal do número de árvores do Cenário 2 até 2052, simulados pelo i-Tree.....	75
Figura 30: Evolução do crescimento da biomassa total de árvores do Cenário 2 até 2052, simulados pelo i-Tree.	75
Figura 31: Evolução temporal da remoção de poluentes do Cenário 2, simulados pelo i-Tree.....	76
Figura 32: Evolução temporal do total de absorção de carbono do Cenário 2, simulados pelo i-Tree.....	77
Figura 33: Evolução temporal de carbono armazenado, simulados pelo i-Tree.	78

Figura 34: Fluxo de CO ₂ das plantas no Cenário 0 em 2022, às 15:00.	81
Figura 35: Temperatura potencial do ar no Cenário 0 em 2022, às 15:00.	83
Figura 36: Fluxo de CO ₂ das plantas no Cenário 1 em 2022, às 15:00.	84
Figura 37: Temperatura potencial do ar no Cenário 1 em 2022, às 15:00.	86
Figura 38: Fluxo de CO ₂ das plantas no Cenário 1 em 2052, às 15:00.	88
Figura 39: Temperatura potencial do ar no Cenário 1 em 2052, às 15:00.	90
Figura 40: Fluxo de CO ₂ das plantas no Cenário 2 em 2022, às 15:00.	91
Figura 41: Temperatura potencial do ar no Cenário 2 em 2022, às 15:00.	94
Figura 42: Fluxo de CO ₂ das plantas no Cenário 2 em 2052, às 15:00.	95
Figura 43: Temperatura potencial do ar no Cenário 2 em 2052, às 15:00.	98
Figura 44: Gráfico comparativo das temperaturas simuladas pelo ENVI-met.....	100
Figura 45: Localização do sensor de temperatura na área de estudo.....	102

Lista de Abreviaturas, Acrônimos e Unidades de Medida

Abreviaturas e Acrônimos

AEA	Agência Europeia de Ambiente
AEM	Avaliação Ecosistêmica do Milênio
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
DAP	Diâmetro na Altura do Peito
EDGAR	<i>Emissions Database for Global Atmospheric Research</i> (Banco de Dados de Emissões para Pesquisa Atmosférica Global)
FVC	Fator Visão de Céu, em inglês <i>Sky View Factor (SVF)</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GEO	<i>Global Environment Outlook</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental de Mudança Climática)
IQAr	Índice de Qualidade do Ar
NH₃	Amoníaco
NO	Óxido nítrico
NO_x	Óxidos de nitrogênio
NO₂	Dióxido de nitrogênio
N₂O	Óxido nitroso
O₃	Ozono
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas

PM_{2.5}	Partículas suspensas no ar de diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 2,5 µm
PM₁₀	Partículas suspensas no ar de diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 10 µm
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
SBN	Soluções Baseadas na Natureza
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SO₂	Dióxido de Enxofre
UICN	União Internacional de Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais, em inglês <i>International Union for Conservation of Nature (IUCN)</i>

Unidades de Medida

°C	Graus Celsius
cm	Centímetro
g	Gramma
h	Hora
hab/km²	Habitante por quilômetro quadrado
kg	Quilograma
km²	Quilômetro quadrado
t	Tonelada métrica
µg/m³	Micrograma por metro cúbico
µm	Micrômetro

1 INTRODUÇÃO

1.1 Fundamentação

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), cerca de 55% da população mundial se encontrava em áreas urbanas no ano de 2019, e a previsão é que esse número aumente para 70% até 2050 (ONU, 2019b). Para que esse crescimento urbano se dê de forma mais ordenada, minimizando assim problemas sociais, ambientais e de infraestrutura, faz-se necessário a aplicação dos conceitos de planejamento urbano, que preveja uma ocupação ordenada e equilibrada do território (Honda et al., 2015).d

Associado a tal questão, o zoneamento municipal se apresenta como uma forma de segregação do espaço urbano de acordo com sua função social e/ou econômica (S. M. S. A. Lima et al., 2019). Nesse contexto, as zonas industriais se apresentam como áreas destinadas ao agrupamento de indústrias de diferentes setores, sendo essa uma região que normalmente conta com uma infraestrutura adequada para abrigar tais empreendimentos (Pereira, 2013).

Embora estejam associados ao desenvolvimento econômico de uma determinada região, a instalação de zonas industriais pode gerar consequências ambientais e sociais negativas. Um dos aspectos que merece destaque em relação aos danos ambientais causados pelas indústrias é a questão da poluição atmosférica. A emissão de gases tóxicos e/ou poluentes provenientes não somente do processo produtivo industrial, mas também da operação do empreendimento, é um passivo ambiental recorrente e controlado por legislações específicas de qualidade do ar. Entretanto, mesmo com esse controle de emissões respaldado por leis, ainda assim existem efeitos adversos à saúde humana, como infecções respiratórias, doenças pulmonares e problemas cardiovasculares (Ferreira, 2018; Sosa et al., 2013).

Segundo a Agência Europeia do Ambiente (AEA), em 2019, morreram 307 mil pessoas prematuramente na Europa devido à exposição de poluentes e partículas finas, e pelo menos 58% dessas mortes poderiam ter sido evitadas, caso o nível de referência preconizado pela Organização Mundial de saúde (OMS) em relação a matéria de qualidade do ar tivesse sido atingido - $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ médios anuais de $\text{PM}_{2,5}$ (Agência Europeia do Ambiente, 2021).

Além dos problemas relacionados à saúde humana, as emissões de gases por parte das indústrias também interferem no clima. Resíduos gasosos contendo dióxido de carbono (CO₂), Óxido nitroso (N₂O) e hidrofluorcarbonetos (HFC), por exemplo, são considerados Gases de Efeito Estufa (GEE), que por sua vez compõe atualmente um dos principais cenários da crise climática (Ferreira, 2018).

De acordo com o sexto relatório sobre mudanças climáticas, publicado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), a humanidade já atingiu 80% do seu limite de emissões de GEE. Caso não sejam tomadas medidas de mitigação e reforço nas políticas de combate a crise climática, o planeta alcançará o aquecimento global médio de 3,2 °C até 2100, sendo que o que se deseja evitar atualmente é que essa temperatura atinja 1,5 °C, o que já traria consequências significativas para o meio ambiente (IPCC, 2021).

Além da relação com o clima global, as indústrias interferem diretamente no clima urbano da região e no microclima da área onde ela está instalada. Esse último, que se refere a uma área relativamente pequena, é fortemente influenciado pelas atividades antrópicas e pelas características físicas da localidade, como tipo cobertura do solo, presença e tipo de vegetação, topografia e materiais das edificações (Leal, 2012).

As zonas industriais, principalmente de grandes centros urbanos, por normalmente estarem em locais com pouca presença de áreas verdes naturais, com muitas edificações e com um fluxo constante de veículos, fazem com que o microclima de tais territórios tenham temperaturas mais elevadas e que registrem aumento nos níveis de poluentes atmosféricos, se comparado com outras zonas. Entretanto, destaca-se que o tipo de indústria, assim como seu processo produtivo possuem grande influência no tipo de poluente emitido e, conseqüentemente, na qualidade do ar local (Gomes, 2020).

Uma forma de mitigar os efeitos em relação ao clima urbano e microclima de tais zonas é através da implantação de Soluções Baseadas na Natureza (SBN). Segundo a União Internacional de Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais (UICN), as SBN são abordagens de intervenções para restauração e conservação de ecossistemas, serviços de adaptação climática e controle dos impactos das ações antrópicas a partir de soluções inspiradas em recursos naturais (Stöberl et al., 2019; UICN, 2020).

Os benefícios advindos da implantação de SBN envolvem as esferas ambiental, social e econômica, proporcionando a restauração dos recursos naturais, bem-estar humano e maior resiliência para os sistemas de infraestruturas antrópicas. De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) as SBN têm capacidade para reduzir as emissões líquidas de CO₂ mundiais em até 18 gigatoneladas por ano até 2050, se aplicadas com base em um bom planejamento e com constantes investimentos (Lera et al., 2021; ONU, 2021).

Uma das formas de mensurar e prever os benefícios causados pelas SBN é através da modelação de microclima, que podem fornecer simulações futuras sobre os efeitos dessas estratégias em determinadas áreas. Para ter confiabilidade em tais simulações, é importante que sejam imputados dados primários coletados nos modelos trabalhados (Simon et al., 2018).

Entre diversas alternativas, dois *software*, o ENVI-met e o i-Tree, permitem a modelação e simulação dos benefícios de vegetação em meio urbano. O primeiro se baseia em um modelo microclimático holístico e tridimensional, e simula as interações climatológicas entre superfícies, plantas e atmosfera (ENVI-Met, 2022). Já o segundo, é um pacote de *software* que fornece ferramentas de análise do sistema e dos benefícios de silvicultura urbana e rural, quantificando a infraestrutura florestal e os benefícios ambientais proporcionados pelas árvores (i-Tree, 2022).

Tais *software* vêm sendo utilizados para modelações significativas do microclima, principalmente quando há a necessidade de expor os efeitos de árvores sobre fatores atmosféricos. Isso é demonstrado por Buccolieri et al. (2020), que usaram tanto o ENVI-met, como o i-Tree, para realizar modelações microclimáticas em um distrito no Sul da Itália. Já Simona et al. (2018), utilizaram o ENVI-met para modelar a transpiração e temperatura foliar de árvores urbanas, com o intuito de contrastar com os dados medidos. Ademais, Pança (2021), Pace (2020), Costa, (2020), Alves (2020) e Simon (2016) estão entre os diversos pesquisadores que utilizaram o ENVI-met ou i-Tree como ferramentas essenciais para suas pesquisas acadêmicas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Essa dissertação possui o objetivo de analisar a influência das Soluções Baseadas na Natureza (SBN) na zona industrial de Bragança-PT, em relação à qualidade do ar e

temperatura, a partir de modelações e simulações microclimáticas, com enfoque nos benefícios da vegetação urbana.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos dessa pesquisa são:

- I. Caracterizar a área de estudo com base em três cenários distintos: antes das intervenções, com as intervenções atuais já realizadas e para um cenário futuro com maior número de SBN;
- II. Realizar modelação ambiental e simulações em dois *software* distintos: ENVI-met e i-Tree;
- III. Quantificar os benefícios ambientais causados pelas intervenções na área de estudo em relação a absorção e armazenamento de CO₂, remoção de poluentes e temperatura;
- IV. Comparar o uso dos dois *software* citados anteriormente para o cumprimento dos objetivos dessa pesquisa.

1.3 **Estruturação da Dissertação**

Essa dissertação está estruturada em cinco capítulos: Introdução, Metodologia, Referencial Teórico, Resultados e Discussões, e por fim a Conclusão.

No capítulo 1, Introdução, é apresentada a fundamentação e justificativa para realização do trabalho, além de ser feita uma contextualização de zonas industriais, seus passivos ambientais e do uso de SBN como forma de mitigação. Subsequente a essa parte introdutória, é exposto os objetivos, geral e específicos, da pesquisa.

No capítulo 2, Referencial Teórico, é apresentada uma revisão da literatura relevante sobre clima urbano e microclima, relacionando-os com as questões de qualidade do ar e poluição atmosférica. Nesse contexto, é introduzido o conceito de Soluções Baseadas na Natureza, seus benefícios e aplicabilidade. Por fim, é discutida a temática de modelação e simulação ambiental, seguido da apresentação dos *software* ENVI-met e i-Tree.

Já no capítulo 3, Metodologia, a área de estudo e os materiais e métodos necessários para realização dessa pesquisa são apresentados. A etapa de coleta de dados primários a campo, e o tratamento dos parâmetros para a utilização nos *software* de

modulação e simulação ambiental. Logo depois, é apresentada a forma como foi realizada as modulações e simulações de três cenários distintos para a área de estudo, em dois *software*, ENVI-met e i-Tree.

No Capítulo 4, Resultados e Discussões, são apresentados os resultados dos métodos descritos no capítulo anterior, além de discussões baseadas na interpretação dos resultados das modulações e simulações.

Por fim, no capítulo 5, Conclusão, é apresentada a conclusão é apresentada uma síntese e reflexão do fechamento de todos os objetivos, assim como sugestões para trabalhos futuros e para possíveis intervenções posteriores.

2 SIMULAÇÃO DOS BENEFÍCIOS DAS SBN NO MICROCLIMA URBANO

Este capítulo de revisão da literatura apresenta temáticas relevantes para a pesquisa, explorando de início o assunto mais abrangente para posteriormente adentrar-se no mais específico. Inicia-se então a discussão sobre o Clima Urbano, conceituando e apresentando seus componentes, escalas e sistematizações. O próximo tópico é sobre Microclima, que aborda sobre seus componentes, fatores de influência, relação com a saúde humana e mudanças climáticas.

Posteriormente, trata-se sobre a Qualidade do Ar, expondo sua definição e fatores de influência. Também é apresentada a temática sobre Poluição Atmosférica e os efeitos na saúde humana. A partir de tais discussões, é apresentado um tópico sobre Soluções Baseadas na Natureza, onde é exposto a parte conceitual de tal termo, aplicabilidade em zonas industriais, desafios, seus benefícios e formas de mensurá-los. Também é apresentado um tópico de Modelação e Simulação Ambiental, onde o tema foi conceituado, definiu-se também sua funcionalidade e aplicabilidade em relação ao meio ambiente.

Os temas subsequentes têm foco nas modelações e simulações microclimáticas, com enfoque nos *software* ENVI-Met e I-Tree, são apresentadas introduções sobre os programas, assim como suas principais ferramentas e funcionalidades que serão mais bem trabalhadas neste trabalho.

2.1 Clima Urbano

A diferenciação das características climáticas entre zonas rurais e urbanas foi explicitamente estudada a primeira vez ainda no século XIX, quando Howard (1818) evidenciou que as temperaturas no interior da cidade de Londres, eram maiores se comparadas a zonas periféricas. No Brasil, o Prof. Dr. Carlos Monteiro (1976) definiu clima urbano como “um sistema que abrange o clima de um dado espaço territorial e sua urbanização”. Sendo assim, entende-se que o clima urbano é intimamente afetado pelas condições territoriais e infraestruturas urbanas.

As interações entre diversos elementos naturais, como vento, humidade, chuva e radiação solar definem, de forma mais ampla, a condição climática de um local. Entretanto, fatores como relevo, latitude, altitude, vegetação, posição geográfica e proximidade com o mar interferem no clima em menor intensidade. Já ao tratar-se de

climas locais, a topografia do terreno, cobertura do solo e a vegetação são determinantes (Pinheiro, 2008).

2.1.1 *Escalas climáticas*

Devido as diferenças dimensionais da percepção dos efeitos do clima, as escalas climáticas se apresentam como uma forma de segregação dos níveis de interações do clima, sendo que Ayoade, (1988), propôs a seguinte taxonomia:

- **Nível macroclimático:** esse é o nível mais amplo e abrangente, é interferido pela radiação solar, formato e movimento do planeta. Se relaciona com os aspectos climáticos de grandes áreas e com os movimentos atmosféricos em larga escala (Ayoade, 1988).
- **Nível mesoclimático:** já nesse nível é tratado das interações entre a energia disponível e a própria feição do meio terrestre. Refere-se a áreas menores, aproximadamente entre 10 e 100 quilômetros de largura. Normalmente, quando se fala de clima urbano, lida-se com a escala mesoclimática (Ayoade, 1988).
- **Nível microclimático:** por fim, o nível mais específico se denomina microclimático. Trata-se da interação entre os sistemas particulares que podem afetar o fluxo de energia de um determinado local. Nesse caso, preocupa-se com o estudo do clima próximo a superfícies ou em áreas pequenas (Ayoade, 1988).

Considerando os níveis apresentados acima, Ribeiro (1993) também dividiu o fenômeno climático em diferentes ordens de grandeza:

- **Clima zonal:** as zonas são formadas de acordo com a distribuição latitudinal da radiação solar, ou seja, está relacionado com a curvatura e a inclinação do eixo da Terra. Nesse nível é definido a circulação geral da atmosfera e apresentam fenômenos com extensão entre 1000 e 5000 quilômetros na horizontal, e na vertical abrangem toda a atmosfera. Para a compreensão de tais fenômenos climáticos necessita-se observações de no mínimo 30 anos, como exemplo pode-se citar a Zona de Convergência dos Alísios e a Oscilação Sul associada ao El Niño (Ribeiro, 1993).
- **Clima regional:** sendo essa uma dimensão menor que a anterior, refere-se à interferência de fatores de superfície, como forma e rugosidade do continente,

correntes marítimas e continentalidade/maritimidade, na circulação geral da atmosfera. As alterações provocadas por tais fatores de forma frequente e permanente, resultam em condições relativamente estáveis para o desenvolvimento de uma área natural. Se apresentam em extensões horizontais entre 150 e 2500 quilômetros e são limitados pela Tropopausa no sentido vertical (Ribeiro, 1993).

- **Mesoclima ou Clima local:** essa classe sofre grande influência de fatores antrópicos e das feições fisiográficas, como tipo de solo, cobertura vegetal e configurações do terreno. Essas feições da localidade, que estão sujeitas a mudanças ao longo do tempo, determina o clima predominante em um determinado lugar. Nesse sentido, o relevo apresenta-se como um fator relevante na determinação do clima local, pois serve de barreira física para o vento influenciando a circulação de superfície. As ações antrópicas de mudança na cobertura do solo e a poluição atmosférica também influenciam fortemente o mesoclima, sendo assim, pode-se estabelecer uma forte relação entre clima urbano e clima local. Possui uma escala de 15 a 150 quilômetros no sentido horizontal, embora já tenha utilizado para cobrir extensões de áreas maiores, e verticalmente se limita junto a camada limite planetária (Oliver & Fairbridge, 1987; Ribeiro, 1993; Smith, 1975).
- **Topoclima:** esse é uma derivação do clima local devido a rugosidade da superfície, que gera uma energização diferenciada do terreno durante o dia e drenagem do ar frio em direção aos vales a noite. Como resultado, tem-se um grande contraste entre as vertentes em uma mesma altitude e latitude. Sua extensão é de 0,5 a 5 quilômetros na horizontal e até 100 metros na vertical (Ribeiro, 1993; Smith, 1975).
- **Microclima:** é o nível mais próximo do indivíduo, pois integra as trocas gasosas e energéticas de estruturas particularizadas, inclusive de tamanhos pequenos, que existam na superfície. O microclima é afetado pela microrugosidade do terreno, cor, textura dos materiais de superfície, tipo de solo, edificações e vegetação, sendo que tais elementos possuem a capacidade de modificar o comportamento do ar circundante. Embora tente-se limitar a extensão microclimática, entende-se

que a mesma depende da natureza da superfície que deu origem àquele ambiente (Ribeiro, 1993).

2.1.2 *Mudanças climáticas*

Nota-se que a discussão acerca da temática de dimensão climática não é algo recente, mas que permanece em foco principalmente devido a atual situação de mudanças climáticas. No aspecto global, em um nível macroclimático, o planeta hoje sofre com a crise climática, sendo que a poluição atmosférica e a acentuação do efeito estufa devido às ações antrópicas se apresentam como os principais responsáveis (IPCC, 2021).

De acordo com sexto volume do relatório da *Emissions Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR) da Comissão Europeia, em 2018 as regiões metropolitanas urbanas mundiais foram responsáveis por aproximadamente 55% das emissões globais de GEE. Ao incluir qualquer área urbana, esse número se eleva para 75% (EDGAR, 2020). Logo, percebe-se que tais áreas possuem grande influência em relação às mudanças climáticas, pois além de serem responsáveis por grande parte das emissões atmosféricas, também alteram drasticamente a paisagem, principalmente alterando e degradando áreas naturais.

Essas emissões contribuem para o superaquecimento da temperatura do planeta Terra. De acordo com o sexto relatório sobre mudanças climáticas publicado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, em inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), a humanidade já atingiu 80% do seu limite de emissões de GEE. Caso não sejam tomadas medidas de mitigação e reforço nas políticas de combate a crise climática, o planeta alcançará o aquecimento global médio de 3,2 °C até 2100, sendo que o que se deseja evitar atualmente é que essa temperatura atinja 1,5 °C, o que já traria consequências significativas para o meio ambiente (IPCC, 2021).

As consequências relacionadas com a crise climática são cada vez mais evidentes. No verão de 2022, a Europa sofreu com ondas de calor extremas. Na Espanha, por exemplo, os termômetros chegaram a 43°C, o Reino Unido chegou a suspender aeroportos devido a problemas na pista de pouso causados pelo calor, e em Portugal foram registrados diversos incêndios florestais devido a tal motivo (ONU, 2022).

Segundo o mesmo relatório, mesmo que seja mantido níveis baixos de carbono, já se atingiu um ponto onde as mudanças climáticas são irreversíveis, o que mostra que

essas consequências piorarão nos próximos 30 anos. Para que os limites de aquecimento do planeta se mantenham dentro de 1,5 °C, ponto limiar que as mudanças climáticas não tenham consequências catastróficas para a humanidade, é necessário parar de queimar combustíveis fósseis, focando na neutralidade de emissões de GEE, plantar mais árvores, conservar as florestas existentes e reduzir a pressão sobre a capacidade da Terra de recarga dos seus recursos naturais (IPCC, 2021).

2.2 Microclima

Como mencionado anteriormente, o microclima refere-se a escala climática mais próxima do indivíduo e é influenciada pelas características das estruturas particularizadas de uma determinada área. As zonas onde há a ocorrência de microclima é caracterizada por um clima diferente em uma pequena área, se comparada com a região que a rodeia (Zellweger et al., 2019).

Comumente observa-se maiores temperaturas no interior de centros urbanos. Isso se dá devido às alterações geradas na superfície e pela influência de atividades antrópicas que afetam o microclima regional. Tal fenômeno é denominado ilha de calor, e está associado à retenção de calor por parte dos materiais presentes em abundância em áreas de grande urbanização, como asfalto e concreto. Isso é ainda mais acentuado devido à poluição atmosférica, causada principalmente por veículos e indústrias, já que os poluentes aprisionam a radiação solar evitando que o calor se dissipe, resultando em um aumento da temperatura do ar (Aboelata, 2020; Amorim, 2019; Iberdrola, 2022).

O microclima não é perceptível apenas em áreas urbanizadas, mas também em áreas naturais, onde a presença de alguma barreira geomorfológica, vegetação e/ou corpos hídricos, acarretam em diferenças de temperatura, precipitação e humidade, por exemplo, das áreas circundantes, o que influencia os processos ecológicos do local (Naime, 2019).

2.2.1 Variáveis Microclimáticas

As principais variáveis microclimáticas estão relacionadas com radiação solar, temperatura e humidade do ar. Os autores Heberle et al. (2017), Maciel et al. (2014) e Souza et al. (2018) destacam o uso de tais parâmetros para trabalhos envolvendo microclimas urbanos ou em áreas com vegetação. Raymundo et al. (2020) por sua vez, adicionaram a variável velocidade do vento em seu estudo de microclima de floresta urbana. Já Gotardo et al. (2019), além de trabalharem com tais variáveis, também incluíram precipitação e temperatura do solo em seu estudo sobre microclimas florestais.

Nota-se que há uma grande diversidade de variáveis microclimáticas que podem ser avaliadas nos diferentes tipos de estudos, entretanto, percebe-se que radiação solar, temperatura e humidade do ar são praticamente os elementos básicos em relação aos estudos dessa área.

Entretanto, estudos mais completos envolvendo malhas e planejamento urbano adentram em nuances mais específicas de elementos que influenciam o microclima de uma determinada área. Vianna (2018), em seu trabalho sobre campo térmico e ilhas de calor em Brasília (Brasil), especificou e estudou, variáveis relacionadas ao tipo de material de superfície e suas características (albedo, absorvância e emissividade), evapotranspiração da vegetação, morfologia urbana, que envolve a geometria urbana, Fator Visão de Céu (FVC), rugosidade e porosidade do terreno. Tais aspectos influenciam a temperatura do ar em uma determinada área, principalmente se tratando de análise microclimática urbana.

Outros atores que discorreram detalhadamente alguns aspectos importantes sobre o desenho bioclimático urbano foram Hernández et al. (2013), na confecção de um manual de orientações para elaboração de normas urbanísticas para regiões de clima temperado. Em tal documento é exposto as variáveis físicas que interferem no clima urbano, como temperatura do ar, humidade relativa do ar, radiação solar, vento, água, vegetação e tipos de materiais.

Tomando de base o manual de desenho bioclimático de Hernández et al. (2013), a seguir estão descritas as principais variáveis microclimáticas relevantes para realização deste trabalho.

2.2.1.1 Radiação Solar

A emissão de energia proveniente do sol é denominada radiação solar. Tal energia é propagada no espaço através de ondas eletromagnéticas, que podem ser ondas de pequeno comprimento de onda (que é proveniente diretamente do sol, incidente ou refletida nas superfícies terrestres), ou ondas de grande comprimento de onda (que é emitida pelos corpos em função de sua temperatura) (Freitas, 2013; Hernández et al., 2013).

Ao adentrar na atmosfera terrestre, as ondas curtas da radiação solar são parcialmente refletidas para o espaço pelas nuvens, aproximadamente 25%, enquanto

outros 25% são absorvidos pelas mesmas. O restante é transmitido diretamente para a superfície terrestre, que reflete 5% dessa radiação e absorve os outros 45%. As radiações absorvidas tanto pelas nuvens, quanto pela superfície do planeta são emitidas como ondas de grande comprimento para a atmosfera, onde parte da radiação é perdida para o espaço e parte é absorvida pelos gases de efeito estufa. Os GEE reemitem essa radiação para todas as direções, sendo que grande parte fica retida na baixa atmosfera gerando o fenômeno de efeito estufa. Na Figura 1 é apresentado um esquema da dinâmica da radiação solar no planeta Terra (Hernández et al., 2013; Junges et al., 2018; Vianna, 2018).

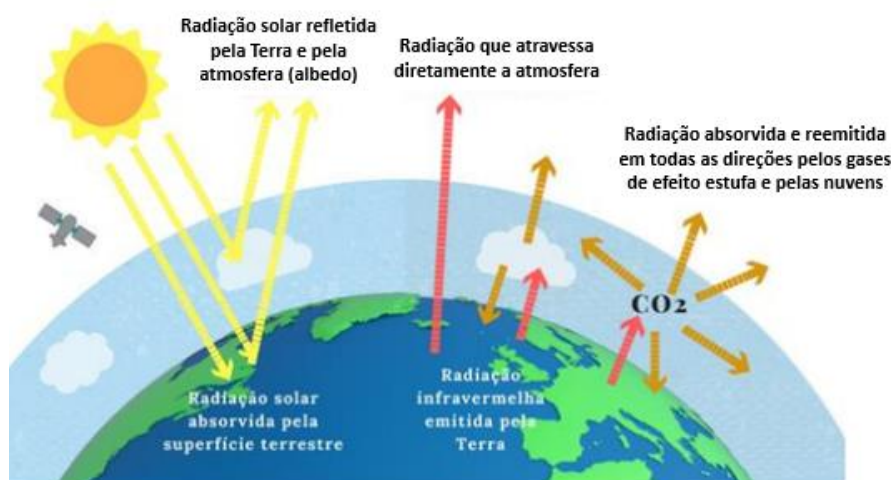


Figura 1: Radiação solar na Terra (Junges et al., 2018).

A radiação de pequeno comprimento de onda é composta pela radiação direta, que atravessa a atmosfera de forma unidirecional, radiação difusa, que é difundida pela atmosfera e pelas nuvens, e a radiação refletida pelas superfícies, que é a que mais interfere no stress térmico e é determinada pela geometria do espaço urbano, da forma e posição do corpo e da posição relativa do sol (Freitas, 2013; Hernández et al., 2013).

A radiação solar e a temperatura interferem no conforto térmico de espaços exteriores abertos. A primeira variável pode ser de certa forma controlada por condicionantes que favorecem a incidência de radiação ou sombreamento dos espaços exteriores, considerando ainda que 75% da incidência de radiação solar se dá nos horários centrais do dia (entre 10:00 e 14:00 – horários solares). Já a segunda variável é um fator dificilmente controlado em áreas abertas. Sendo assim, entende-se que as variáveis morfológicas das estruturas urbanas, ou seja, a configuração tridimensional dos elementos construtivos tem uma forte relação com alguns elementos microclimáticos, como vento, radiação solar e temperatura do ar (Hernández et al., 2013; Romero et al., 2019).

2.2.1.2 Temperatura do Ar

Essa é uma grandeza física que mais é perceptível para a população, sendo que diversos fenômenos naturais e grandezas físicas possuem certa interferência da temperatura. Tendo um caráter escalar, é medida pelo sistema internacional em Kelvin, porém em Portugal e no Brasil é mais comum se utilizar a escala graus Celsius (°C) (Freitas, 2013).

A temperatura média e a amplitude térmica são indicadores do potencial do clima. O primeiro é obtido a partir da soma de dois ou mais registros de temperatura divididos pelo número de registros. Já o segundo é a diferença entre a temperatura máxima e mínima de determinado período. Os valores de máximos, mínimos e médios podem resultar, por exemplo, em dados de temperatura horária a partir de aplicação de modelos matemáticos simples (Hernández et al., 2013).

Há diversos fatores que podem influenciar a temperatura do ar. Em relação aos aspectos naturais destacam-se a atitude, distribuição de água, correntes oceânicas e incidência de radiação solar. Já no que diz respeito a interferência antrópica, a poluição atmosférica, mudança no uso e ocupação do solo e ilhas de calor influenciam diretamente na temperatura (Freitas, 2013; Vianna, 2018).

Para análises ambientais a temperatura do ar se apresenta como uma das principais variáveis de análise. Além de ser um importante indicador climático, também é lidado quando se trata de conforto térmico, sendo um dos principais fatores a ser notado pelas pessoas (Oliveira & Knies, 2019).

2.2.1.3 Vento

O vento pode ser definido como o movimento do ar na superfície terrestre ocasionado devido a diferença de pressão entre duas regiões. Os distintos processos de aquecimento, também relacionados com a radiação solar, das regiões continentais e oceânicas fazem com que haja variações de pressões, fazendo com que o ar se desloque das regiões de alta pressão, para as de baixa pressão (Carvalho, 2015; Freitas, 2013).

Essa é uma variável com potencial de alterar o microclima de uma região e possui dois efeitos principais: mecânico, que começam a ser mais sentidos a partir de 4 m/s, podendo causar graves prejuízos se alcançam velocidades a partir de 10 m/s; e térmicos,

que afetam o conforto térmico e o bem-estar das pessoas (Hernández et al., 2013; Olgyay et al., 1963).

A direção e velocidade do vento podem variar de acordo com a geografia do local, relevo, rugosidade da superfície, clima e época do ano. Mesmo o regime de ventos sendo tão diverso, os efeitos globais e locais de padrões de movimento do ar ajudam a descrever o funcionamento das correntes de ar em uma área de morfologia urbana (Hernández et al., 2013).

O microclima urbano, e conseqüentemente o bem-estar das pessoas, são afetados pela combinação dos efeitos térmicos e mecânicos dos ventos. Em relação ao conforto térmico, o movimento do ar diminui a diferença de temperatura microclimática, favorece a evapotranspiração da pele quando a temperatura está elevada, e o arrefecimento do vento em temperaturas mais baixas. Já em relação a variação do fluxo de ar, a rugosidade da superfície, que refere-se à diferença entre as alturas dos edifícios e outras superfícies horizontais, provoca distintos efeitos das edificações. Na Figura 2 abaixo é possível visualizar os diferentes tipos de efeitos provocados pelo vento nas edificações, que podem servir de barreira para o vento (Hernández et al., 2013; Vianna, 2018).

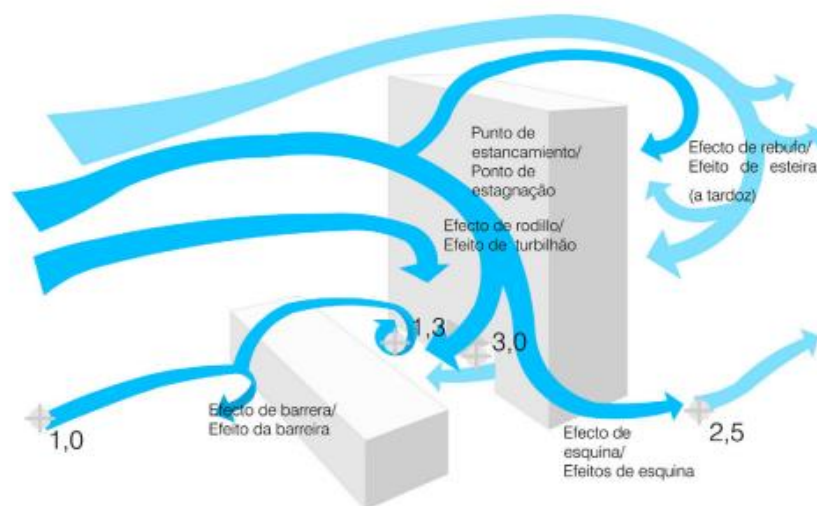


Figura 2: Efeitos da interação entre o vento e os edifícios (Hernández et al., 2013).

Ressalta-se que o efeito de canalização do ar ao longo das ruas, associados às configurações dos edifícios, resulta em corredores urbanos com regimes de ventos diferentes do entorno. Isso depende da direção e velocidade do vento, mas tem o potencial de influenciar no microclima local, principalmente em relação a transporte de poluentes e conseqüentemente a qualidade do ar (Hernández et al., 2013).

2.2.1.4 Água

O elemento água cobre cerca de 70% da superfície terrestre, mas embora esse número pareça abundante, apenas 2,5% são constituintes de água doce, onde cerca de 1,8% se encontram retidas em forma de gelo nos polos. Toda essa água integra um sistema fechado não estático, no qual a totalidade quantitativa de tal elemento permanece praticamente constante (CNA, n.d.; Snirh, n.d.).

Esse sistema fechado constitui o ciclo hidrológico, que descreve o movimento cíclico infinito da água e é mantido pela energia solar direta ou indireta. De uma forma simplificada, a radiação emitida pelo sol aquece os corpos hídricos superficiais, o que resulta na evaporação de moléculas de água para a atmosfera. Além dos rios, lagos e oceanos, a energia solar também atua na evapotranspiração, que é a perda de água do solo, por evaporação, e das plantas, por transpiração. Todas essas moléculas de água na atmosfera podem ser transportadas que posteriormente se precipitam em forma de água, neve ou granizo. Ao retornarem para a superfície terrestre parte dessa água é infiltrada e parte passa pelo processo de escoamento superficial, onde ambas migram em direção aos corpos hídricos recomeçando o ciclo hidrológico (EPAL, 2022).

Em relação ao microclima urbano o ciclo hidrológico se incorpora naturalmente nas configurações urbanas, sendo influenciadas pela permeabilidade dos materiais, cobertura do solo, presença de vegetação e de corpos hídricos naturais ou artificiais nas proximidades. Todos esses pontos afetam a quantidade de vapor de água presente na atmosfera, ou seja, influenciam na humidade relativa do ar, parâmetro que influencia no bem-estar da população (Hernández et al., 2013).

A presença de vapor d'água no ar tem a capacidade de refrigerar o ar através do arrefecimento adiabático, que consiste na perda de calor de uma massa de ar seco e quente quando esta entra em contato com uma superfície de água. O efeito contrário também acontece quando se retira certa quantidade de vapor d'água da massa de ar, ou seja, o calor aumenta pelo efeito da dessecação (Hernández et al., 2013).

2.2.1.5 Humidade Relativa do Ar

A humidade do ar pode ser definida como a quantidade de vapor de água presente em uma massa de ar seco. Essa variável pode ser expressa em volume, como humidade absoluta do ar, ou em massa, como teor de humidade do ar (Freitas & Pinto, 1998).

A humidade absoluta mede a quantidade de vapor de água no ar independente da temperatura, ou seja, quanto maior for a quantidade de vapor de água do ar, maior será a humidade absoluta (National Weather Service, 2015).

A humidade relativa do ar, por sua vez, é um parâmetro percentual que mede a humidade relativa à uma determinada temperatura. Ela indica a quantidade de vapor de água presente em um determinado volume de ar, em relação a quantidade máxima de vapor que ele pode conter nesse volume (vapor de água de saturação) em uma temperatura específica. O ar quente pode possuir mais vapor d'água devido a maior evaporação de corpos hídricos, tendo então uma humidade relativa maior do que o ar frio. (Freitas & Pinto, 1998; Hernández et al., 2013; National Weather Service, 2015).

De acordo com Olgyay (1963), a fronteira de humidade relativa do ar adequados para saúde humana se encontra entre 20 e os 80%. Índices muito baixos podem causar complicações alérgicas e respiratórias, ressecamento das mucosas e pele, sangramento nasal e também podem aumentar o potencial e incêndios florestais. Já índices muito elevados também não são adequados, já que influenciam na proliferação de fungos e bactérias (CGE, n.d.).

2.2.1.6 Vegetação

Uma das consequências causadas pela urbanização é a diminuição de vegetação e áreas permeáveis, o que ocasiona na diminuição de sombras, redução da humidade, elevação das temperaturas de superfície e do ar. A impermeabilização do solo está diretamente relacionada com a redução da evapotranspiração, que é um mecanismo que influencia no balanço energético (Vianna, 2018).

A presença de áreas verdes em regiões urbanas traz diversos benefícios, como ornamentação, composição de espaços recreativos, proporciona um ambiente próprio para o desenvolvimento animal, atua como barreira de ruídos de baixa frequência, reflete as trocas sazonais ao longo do ano e atua diretamente na melhoria climática. Em relação a esse último aspecto, a vegetação tem a capacidade de melhorar a humidade, ajudar no controle da temperatura microclimática, reduzir a poluição ambiental e ainda servir como barreira atenuadora de ventos (Silva et al., 2015).

Os efeitos positivos gerados pela vegetação são acentuados pela presença de mais exemplares arbóreos, entretanto, pequenas massas vegetais também produzem

benefícios detectáveis. Grandes espaços verdes podem produzir grandes variações de temperatura que afetam o microclima na escala local. No que se diz respeito a pequenas massas vegetais isoladas, as variações de temperatura se dão principalmente devido a radiação solar e a evapotranspiração (Silva, 2021).

A vegetação impede que a radiação solar chegue diretamente ao solo, ou seja, ela absorve a radiação de pequeno comprimento de onda, evitando que ela penetre por suas folhagens. Isso gera um efeito de ensombreamento sob a copa, evitando que a radiação solar seja refletida para outras superfícies. Paralelamente, a radiação de grande comprimento de onda também é absorvida após ser emitida pelos materiais ao redor, pelo solo e pelo céu. Como consequência a temperatura da envolvente diminui durante o dia, e durante a noite, a vegetação tende a produzir temperaturas mais elevadas na sua envolvente direta (Hernández et al., 2013).

A evapotranspiração das plantas resulta em um acréscimo de vapor de água no ar, o que conduz a um arrefecimento adiabático, descrito anteriormente, e consequentemente a uma diminuição da temperatura. Esse efeito ocorre durante o dia enquanto a planta realiza a fotossíntese, sendo que no período noturno não ocorre tal arrefecimento. De forma geral, a vegetação exerce um papel de termorregulação a partir do controle da radiação solar, sendo que é interessante a existência de espécies com folhas caducas, já que permitem a incidência mais direta de radiação nas superfícies no inverno e a absorve no verão (Hernández et al., 2013).

Um outro ponto relevante da atuação da vegetação no microclima está relacionado com a qualidade do ar. Além de absorverem o dióxido de carbono e liberarem oxigênio no processo de fotossíntese, as árvores e arbustos tem a capacidade de acumularem material particulado principalmente em suas folhagens, sendo que essa captura depende da área superficial de contato e das características das folhas e do próprio material particulado. Nesse sentido, massas vegetais também podem atuar como uma barreira no trajeto dos fluxos de ar com plumas de poluentes atmosférico, o que pode representar algo positivo ou negativo, quando as mesmas impedem a dispersão de contaminantes (Hernández et al., 2013; Popek et al., 2015).

Além da remoção de partículas por meio de deposição em sua superfície, as árvores têm a capacidade de remover poluentes a partir da absorção estomática de gases-traços, ou seja, que estão presentes em pequenas quantidades na atmosfera. Esses gases,

que podem ser principalmente gás carbônico, vapor d'água, metano, ozono e óxido de nitrogênio, são absorvidos pelas plantas predominantemente através dos estômatos, sendo que essa é uma absorção direta ao metabolismo vegetal, e que pode influenciar seu crescimento, causar lesões e afetar negativamente na fotossíntese, caso a planta esteja sujeita a níveis críticos de poluição (Popek et al., 2015; Vieira et al., 2018; Yanting et al., 2016).

2.2.1.7 Materiais

A complexidade da composição de elementos que integram uma área urbana está relacionada, principalmente, com a diversidade de materiais utilizados na construção civil. Esses diferentes tipos de revestimentos superficiais, integrados com os outros elementos naturais, como água e vegetação, são determinantes microclimáticas. Além de influenciarem na velocidade do vento e no balanço hídrico, os materiais possuem a capacidade de absorver, armazenar e emitir energia radiante. Isso dependerá da especificidade, da disposição e da configuração espacial dos elementos integrantes da malha urbana, que determinam a quantidade de calor a ser dissipado por convecção para o ar (Hernández et al., 2013; Vianna, 2018).

As estruturas urbanas recebem radiação de pequeno e grande comprimento de onda diretamente do céu (direta e difusa). Essa energia é parcialmente refletida e absorvida por tais elementos, que por sua vez também emitem radiação de longo comprimento de onda. Esse balanço energético pode ser observado na Figura 3 abaixo.

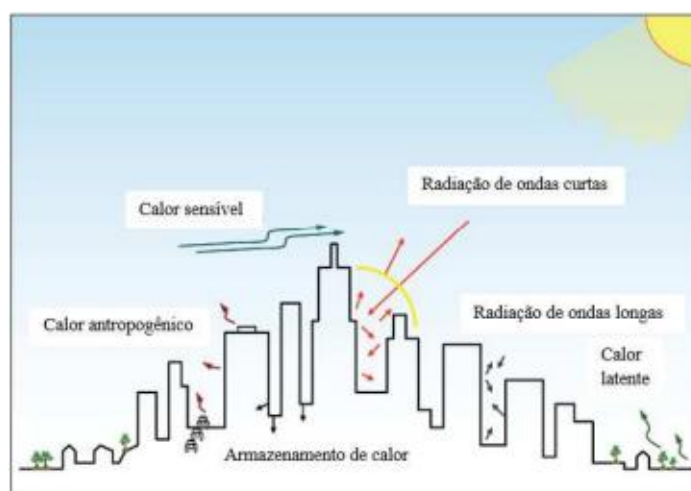


Figura 3: Balanço de energia entre edifícios (Vianna, 2018).

Ressalta-se que a relação entre os tipos de materiais e a radiação absorvida determinará a quantidade de calor sensível a ser dissipado para o ar. Sendo assim, as

características térmicas dos elementos influenciam na temperatura e no microclima local, cuja temática pode ser discutida ao se tratar do albedo (Vianna, 2018).

O albedo, também chamado de refletividade, é um parâmetro adimensional que indica a porcentagem de radiação solar que é refletida em uma determinada superfície, a partir da radiação incidente sobre ela. Tal fator é influenciado pelo ângulo de incidência solar e pode ser explorado no âmbito de mitigação do calor urbano, sendo que o albedo dos materiais também tem a capacidade de condicionar a temperatura superficial dos revestimentos urbanos. De uma forma geral, elementos com menor albedo permitem uma maior acumulação de energia radiante, o que reflete no aumento da sua temperatura superficial. De maneira recíproca, o inverso ocorre com elementos com maior albedo, onde há maior reflexão da radiação solar, evitando o acúmulo de calor nas superfícies (Dobos, 2020; Santamouris & Fiorito, 2021).

A cor é um dos fatores que interfere no albedo. Cores mais claras possuem um maior albedo, ou seja, uma maior capacidade de reflexão da radiação solar, o que faz com que edificações desse tipo sejam mais frescas. O contrário ocorre com materiais de cores mais escuras onde o albedo é menor, e tendem a absorver mais energia e acumulam calor em seu interior (Santamouris & Fiorito, 2021).

Em termos de parâmetros físicos, aqueles que descrevem a relação do albedo com o balanço térmico de energia são a absorvidade e emissividade. O primeiro parâmetro é definido como a fração de radiação que é absorvida por uma superfície em relação a toda radiação refletida sobre ela, assim, superfícies com baixo albedo tendem a ter maior absorvidade. Já o segundo é a fração de radiação refletida por uma superfície em relação à sua correspondente a corpo negro e em uma mesma temperatura, logo, elementos com alto albedo tendem a ter pouca emissividade (Hernández et al., 2013).

2.3 Qualidade do Ar e Poluição Atmosférica

O termo qualidade do ar normalmente é utilizado para traduzir o grau de poluição do ar que nos circunda, de acordo com as condições meteorológicas que o influencia. A poluição atmosférica, por sua vez, pode ser definida como substâncias presentes na atmosfera terrestre em quantidades suficientes para alterar seu equilíbrio e sua composição. Esta condição é provocada por uma mistura de substâncias que são lançadas no ar de forma natural ou antrópica, ou resultantes de reações químicas que ocorrem na atmosfera capazes de alterar sua constituição natural (APA, 2021b; Drumm et al., 2014).

A qualidade do ar sofre influência direta das condições meteorológicas, pois dependendo da temperatura, da humidade relativa, da existência de ventos fortes, de precipitação e das condições de estabilidade atmosférica, os poluentes podem ser dispersados ou permanecerem acumulados e retidos na baixa atmosfera. Nesse contexto a sazonalidade também possui forte influência sobre a concentração de poluentes na atmosfera, já que períodos mais secos tendem a aumentar a concentração de poluentes e estações mais chuvosas tendem a diminuir (APA, 2021b; Monte et al., 2016).

De acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) os principais poluentes atmosféricos são os óxidos de nitrogênio (NO_x), amônia (NH_3), dióxido de enxofre (SO_2), compostos orgânicos voláteis (COV), ozono (O_3) e material particulado (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$). Além desses, outras substâncias também podem causar alterações significativas no meio ambiente e na saúde humana, como é o caso do dióxido de carbono (CO_2) e monóxido de carbono (CO), que contribuem fortemente para o efeito estufa. Dentre as atividades antrópicas que originam a formação de tais poluentes, se destacam o setores de produção de energia, de indústria e construção, refino e armazenamento de petróleo, aquecimento residencial e comercial, transporte rodoviário e atividades agrícolas (APA, 2021b; Drumm et al., 2014).

A poluição atmosférica resulta em impactos na saúde humana, alterações climáticas e danifica ecossistemas. Na Tabela 1 abaixo estão expostas as principais características e efeitos dos poluentes atmosféricos citados acima.

Tabela 1: Poluentes atmosféricos e suas principais características.

Substância	Características
NO_x	Formado através da oxidação de compostos de nitrogênio que estão presentes no combustível e no próprio ar presente no comburentes. A combustão incompleta resulta na formação de NO e NO_2 , que se formam a partir da combinação com átomos de oxigênio presentes na atmosfera. Os NO_x contribuem para formação de chuva ácida e smog, além disso, em relação a saúde humana, podem causar irritações pulmonares e problemas respiratórios (Drumm et al., 2014).
SO_2	Resultante da combustão de materiais que possuem enxofre em sua composição. É um dos principais causadores da chuva ácida a partir da formação de ácido sulfuroso na presença de água. Esse é um gás tóxico que causa irritação nas mucosas, e em altas concentrações esse gás pode ser asfíxiante (Sun et al., 2015).

Tabela 2 (continuação): Poluentes atmosféricos e suas principais características.

Substância	Características
COV	São hidrocarbonetos voláteis gerados a partir da combustão incompleta em baixas temperaturas e baixo teor de oxigênio. Esses elementos são precursores do ozônio troposférico, que está relacionado com agravamento do efeito estufa. Para a saúde humana, esses elementos ao serem inalados concentram-se no fígado, medula e placenta, causando efeitos nocivos à saúde, causando náuseas e afetando o material hereditário, podendo causar leucemia e cânceros na pele e pulmão (Castro et al., 2013).
O₃	O ozônio é considerado um poluente secundário, pois sua formação resulta de reações fotoquímicas na atmosfera a partir de precursores com origem antropogênica e biogênica (NO _x e COV). O O ₃ quando está na troposfera (camada inferior da atmosfera) pode afetar a saúde humana, causando irritações nos olhos e vias respiratórias. Também considerado um composto químico altamente reativo e prejudicial à vegetação, à vida animal e alguns materiais (CCDR, n.d.).
PM₁₀ PM_{2,5}	São partículas sólidas ou líquidas suspensas e dispersas na atmosfera que possuem características variadas de composição, tamanho e morfologia. São liberadas a partir de diversos processos (combustão e indústrias). Podem ser classificadas de acordo com o tamanho da partícula, como PM ₁₀ (material particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a 10 µm) e PM _{2,5} (material particulado com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 µm). Pode influenciar no balanço térmico da atmosfera, na visibilidade, também pode prejudicar a fotossíntese das plantas e a qualidade do solo e água. Em relação a saúde humana, tais partículas têm sido associadas a diferentes efeitos na saúde humana, podendo causar sintomas respiratórios leves, graves, além de impactos cardiovasculares, atingindo órgãos e o sistema nervoso, podendo até causar morte prematura (Drumm et al., 2014; WRI, 2018).
CO₂	É um gás liberado na respiração dos seres vivos, incluindo seres vegetais, e na combustão, também é utilizado pelas plantas na fotossíntese. É incolor e inodoro, não tóxico e compõe um dos principais gases formadores do efeito estufa, que atualmente se apresenta como uma grande problemática ambiental (Anderson et al., 2021).
CO	É formado durante a combustão incompleta em baixas concentrações de oxigênio. É um gás incolor e inodoro, tóxico para os seres humanos se expostos por um longo período, podendo causar até mesmo a morte por falta de oxigênio no sangue. Para o meio ambiente, ele compõe a lista de gases de efeito estufa (Moraes, 2017).

A qualidade do ar pode ser mensurada qualitativamente a partir do Índice de Qualidade do Ar (IQA), que leva em consideração as concentrações de poluentes de análise obrigatória analisados pelas estações de monitorização. Para regiões consideradas como zonas, o cálculo do IQA considera a média aritmética das concentrações de O₃ e PM₁₀ ou PM_{2,5} de um determinado período. Já para áreas de aglomerações, os poluentes

obrigatórios são o NO₂ e PM₁₀ ou PM_{2,5}. Caso exista informações sobre o SO₂, ele também pode entrar no cálculo (APA, 2021a; REA, 2021).

Tal classificação é traduzida em uma escala de cores divididas em cinco classes, de “Muito bom” a “Mau”, que pode ser facilmente compreendida pela população, permitindo que ações adequadas sejam tomadas em prol dos cuidados à saúde. Na Tabela 3 abaixo é possível identificar os valores de intervalos de concentrações (expressos em µg/m³) de cada poluente definidos para cada nível de classificação (APA, 2021a).

Tabela 3: Classificação do IQAr (APA, 2021a).

Classificação	PM₁₀	PM_{2,5}	NO₂	SO₂	O₃
Muito Bom	0-20	0-10	0-40	0-80	0-100
Bom	21-35	11-20	41-100	81-100	101-200
Médio	36-50	21-25	101-200	101-180	201-350
Fraco	51-100	26-50	201-400	181-240	351-500
Mau	101-1.200	51-800	401-1.000	241-600	501-1.250

Para a definição final da classificação qualitativa do IQAr considera-se o resultado do pior poluente analisado, podendo o cálculo ser feito para dados atuais ou históricos. Os registros atuais são atualizados a cada hora do dia, e o parâmetro estatístico baseia-se na média horária e deslizante das últimas 24 horas para definição das concentrações dos poluentes. Já para análises históricas, onde são necessários no mínimo 75% dos valores horários medidos, o parâmetro estatístico é tido através das máximas horárias para o NO₂, O₃ e SO₂, e por meio da média diária para PM₁₀ e PM_{2,5} (APA, 2021a).

Segundo o sexto relatório de Perspectivas do Ambiente Global (em inglês, *Global Environment Outlook - GEO*), da ONU, cerca de uma em cada quatro mortes do mundo estão relacionadas com riscos ambientais, sendo que a poluição atmosférica é responsável por entre 6 e 7 milhões de mortes anuais (ONU, 2019a).

Além de efeitos na saúde ligada a doenças respiratórias e cardiovasculares, a poluição do ar atinge o ecossistema e o clima de forma negativa. Em relação ao primeiro, este ocasiona danos na vegetação, perda da biodiversidade, acidificação e eutrofização dos ambientes. Já se tratando do aspecto climático, alguns poluentes acentuam o efeito

estufa, responsável pelo superaquecimento terrestre, resultando em alterações climáticas significativas e de grande impacto global (APA, 2019).

Tendo em vista a remediação e atenuação da poluição atmosférica, convencionalmente pode-se agir de três maneiras: a primeira é atuando diretamente no equipamento poluente, substituindo-o por algum outro com maior eficiência e com maior tecnologia voltada para redução de emissões; a segunda forma é direcionada para a troca ou melhoramento de combustíveis, priorizando a utilização daqueles com menores emissões atmosféricas associadas; já terceira maneira é voltada para atuação diretamente nos gases poluentes, com aplicação de tecnologias que reduzem os níveis de poluição na saída dos equipamentos de combustão (Campos, 2021).

Entretanto, ao se tratar de uma visão mais integrada e que leva em consideração não somente o controle específico de um poluente, mas sim todo o ecossistema de uma dada região, as Soluções Baseadas na Natureza (SBN) se apresentam como uma alternativa sustentável e com grandes benefícios aos serviços ecossistêmicos, que influenciam diretamente o bem-estar das populações e proporcionam benefícios de suporte à vida, sociais e econômicos para o homem (European Commission, 2015; Muñoz & Freitas, 2017).

2.4 Soluções Baseadas na Natureza

Segundo a Comissão Europeia, soluções baseadas na natureza (SBN) são ações que se apoiam, inspiram, relacionam ou imitam aspectos da natureza. Elas possuem o objetivo de auxiliar a sociedade no enfrentamento de problemas ambientais, sociais, e econômicos de forma sustentável, usufruindo dos benefícios proporcionados por sistemas naturais (European Commission, 2015).

Uma outra definição dada pela UICN aborda um aspecto mais integrado com os benefícios sociais e restauração de ecossistemas adaptativos naturais ou modificados, aonde o objetivo vai além de apenas proporcionar bem-estar para o homem, colocando em foco os benefícios da biodiversidade. As SBN buscam enfrentar desafios sociais, como segurança alimentar, mudanças climáticas, saúde humana, problemas sociais e econômicos a partir do aumento da resiliência dos ecossistemas (IUCN, 2016).

Por ser um conceito relativamente novo, sendo citado formalmente a primeira vez por uma publicação do Banco Mundial no ano 2000, engloba outras estratégias já

consolidadas no âmbito de infraestruturas verdes, serviços ecossistêmicos, capital natural e adaptação baseada em ecossistemas, sendo que o aspecto econômico também aparece como algo de destaque (Fraga, 2020; Word Bank, 2008).

As SBN podem ser traduzidas como uma abordagem sistêmica das principais esferas da sustentabilidade: ambiental, social e econômica. Seus benefícios estão pautados principalmente nos serviços ecossistêmicos, onde é considerada também uma visão a longo prazo fundamentada em processos naturais (Faivre et al., 2017).

Os serviços ecossistêmicos, por sua vez, são os benefícios obtidos dos ecossistemas que desempenham funções importantes para biodiversidade. Os efeitos positivos sociais, econômicos e de suporte à vida são sentidos de forma direta ou indireta pelo o homem (Vezzani, 2015).

Segundo o comitê de Avaliação Ecosistêmica do Milênio (AEM), tais serviços podem ser classificados em quatro categorias: serviços de suporte, que são necessários para produção de outros serviços, como formação do solo e reciclagem de nutrientes; serviços de regulação, relacionados com processos regulatórios naturais, como regulação climática e manutenção da qualidade do ar; serviços de abastecimento e provisão, que são produtos obtidos dos ecossistemas, como alimentos e outros recursos; e serviços culturais, que engloba os efeitos na cultura de uma população, advindos da multiplicidade de ecossistemas existentes (AEM, 2005).

No contexto em que a tendência mundial é fazer com que as áreas urbanas consigam cumprir seus objetivos de sustentabilidade, incluindo a adaptação aos riscos climáticos, as SBN são apresentadas como uma estratégia econômica com relevante interesse para cidades. Além de prezarem pelo bem-estar humano, enfatizam a ideia de que isso pode ser feito de uma forma rentável e sustentável (Toxopeus et al., 2020).

Tendo em vista a aplicação de uma política de SBN, a Comissão Europeia identificou quatro objetivos onde a aplicação das SBN está associada a inovação responsável para solução de problemas sociais: melhorar urbanização sustentável, restauração de ecossistemas degradados, desenvolvimento de adaptação às mudanças climáticas e mitigação, e melhoria da gestão de risco e resiliência. Tais concepções podem ser aplicadas no âmbito rural ou urbano (European Commission, 2015).

2.4.1 *Princípios das SBN*

De acordo com a UICN, para complementar o entendimento da definição de SBN, é essencial que sejam discutidos os oito princípios associados a esse conceito (IUCN, 2016):

1. É necessário integrar as normas e princípios de conservação da natureza, pois as SBN não substituem as práticas de conservação diretas, assim como nem todos os esforços de conservação seriam considerados SBN;
2. Podem ser implementadas sozinhas ou de forma conjunta com outras soluções de desafios sociais, como tecnologia e soluções de engenharia;
3. São determinadas por contextos naturais e culturais, que incluem o conhecimento tradicional local e o científico;
4. Desejam produzir benefícios sociais de forma justa e equitativa, objetivando a ampla participação social;
5. Objetivam manter a diversidade biológica e cultura, e a capacidade dos ecossistemas evoluírem com o tempo;
6. São aplicados em uma escala de uma determinada área;
7. Necessitam reconhecer e abordar os desafios entre a produção de alguns benefícios imediatos econômicos para o desenvolvimento, e opções futuras para toda uma produção de serviços ecossistêmicos;
8. São parte integrante de um projeto geral de políticas e ações para o enfrentamento de um desafio específico.

Partindo dos princípios citados acima, ressalta-se que as SBN são específicas de um determinado contexto, tanto em relação ao tempo quanto no espaço. As soluções podem ser aplicadas em uma escala global, ou local, de diferentes maneiras e em qualquer local do mundo, a partir da adaptação de acordo com a problemática e singularidade de cada área (IUCN, 2016).

A inspiração na natureza para solução de problemas sociais e ambientais podem estimular a inovação científica e fortalecer a economia de forma mais sustentável. O tratamento do conceito é amplo e que engloba diferentes abordagens relacionadas ao ecossistema está representado na Figura 4 abaixo (European Commission, 2015).



Figura 4: SBN e as abordagens ecossistêmicas (adaptado IUCN, 2016).

No esquema apresentado acima pode-se observar que as SBN compõem um sistema integrado e amplo, que pode ser aplicado em diferentes frentes com o intuito de alcançar o bem-estar humano e melhorar a biodiversidade local.

2.4.2 Aplicabilidade das SBN

A partir da perspectiva de aplicação das intervenções de SBN, elas podem ser categorizadas ao longo de dois gradientes: em relação ao nível exigido de engenharia da biodiversidade e do envolvimento dos ecossistemas associados; e pelo nível dos resultados obtidos a partir do aprimoramento dos serviços ecossistêmicos. Esses gradientes englobam uma série de medidas que refletem diretamente nos benefícios alcançados pelas SBN (IUCN, 2016).

As ações prioritárias que descrevem as intervenções efetivas das SBN estão pautadas na: i) Regeneração da infraestrutura urbana; ii) Melhora no bem-estar da população urbana; iii) Resiliência costeira; iv) Gestão multifuncional das bacias hidrográficas baseada na restauração de ecossistemas; v) Aumento do uso sustentável da

matéria e energia; vi) Mitigação e redução de riscos a partir do uso de ecossistemas; e vii) Aumento do sequestro de carbono. Essas medidas são resultantes de intervenções que visam as abordagens do melhor aproveitamento de infraestruturas verdes e dos recursos naturais protegidos ou já existentes, da restauração, da gestão sustentável e da criação de ecossistemas (European Commission, 2015; IUCN, 2016).

O desenvolvimento de SBN em uma área específica atende a demandas das problemáticas locais, porém simultaneamente também busca maximizar outros co-benefícios ambientais, sociais e econômicos. São soluções, quando bem planejadas e aplicadas, eficazes e de abordagem flexível, que refletem na melhora no bem-estar humano e no ambiente natural (IUCN, 2016).

Em um contexto em que mais de 70% da população europeia reside em cidades, as regiões de aglomerações urbanas tendem a compor cenários mais relevantes de poluição e degradação ambiental. As zonas industriais, associadas principalmente ao desenvolvimento econômico e tecnológico de uma região, concentram elevado número de indústrias com um grande potencial poluidor. Dentre os efeitos negativos ocasionados pelo processo produtivo, destacam-se poluição atmosférica, ruído e risco de contaminação dos recursos naturais (European Commission, 2015; Ferreira, 2018).

Tendo em visto a mitigação dos efeitos adversos causados pelas indústrias, as SBN, além de contribuírem com o microclima local em relação a temperatura e poluição atmosférica, também influenciam no bem-estar físico e mental da população. O contato com áreas verdes está relacionado com melhora da qualidade de vida, pois além de trazerem benefícios sociais e culturais, auxiliam na manutenção do equilíbrio psicológico e físico das pessoas. Sendo assim, a aplicações de SBN em áreas que tendem a ter uma maior concentração de problemáticas ambientais, como zonas industriais, podem resultar em um crescimento sustentável e inclusivo, com reflexos no ambiente natural, na sociedade e na resiliência acerca de desastres naturais (European Commission, 2015; Fernandes & Higuchi, 2017; Gomes, 2020).

A compreensão e a metrificação dos impactos das SBN permitem prever o comportamento e mensurar o alcance e a magnitude dos benefícios de tais intervenções. Por se tratar da integração de sistemas ambientais complexos, naturais e antrópicos, a aplicação de modelos e simulações computacionais ambientais se mostram como

alternativas viáveis que permitem analisar e antecipar os efeitos das ações associadas à projetos que envolvam SBN (Gettelman & Rood, 2022).

2.5 Modelação e Simulação de Sistemas Ambientais

Um modelo pode ser considerado como uma representação de um sistema, que pode ser utilizado para abstrair, tornar tratável e entender a sistemática e as interações entre as dimensões humana e natural do ambiente. Podem ser físicos, que utilizam a representação física, como uma maquete, ou numéricos, que se pautam em linguagens matemáticas (Gettelman & Rood, 2022).

Um modelo computacional é considerado numérico, pois é pautado em expressões matemáticas que definem seu comportamento. Algumas das vantagens da utilização desse tipo de sistemática são a possibilidade de realizar simulações de experimentos inviáveis na prática, além de permitirem uma certa rapidez na obtenção de resultados (Gettelman & Rood, 2022; Kobiyama & Manfroi, 1999).

A modelagem é o processo de se gerar ou correr modelos, que por sua vez, buscam uma aproximação com a realidade. Para obtenção de bons modelos, ou seja, que mais se aproxime das características reais de um determinado sistema, é importante a incorporação de dados obtidos através do monitoramento. Quanto mais detalhado e maior for a quantidade de dados, mais semelhança com a realidade o modelo terá (Kobiyama & Manfroi, 1999).

Os sistemas e fenômenos ambientais são, de maneira geral, complexos. Podem incluir comportamentos não lineares, propriedades e interações diversas, sobre múltiplas escalas de espaço e tempo. Nesse contexto, a modelagem se apresenta como uma ferramenta útil e essencial para o estudo dos sistemas ambientais, já que permite representar os processos dinâmicos naturais e urbano-naturais em diferentes escalas temporais, o que facilita a previsão de fenômenos e processos através das simulações (Lima et al., 2010).

Para os fenômenos climáticos os modelos representam uma importante ferramenta para melhorar a compreensão e previsão dos seus comportamentos em períodos sazonais, anuais ou em maiores ou menores escalas. Os resultados obtidos das simulações em diferentes cenários, auxiliam a tomada de decisão dos governantes frente

os desafios de adaptação e risco climático. Toda essa lógica também é aplicada para o microclima, sendo que existem modelos específicos nesse âmbito (GFDL, 2018).

Existem diversos modelos climáticos na literatura, que podem ser classificados como: modelos empíricos, de vegetação e de dossel urbano. O primeiro é baseado principalmente em dados meteorológicos, informações das superfícies e da morfologia dos edifícios, e buscam simular o fluxo de balanço energético superficial por meio de relações estatísticas derivadas das observações. O segundo se refere aos esquemas de vegetação adaptados para incluir a variável urbana e o fluxo de balanço energético entre solo-vegetação-atmosfera. Já o terceiro, podendo ser de uma ou multicamadas, simula o dossel urbano com maior precisão física e incorporam a forma tridimensional dos edifícios (Masson, 2006).

A calibração de um modelo é essencial para uma boa execução de uma simulação. Ela é feita com dados de monitoramento, e quanto mais robusto for o modelo, mais calibrações são necessárias. Outro ponto relevante de simulações é a validação de resultados, pois um modelo pode fornecer previsões equivocadas, sendo que a incerteza, ou seja, a chance de erro, é definida através da validação, que compara os resultados do sistema com o fornecido pelo modelo (Gabriel et al., 2018; Gettelman & Rood, 2022).

Esses tipos de modelos são aplicáveis a partir do uso de *software* específicos que permitem a aplicação e simulação de diferentes interações e variáveis ambientais. Em relação a modelação e simulação microclimática, o *software* ENVI-Met vem sendo utilizado amplamente nas pesquisas para simular os fluxos entre a superfície-vegetação-atmosfera, permitindo uma análise dos efeitos das alterações no ambiente urbano no microclima (Cardoso, 2021).

Num contexto diferenciado, outro *software* gratuito e que merece destaque é o i-Tree, que fornece ferramentas de análise e avaliação de benefícios florestais urbanos e rurais, tendo o foco voltado para as interações solo-vegetação-atmosfera (i-Tree, 2022).

2.5.1 I-Tree

O i-Tree é um pacote de *software* projetado para avaliar os benefícios ecossistêmicos produzidos por árvores ou florestas. Lançado inicialmente em 2006, foi revisado pelo Departamento de Agricultura e Floresta dos Estados Unidos. Inicialmente

desenvolvido para ser aplicado apenas para o próprio território, entretanto o programa já se expandiu para mais de 130 países (Nowak et al., 2018).

Essa ferramenta de modelagem visa envolver a população na participação da gestão e valorização dos recursos florestais, na compreensão dos riscos das áreas verdes com o objetivo de auxiliar no manejo de florestas sustentáveis e promover a melhora na qualidade de vida humana e saúde ambiental. O programa é direcionado para toda gama da sociedade civil e entidades, desde estudantes até profissionais, vinculando o uso da tecnologia de fácil acesso com a resiliência e a melhora no manejo florestal (Nowak, 2020).

Nota-se que o i-Tree é uma ferramenta voltada para a modelagem da área vegetal e suas interações com a atmosfera e o solo. Podendo ser aplicado em áreas urbanas e rurais, também pode fornecer informações relevantes para a qualidade do ar, como a relação com a absorção e armazenamento de CO₂ e a interferência na dispersão de poluentes atmosféricos (Cimburova & Barton, 2020).

Composto por diversas ferramentas de desktop e online, permite que os usuários avaliem de forma fácil a condição florestal local, os serviços ecossistêmicos derivados das florestas, os riscos locais para a saúde humana e áreas verdes, as consequências de uma mudança na estrutura vegetal para os benefícios ecossistêmicos, as melhores espécies e localizações para determinado objetivo a ser alcançado (Nowak et al., 2018).

As ferramentas de desktop se dividem em três (i-Tree, 2021b):

- **i-Tree Eco:** fornece uma visão global dos aspectos das florestas ou das árvores em ambientes urbanos ou rurais. Utiliza dados de campo baseados em inventários completos de árvores para quantificar estrutura florestal urbana e serviços ecossistêmicos;
- **i-Tree Hydro:** é um modelo hidrológico urbano voltado para a vegetação. Projetado para modelar as interações entre a cobertura arbórea e as superfícies impermeáveis;
- **i-Tree Vue:** permite o uso de imagens de satélite gratuitamente para avaliar a cobertura da terra da área de estudo, podendo modelar cenário de plantios e benefícios atuais e futuros.

Para a realização desse trabalho, a ferramenta i-Tree Eco foi utilizada para alcançar os objetivos demandados pela pesquisa, e dentre as funcionalidades, essa versão permite a obtenção de uma série de relatórios, gráficos e tabelas que refletem as características e os benefícios ocasionados pela presença da floresta urbana.

Como padrão, o sistema fornece de resultados informações em forma de relatório sobre a estrutura e aspecto da floresta urbana, benefícios ambientais globalizados e individualizados de cada árvore, suscetibilidade a pragas, impactos na saúde e na qualidade do ar. Para isso, além das variáveis de entrada, o sistema busca dados meteorológicos e de monitorização da poluição atmosférica de estações próximas a área de estudo.

Assim, os resultados diretos fornecidos pelo i-Tree englobam informações estruturais da floresta urbana sobre o tamanho da população arbórea, espécies, composição, área foliar, condição das árvores e informações de biomassa. Além disso, são fornecidos dados e valores econômicos monetários dos benefícios ecossistêmicos urbanos, como escoamento superficial evitado, água interceptação da água da chuva, remoção de poluentes atmosféricos, sequestro e armazenamento de carbono, evaporação e transpiração, produção de oxigênio e efeitos na utilização de energia por parte dos edifícios ao redor.

2.5.2 ENVI-met

O ENVI-met é um *software* holístico de modelação e simulação tridimensional microclimático que integra diversos sistemas ambientais em um único modelo, considerando a multiplicidade de processos no âmbito superfície-planta-ar que são pautados nas leis fundamentais da dinâmica dos fluidos, termodinâmica, fisiologia vegetal e ciência do solo. Esse é um sistema voltado para a análise do microclima, simulando condições meteorológicas específicas para um determinado cenário urbano. Trata-se de uma ferramenta difundida mundialmente e é indicado para o planejamento urbano adequado ao clima, sendo alvo de estudo de mais de 3 mil publicações científicas e estudos independentes (Cardoso, 2021; ENVI-met, 2022).

Tendo um caráter multidisciplinar, o ENVI-met possui diferentes recursos que permitem a criação de projetos robustos que podem ser utilizados por diversos profissionais e pesquisadores ligados a temática de clima urbano. Tais recursos estão divididos e classificados na Tabela 4 abaixo (ENVI-met, 2022).

Tabela 4: Recursos do *software* ENVI-met (ENVI-met, 2022).

Recurso	Descrição
Análise solar	Permite simulações tridimensionais da radiação solar e do sombreamento e analisa a reflexão solar a partir do albedo das superfícies.
Dispersão de poluentes	Realiza a análise de dispersão, transformação e deposição de poluentes atmosféricos, simula o microclima de forma holística com a avaliação de gases reativos e não reativos e permite obtenção de perfis de emissões pelo tráfego.
Física dos edifícios	Permite uma simulação em alta resolução da temperatura das fachadas e paredes, além de modelagem de coberturas vegetais e suas interações com edifício.
Tecnologias verdes e azuis	Relacionado com vegetação e água, permite a simulação de evapotranspiração, absorção de CO ₂ e temperatura da folha com base na taxa de fotossíntese. Realiza cálculos de transferência de calor da camada vegetal e paredes e simula os efeitos de resfriamento provocado pela aspersão da água.
Fluxo de ventos	Permite a simulação tridimensional dos ventos e campos de turbulência, estimando as suas condições em cada ponto do modelo.
Conforto térmico	Promove a análise do conforto térmico humano em ambientes abertos, além de fornecer métricas biometeorológicas e de conforto térmico.
Biomecânica das árvores	Permite a análise da geometria das árvores individuais, considerando as condições locais e simulando os danos causados pelos ventos.
Humidade	Permite a análise por feedback entre diferentes tecnologias “Verdes e azuis” e o modelo microclimático.

Atualmente o ENVI-met já possui sua 5ª versão disponível, apresentando uma resolução horizontal que varia de um a dez metros, com períodos simulados de um a cinco dias. A dimensão da área do modelo depende da sua resolução espacial, tendo um limite máximo de 500 x 500 células na grade horizontal e 50 células na grade vertical, onde cada ponto da grade modelada é chamado de *grid box* (ENVI-met, 2022).

Por utilizar uma dinâmica tridimensional, os modelos do ENVI-met se estendem pelas direções horizontais (x, y) e vertical (z), sendo que sua estrutura básica possui três subdivisões (Silva, 2021; Simon, 2016):

- **Modelo Limite 1D (1D Boundary Model):** que define as condições de limite do modelo atmosférico 3D, iniciando no solo ($z = 0$) e estende-se até a altura de 2.500 metros. Com o intuito de se aproximar da realidade, esse modelo se integra ao longo da simulação até que os parâmetros verticais (latitude, longitude, data, duração da simulação, velocidade do vento, rugosidade, temperatura, humidade) atinjam um estado estacionário;

- **Modelo Atmosférico 3D (3D Atmospheric Model):** área tridimensional onde pode-se moldar a área urbana e simular os principais processos do clima, considerando a complexidade entre as superfícies, vegetação, edificações e atmosfera. Uma área circundante ao modelo central, chamada área de aninhamento (*nesting area*), tem o objetivo de estabilizar as condições ao redor, evitando efeitos de bordas que afetem os dados de saída;
- **Modelo de Solo 3D (3D Soil Model):** está associado a parte inferior do modelo (profundidade de 5 metros, com $z = -5$) e visa contabilizar as interações hidrológicas e termodinâmicas do solo superior com atmosfera.

Na Figura 5 abaixo é apresentada a estrutura básica dessas subdivisões em um modelo do ENVI-met. Para que uma área seja representada dentro do *software* é necessário que ela seja reduzida em células de grade (*grid box*). Quanto menor, melhor será a resolução do modelo, mas em compensação, mais células serão necessárias para cobrir toda a área, aumentando o tempo de processamento e o armazenamento necessário (Cardoso, 2021).

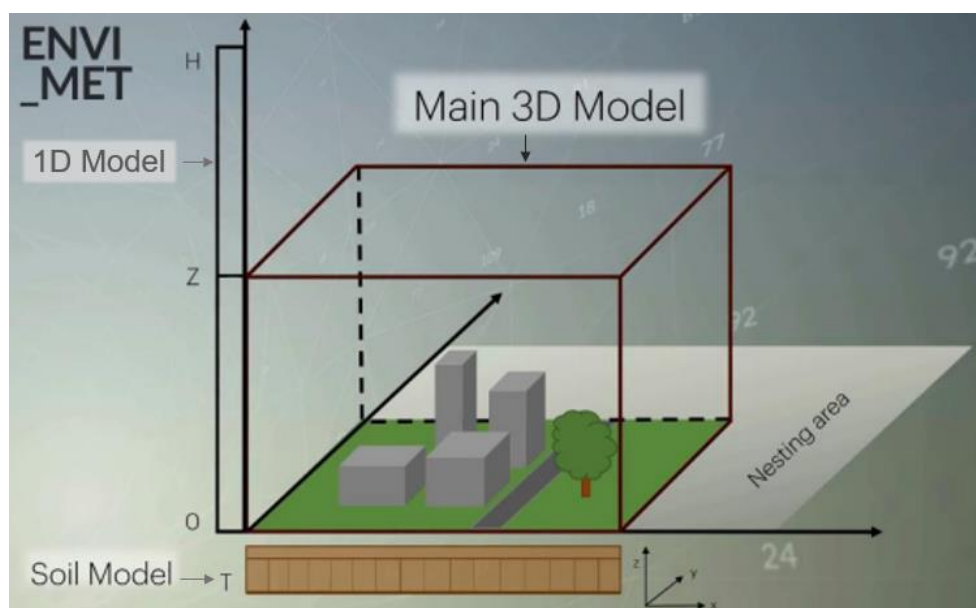


Figura 5: Estrutura do modelo do ENVI-met (adaptado ENVI-met, 2022).

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo é apresentado a estrutura empírica do trabalho, especificando primeiramente a área de estudo, onde o município de Bragança-Pt é caracterizado, e mapas e recortes que descrevem a área específica a ser trabalhada dentro da zona industrial da referida cidade.

Logo após, é introduzida a explicação sobre os materiais e métodos utilizados para a definição dos parâmetros de entrada, a aplicar nas simulações ambientais, nos *software* i-Tree e ENVI-met. Nesse contexto destaca-se as variáveis utilizadas, assim como o processo de levantamento de dados e obtenção de resultados.

3.1 Área de Estudo – Bragança-PT

O concelho de Bragança está localizado na região nordeste de Portugal, é rodeada pelas Serra de Montesinho e Serra da Nogueira e é considerada uma área Transmontana. Possui uma extensão de 1.173,9 km² e uma população residente de 34.589 habitantes, alcançando uma densidade populacional de 29,5 hab/km². Bragança é um dos maiores concelhos de Portugal constituído por 39 freguesias, sendo que a capital é a cidade que possui o mesmo nome, Bragança (INE, 2021).

Essa é uma região com clima temperado com características mediterrâneas, em que a escala regional é afetada pela continentalidade e a escala local é afetada pelo relevo complexo montanhoso e a proximidade com massas de água, o rio Fervença, por exemplo, atravessa a cidade influenciando mais significativamente na vida dos residentes. O verão é seco, curto e quente e o inverno frio, úmido e longo (Bragança, 2021).

Em sua zona urbana Bragança possui uma diversidade de infraestrutura, que inclui bairros com edificações uni e plurifamiliares, espaços verdes e construções públicas. A indústria não é uma atividade relevante na região, sendo que, na cidade, essa atividade se concentra na zona industrial das Cantarias e em outras zonas industriais em contexto rural. A economia é sustentada basicamente pela atividade comercial e pela prestação de serviço (Menezes, 2017).

3.1.1 Zona Industrial das Cantarias

A área específica de estudo se localiza na zona industrial das Cantarias, na região sudoeste da cidade, e é composta maioritariamente por comércios e indústrias, tendo poucas zonas verdes e extensas áreas asfaltadas. Possui uma área total de 970 mil m²,

onde 830 mil m² são destinados para as instalações (Alves, 2020). Na Figura 6 abaixo, é mostrado um mapa da zona urbana de Bragança, sendo que a área industrial é destacada pela cor amarela, e a área específica de estudo em vermelho.

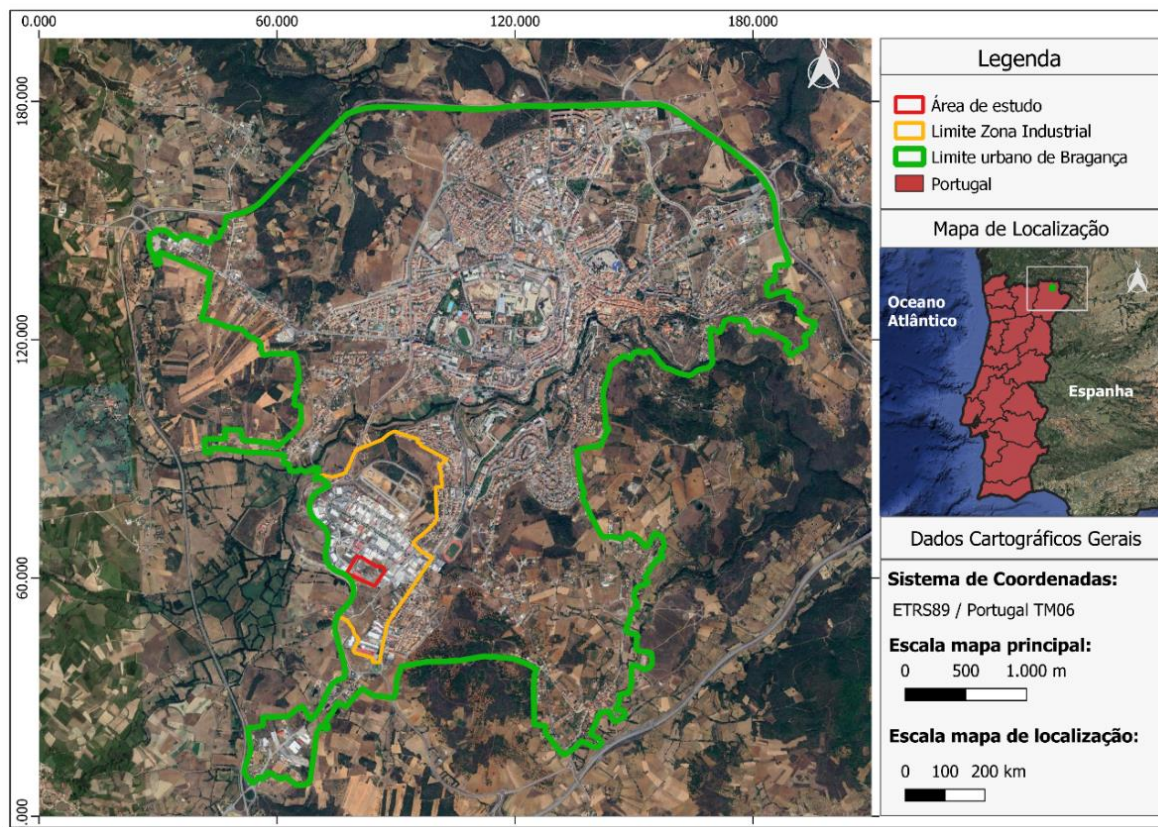


Figura 6: Área de estudo.

Para a viabilidade da realização desse estudo foi escolhida uma pequena área de aproximadamente 4,3 hectares (indicado em vermelho na Figura 6), delimitada pelas coordenadas 39°5'21"N e 9°8'45"W, 39°5'17"N e 9°8'35"W, 39°5'13"N e 9°8'39"W, 39°5'16"N e 9°8'48"W. Considerando os *software* a serem utilizados e o tempo de realização da pesquisa, o local foi escolhido por ter sido foco de um projeto INTERREG POCTEP INDNATUR.

Esse projeto, liderado pela Universidade de Valladolid, foi desenvolvido em parceria com entidades das regiões do norte de Portugal, Castilla e León na Espanha. Teve o objetivo promover a reabilitação de áreas industriais, visando a adaptação às mudanças climáticas e a melhora na qualidade de vida a partir de soluções baseadas na natureza (INDNATUR, 2021).

Uma das áreas foco do projeto foi a zona industrial das Cantarias, em Bragança. No local diversas calçadas foram revitalizadas, sendo incorporadas estruturas de drenagem urbana, como concretos permeáveis e áreas verdes. Também houve a introdução de exemplares arbóreos em diversos pontos da região, favorecendo a formação de corredores ecológicos.

A área em que foram realizadas as simulações com os modelos está localizada no interior da zona industrial de Bragança, e recebeu parte das intervenções do projeto INDNATUR. Portanto, foi considerado um local ideal para a realização das análises dos efeitos de SBN, principalmente no que tange a vegetação urbana, em regiões industrializadas, cumprindo, assim, com o objetivo da pesquisa. Na Figura 7 abaixo destaca-se a área foco desse trabalho.

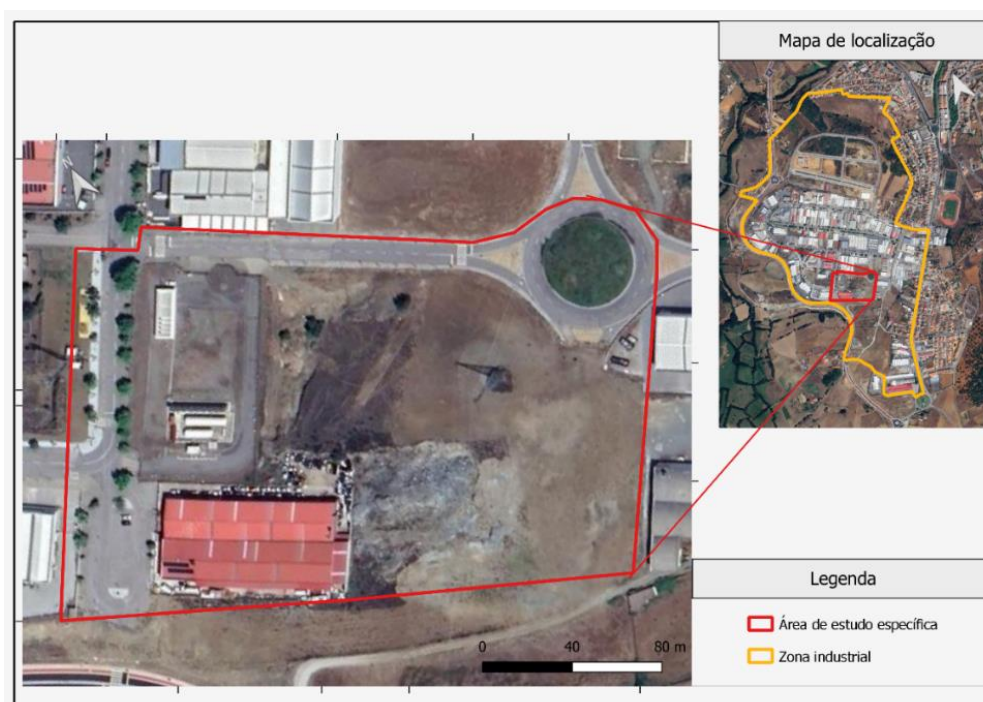


Figura 7: Área de estudo específica (Google Earth, 2022).

3.2 Ferramenta i-Tree

O *software* i-Tree, como já mencionado anteriormente, busca avaliar os benefícios dos serviços ecossistêmicos gerados por uma ou mais unidades de árvores. No próprio site do sistema é possível acessar diversos documentos que auxiliam no planejamento completo e na confecção de um projeto, o que facilita sua aplicação.

Para essa pesquisa foi utilizada a 6ª versão do i-Tree Eco, que além de possuir integração com várias cidades da Europa, se baseia em um inventário de árvores para a obtenção de resultados. Na realização desse trabalho fez-se um inventário completo das árvores presentes na área de estudo, ou seja, todos os exemplares arbóreos presentes nos espaços públicos foram avaliados. A porção de árvores que se encontravam em espaços privados não foram avaliadas.

3.2.1 Levantamento de Dados e Variáveis de Entrada

A coleta dos dados se deu no dia 12 de julho e entre os dias 16 e 21 de outubro de 2022. O i-Tree possui duas variáveis primárias de entrada obrigatórias, espécies das árvores e diâmetro da altura do peito (DAP). Apenas com essas informações é possível obter os resultados do i-Tree, porém, com a inserção das variáveis secundárias recomendadas é possível obter resultados mais condizentes com a realidade local.

Em relação às variáveis primárias, a espécie se refere essencialmente ao nome científico de cada exemplar arbóreo. Para essa coleta utilizou-se de dados fornecidos pela Câmara Municipal e dados coletados em outros trabalhos acadêmicos, como o da (Pança, 2021)

Já para a medida do DAP, utilizou-se uma fita métrica padrão para medir manualmente os perímetros dos troncos das árvores a uma altura de 1,30 metros, Figura 8. Essa altura é fixada pela literatura por expressar bem a relação com o volume da árvore. A partir dessas medidas converteu-se o perímetro (P) para o diâmetro (D) com a equação

$$D = \frac{P}{\pi}$$

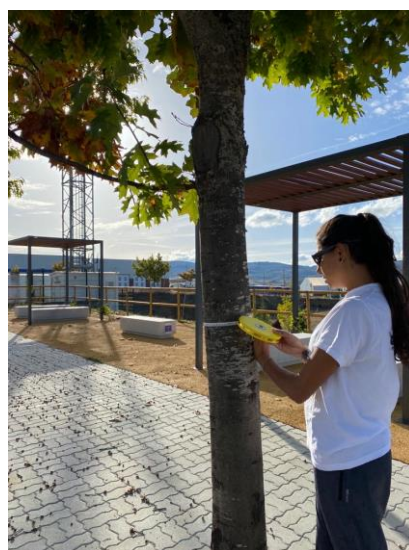


Figura 8: Medição do DAP.

As variáveis secundárias recomendadas englobam o uso da terra, altura total das árvores, altura até a base da copa, largura da copa, porcentagem de copa faltando e exposição à luz da copa. Esses parâmetros influenciam nos resultados foco dessa pesquisa, sequestro de carbono e remoção de poluentes do ar, e por isso, também foram coletados.

A medição das variáveis de altura total da árvore e altura até a base da copa foram obtidas através do uso da vara telescópica, um instrumento para medição de exemplares arbóreos (Figura 9). A largura da copa, expressa nas medições norte-sul e leste-oeste, foi obtida com auxílio da fita métrica. Para o uso da terra considerou-se como comercial/industrial (classe C dentro do sistema) pelas características do local. Para a porcentagem de copa faltando, por se tratar de árvores saudáveis, seguindo recomendações do próprio i-Tree, considerou-se um padrão de 10% a 15% (classe 4 dentro do sistema).



Figura 9: Medição da altura de uma árvore com a vara telescópica.

Por fim, a exposição à luz da copa foi medida seguindo recomendações do próprio *software*, onde subdivide-se as copas das árvores em cinco partes: as duas primeiras localizam-se na parte frontal da copa, a terceira e quarta na parte posterior e a quinta no topo, como demonstrado na Figura 10. A partir disso, observa-se a quantidade de lados que é atingida pela luz solar nos horários de nascer do sol, meio-dia solar e no pôr do sol.

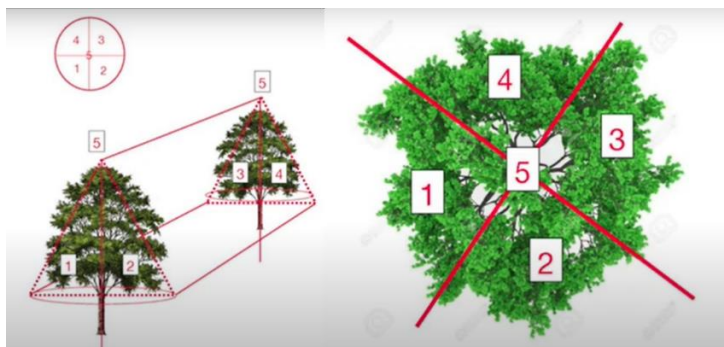


Figura 10: Metodologia de divisão da copa para medição de exposição à luz solar (i-Tree, 2021a).

A entrada de dados no sistema dessa variável se baseia em códigos de 0 a 5, que representam a quantidade de partes da copa que recebe luz do sol, sendo que 0 significa que nenhum lado recebe radiação solar, e 5 que todos os lados recebem.

A coleta de todos esses dados se deu a partir do preenchimento de uma planilha digital com os valores medidos em campo. Posteriormente, os registros foram tratados para que se adequem ao formato de importação do *software* i-Tree Eco.

3.2.2 *Trabalhando no i-Tree*

Um guia, fornecido pelo próprio *software*, pode ser utilizado para auxiliar na construção de um projeto no i-Tree. Após as etapas de planejamento, coleta e tratamento de dados, foi criado um projeto no sistema baseado em um inventário completo de árvores da área de estudo.

Para isso, inicialmente foram imputadas as definições do projeto, que englobam: informações sobre configurações básicas de identificação do projeto; localização, onde é necessário indicar informações sobre a cidade da área de estudo, além de estações meteorológicas e de poluição atmosférica na proximidade; e por fim, as opções de coleta de dados, onde foram selecionados quais parâmetros das informações das árvores seriam coletados.

Os dados meteorológicos e de poluição atmosférica são coletados diretamente pelo sistema a partir de estações pré-definidas e já registradas no i-Tree. Sendo assim, não há a possibilidade da inserção de tais informações no projeto pelo usuário. Para essa pesquisa, a estação meteorológica e de poluição atmosférica mais próxima da área de estudo se localiza em Ourense, a aproximadamente 180 km de Bragança-PT.

Após a definição das configurações do projeto, fez-se a importação da planilha digital previamente preparada que continha os dados de coleta. Para que essa importação

funcionasse de forma correta, o próprio sistema exige o pareamento das informações de cada coluna, o que facilita a assertividade das informações. Após a importação de dados as informações são verificadas pelo sistema, e após a validação da inexistência de erros de formato pode-se seguir para a etapa de simulação.

A simulação do i-Tree é feita na aba de ‘Relatórios’ (*report* em inglês). Os dados são submetidos para processamento, e após certo período (que dependerá do volume de dados a serem processados) recebe-se uma notificação por e-mail, indicando a possibilidade de gerar os resultados.

Os resultados são gerados no servidor do provedor do *software*, e a partir da função de ‘Rastrear e Recuperar Resultados’ (*Track & Retrieve Results* em inglês), os resultados são disponibilizados na tela *report* do sistema para o usuário, em uma aba como demonstrado na Figura 11.

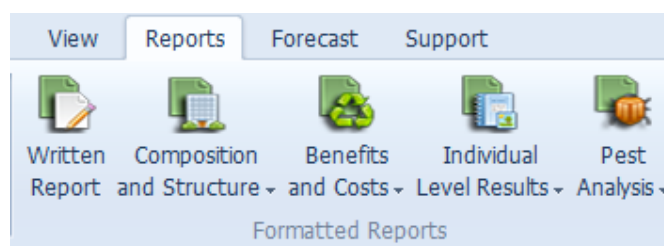


Figura 11: Tipos de resultados disponibilizados pelo i-Tree (i-Tree, 2021b).

Tais resultados são segregados em cinco categorias: Relatório Escrito (*Written Report* em inglês), que fornece um relatório resumido dos resultados, incluindo a composição, estrutura e serviços ecossistêmicos fornecidos pelas árvores; Composição e estrutura (*Composition and Structure* em inglês), que fornece informações sobre os aspectos estruturais da área de estudo, incluindo tamanho da população, composição das espécies, área foliar, condição das árvores e informações sobre biomassa por espécie ou por estrato; Benefícios e Custos (*Benefits and Costs* em inglês), que expressa os benefícios ambientais que são proporcionados pela arborização urbana. Os resultados são fornecidos em unidades funcionais e em valores associados; Resultado de Nível Individual (*Individual level results* em inglês), que apresenta a representatividade de cada exemplar arbóreo em relação a composição, estrutura, benefícios e custos; e por fim, Análise de Pragas (*Pest Analysis* em inglês), que inclui um relatório sobre a suscetibilidade a pragas conhecidas pelas árvores.

O i-Tree também fornece valores associados aos benefícios advindos da área simulada. Para isso, ele utiliza como base valores pré-definidos no sistema dos benefícios avaliados, como preço da tonelada de carbono e do quilo de cada poluente removido.

Uma outra ferramenta explorada no i-Tree foi a *Forecast* (Previsão, em português), que permite simular a evolução da vegetação urbana estudada por um período pré-determinado. Para isso, são necessários a inserção de dados referentes ao número de anos a ser simulado, dias por ano sem gelo, base anual da taxa de mortalidade das árvores, saudáveis ou não. Na Tabela 5 abaixo é possível identificar os valores dos parâmetros utilizados para realizar a previsão dos cenários desta pesquisa.

Tabela 5: Parâmetros utilizados na função *Forecast*.

Parâmetros Básicos	Valores
Número de anos previstos	30
Dias por ano sem geada	303
Taxa de mortalidade anual básica para árvores saudáveis	1,0%
Taxa de mortalidade anual básica para árvores doentes	5,0%
Taxa de mortalidade anual básica para árvores morrendo	10,0%

Decidiu-se realizar uma previsão de 30 anos levando em consideração que seria um tempo médio de desenvolvimento das árvores que foram plantadas recentemente. Além disso, para os dias do ano sem geada apenas desconsiderou-se os dias correspondentes aos meses mais severos de inverno, dezembro e janeiro. Sobre as taxas de mortalidade considerou-se que o local recebe manejo adequado por parte da câmara, e que não há pressões externas consideráveis, mesmo sendo uma região industrial. Sendo assim, adotou-se os valores de 1% para árvores saudáveis, 5% para árvores doentes e 10% para árvores já no estágio final de vida, considerando sugestões do próprio sistema.

Cada um dos relatórios gerados foi analisado, sendo que apenas as informações mais relevantes, que convergiam para o tema dessa pesquisa, foram incorporadas para a etapa de resultados e discussões.

3.2.3 Cenários trabalhados no i-Tree

Foram considerados no i-Tree três cenários distintos. O primeiro (Cenário 0) refere-se a uma situação hipotética onde não existe nenhuma árvore na área de estudo. Nesse sentido, como os *inputs* de parâmetros no sistema referem-se apenas a dados

medidos em campo de cada exemplar arbóreo, não há o que ser simulado, já que não há árvores para se considerar.

Já o segundo cenário, Cenário 1, refere-se à situação existente na área de estudo com todas suas componentes vegetais de grande porte. Nesse caso, a coleta de dados descrita no item 3.2.1 foi completamente aplicada para todas as árvores presentes na região. Para esse cenário também foi possível realizar a previsão para 30 anos futuros, obtendo resultados quantitativos referentes aos possíveis benefícios ecossistêmicos que seriam obtidos caso a área fosse mantida na conformidade atual.

Por fim, o último cenário, Cenário 2, refere-se a uma situação hipotética onde parte da área de estudo seria convertida em uma zona verde funcional, mais especificamente, em um parque ecológico urbano com áreas verdes de aproximadamente 1,9 hectares para uso, principalmente, dos trabalhadores e frequentadores da Zona Industrial das Cantarias. Tal projeto foi proposto para fins dessa pesquisa, considerando uma área da região não utilizada e que poderia ser mais bem aproveitada. Na Figura 12 abaixo é apresentado um mapa locacional da área proposta para sofrer intervenção.



Figura 12: Mapa locacional da área proposta para sofrer intervenção.

Nesse contexto, além de parte dos parâmetros coletados para o Cenário 1, foram inseridos mais dados referentes ao parque urbano proposto. Para isso, apenas quatro parâmetros foram considerados para a simulação desse cenário: diâmetro na altura do peito, uso da terra, altura total das árvores e saúde da copa (porcentagem de dieback).

De forma geral, foram considerados a adição de 124 exemplares arbóreos, de acordo com projeto proposto, tendo cada um deles os quatro parâmetros descritos acima. Os exemplares escolhidos basearam-se em espécies já existentes na área e em estudos sobre florestas urbanas, como feito por Alegria (2018). O quantitativo de árvores foi resultado da construção do desenho do projeto proposto.

Os dados coletados em campo e os utilizados para compor os cenários 1 e 2 estão apresentados no Anexo.

3.3 Ferramenta ENVI-met

O ENVI-met é um *software* que permite a modelação e simulação microclimática urbana, integrando diferentes sistemas que atuam no ambiente. Para isso é necessário construir um modelo que represente todas as estruturas físicas que compõem a área de estudo. Neste trabalho, esse modelo foi construído com base em observações da área de estudo e informações obtidas com ferramentas de sensoriamento remoto.

A versão do sistema a ser utilizada é a 5ª, e por ser um *software* que demanda uma licença, possui custo monetário envolvido para o uso de todos os recursos disponíveis. Para o cumprimento do objetivo central da pesquisa o foco se deu nas análises em relação à qualidade do ar.

A modelação de uma área depende da definição dos elementos que integram o local estudado. Logo, as características do terreno, dos edifícios, da vegetação, do solo e das superfícies foram coletadas e inseridas na composição do modelo. Esse *software* também necessita de informações meteorológicas para que as simulações ocorram, e para os resultados pretendidos acerca de dispersão e remoção de poluentes, dados de concentrações de poluentes atmosféricos também são demandados.

De forma geral, o *software* possui um menu, chamado *Headquarter*, que agrega todas as funcionalidades do sistema. Nele é possível acessar todas as ferramentas disponíveis para a construção e simulação do modelo a ser analisado, além de agregar diversos *software* que no fim compõem o sistema ENVI-met. As principais abas de funções do *software* são a “ENVI-met” (Figura 13) e “Data and Settings” (Figura 14).

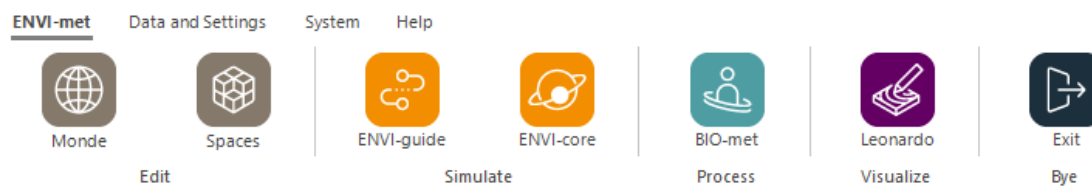


Figura 13: Ferramentas da aba “ENVI-met”.

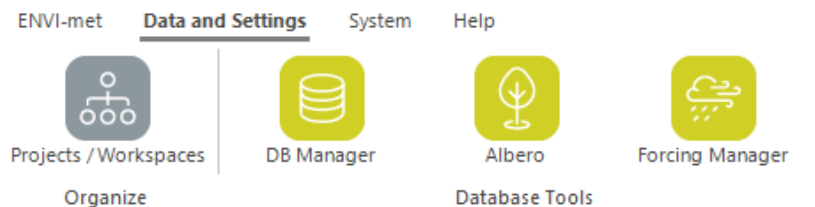


Figura 14: Ferramenta da aba "Data and Settings".

Na Tabela 6 abaixo é apresentada uma descrição resumida de cada uma das ferramentas indicadas acima.

Tabela 6: Ferramentas existentes no ENVI-met.

Ferramenta	Descrição
Monde	Aplicação que permite pré-processar e digitalizar a área a ser modelada, carregando diferentes tipos de arquivos, ou desenhando sua própria área.
Spaces	Aplicação para a modelação da área a ser simulada, e é inserido todos os elementos que compõe a malha urbana da área de estudo (prédios, vegetação, fontes de emissão de poluentes e elevação do terreno).
ENVI-guide	Aplicação para a definição das configurações básicas e opcionais para a realização da simulação.
ENVI-core	Aplicação para a execução da simulação.
Bio-met	Ferramenta de pós-processamento que fornece opções para cálculo de índices de conforto térmico humano.
Leonardo	Nessa ferramenta, os resultados gerados na simulação podem ser utilizados para criação e análise de mapas 2D ou 3D.
Projects/Workspaces	Destinado para criação, edição de workspaces e organização de projetos.
DB Manager	Aplicação para editar e criar elementos que serão utilizados na área modelada (Spaces).
Albero	Para edição das propriedades das plantas 3D ou desenhar novas.
Forcing Manager	Permite criar arquivos de forçamento importando seus dados de medição pré-formatados.

Para a realização dessa pesquisa foram utilizadas apenas as ferramentas Spaces, ENVI-guide, ENVI-core, Leonardo e Projects/Workspaces, pois essas foram as ferramentas necessárias para cumprimento do objetivo da pesquisa.

3.3.1 Construindo o modelo no ENVI-met

A área a ser simulada no ENVI-met é construída na ferramenta “Spaces”. Nela é possível construir o modelo em formato INX, que será utilizado no “ENVI-guide” para que a simulação ocorra no “ENVI-core”.

O modelo pode ser construído na visão 2D e uma das funcionalidades do “Spaces” permite a transformação e visualização do cenário trabalhado em 3D. A construção da área é realizada em módulos denominados de *Grids*, grades em português, e a resolução máxima permitida pela malha de grades que caracteriza a modelação é de 0,5 x 0,5 x 0,5 metros, para os planos X, Y e Z. Isso resulta em uma imagem pixelada, que quanto menor a resolução, menor o grau de robustez de detalhamento do modelo.

Para essa pesquisa configurou-se a resolução da área para 5 metros nos planos X e Y, e 1 metro para o plano Z para cada *grid*. As dimensões aplicadas no modelo foram 74 grids para o eixo X, 55 grids para o Y e 30 para o Z. Além disso, a referência do nível de elevação ao nível do mar foi definida como 740 metros.

A inserção de recursos que compõe a malha urbana na ferramenta “Spaces” é feita a partir de diferentes abas que permitem a construção de sete elementos distintos que são descritos na Tabela 7 abaixo. Todos os elementos já existentes podem ter suas configurações editadas, ou ainda podem ser adicionados diferentes recursos na ferramenta DB Manager, e as plantas 3D na ferramenta Albero.

Tabela 7: Elementos presentes da ferramenta "Spaces" do ENVI-met.

Elemento	Descrição
<i>Buildings</i> (edifícios)	São os elementos que representam as construções. São definidos em 3 dimensões e pode-se editar os materiais das paredes e tetos. Existem uma série de materiais padronizados no sistema que podem ser utilizados para definição dos edifícios inseridos, ou podem ser criados novos materiais.
<i>Vegetation</i> (vegetação)	Essa categoria subdivide-se em “Simple Plants” (plantas simples), que representam a cobertura do solo de vegetação bidimensional, e em “3D Plants” (plantas 3D), que busca representar árvores individuais de forma mais elaborada no plano tridimensional. Existem diversas plantas disponíveis no sistema para serem utilizadas, mas pode-se criar novas.
DEM	Utilizado para modelação de características topográficas.
<i>Soil and Surface</i> (solo e superfície)	Define a composição do solo e da superfície em até 4,5 metros de profundidade, possuindo diversos tipos de solos diferentes padronizados, podendo ainda ser adicionados novos tipos.
<i>Sources</i> (fontes)	Busca representar fontes de poluição e emissões antropogênicas ou advindas de fontes de água. Pode ser definido como ponto, linha ou área e pode ser especificado de acordo com a necessidade do usuário.
<i>Single Walls</i> (Paredes simples)	Utilizado para detalhar a composição dos edifícios, como janelas e toldos, podendo ser aplicado nos planos X, Y e Z.

Na construção dos modelos da área de estudo dessa pesquisa utilizados para realização das simulações foram utilizados os seguintes elementos da ferramenta “Spaces”: *Buildings*, *Vegetation* e *Soil and Surface*.

A construção desse e dos outros cenários se deu com base em outros trabalhos já realizados na área com a mesma ferramenta, como por exemplo, Alves, (2020).

3.3.1.1 Cenário 0

O primeiro cenário construído no ENVI-met foi o Cenário 0, que representa a situação hipotética onde não existe nenhum exemplar arbóreo na área de estudo. Nesse caso foram representados todos os outros elementos que compunham a malha urbana, incluindo as edificações, cobertura do solo e a cobertura vegetal. O modelo 3D obtido desse cenário está apresentado na Figura 15 abaixo.

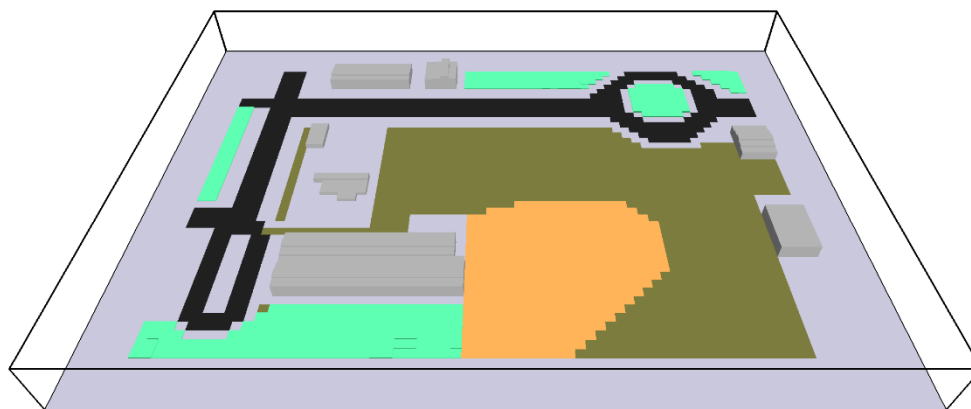


Figura 15: Representação 3D do Cenário 0.

Os elementos que compõe o Cenário 0 representado acima consiste em: uma superfície de concreto (cem cinza), onde também foi adicionado a *nesting area* ao redor do modelo dessa mesma cobertura; uma superfície de asfalto (preto) representando as ruas; uma cobertura de grama de 25 a 50 cm (verde claro); uma superfície de solo não semeado franco arenoso (marrom); uma superfície de solo de tijolos quebrados (laranja); e por fim, edifícios (cinza) sendo representados pelos elementos de cota mais elevada.

3.3.1.2 Cenário 1

O segundo cenário construído, Cenário 1, por sua vez, é o mais representativo em termos da realidade atual. Sendo assim, é composto basicamente por todos os elementos presentes no Cenário 0, com a adição de plantas 3D que representam os exemplares arbóreos presentes na área de estudo. O modelo 3D obtido desse cenário está apresentado na Figura 16 abaixo.

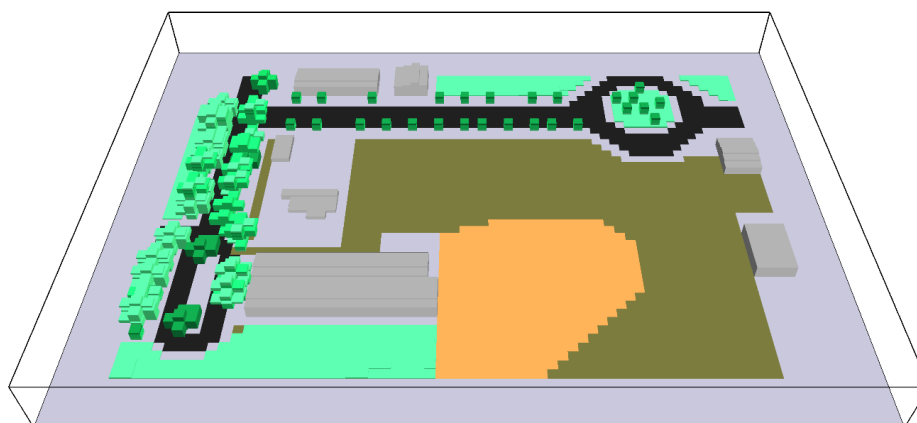


Figura 16: Representação 3D do Cenário 1.

Os elementos arbóreos adicionais presentes na representação acima do Cenário 1 consistem em 58 exemplares arbóreos segregados em: 28 espécimes de *Liquidambar*

styraciflua (liquidâmbar) jovens; 12 espécimes de *Quercus rubra* (carvalho vermelho americano); 12 espécimes de *Platanus occidentalis* (plátano); 2 espécimes de *Celtis australis* (lódão-bastardo); 2 espécimes de *Liriodendron tulipifera* (árvore das tulipas) 1 espécime de *Aesculus hippocastanum* (castanho da índia); 1 espécime de *Zanthoxylum clava-herculis* (árvore dor de dente).

O mesmo cenário também foi utilizado nas simulações futuras de 2052, entretanto, atentou-se à adaptação dos espécimes indicados acima, para que representasse árvores em um estágio de desenvolvimento mais avançado. Não foi considerada mortalidade dos espécimes.

3.3.1.3 Cenário 2

O terceiro cenário trabalhado, Cenário 2, agrega todos os elementos presentes nos outros dois contextos apresentados acima, além de outros recursos necessários para a composição da situação hipotética da transformação de uma área vaga e sem função social, em uma zona verde funcional. O modelo 3D obtido desse cenário está apresentado na Figura 17 abaixo.



Figura 17: Representação 3D do Cenário 2.

A área proposta consiste na ocupação do espaço vago composto principalmente por solo exposto. Também foi modelado a continuação da via que se segue na rotunda, a partir da suposição de uma expansão viária na região.

Para tal proposta foi previsto a inserção de um caminho de pedestres cruzando toda a área de tijolos e mais 124 exemplares arbóreos estratificados em: 33 *Liquidambar styraciflua*; 19 *Cupressus macrocarpa* (cipreste), implantados nas bordas; 19 *Pinus strobus* (pinheiro), implantados também nas bordas; 6 *Liriodendron tulipifera*; 12

Castanea sativa (castanha portuguesa); 7 *Acer saccharinum*; 9 *Quercus rubra*; 9 *Platanus occidentalis*; 10 *Quercus robur*.

O objetivo de diversificar as espécies é aumentar o aspecto da biodiversidade. Além disso, outros elementos como bancos, mesas e lixeiras também fazem parte da proposta, já que tais elementos permitem que a área se torne funcional, principalmente para os trabalhadores e frequentadores da região. Para fins de modelação, tais elementos foram representados com uma cobertura de solo diferente.

Assim como no Cenário 1, esse modelo também foi utilizado nas simulações futuras de 2052, entretanto, atentou-se também à adaptação dos espécimes indicados acima, para que representasse árvores em um estágio de desenvolvimento mais avançado. Não foi considerada a mortalidade dos espécimes.

3.3.2 *Parâmetros de Entrada para Simulação*

A definição dos parâmetros necessários para a realização da simulação é feita na ferramenta “ENVI-guide”. Nela é necessário, além de inserir os valores de cada parâmetro obrigatório ou opcional, carregar o arquivo da área modelada em formato INX.

Existem duas seções de inserção de parâmetros: a “Mandatory Sections” (Seção Obrigatória), que engloba as configurações gerais e os parâmetros meteorológicos; e a “Optional Sections”, onde pode-se adicionar parâmetros referentes a oito aspectos distintos (solo, radiação, edifícios, plantas, temporalidade, arquivos de saída e configurações mais robustas específicas).

As configurações gerais da “Mandatory Sections” são exigidos o preenchimento de campos sobre a data, hora de início e duração da simulação; nome da simulação, local de salvamento do arquivo SIMX, carregamento da área a ser modelada, e por fim, a indicação do número de processadores computacionais que serão utilizados no processamento dos dados. Nessa seção, foram utilizadas duas configurações de temporalidade das simulações, uma referente aos três cenários trabalhados para o ano de 2022, e outra referente a previsão de 30 anos futuros (2052). Os nomes e a área modelada foram alterados a cada cenário trabalhado, já quanto ao número de processadores considerados, utilizou-se o padrão de “Single Core” (Núcleo Único) para todas as simulações.

Na Tabela 8 estão indicadas as configurações gerais de temporalidade utilizadas para as simulações no ano de 2022 e nas previsões futuras de 30 anos.

Tabela 8: Parâmetros das configurações gerais utilizados na "Mandatory Sections" do ENVI-guide.

Parâmetro	Valor Inserido
Data de início	11/07/2022 (para atualidade) ou 11/07/2052 (para previsão)
Hora inicial	00:00 h
Duração da simulação	25 horas

Já os parâmetros meteorológicos obrigatórios podem ser definidos de três maneiras distintas em relação as condições de contorno meteorológicas. A primeira, "Simple Forcing" (Forçamento Simples), é mais simples de ser utilizado e é recomendado quando se possui dados meteorológicos limitados. O segundo, "Full Forcing" (Forçamento total), é mais robusto e é recomendado quando se deseja uma maior precisão, pois necessita de dados mais completos. Por fim, o "Other LBC" agrega opções de versões mais antigas do sistema e definem principalmente as condições das fronteiras laterais do modelo.

Para essa pesquisa utilizou-se a opção de "Simple Forcing", onde é exigido os parâmetros de temperatura máxima e mínima, e seus respectivos horários e valores de maior e menor humidade relativa do ar, e seus respectivos horários. Outros parâmetros de velocidade e direção do vento e condições de radiação, também podem ser inseridos para uma maior precisão do modelo. Optou-se por utilizar os parâmetros de temperatura, humidade relativa do ar e vento para as simulações dos cenários propostos. Os valores utilizados nessa seção podem ser observados da Tabela 9 abaixo.

Tabela 9: Parâmetros meteorológicos utilizados na "Mandatory Sections" do ENVI-guide.

Parâmetro	Valor Inserido
Valor e horário da temperatura máxima	38,0 °C e 15:00 h
Valor e horário da temperatura mínima	18,0 °C e 06:00 h
Valor e horário da humidade relativa do ar máxima	53,0 % e 06:00 h
Valor e horário da humidade relativa do ar mínima	12,0 % e 17:00 h
Velocidade do vento	2,7 m/s
Direção do vento	270 °

Os valores de máximas e mínimas indicados acima, em relação a temperatura e humidade relativa do ar, foram obtidas a partir de estações meteorológicas fixas simples instaladas na área de estudo exclusivamente para esta pesquisa. Foram instalados três sensores em diferentes pontos da área de estudo, que mediram continuamente a temperatura local e a humidade relativa do ar em intervalos fixos de cinco minutos. Tais sensores estiveram presentes cerca de sete meses no local da pesquisa. Já os valores dos parâmetros referentes ao vento, foram estimados a partir de consultas a dados meteorológicos da cidade de Bragança disponibilizados pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera em julho de 2022 (IPMA, 2022).

Ainda no que se trata dos parâmetros de entrada, utilizou-se um aspecto da “Optional Sections”, referente à poluição atmosférica. Nessa seção definiram-se as configurações gerais de poluentes para operação de “Multi Pollutant” (Multi Poluentes), onde são considerados cinco poluentes atmosféricos de fundo padrões (NO, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2,5}) e pode ser adicionado mais um à livre escolha do usuário. Além disso, também optou-se por ativar o módulo de “Dispersion and Active Chemistry” (Dispersão e Química Ativa), que permite considerar nas simulações as reações que ocorrem na atmosfera em termos do NO, NO₂ e O₃. Os valores das concentrações adotados para cada poluente estão expressos na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10: Valores de poluente adotados na seção de poluentes da "Optional Sections".

Poluente	Valores de Concentrações
NO	0,0 µg/m ³
NO ₂	2,0 µg/m ³
O ₃	65,0 µg/m ³
PM ₁₀	3,0 µg/m ³
PM _{2,5}	1,0 µg/m ³
CO (escolha do usuário)	249,0 µg/m ³

Visando igualar os parâmetros utilizados nas simulações do i-Tree, não foi considerado nenhum valor para concentração do poluente NO (óxido nítrico), já que no i-Tree não se utiliza tal poluente. Nesse sentido, também foi adicionado o poluente CO (monóxido de carbono) que estava presente nas simulações do primeiro *software* utilizado. Por fim, por limitações do ENVI-met, que não aceita a inserção de mais de um poluente extra além dos padronizados, o poluente SO₂ (dióxido de enxofre) não foi

considerado nas simulações, como ocorreu no i-Tree. Entretanto, ressalta-se que os valores de tal poluente não eram tão representativos para as análises devido aos seus baixos valores de concentrações.

Por fim, todos os valores acima utilizados foram obtidos a partir do tratamento de dados extraídos diretamente do *software* i-Tree, que mantém um registro dos valores horários de cada poluente considerado em um intervalo de um ano. Ressalta-se que tais concentrações foram consideradas como concentrações de poluentes de fundo, não tendo assim, uma fonte específica de emissão.

Após a finalização das definições de todos os parâmetros de entrada, obrigatórios e opcionais, é gerado um arquivo em formato SIMX. Tal arquivo será utilizado na etapa seguinte de execução da simulação.

3.3.3 *Trabalhando as simulações no ENVI-met*

Todas as simulações do referido *software* ocorrem na ferramenta “ENVI-core”. Para isso é preciso carregar o arquivo em formato SIMX gerado na etapa anterior, checar as informações, se necessário realizar ajustes, e por fim, correr a simulação. O processamento dessa etapa demanda um tempo relativamente extenso, que é influenciado pelo tamanho e a resolução da área a ser modelada, e pelo tempo de duração definido para simulação. O tempo médio gasto para correr cada uma das simulações desta pesquisa foi de aproximadamente 30 horas.

Com a finalização da execução da simulação diversos arquivos são gerados em formatos EDT e EDX referentes a diversos *outputs* disponibilizados pelo sistema, como dados atmosféricos, de radiação, de solo, dentre outros. Os arquivos em formato EDX devem ser utilizados na ferramenta “Leonardo” para obtenção de mapas 2D e 3D de diferentes dados que podem ser selecionados dentro da ferramenta.

Os arquivos resultantes da simulação são automaticamente salvos em diferentes pastas segregadas por tipo de parâmetro, como atmosfera, edificações, radiação, solo, poluentes, superfície e vegetação. A disponibilidade de tais dados depende do tipo de licença que o usuário possui do *software* e das características presentes no modelo. Para essa pesquisa, utilizou-se os dados de atmosfera e de vegetação.

Os resultados obtidos pelo *software* ENVI-met são fornecidos principalmente na forma de mapas temáticos. Tais mapas podem ser construídos de acordo com o tipo de

parâmetro a ser analisado, a partir de temas específicos (atmosfera, radiação, poluentes, solo, superfície e vegetação). As análises são feitas a partir de resultados horários comparáveis entre si.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos nos dois *software* trabalhados. Para o i-Tree, apresentado primeiro, segregou-se os resultados nos três cenários que foram analisados nesse trabalho, especificando suas características de composição e estrutura, remoção de poluentes atmosféricos e absorção e armazenamento de CO₂.

Para cada cenário analisado fez-se duas simulações: uma em relação a situação temporal atual, onde considera-se a existência de cada cenário para o ano de 2022 (ano de realização da pesquisa); e outra em relação ao mesmo cenário em 30 anos (quando possível), onde considera-se a questão do crescimento e morte das árvores.

Essas simulações citadas acima foram feitas tanto para o i-Tree, quanto para o ENVI-met, entretanto, para o primeiro *software* os resultados foram apresentados em tópicos separados, e para o segundo, optou-se por trabalhar de forma agregada, analisando os dados referentes a um mesmo cenário de forma conjunta.

4.1 Resultados i-Tree

Como mencionado acima, os resultados do i-Tree foram segregados por cenários, tanto para o ano de 2022 (atual), quanto para 2052 (previsão). O próprio *software* fornece um relatório com tabelas e gráficos que foram tratados para melhor representação dos resultados.

4.1.1 Cenário 0

O primeiro cenário proposto, chamado de Cenário 0, configura uma situação hipotética em que a área de estudo não teria nenhum exemplar arbóreo. Nesse contexto são mantidas todas as demais estruturas que compõe a malha urbana, inclusive a cobertura do solo e as infraestruturas públicas e privadas, mantendo assim, a dinâmica de atividades já existente, alterando apenas a parte da vegetação em vias públicas.

A escolha da modelação e simulação de um cenário com nenhuma árvore remete a possíveis situações de supressão da vegetação da área de estudo, que pode ocorrer a partir da expansão das vias públicas, por exemplo. Entende-se, porém, que essa não é uma situação ideal, mas a simulação nesse contexto se deu justamente para demonstrar um cenário que é comum em zonas industriais, de grande parte das áreas concretadas e composta apenas por construções industriais e comerciais.

Os dados de entrada do i-Tree consistem apenas nos parâmetros arbóreos de uma determinada área. Como o cenário 0 corresponde a uma situação hipotética de inexistência de exemplares arbóreos, não é possível realizar uma simulação no sistema. Logo, os resultados obtidos com i-Tree para essa situação e para um quadro futuro são nulos.

Nesse contexto, nota-se que o *software* possui uma limitação em relação as outras variáveis biofísicas que compõe o ambiente urbano. Por ser um sistema específico para análise dos benefícios gerados pelas árvores, há uma subestimação dos resultados como um todo para a área de estudo. Logo, é importante considerar que embora nesse cenário os resultados sejam nulos, não significa que não há nenhuma outra estrutura presente capaz de influenciar na absorção e armazenamento de CO₂ ou na dispersão de poluentes.

4.1.2 *Cenário 1 atual*

A segunda situação analisada, chamada de Cenário 1, corresponde ao panorama atual da área de estudo. Nesse sentido, os dados coletados para essa pesquisa (apresentados em anexo) referem-se a esse cenário no contexto do ano de 2022, ano da pesquisa.

A simulação do cenário real é a opção mais lógica para entender os benefícios causados pelas soluções baseadas na natureza presentes na área de estudo. A vantagem da análise desse contexto se dá também devido a possibilidade de validação, o que agrega confiabilidade ao modelo.

De todos os resultados disponibilizados pelo i-Tree, foram compilados e apresentados os de composição e estrutura, de remoção da poluição e de absorção e armazenamento de carbono. Outros dados também fornecidos podem ser utilizados para análises mais detalhadas acerca dos benefícios gerados pela vegetação urbana, porém, dado ao objetivo do presente trabalho não foram registrados, mas sim considerados em uma avaliação geral da situação na área de estudo.

4.1.2.1 Composição e Estrutura

Em relação a caracterização da composição e estrutura da vegetação urbana do Cenário 1, obteve-se resultados relevantes sobre a população arbórea, área foliar, distribuição de acordo com DAP, e valor de importância. Na Figura 18 abaixo é possível

visualizar a distribuição da população das árvores, de acordo com a quantidade presente na área observada.

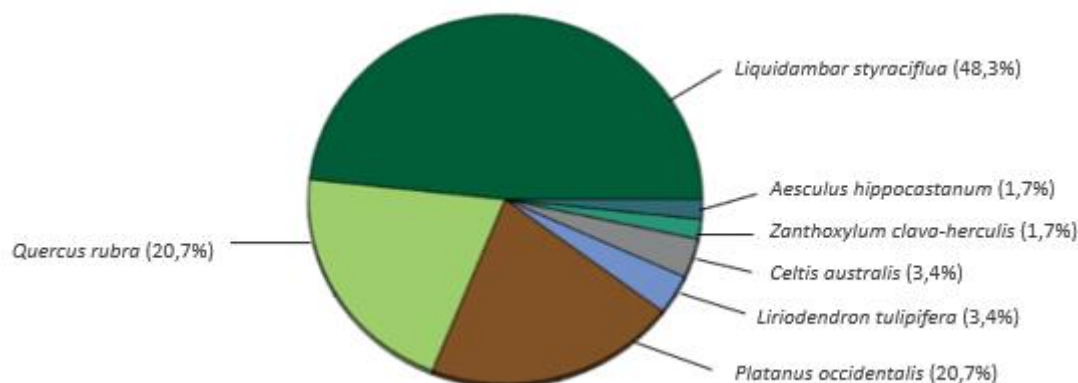


Figura 18: Distribuição da população de árvores do Cenário 1.

Nota-se que a maior população é de *Liquidambar styraciflua*, chamada popularmente apenas de liquidambar (espécie exótica oriunda da América do Norte), que corresponde, em sua maioria, a exemplares que foram plantados a partir do projeto INDNATUR (realizado no ano de 2022), logo são árvores jovens ainda no início do seu desenvolvimento. Essa espécie é de grande porte podendo alcançar até 40 metros de altura, possui folhas caducas, ou seja, que caem no inverno, permitindo a entrada da luz solar, e permanecem na copa no verão, produzindo sombra. São árvores adaptáveis a diferentes tipos de solo, resistem bem ao frio e possuem uma necessidade hídrica alta nos primeiros anos de plantio. Além disso, é um exemplar que adquire tonalidades outonais em suas folhas, senso assim cotado no âmbito paisagístico (Serralves, 2009).

Outra espécie bem representativa é a *Quercus rubra*, chamada popularmente de carvalho vermelho americano e que ocupa extensa área da Europa. Sendo ela uma árvore caducifolia, assim como o liquidambar, perde as folhas no inverno e as mantém no verão. São exemplares de grande porte, podendo atingir até 50 metros e são cotadas para fins ornamentais, já que adquirem coloração outonal em suas folhagens (Santa Maria da Feira, 2020). Os espécimes presentes na área de estudo já são mais desenvolvidos e possuem grande porte, sendo árvores mais antigas do que os exemplares de liquidambar.

A população de *Platanus occidentalis*, cujo nome popular é apenas plátanos, é equivalente em número à de *Quercus rubra*. Essa árvore possui grande porte, ampla copa e folhas caducas com tonalidades outonais, sendo essas características semelhantes aos

das espécies citadas anteriormente. Uma das características que faz com que o plátano seja utilizada em zonas urbanas é a resistência a poluição, fazendo com que essa árvore seja adequada para se situar em áreas industriais (Serralves, 2011).

Ainda no exacto de composição e estrutura da vegetação analisada, a Tabela 11 abaixo apresenta outros dados relevantes sobre a população arbórea e importância de cada espécie para a área de estudo fornecidos pelas simulações do i-Tree.

Tabela 11: Resumo da composição e estrutura das árvores do Cenário 1.

Espécie	População (un)	% da população	Área foliar (m²)	% área foliar	Valor de Importância
<i>Liquidambar styraciflua</i>	28	48,3%	73,8	3,7%	51,9
<i>Platanus occidentalis</i>	12	20,7%	1.500,9	74,7%	95,4
<i>Quercus rubra</i>	12	20,7%	333,9	37,3%	37,3
<i>Celtis australis</i>	2	3,4%	53,3	2,7%	6,1
<i>Liriodendron tulipifera</i>	2	3,4%	18,2	0,9%	4,4
<i>Aesculus hippocastanum</i>	1	1,7%	23,2	1,2%	2,9
<i>Zanthoxylum clava-herculis</i>	1	1,7%	5,4	0,3%	2,0

Ao analisar a tabela acima nota-se que as espécies com maiores áreas foliares são as *Platanus occidentalis* e *Quercus rubra*, com 74,7% e 37,3% da área foliar total, respectivamente. Embora a *Liquidambar styraciflua* detenha a maior quantidade de exemplares arbóreos, que são jovens e plantados recentemente, ela não possui uma grande cobertura foliar. Esses aspectos refletem no Valor de Importância, indicado pela última coluna da Tabela 11.

O Valor de Importância (sem unidade), resultante da soma da porcentagem da população com a porcentagem de área foliar, reflete a influência de cada espécie na área de estudo, que se dá não somente pela quantidade de árvores presente na região, mas também pelo grau de desenvolvimento de cada uma delas. Isso pode ser avaliado a partir da massa vegetal foliar presente em cada exemplar arbóreo, logo, nota-se que atualmente a espécie mais importante da área de trabalho é a *Platanus occidentalis*, a as menos importantes são as que possuem apenas um exemplar, como a *Aesculus hippocastanum*.

4.1.2.2 Remoção de Poluentes Atmosféricos

Os resultados obtidos pelo i-Tree em relação a remoção de poluentes basearam-se em dados de poluição disponíveis da estação meteorológica disponível mais próxima (nesse caso localizada em Ourense, a aproximadamente 180 km de Bragança). O sistema estima tais remoções considerando diferentes metodologias, referências e modelos para os diferentes tipos de poluentes considerados na análise.

Para o Cenário 1 foi estimado que a remoção de poluentes anual total foi de 2,617 kg, que está associado a um valor de 1,14 €. Esse valor inclui o ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de azoto (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), PM_{2,5} e PM₁₀, que são substâncias que podem ser nocivas à saúde humana. Na Tabela 12 abaixo é apresentado a quantidade removida de cada um dos poluentes acima, assim como o correspondente retorno económico.

Tabela 12: Quantidade estimada pelo i-Tree de poluentes removidos pelas árvores do Cenário 1.

Poluente	Poluição Removida (kg/ano)	Poluição Removida (%)	Valor de Referência (€/kg)	Valor Real (€/ano)
CO	0,055	2,10	1,041	0,06
O ₃	2,059	78,68	0,116	0,24
NO ₂	0,055	2,10	0,017	0,00*
SO ₂	0,032	1,22	0,006	0,00*
PM ₁₀	0,412	15,74	4,141	0,82
PM _{2,5}	0,004	0,15	1,977	0,02
Total	2,617	-	-	1,14

*Valores residuais.

Nota-se que o poluente de maior representatividade em termos de remoção da poluição por exemplares arbóreos é o ozono, representando um montante de 78,68% do total. Tal poluente pode ser absorvido diretamente pelas plantas através das estruturas denominadas estomas, que são microporos presentes nas árvores responsáveis pela absorção do gás carbónico para a realização da fotossíntese. O ozono, por sua vez, é fitotóxico, e ao ser absorvido para o interior da planta reage com a superfície da mesma, desencadeando efeitos adversos para as plantas, como lesões localizadas, defasagem no crescimento e até mesmo a morte (Fernandes, 2007).

Seguido do O₃, o PM₁₀ se apresenta como o segundo poluente mais removido, com 15,74% do total. O material particulado, nesse caso, é removido a partir da deposição das partículas na superfície das folhas das árvores, entretanto, ele pode ser removido ou ressuspenso para a atmosfera em função das condições meteorológicas. Em períodos secos, por exemplo, as árvores mais ressuspendem material particulado do que removem, já em meses chuvosos, essas partículas tendem a serem dissolvidas ou transferidas para o solo. Para este trabalho foi incorporado às análises uma taxa de ressuspensão de 50%, valor padrão do *software*.

Os valores associados a remoção de cada um dos poluentes (coluna “Valor Real”) que são apresentados na Tabela 11 foram calculados com base em valores referentes ao preço das externalidades associadas a remoção da poluição (coluna “Valor de Referência”). O i-Tree fornece os valores base para tal cálculo, podendo esse valor ser alterado pelo usuário. No caso desta pesquisa optou-se por utilizar os valores padrão fornecidos pelo sistema, que resultou em um montante não muito significativo de 1,13 €.

Um outro aspecto relevante acerca da temática de poluição atmosférica e vegetação é a emissão de Compostos Orgânicos Voláteis (COV) biogênicos, ou seja, que são produzidos e emitidos pela massa vegetal. Segundo a simulação realizada no I-Tree, foi estimado que as árvores presentes no Cenário 1 emitem 2,822 kg anualmente de COV, sendo 2,083 kg de isopreno e 0,7386 kg de monoterpenos. Tais substâncias, principalmente o isopreno, são emitidas por árvores caducifólias, como é o caso da maioria das espécies presentes na área de estudo. Na presente pesquisa, o modelo estima que cerca de 95% das emissões de COV foram dos espécimes arbóreos de *Quercus rubra* e *Platanus occidentalis*.

Os COV são precursores do ozono troposférico, contribuindo assim, para o aumento da concentração desse poluente na atmosfera. Entretanto, estudos revelam que em relação a concentração de ozono, os efeitos locais são mais relevantes do que as interações químicas na atmosfera. Isso ocorre porque as emissões de tais compostos dependem também da temperatura, e a massa vegetal tem a capacidade de arrefecimento do ambiente. Sendo assim, a produção de O₃ e de COV tendem a diminuir com o aumento dos espaços verdes com espécies de baixa emissão de COV, pois além de haver o decréscimo da temperatura e conseqüentemente menor produção de COV, mais ozono é absorvido pelas folhas (Cardelino & Chameides, 1990; Fernandes, 2007).

4.1.2.3 Absorção e Armazenamento de CO₂

Já os resultados acerca do dióxido de carbono giram em torno de duas temáticas: absorção e armazenamento de CO₂. Ambas influenciam em relação às mudanças climáticas, porém possuem conceitos distintos.

A absorção de CO₂ se dá a partir de um novo crescimento da planta a cada ano, onde a planta utiliza a energia proveniente da fotossíntese. A quantidade de dióxido de carbono sequestrado depende da saúde e do tamanho do exemplar vegetal. Além disso, as árvores realizam a fotossíntese, onde é utilizado o carbono da atmosfera (em forma de CO₂) para produção de compostos orgânicos. Essas ações retiram o dióxido de carbono da atmosfera, gás esse que é um dos precursores do efeito estufa.

De acordo com os resultados simulados pelo i-Tree, a quantidade total anual de carbono sequestrada pelas árvores presentes no Cenário 1 é de 139,7 kg/ano, o que corresponde a 510 kg de CO₂ equivalente (medida internacional que estabelece a equivalência entre todos os gases de efeito estufa). Esse quantitativo está associado a um valor de 22,48 € /ano. Na Figura 19 abaixo é apresentado um gráfico sobre a absorção de carbono por espécie presente na área de estudo.

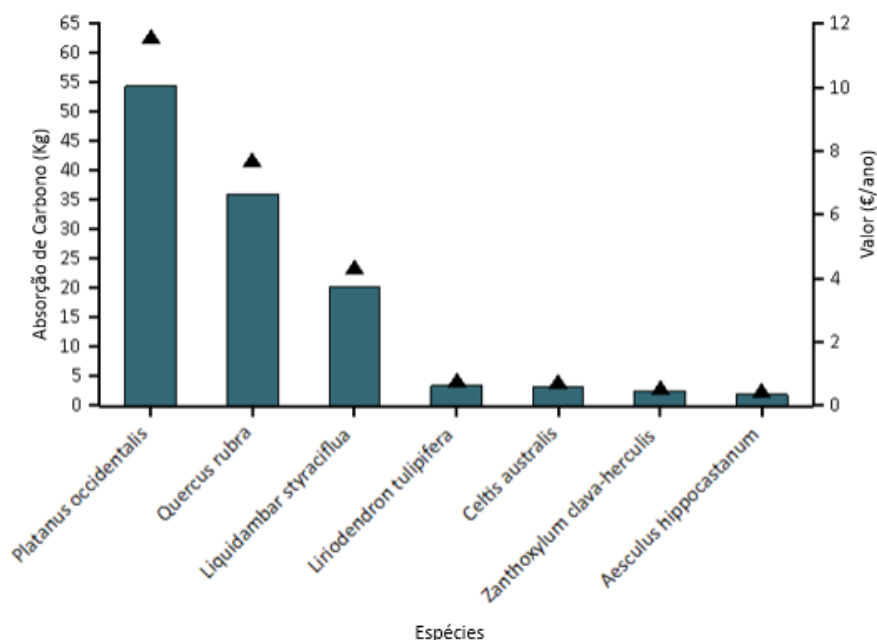


Figura 19: Absorção bruta anual estimada de carbono (pontos) e valor associado (barras) do Cenário 1.

A partir da análise do gráfico acima nota-se que as principais espécies que influenciam na absorção de carbono são as que possuem maior Valor de Importância (Tabela 11). Na Tabela 13 abaixo é demonstrado esses valores em uma configuração diferente,

apresentando ainda mais informações relevantes para cada espécie presente na área de estudo.

Tabela 13: Dados de absorção de CO₂ do Cenário 1.

Espécie	Absorção Bruta de Carbono (kg/ano)	CO₂ Equivalente (t/ano)	% de absorção de carbono	Valor associado (€/ano)
<i>Platanus occidentalis</i>	62,3	0,23	44,6%	10,05
<i>Quercus rubra</i>	41,5	0,15	29,7%	6,65
<i>Liquidambar styraciflua</i>	23,3	0,09	16,7%	3,75
<i>Liriodendron tulipifera</i>	3,9	0,01	2,8%	0,63
<i>Celtis australis</i>	3,6	0,01	2,6%	0,59
<i>Zanthoxylum clava-herculis</i>	2,9	0,01	2,0%	0,46
<i>Aesculus hippocastanum</i>	2,2	0,01	1,6%	0,36
TOTAL	139,7	0,51		22,48

Chama-se a atenção para a coluna de “% de Absorção de Carbono”, onde é indicado a participação de cada espécie em relação a absorção de carbono da área de estudo. Essa coluna apresenta um valor representativo da quantidade que o conjunto de exemplares arbóreos de cada espécie pode absorver. Considerando que as simulações do i-Tree retornaram valores relativamente baixos para absorção de carbono, a análise do percentual de representatividade fornece dados mais significativos para análises globais.

Uma outra forma que as árvores influenciam nas mudanças climáticas é através do armazenamento de carbono. As árvores possuem a capacidade de acumular tal elemento em seus tecidos à medida que crescem, e quando elas morrem e decompõe parte desse carbono retorna para atmosfera e parte é integrada com o solo. Nesse sentido, o armazenamento de carbono pode ser considerado um indicador da quantidade de carbono que pode ser liberado na atmosfera se a árvore for cortada.

De acordo com as simulações do i-Tree, as árvores existentes no Cenário 1 do presente trabalho armazenam 1,27 toneladas de carbono, referente ao estoque de carbono associado às árvores até a data da simulação, o que equivale a 4,8 t de CO₂ equivalente. Esse quantitativo está associado a um valor de 204,33 €. Na Figura 20 abaixo é apresentado um gráfico sobre o armazenamento de carbono de cada espécie da área de estudo, considerando toda a estrutura arbórea.

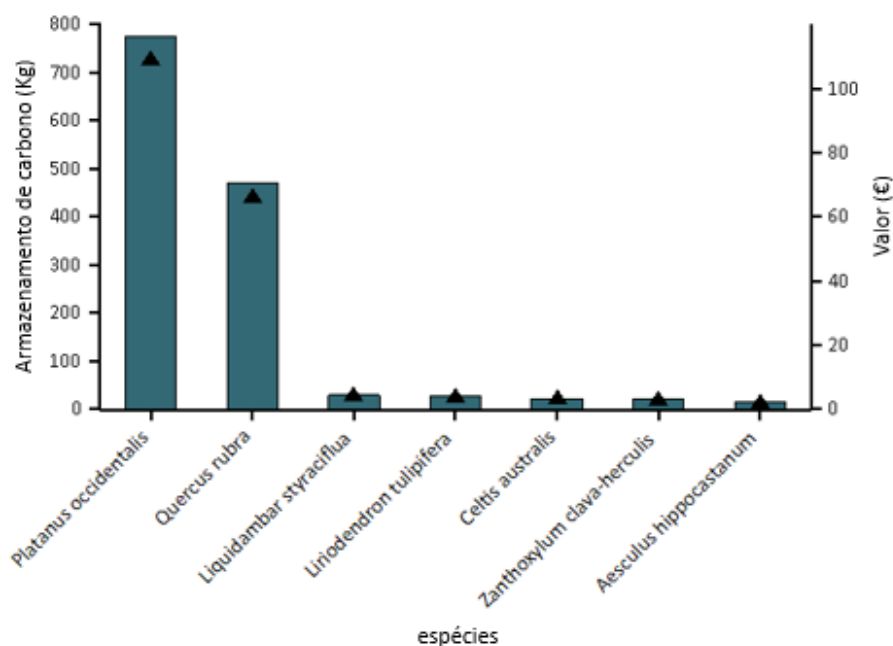


Figura 20: Armazenamento estimado de carbono (pontos) e valor associado (barras) do Cenário 1.

A partir da análise gráfica do armazenamento de carbono, nota-se que as duas espécies mais representativas coincidem com as que mais absorvem carbono, *Platanus occidentalis* e *Quercus rubra*. Embora a *Liquidambar styraciflua* seja a espécie com um maior quantitativo, suas árvores ainda são jovens, logo, não são tão representativas em termos de armazenamento de carbono. Na Tabela 14 abaixo é apresentada uma conformação distinta de tais dados, além de outras informações relevantes referentes a essa temática.

Tabela 14: Dados de armazenamento de carbono do Cenário 1.

Espécie	Armazenamento de Carbono (kg)	CO ₂ Equivalente (t)	% de armazenamento de carbono	Valor associado (€)
<i>Liquidambar styraciflua</i>	28,0	0,1	2,2%	4,45
<i>Platanus occidentalis</i>	724,9	2,7	57,0%	116,47
<i>Quercus rubra</i>	438,9	1,6	34,5%	70,51
<i>Celtis australis</i>	21,5	0,1	1,7%	3,46
<i>Liriodendron tulipifera</i>	25,6	0,1	2,0%	4,11
<i>Aesculus hippocastanum</i>	13,7	0,1	1,1%	2,20
<i>Zanthoxylum clava-herculis</i>	19,5	0,1	1,5%	3,13
TOTAL	1.271,7	4,8		204,33

4.1.3 Cenário 1 previsão

A área de estudo foco desta pesquisa, principalmente as zonas das vias de circulação, passou por uma revitalização no âmbito do projeto INDNATUR, no ano de 2022, que resultou na implantação de diversas árvores na região. Os espécimes plantados são jovens e de pequeno porte, sendo ainda necessário alguns anos para que a vegetação se desenvolva e resulte em maiores benefícios para o ambiente urbano. Nesse sentido, a simulação de tal cenário em 30 anos se mostra como útil na avaliação de previsões futuras com resultados mais significativos.

Seguindo a lógica do que já foi apresentado anteriormente para as informações geradas pelo i-Tree, nessa seção são apresentados os resultados da previsão de 30 anos futuros para o Cenário 1. Os dados referentes a composição e estrutura, absorção e sequestro de CO₂ e remoção de poluentes simulados estão apresentados nos tópicos a seguir.

Destaca-se que a conformação das previsões simuladas no *software* não corresponde a estrutura exata dos resultados apresentados anteriormente para o “Cenário 1 atual”. Nesse caso, são apresentados valores de evolução ao longo do tempo e dados acumulativos dos 30 anos simulados.

4.1.3.1 Composição e Estrutura

Os resultados relevantes acerca da composição e estrutura obtidos das simulações do i-Tree são relativamente limitados. É possível acompanhar a evolução temporal referente ao número de árvores e crescimento da biomassa vegetal em diferentes aspectos. Para essa pesquisa, de todos os resultados fornecidos pelo i-Tree, optou-se por apresentar os valores simulados apenas para a população quantitativa das árvores, média de crescimento do DAP e o crescimento da biomassa das árvores.

Em relação ao número de árvores que estarão presentes na área de estudo, em 2052, estima-se que a população de árvores decairá aproximadamente 19%, totalizando em 47 espécimes. Na Figura 21 abaixo é possível observar a evolução temporal desse parâmetro.

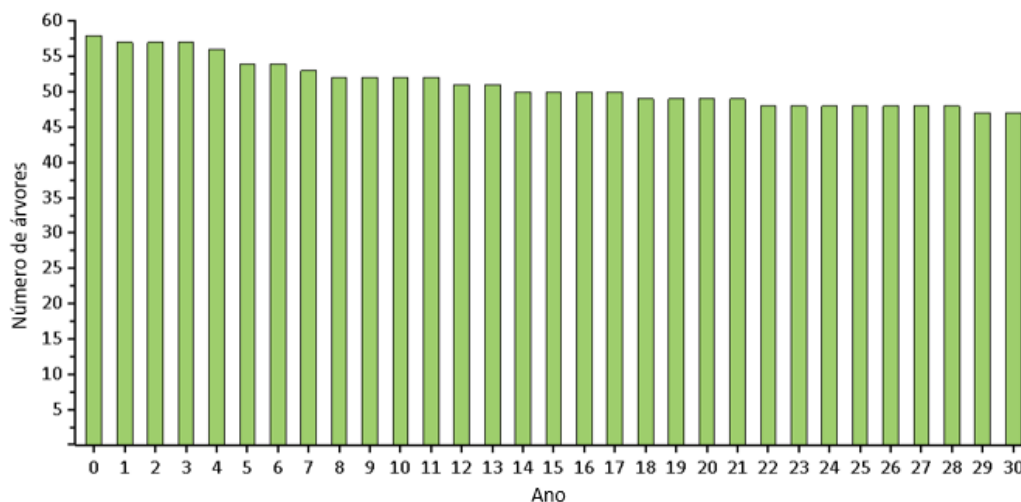


Figura 21: Evolução temporal do número de árvores do Cenário 1 até 2052, simulados pelo i-Tree.

Ressalta-se que a definição dos parâmetros que afeta o número de árvores na simulação foi definida anteriormente e apresentada no item 3.2.2.

Outro parâmetro relevante observado refere-se a média de crescimento anual do DAP. Essa variável permite avaliar o crescimento da árvore através da medida do tronco. Os resultados simulados acerca desse parâmetro indicaram um crescimento anual médio de 1,3 cm para a população arbórea.

Já em relação a evolução da biomassa vegetal, os resultados simulados apresentam a evolução ao longo do tempo de toda população arbórea presente na área de estudo. Na Figura 22 abaixo é possível observar um gráfico do crescimento da biomassa total de árvores.

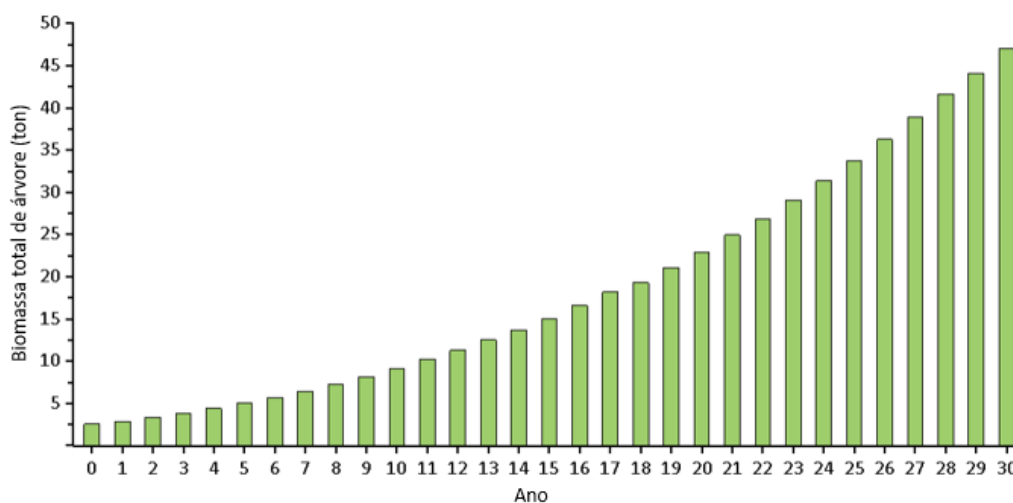


Figura 22: Evolução do crescimento da biomassa total de árvores do Cenário 1 até 2052, simulados pelo i-Tree.

Ao observar o gráfico acima (Figura 22) nota-se que houve um aumento significativo da biomassa total de árvores, principalmente a partir do ano 15. Isso pode ser explicado pelo fato de um quantitativo significativo de exemplares arbóreos de *Liquidambar styraciflua* eram jovens no ano 0. Em termos quantitativos, a biomassa total no ano 0 considerada é de 2,54 toneladas, já a simulada para o ano 30 alcança 47,09 toneladas. Isso representa um aumento expressivo de aproximadamente 1.754%.

Logo, conclui-se que em 30 anos a representatividade e o valor de importância das árvores presentes na área de estudo serão maiores do que atualmente, compondo um cenário de maior cobertura vegetal em termos de área foliar principalmente.

4.1.3.2 Remoção de Poluentes Atmosféricos

Embora os resultados simulados pelo i-Tree permitam a análise segregada por ano de remoção e valor associado para cada poluente, observou-se que o padrão de remoção estabelecido, em termos gráficos, era semelhante para todos os poluentes, diferenciando-se apenas em relação a quantidade. Nesse sentido, é apresentado um gráfico na Figura 23 da remoção do O₃ como exemplo, e o restante dos outros gráficos dos demais poluentes estão apresentados em anexo.

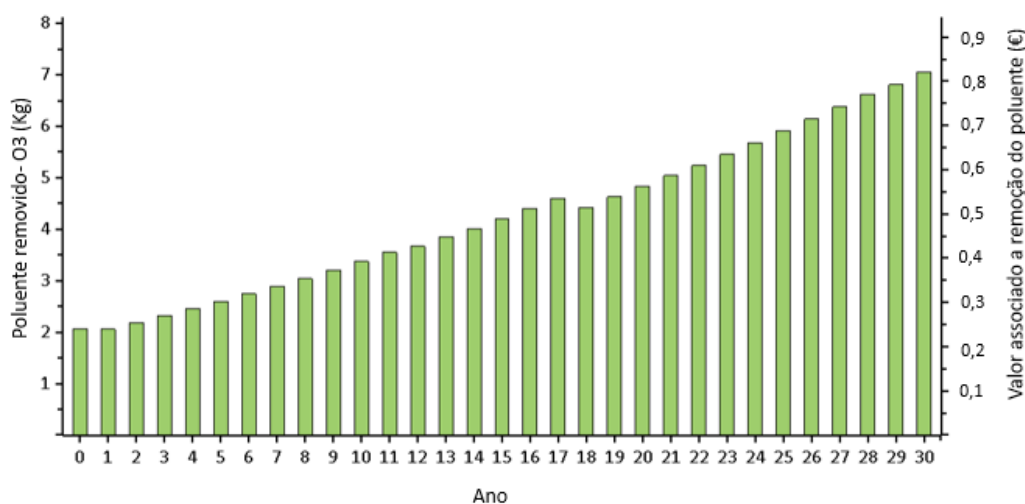


Figura 23: Evolução temporal da remoção de poluentes do Cenário 1, simulados pelo i-Tree.

Os resultados acerca de remoção de poluentes são acumulativos ao longo do tempo. Sendo assim, de uma forma geral, os valores totais removidos e seus valores associados em 30 anos podem ser observados na Tabela 15 abaixo.

Tabela 15: Total de poluentes removidos em 30 anos no Cenário 1, simulados pelo i-Tree.

Poluente	Poluição Removida (kg)	Poluição Removida (%)	Valor Real (€/ano)
O ₃	131,4	78,68%	15,29
PM ₁₀	26,3	15,75%	52,02
CO	3,5	2,10%	3,66
NO ₂	3,5	2,10%	0,06
SO ₂	2,0	1,19%	0,01
PM _{2,5}	0,3	0,18%	1,09
Total	167	100%	72,13

Assim como apresentado anteriormente para o Cenário 1, o poluente que mais sofre influência de remoção na área de estudo é o O₃, alcançando o valor de 131,4 kg removidos em 30 anos, que está associado à um valor de 72,13 €.

4.1.3.3 Absorção e Armazenamento de CO₂

Em relação a absorção de CO₂, que é refletida em termos de carbono, pode-se considerar que existe uma evolução gradual ao longo dos 30 anos simulados. Na Figura 24 abaixo é possível observar um gráfico que indica essa evolução.

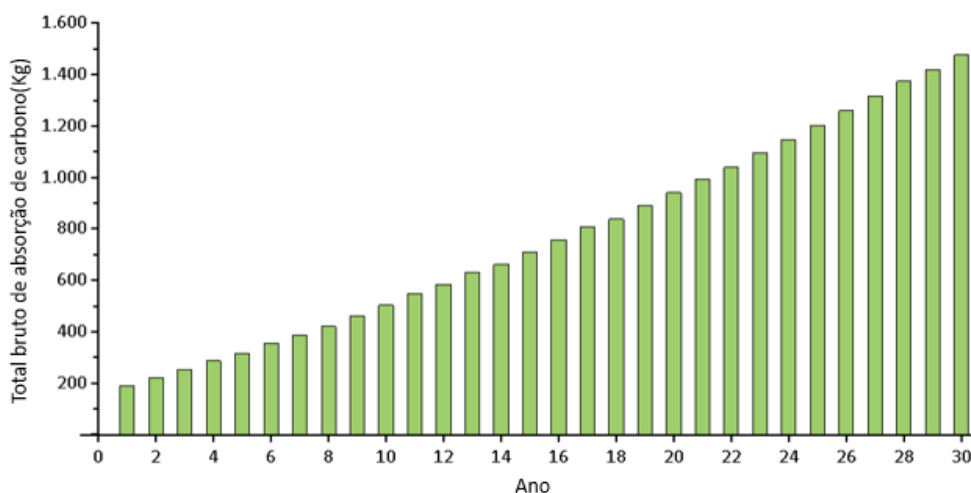


Figura 24: Evolução temporal do total de absorção de carbono do Cenário 1, simulados pelo i-Tree.

O total de carbono absorvido ao longo dos 30 anos simulados foi de aproximadamente 23.079,1 kg, o que equivale a aproximadamente 84,3 t de CO₂ equivalente. O valor dessa absorção aumenta com passar dos anos principalmente devido ao quantitativo de exemplares arbóreos em fase de crescimento, que acabam por aumentar a taxa de fotossíntese ao longo do tempo.

Já no que se refere ao armazenamento de carbono, observa-se a mesma tendência de aumento gradual ao longo dos anos, com valores mais significativos principalmente a partir do ano 20. Na Figura 25 abaixo é possível observar o gráfico que representa a evolução desse parâmetro.

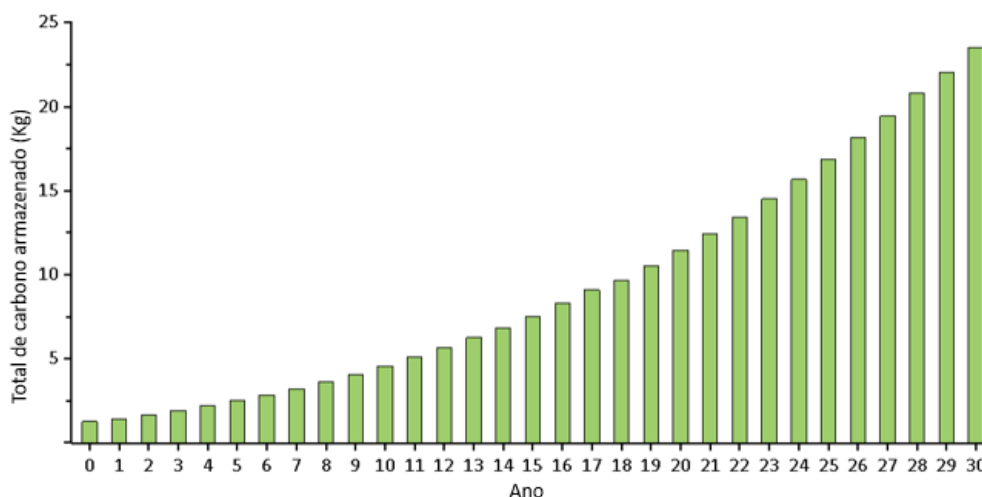


Figura 25: Evolução temporal de carbono armazenado do Cenário 1, simulados pelo i-Tree.

Para esse parâmetro nota-se um aumento significativo entre o ano 0 (2022), que registrou um valor de 1,27 toneladas de carbono bruto armazenados, e o ano 30, que registrou 23,54 toneladas, o equivalente a 88,9 CO₂ equivalente. Esse aumento representa um percentual de aproximadamente 1.754 %. Tal fato pode ser explicado pelo fato da presença significativa de exemplares jovens na área de estudo, pois à medida que as árvores crescem mais carbono é armazenado em seus tecidos.

4.1.4 Cenário 2 atual

A última situação analisada para esta pesquisa foi a do Cenário 2, que consiste em praticamente todos os aspectos presentes no Cenário 1, mas com a transformação de uma área vaga em um parque urbano funcional, como explicitado nos tópicos 3.2.3 e 3.3.1.3. A proposta em adicionar uma área verde na zona industrial visa explicitar, em termos quantitativos, os benefícios acarretados pelo uso de soluções baseadas na natureza (plantio de árvores) em áreas urbanas, podendo assim, inferir as vantagens acerca desse método na melhora da qualidade ambiental do local.

Para essa seção foram compilados e apresentados também os dados de composição e estrutura, de remoção da poluição e de absorção e armazenamento de

carbono para o Cenário 2. Os resultados foram apresentados de forma mais direta, visto que dados semelhantes já foram discutidos detalhadamente no tópico 4.1.2.

4.1.4.1 Composição e Estrutura

Assim como para o Cenário 1, em relação a caracterização da composição e estrutura da vegetação urbana do Cenário 2, obteve-se resultados relevantes sobre a população arbórea, área foliar e valor de importância. Na Figura 28 abaixo é possível visualizar a distribuição da população das árvores, de acordo com a quantidade presente na área observada.

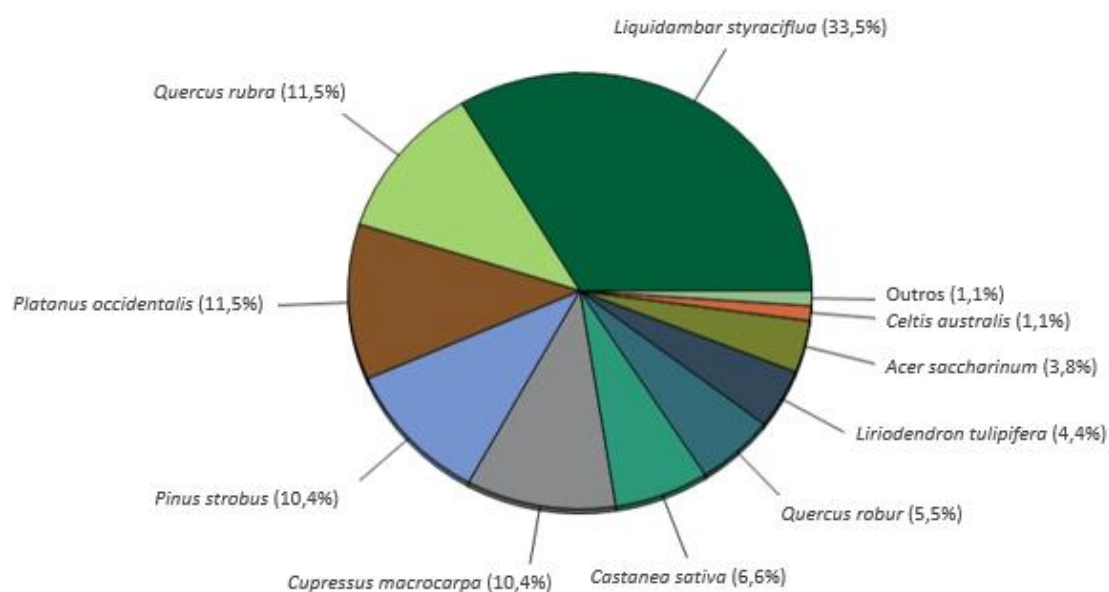


Figura 26: Distribuição da população de árvores do Cenário 2.

Para o Cenário 2, a área de estudo continua com a maior porcentagem de *Liquidambar styraciflua*. Isso se dá principalmente pois para a intervenção proposta ainda se seguiu o padrão do uso de tal espécie como árvore de alinhamento para ruas. Outra espécie que continua representativa a *Quercus rubra* e *Platanus occidentalis*. Ambas já estavam presentes na área de estudo, mas também tiveram mais exemplares adicionados para compor o Cenário 2.

Ainda no exacto de composição e estrutura da vegetação analisada, a Tabela 16 abaixo apresenta outros dados relevantes sobre a população arbórea e importância de cada espécie para a área de estudo com a proposta de intervenção de inserção de SBN.

Tabela 16: Resumo da composição e estrutura das árvores do Cenário 2.

Espécie	População (un)	% da população	Área foliar (m²)	% área foliar	Valor de Importância
<i>Liquidambar styraciflua</i>	61	33,5%	399,8	11,5%	45,0
<i>Platanus occidentalis</i>	21	11,5%	1.603,5	46,2%	57,7
<i>Quercus rubra</i>	21	11,5%	684,5	19,7%	31,3
<i>Cupressus macrocarpa</i>	19	10,4%	166,1	4,8%	15,2
<i>Pinus strobus</i>	19	10,4%	118,7	3,4%	13,9
<i>Castanea sativa</i>	12	6,6%	155,9	4,5%	11,1
<i>Quercus robur</i>	10	5,5%	106,4	3,1%	8,6
<i>Liriodendron tulipifera</i>	8	4,4%	94,9	2,7%	7,1
<i>Acer saccharinum</i>	7	3,8%	43,1	1,2%	5,1
<i>Celtis australis</i>	2	1,2%	64,0	1,8%	2,9
<i>Aesculus hippocastanum</i>	1	0,6%	20,4	0,7%	0,1
<i>Zanthoxylum clava-herculis</i>	1	0,6%	13,9	0,4%	0,1
TOTAL	182	100%	3.471,2	100%	

Ao analisar a tabela acima nota-se que o padrão observado no Cenário 1 se repete, onde as espécies com maiores áreas foliares são as *Platanus occidentalis* e *Quercus rubra*, com 46,2% e 19,7% da área foliar total, respectivamente. Embora a *Liquidambar* detenha a maior quantidade de exemplares arbóreos, novamente se destaca o fato dos exemplares serem jovens e plantados recentemente, não possuindo assim uma grande cobertura foliar.

Outro aspecto relevante é o fato de que como há um maior número de espécies, acarretando uma maior biodiversidade no local, a % de área foliar se torna mais diversificada, não tendo mais da metade da ocupação das folhas por uma única espécie, como ocorre no Cenário 1.

O Valor de Importância, indicado na última coluna da tabela acima, reflete a influência de cada espécie na área de estudo, que se dá não somente pela quantidade de árvores presente na região, mas também pelo grau de desenvolvimento de cada uma delas. Nesse sentido, as espécies mais relevantes no Cenário 2 são a *Platanus occidentalis* e *Liquidambar styraciflua*.

4.1.4.2 Remoção de Poluentes Atmosféricos

Para o Cenário 2 foi estimado que a remoção de poluentes anual total foi de 5,204 kg, que está associado a um valor de 2,20 €. Esse valor inclui o ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de azoto (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), PM_{2,5} e PM₁₀, que são substâncias que podem ser nocivas à saúde humana. Na Tabela 17 abaixo é apresentado a quantidade removida de cada um dos poluentes acima.

Tabela 17: Quantidade estimada pelo i-Tree de poluentes removidos pelas árvores no Cenário 2.

Poluente	Poluição Removida (kg/ano)	Poluição Removida (%)	Valor de Referência (€/kg)	Valor Real (€/ano)
CO	0,112	2,15	1,041	0,12
O ₃	4,119	79,15	0,116	0,48
NO ₂	0,109	2,10	0,017	0,00*
SO ₂	0,065	1,25	0,006	0,00*
PM ₁₀	0,790	15,18	4,141	1,56
PM _{2,5}	0,009	0,17	1,977	0,04
Total	5,204	-	-	2,20

*Valores residuais.

Nota-se que o poluente mais removido pelos exemplares arbóreos continua sendo o ozono, representando um montante de 79,15% do total. Logo após, o PM₁₀ se apresenta como o segundo poluente mais removido, com 15,18% do total. De forma geral, as porcentagens de poluição removida tanto pelo Cenário 2, quanto para o Cenário 1 foram semelhantes, mostrando que mesmo com o aumento de espécies arbóreas, a remoção de poluentes tende a seguir a mesma tendência de remoção, ou seja, o aumento de biodiversidade das árvores não causa alterações significativas para maior ou menor remoção de determinado tipo de poluente, alterando apenas a quantidade (mais árvores, removem mais poluentes).

O valor associado à remoção da poluição no Cenário 2 de 2,20 €, assim como observado no Cenário 1, continua sendo pouco significativo, porém, ressalta-se que as quantidades de poluentes da área de estudo não apresentam valores elevados.

Um outro aspecto relevante discutido anteriormente acerca da temática de poluição atmosférica e vegetação é a emissão de Compostos Orgânicos Voláteis (COV)

biogênicos, ou seja, que são produzidos e emitidos pela planta. Segundo a simulação realizada no i-Tree, foi estimado que as árvores presentes no Cenário 2 emitem 6,433 kg anualmente de COV, sendo 4,239 kg de isopreno e 2,194 kg de monoterpenos. Tais substâncias, principalmente o isopreno, são emitidas por árvores caducifólias, como é o caso da maioria das espécies presentes na área de estudo. Na presente pesquisa, 75,0% das emissões de COV foram dos espécimes arbóreos de *Quercus rubra* e *Platanus occidentalis*, associados principalmente ao maior grau de desenvolvimento das árvores dessas espécies.

4.1.4.3 Absorção e Armazenamento de CO₂

Já os resultados acerca do dióxido de carbono giram em torno de duas temáticas: absorção e armazenamento de CO₂. Ambas influenciam em relação às mudanças climáticas, porém possuem conceitos distintos já explicados anteriormente.

De acordo com os resultados simulados pelo i-Tree, a quantidade total anual de carbono sequestrada pelas árvores presentes no Cenário 2 é de 271,2 kg/ano, o que corresponde a 1.000 kg de CO₂ equivalente (medida internacional que estabelece a equivalência entre todos os gases de efeito estufa). Esse quantitativo está associado a um valor de 43,34 €/ano. Na Figura 27 abaixo é apresentado um gráfico sobre a absorção de carbono por espécie presente na área de estudo.

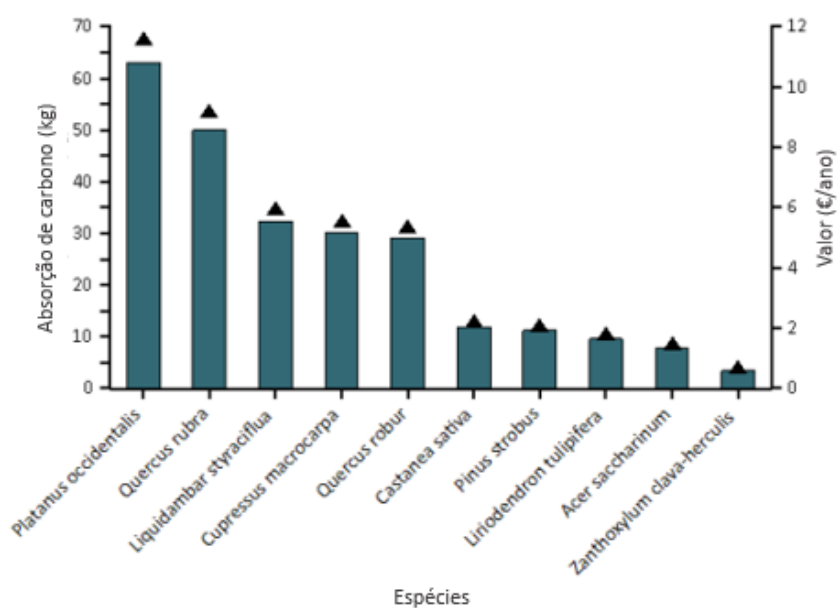


Figura 27: Absorção bruta anual estimada de carbono (pontos) e valor associado (barras) do Cenário 2.

A partir da análise do gráfico acima nota-se novamente que as principais espécies que influenciam na absorção de carbono são as possuem maior Valor de Importância (Tabela 11). Na Tabela 18 abaixo é demonstrado esses valores em uma configuração diferente, apresentando ainda mais informações relevantes para cada espécie presente na área de estudo.

Tabela 18: Dados de absorção de carbono do Cenário 2.

Espécie	Absorção Bruta de Carbono (kg/ano)	CO₂ Equivalente (t/ano)	% de absorção de carbono	Valor associado (€/ano)
<i>Liquidambar styraciflua</i>	35,8	0,13	13,2%	5,54
<i>Platanus occidentalis</i>	66,9	0,25	24,7%	10,80
<i>Quercus rubra</i>	53,3	0,20	19,7%	8,58
<i>Cupressus macrocarpa</i>	32,3	0,12	11,9%	5,16
<i>Pinus strobus</i>	11,4	0,04	4,2%	1,92
<i>Castanea sativa</i>	13,2	0,05	4,9%	2,03
<i>Quercus robur</i>	31,0	0,11	11,4%	4,98
<i>Liriodendron tulipifera</i>	10,5	0,04	3,8%	1,64
<i>Acer saccharinum</i>	8,4	0,03	3,1%	1,34
<i>Celtis australis</i>	2,5	0,01	0,9%	0,40
<i>Aesculus hippocastanum</i>	2,2	0,01	0,8%	0,36
<i>Zanthoxylum clava-herculis</i>	3,7	0,01	1,4%	0,59
TOTAL	271,2	1,00	100%	43,34

Uma outra forma que as árvores influenciam nas mudanças climáticas é através do armazenamento de carbono. As árvores possuem a capacidade de acumular tal elemento em seus tecidos à medida que crescem, e quando elas morrem e decompõe esse carbono retorna para atmosfera ou é incorporado no solo. Nesse sentido, o armazenamento de carbono pode ser considerado um indicador da quantidade de carbono que pode ser liberado na atmosfera se a árvore for cortada.

De acordo com as simulações do i-Tree, as árvores existentes no Cenário 2 do presente trabalho armazenam 1,87 toneladas de carbono, o que equivale a 6,9 t de CO₂ equivalente. Esse quantitativo está associado a um valor de 300,94 €. Na Figura 28 abaixo é apresentado um gráfico sobre o armazenamento de carbono de cada espécie da área de estudo.

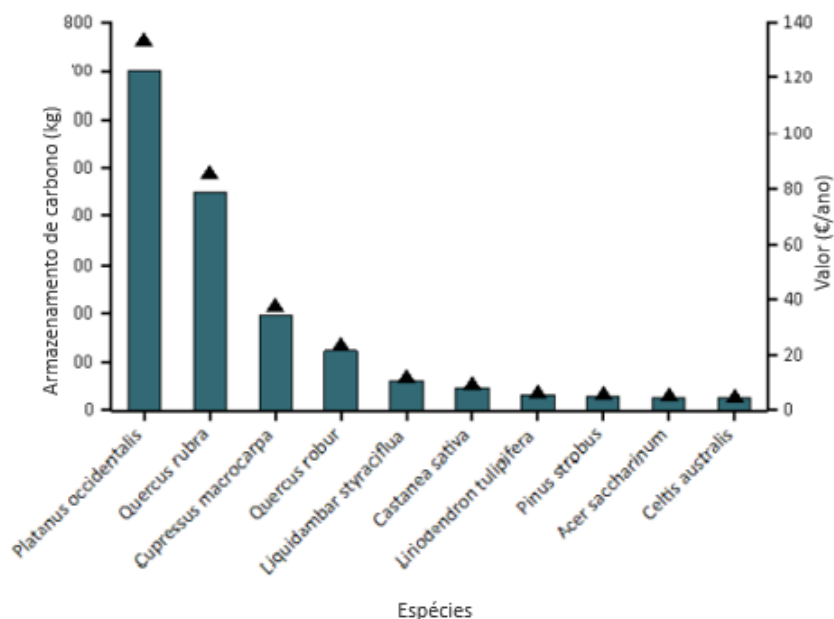


Figura 28: Armazenamento estimado de carbono (pontos) e valor associado (barras) do Cenário 2.

A partir da análise gráfica do armazenamento de carbono, nota-se a existência do mesmo padrão do Cenário 1, onde as duas espécies mais representativas coincidem com as que mais absorvem carbono, *Platanus occidentalis* e *Quercus rubra*. Embora a *Liquidambar styraciflua* seja a espécie com um maior quantitativo, suas árvores ainda são jovens, além disso, as características dessa espécie fazem com que não sejam tão representativas em termos de armazenamento de carbono. Na Tabela 19 abaixo é apresentada uma conformação distinta de tais dados, além de outras informações relevantes referentes a essa temática.

Tabela 19: Dados de armazenamento de carbono do Cenário 2.

Espécie	Armazenamento de Carbono (kg)	CO ₂ Equivalente (t)	% de armazenamento de carbono	Valor associado (€)
<i>Liquidambar styraciflua</i>	65,7	0,2	3,5%	10,82
<i>Platanus occidentalis</i>	763,4	2,8	40,8%	122,63
<i>Quercus rubra</i>	489,6	1,8	26,2%	78,62
<i>Cupressus macrocarpa</i>	214,7	0,8	11,5%	34,40
<i>Pinus strobus</i>	32,3	0,1	1,7%	5,16
<i>Castanea sativa</i>	50,4	0,2	2,7%	8,19
<i>Quercus robur</i>	134,0	0,5	7,2%	21,51
<i>Liriodendron tulipifera</i>	34,6	0,1	1,8%	5,54

Tabela 20 (continuação): Dados de armazenamento de carbono do Cenário 2.

Espécie	Armazenamento de Carbono (kg)	CO₂ Equivalente (t)	% de armazenamento de carbono	Valor associado (€)
<i>Acer saccharinum</i>	27,3	0,1	1,5%	4,41
<i>Celtis australis</i>	26,9	0,1	1,4%	4,33
<i>Aesculus hippocastanum</i>	13,7	0,1	0,7%	2,20
<i>Zanthoxylum clava-herculis</i>	19,5	0,1	1,0%	3,13
TOTAL	1.872,1	6,9	-	300,94

4.1.5 Cenário 2 previsão

Seguindo a lógica do que já foi apresentado anteriormente para as informações geradas pelo i-Tree, nessa seção são apresentados os resultados da previsão de 30 anos futuros para o Cenário 2. Os dados referentes a composição e estrutura, absorção e sequestro de CO₂ e remoção de poluentes simulados estão apresentados nos tópicos a seguir.

Novamente destaca-se que a conformação das previsões simuladas no *software* não corresponde a estrutura exata dos resultados apresentados anteriormente para o “Cenário 2 atual”. Nesse caso, são apresentados valores de evolução ao longo do tempo e dados acumulativos dos 30 anos simulados.

4.1.5.1 Composição e Estrutura

Em relação ao número de árvores que estarão presentes na área de estudo, em 2052 a população de árvores decairá aproximadamente 24%, totalizando em 138 espécimes. Na Figura 29 abaixo é possível observar a evolução temporal desse parâmetro.

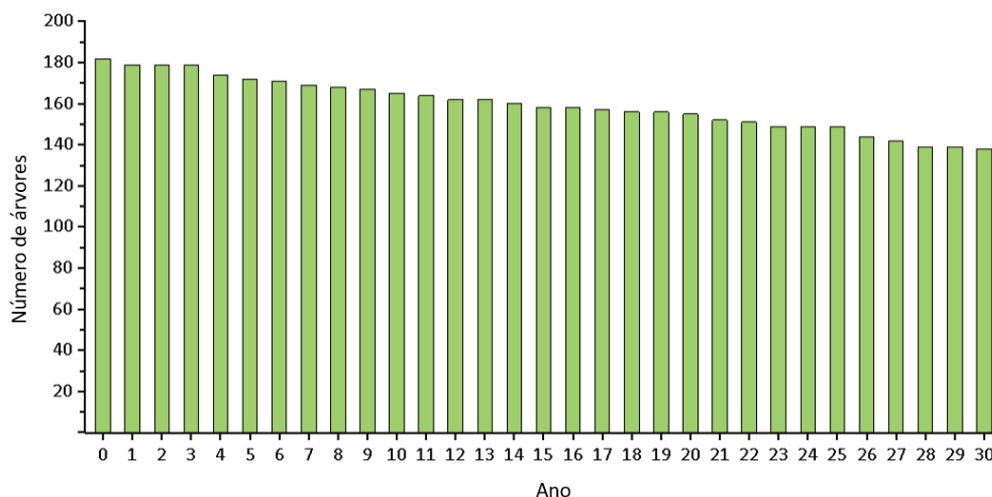


Figura 29: Evolução temporal do número de árvores do Cenário 2 até 2052, simulados pelo i-Tree.

Ressalta-se que a definição dos parâmetros que afeta o número de árvores na simulação foi definida anteriormente e apresentada no item 3.2.2.

Outro parâmetro relevante observado refere-se a média de crescimento anual do DAP. Essa variável permite avaliar o crescimento da árvore através da medida do tronco. Os resultados simulados acerca desse parâmetro indicaram um crescimento anual médio de 0,78 cm para a população arbórea.

Já em relação a evolução da biomassa vegetal, os resultados simulados apresentam a evolução ao longo do tempo de toda população arbórea presente na área de estudo. Na Figura 30 abaixo é possível observar um gráfico do crescimento da biomassa total de árvores.

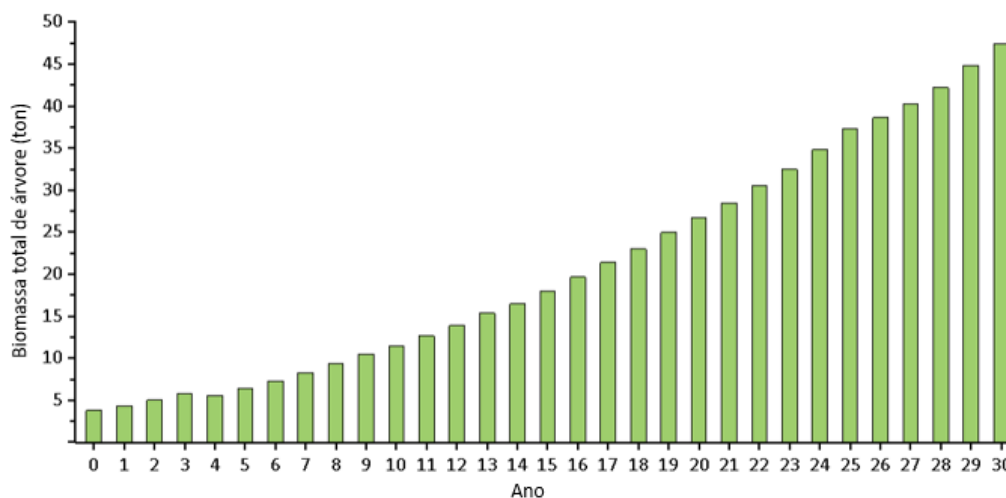


Figura 30: Evolução do crescimento da biomassa total de árvores do Cenário 2 até 2052, simulados pelo i-Tree.

Ao observar o gráfico acima nota-se que houve um aumento significativo da biomassa total de árvores, assim como observado pelo Cenário 1, principalmente a partir do ano 15. Isso pode ser explicado pelo fato de um quantitativo significativo de exemplares arbóreos eram jovens no ano 0. Em termos quantitativos, a biomassa total no ano 0 considerada é de 3,78 t, já a simulada para o ano 30 alcança 47,42 t. Isso representa um aumento expressivo de aproximadamente 1.154%.

Logo, conclui-se que em 30 anos a representatividade e o valor de importância das árvores presentes atualmente na área de estudo serão maiores do que o ano de 2022, compondo um cenário de maior cobertura vegetal em termos de área foliar principalmente.

4.1.5.2 Remoção de Poluentes Atmosféricos

Embora os resultados simulados pelo i-Tree permitam a análise segregada por ano de remoção e o valor associado para cada poluente, observou-se que o padrão de remoção estabelecido, em termos gráficos, era semelhante para todos os poluentes, diferenciando-se apenas em relação a quantidade. Nesse sentido, é apresentado um gráfico na Figura 31 da remoção do O₃ como exemplo, e o restante dos outros gráficos dos demais poluentes estão apresentados em anexo.

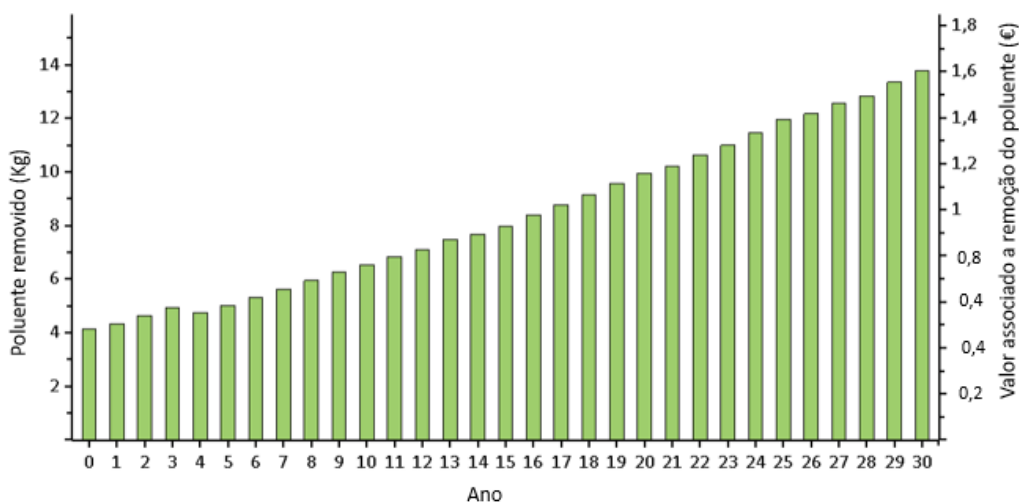


Figura 31: Evolução temporal da remoção de poluentes do Cenário 2, simulados pelo i-Tree.

Os resultados acerca de remoção de poluentes são acumulativos ao longo do tempo. Sendo assim, de uma forma geral, os valores totais removidos e seus valores associados em 30 anos podem ser observados na Tabela 21 abaixo.

Tabela 21: Total de poluentes removidos em 30 anos do Cenário 2, simulados pelo i-Tree.

Poluente	Poluição Removida (kg)	Poluição Removida (%)	Valor Real (€/ano)
CO	7,1	2,10	7,38
O ₃	260,5	78,68	30,32
NO ₂	6,9	2,10	0,12
SO ₂	4,1	1,19	0,02
PM ₁₀	50,0	15,75	98,76
PM _{2,5}	0,5	0,18	2,26
Total	329,1	-	138,86

Assim como apresentado anteriormente para o Cenário 1, o poluente que mais sofre influência de remoção na área de estudo é o O₃, alcançando o valor de 329,1 kg removidos em 30 anos, e como esperado, um valor maior do que o observado no Cenário 1. O valor associado a esse quantitativo equivale ao acumulado de 138,86 €.

4.1.5.3 Absorção e Armazenamento de CO₂

Em relação a absorção de CO₂, que é refletida em termos de carbono, pode-se considerar que a evolução temporal desse parâmetro é gradual ao longo dos 30 anos simulados. Na Figura 32 abaixo é possível observar um gráfico que indica essa evolução.

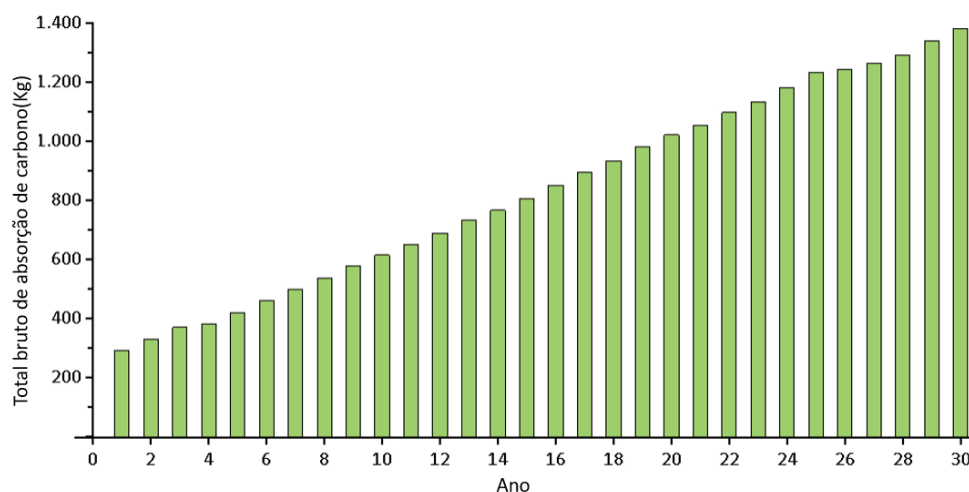


Figura 32: Evolução temporal do total de absorção de carbono do Cenário 2, simulados pelo i-Tree.

O total de carbono absorvido ao longo dos 30 anos simulados foi de aproximadamente 25.077,1 kg o que equivale a 91,5 t de CO₂ equivalente. O valor dessa absorção aumenta com passar dos anos principalmente devido ao quantitativo de

exemplares arbóreos em fase de crescimento, que acabam por aumentar a taxa de fotossíntese ao longo do tempo.

Já no que se refere ao armazenamento de carbono, observa-se a mesma tendência de aumento gradual ao longo dos anos, com valores mais significativos principalmente a partir do ano 17. Na Figura 33 abaixo é possível observar o gráfico que representa a evolução desse parâmetro.

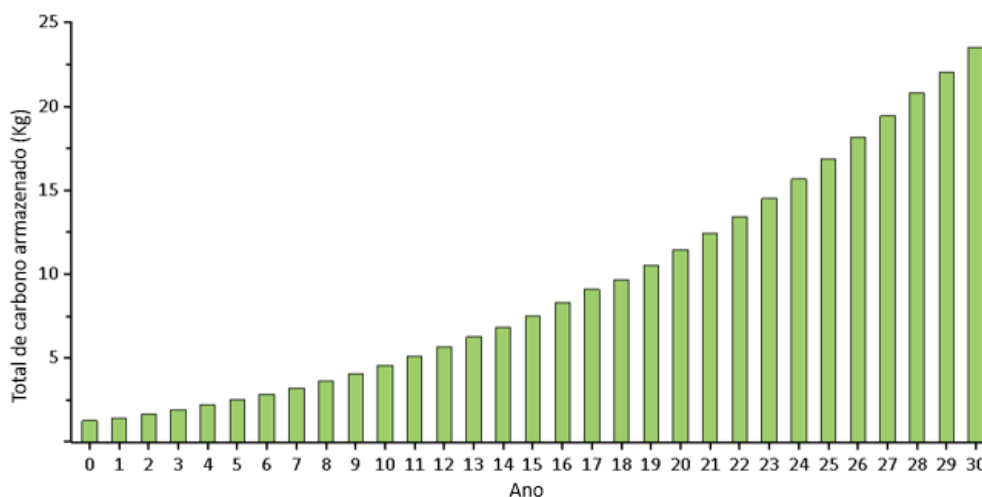


Figura 33: Evolução temporal de carbono armazenado, simulados pelo i-Tree.

Para esse parâmetro nota-se um aumento significativo entre o ano 0, que registrou um valor de 1,87 toneladas de carbono bruto armazenados, e o ano 30, que registrou 23,70 toneladas, o que representa 89,5 t de CO₂ equivalente. Esse aumento representa um percentual de aproximadamente 1.167 %, uma porcentagem menor do que a registrada para o Cenário 1, em termos proporcionais. Porém, tal fato pode ser explicado pelo fato da presença significativa de exemplares jovens na área de estudo, pois à medida que as árvores crescem mais carbono é armazenado em seus tecidos.

4.2 Comparação dos Cenários pelo i-Tree

Em relação aos valores obtidos a partir das simulações dos cenários no i-Tree, apenas o Cenário 1 e Cenário 2 são comparáveis, já que o Cenário 0, por não ter exemplares arbóreos é impossibilitado de ser aplicado no i-Tree.

Além disso, como os resultados obtidos são, de certa forma, mais globais, o que resulta em uma análise comparativa de dois cenários mais simples, podendo ser utilizada para tomada de decisão. Na Tabela 22 abaixo é apresentado os valores obtidos para os dois cenários em relação a remoção de poluentes, absorção e armazenamento de CO₂.

Tabela 22: Comparação entre os cenários simulados no i-Tree.

Parâmetro	Cenário 1 atual	Cenário 1 previsão	Cenário 2 atual	Cenário 2 previsão
Remoção de Poluentes	2,617 kg/ano	167 kg (30 anos)	5,204 kg/ano	329,1 kg (30 anos)
Absorção de CO ₂ equivalente	0,51 t/ano	84,3 t (30 anos)	1,0 t/ano	91,5 t (30 anos)
Armazenamento de CO ₂ equivalente	4,8 t	88,9 t (30 anos)	6,9 t	89,5 t (30 anos)

Como seria expectável, ao observar a tabela acima nota-se que a inserção de exemplares arbóreos, ou seja, de SBN em áreas industriais acarreta potencialmente vantagens em termos de remoção de poluição e absorção e armazenamento de CO₂.

Em relação direta para os cenários atuais, a implantação de uma zona verde, como proposto, gera um aumento imediato de 98,9% em relação a remoção de poluentes anual. No que tange a absorção de CO₂, o aumento foi de 96,1%, e para o armazenamento de CO₂, o incremento alcançou um valor de 43,8%. Em termos quantitativos esses valores não são tão significativos, porém, destaca-se que a área de estudo não sofre com graves problemas de poluição atmosférica, sendo assim, a análise dos percentuais de aumento se torna mais eficazes.

No que se refere aos cenários previstos em um espaço temporal de 30 anos, os resultados são semelhantes. Para o parâmetro de remoção de poluentes observou-se um aumento de 118,3%, já para a absorção de CO₂ esse incremento foi significativamente menor, alcançando um valor de 8,5%. Por fim, para o quesito de armazenamento de CO₂ o aumento foi apenas de 0,7%.

Conclui-se então que as soluções baseadas na natureza, nesse caso específico referentes a introdução de árvores no local, influencia positivamente os parâmetros de remoção de poluentes e absorção e armazenamento de CO₂. Entretanto, também nota-se que as vantagens são mais representativas ao longo do tempo em termos de remoção de poluentes, sendo que os outros dois parâmetros ao fim de 30 anos não demonstraram serem tão significantes. Isso pode se dar devido ao fato do crescimento das árvores se estabilizar com tempo, fazendo com que as trocas gasosas em relação ao CO₂ entrem em equilíbrio em relação a absorção e liberação.

4.3 Resultados ENVI-met

Nesta pesquisa, buscando uma maior aproximação com as variáveis analisadas pelo i-Tree, optou-se por trabalhar com variáveis relacionadas com o CO₂. Em termos de poluição, uma limitação do ENVI-met é que os resultados específicos dessa temática só estão disponíveis a partir da inserção de uma fonte poluidora na construção do modelo. Ou seja, apenas a inserção de concentrações de poluentes de fundo não possibilita a análise específica de dispersão de poluentes.

Sendo assim, para cumprir com o objetivo do trabalho e ainda aproveitar melhor os resultados obtidos pelo ENVI-met, foi trabalhada uma outra variável, a temperatura. Tal parâmetro foi escolhido devido à possibilidade de mensuração um dos benefícios da inserção de SBN numa área urbana industrial. Por fim, as variáveis trabalhadas no ENVI-met foram:

- Fluxo de CO₂ das plantas (mg/m².s): que permite analisar a absorção e a emissão de dióxido de carbono por parte das plantas;
- Temperatura do ar potencial (°C): que nas modelações 3D do ENVI-met pode ser considerada como a temperatura absoluta do ar, sendo um bom indicativo da vantagem da vegetação em termos de arrefecimento.

As análises dos mapas temáticos foram baseadas nas comparações das divergências de cores da área de estudo, sendo que as partes mais externas do modelo foram consideradas como a *nesting área*, adicionada como um espaço vazio, apenas considerando uma superfície de concreto. Logo, as bordas do modelo, ou seja, a *nesting area*, não foram consideradas como informações relevantes nas discussões.

4.3.1 Cenário 0

Para essa situação foram gerados mapas temáticos do fluxo vertical de CO₂ através da interface superfície/atmosfera e da temperatura potencial do ar. Não foram consideradas as análises para a previsão desse cenário, pois já que ele não possuía árvores passíveis de desenvolvimento, uma simulação para 2052 não teria divergências significativas para a do ano de 2022, já que o único parâmetro que seria alterado era o ano.

As análises na aplicação Leonardo foram feitas a partir do mapa temático resultante do horário de maior temperatura (15:00). A seguir são apresentados de forma

segregada os resultados referentes ao fluxo de CO₂ das plantas e temperatura potencial do ar.

4.3.1.1 Fluxo de CO₂ das Plantas

As plantas, de forma geral, têm a capacidade de absorver o CO₂ da atmosfera durante o processo de fotossíntese, que ocorre no período diurno. Já durante a noite, as plantas realizam principalmente apenas o processo de respiração, que por sua vez emite dióxido de carbono. Nesse sentido, o balanço em relação ao fluxo de CO₂ pode ser representado com sinal negativo quando se trata de absorção de dióxido de carbono, e positivo quando se trata de emissão desse gás (Anderson et al., 2021).

Na Figura 34 abaixo é apresentado o mapa temático do parâmetro Fluxo de CO₂ das Plantas para às 15:00, horário de maior temperatura, podendo ser considerado um momento de grande incidência solar e, portanto, representativo em termos de fotossíntese.

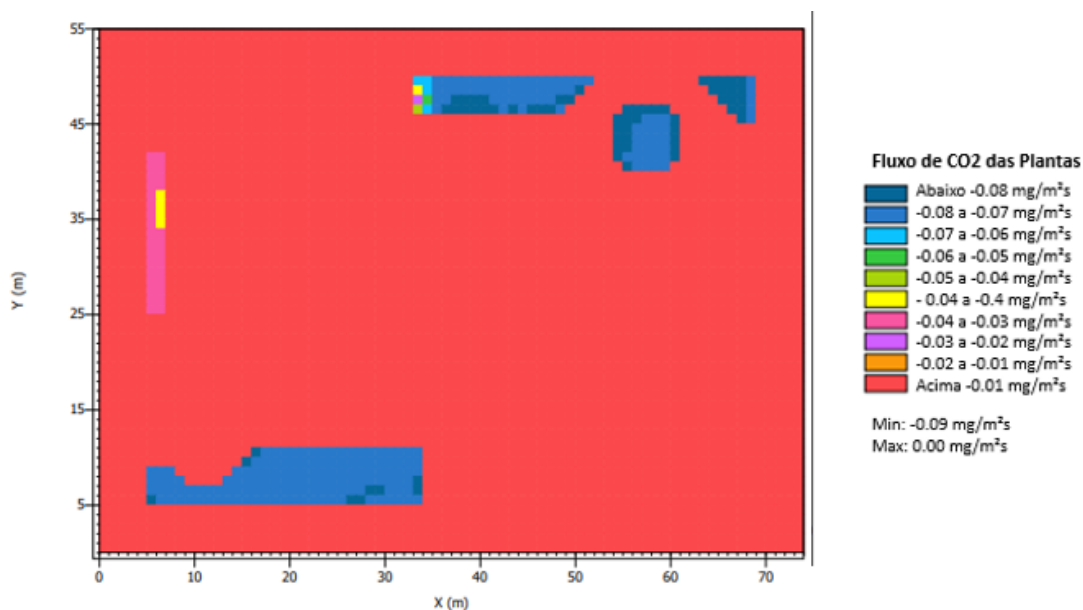


Figura 34: Fluxo de CO₂ das plantas no Cenário 0 em 2022, às 15:00.

Nota-se que para este cenário quase toda a área, no horário de maior temperatura, é caracterizada pela absorção de CO₂, indicada pelo sinal negativo na legenda. A cor predominante (vermelho) são áreas de asfalto, solo exposto e áreas com concreto, que correspondem ao menor valor de absorção de dióxido de carbono, de -0,005 mg/m²s, considerado como um valor residual.

As outras áreas em destaque de coloração azul, que envolvem quantitativos maiores, principalmente de valor médio correspondente a -0,08 mg/m²s, são espaços onde

existem vegetação rasteira (relva) ou solo exposto. Como o parâmetro analisado refere-se ao fluxo vertical de CO₂, nota-se que essas são áreas que mais possuem dióxido de carbono sendo absorvido.

Por fim, outra cor menos relevante observada é a rosa, que corresponde a uma das intervenções do projeto INDNATUR, onde há presença de vegetação e superfície permeável e possui o valor associado de fluxo de CO₂ de -0,035 mg/m²s.

Para se alcançar um montante, nesse caso, de absorção de CO₂ para o Cenário 0, primeiro obteve-se o valor das áreas das regiões representadas pelas principais cores indicadas na Figura 34. Para isso foi utilizada uma ferramenta de sensoriamento remoto, o QGis. Nesse sentido os resultados obtidos foram:

- Área em azul: aproximadamente 7.230 m²;
- Área em rosa: aproximadamente 780 m²;
- Área em vermelho: aproximadamente 34.990 m².

A partir disso, multiplicou-se as áreas pela média dos fluxos representados por cada cor e pelo tempo em segundos equivalente a uma hora (3.600 segundos), já que o mapa retorna valores de intervalos a cada 60 minutos, para a obtenção de um valor em massa da quantidade de dióxido de carbono emitida. A Tabela 23 abaixo apresenta os resultados obtidos a partir dessa análise.

Tabela 23: Valores de absorção de CO₂ pelo Cenário 0 às 15:00.

Áreas do mapa	Absorção de CO ₂
Azul	- 2.082,24 g/h
Rosa	- 98,28 g/h
Vermelho	- 629,82 g/h
TOTAL	- 2.810,34 g/h

Os valores apresentados mostram que no total o Cenário 0, para o horário de maior temperatura, absorve aproximadamente 2,8 kg de CO₂ por hora. A simbologia negativa, como dito anteriormente, indica apenas a direção do fluxo (negativo para absorção, e positivo para emissão). Também nota-se que as áreas relvadas são as que mais absorvem dióxido de carbono nessa hora analisada, atingindo um valor aproximado de 99,9% do total.

4.3.1.2 Temperatura Potencial do Ar

Como não foi possível analisar as vantagens das SBN em relação à poluição atmosférica de fundo, utilizou-se esse um parâmetro para demonstração de outra vantagem da aplicação de SBN, a regulação térmica.

Na Figura 35 abaixo é apresentado o mapa temático das 15:00, horário de maior incidência solar para o parâmetro de Temperatura do Ar Potencial (°C). Assim, é possível analisar o comportamento da vegetação frente a um momento de grande incidência solar.

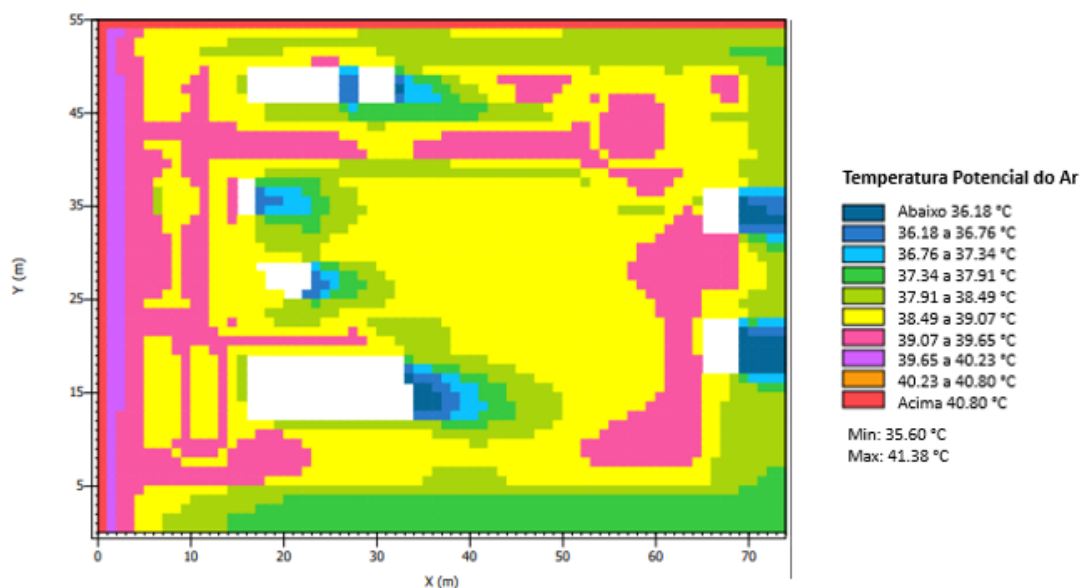


Figura 35: Temperatura potencial do ar no Cenário 0 em 2022, às 15:00.

Sendo esse um mapa mais diverso, observa-se que a maioria das áreas compostas por asfalto, concreto e algumas pequenas partes com solo exposto e relva, a rotunda, por exemplo, são caracterizadas pela cor rosa, que abrange a temperatura média de 39,36 °C. Já a área amarela, predominante no mapa, engloba áreas, principalmente, de solo exposto que atingem uma temperatura média de 38,78 °C, ligeiramente menor que áreas asfaltadas e concretadas. As maiores temperaturas do mapa estão associadas principalmente a uma maior exposição solar e ao menor albedo das superfícies artificiais.

Outro aspecto relevante observado na Figura 35 são as áreas em azul, rodeadas por verde, que representam zonas sombreadas pelos edifícios (em branco). Quanto mais próximo da edificação, menor é a temperatura, representado pela cor azul mais escura, que atinge uma temperatura média de 35,89 °C. As áreas em verde claro, também representativas no mapa, indicam temperatura média de 38,20 °C.

Em termos comparativos, nota-se que a diferença das áreas de maior temperatura, para áreas sombreadas pelos edifícios é de aproximadamente 3,47 °C. Logo, é notável a importância da existência de áreas sombreadas em termos de arrefecimento de uma área.

4.3.2 Cenário 1 atual

Para o Cenário 1 foram consideradas as duas simulações temporais, a referente ao ano 2022 e ao de 2052. Assim como feito para o Cenário 0, as análises no Leonardo foram referentes às 15:00, horário de maior temperatura. A seguir são apresentados de forma segregada os resultados referentes ao fluxo de CO₂ da área de estudo e temperatura potencial do ar apenas para o Cenário 1 atual.

4.3.2.1 Fluxo de CO₂ das Plantas

Na Figura 36 abaixo é apresentado o mapa temático do parâmetro Fluxo de CO₂ das Plantas para às 15:00 do Cenário 1 atual.

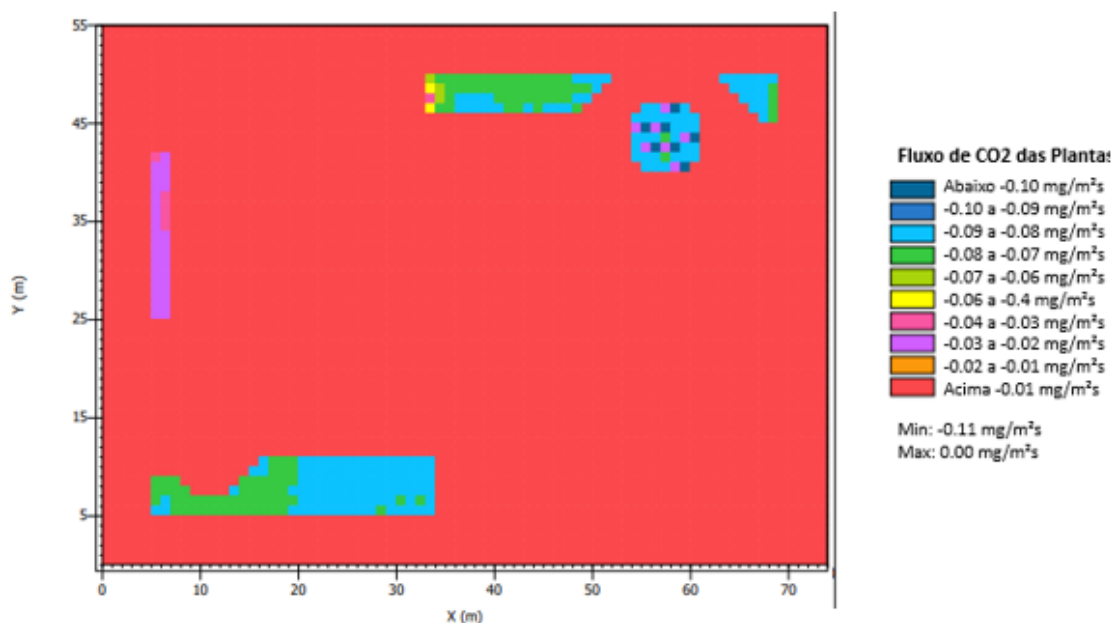


Figura 36: Fluxo de CO₂ das plantas no Cenário 1 em 2022, às 15:00.

Nota-se que para esse cenário, assim como o anterior, quase toda a área no horário de maior temperatura é caracterizada pela absorção de CO₂, indicada pelo sinal negativo na legenda. A cor predominante (vermelho) são áreas de asfalto, solo exposto, concreto e a maioria dos exemplares arbóreos presentes nas vias para essa situação, incluindo árvores jovens. Essa cor corresponde ao menor valor médio de absorção de dióxido de carbono, de -0,005 mg/m²s.

Diferente do Cenário 0, nesse caso é possível distinguir duas cores predominantes nas regiões de relva, verde e azul. A primeira representa aproximadamente 37% da área ocupada por tais cores, tendo um valor associado de $-0,065 \text{ mg/m}^2\text{s}$. Já a parcela azul está associada a valores maiores de absorção (valor médio de $-0,09 \text{ mg/m}^2\text{s}$), ocupando uma parcela maior que a verde nessas áreas vegetadas e de solo exposto.

Por fim, outra cor menos relevante observada é a roxa, que corresponde a uma das intervenções do projeto INDNATUR, onde há presença de vegetação e superfície permeável. Tal cor também está presente em pontos da rotunda, representando as árvores jovens existentes no local, e está associada a um valor de fluxo de CO_2 de $-0,025 \text{ mg/m}^2\text{s}$.

Para se alcançar um montante, nesse caso, de absorção de CO_2 para o Cenário 1 atual, primeiro obteve-se o valor das áreas das regiões representadas pelas principais cores presentes na Figura 36. Para isso foi utilizada uma ferramenta de sensoriamento remoto, o QGis. Nesse sentido os resultados obtidos foram:

- Área em verde: aproximadamente 3.040 m^2 ;
- Área em azul: aproximadamente 4.048 m^2 ;
- Área em roxo: aproximadamente 922 m^2 ;
- Área em vermelho: aproximadamente 34.990 m^2 .

A partir disso, multiplicou-se as áreas pela média dos fluxos representados por cada cor e pelo tempo em segundos equivalente a uma hora (3.600 segundos), já que o mapa retorna valores de intervalos horários, para a obtenção de um valor em massa da quantidade de dióxido de carbono emitida. A Tabela 24 abaixo apresenta os resultados obtidos a partir dessa análise.

Tabela 24: Valores de absorção de CO_2 pelo Cenário 1 às 15:00.

Áreas do mapa	Absorção de CO_2
Verde	- 711,36 g/h
Azul	- 1.311,55 g/h
Roxo	- 82,98 g/h
Vermelho	- 629,82 g/h
TOTAL	- 2.735,71 g/h

Os valores apresentados mostram que no total o Cenário 1, para o horário de maior temperatura, absorve aproximadamente 2,7 kg de CO₂ por hora. A simbologia negativa, como dito anteriormente, indica apenas a direção do fluxo (negativo para absorção, e positivo para emissão). Também nota-se que as áreas relvadas, em azul principalmente, são as que mais absorvem dióxido de carbono nessa hora analisada, atingindo um valor aproximado de 46% do total.

Os valores totais ficaram semelhantes aos encontrados no Cenário 0, porém com uma leve diferença no total, sendo que o Cenário 1 teve um total ligeiramente menor que o Cenário 0. Sendo assim, de acordo com as simulações realizadas no ENVI-met, não se nota uma diferença relevante para um cenário sem árvores e um com árvores principalmente jovens no âmbito de absorção de CO₂. Entretanto, ressalta-se que muitas das árvores são jovens e ainda não alcançaram todo o seu potencial fotossintético.

4.3.2.2 Temperatura Potencial do Ar

Em termos de temperatura, na Figura 37 abaixo é apresentado o mapa temático das 15:00, horário de maior incidência solar para o parâmetro de Temperatura do Ar Potencial (°C). Assim, é possível analisar o comportamento da vegetação frente a um momento de grande incidência solar.

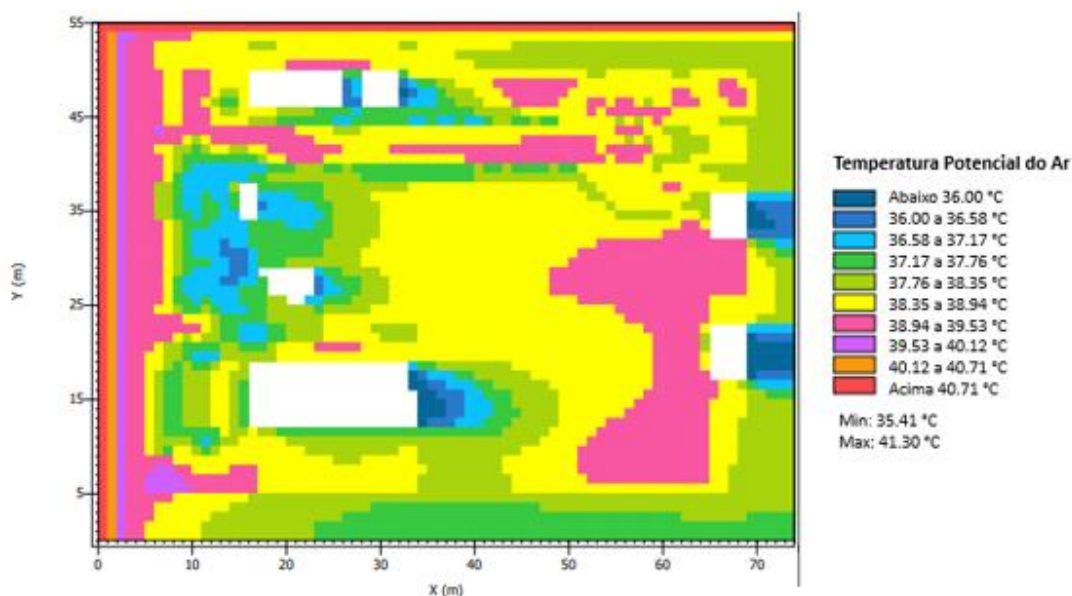


Figura 37: Temperatura potencial do ar no Cenário 1 em 2022, às 15:00.

Sendo esse um mapa mais diverso, observa-se que em comparação com o Cenário 0 as temperaturas são ligeiramente menores. a maioria das áreas compostas por asfalto, concreto e algumas pequenas partes com solo exposto, são caracterizadas pela cor

rosa, que abrange a temperatura média de 39,24 °C. Já a área amarela, predominante no mapa, engloba áreas, principalmente, de solo exposto e áreas sombreadas por árvores, que atingem uma temperatura média de 38,65 °C, ligeiramente menor que áreas asfaltadas e concretadas.

Outro aspecto relevante observado na Figura 37 são as áreas em azul, rodeadas por verde, que representam principalmente zonas sombreadas por árvores mais desenvolvidas ou pelos edifícios (em branco). Quanto mais próximo das árvores ou das edificações, menor é a temperatura, representado pela cor azul mais escura, que atinge uma temperatura média de 35,71 °C. A cor verde clara possui uma temperatura média de 38,06 °C, já as áreas representadas pela cor azul claro indicam regiões que possuem temperatura média de 36,88 °C.

Em termos comparativos, nota-se que a diferença das áreas de maior temperatura, para áreas sombreadas pelas árvores ou pelos edifícios é de aproximadamente 3,53 °C. Sendo a área de estudo considerada como uma zona não muito extensa, essa diferença se torna relevante, mostrando as vantagens de se ter zonas sombreadas em locais abertos.

4.3.3 Cenário 1 previsão

Para o Cenário 1 previsto, referente ao ano de 2052, foram consideradas árvores mais velhas no modelo. Assim como feito para os cenários anteriores, as análises no Leonardo foram referentes às 15:00, horário de maior temperatura. A seguir são apresentados de forma segregada os resultados referentes ao fluxo de CO₂ das plantas e temperatura potencial do ar.

4.3.3.1 Fluxo de CO₂ das Plantas

Na Figura 38 abaixo é apresentado o mapa temático do parâmetro Fluxo de CO₂ das Plantas para às 15:00 do Cenário 1 previsto. Por ser uma situação que já contempla presença de algumas árvores, e podendo ser considerado um momento de grande incidência solar e, portanto, representativo em termos de fotossíntese, ainda mais considerando que as árvores já estariam em um momento de maior desenvolvimento estrutural.

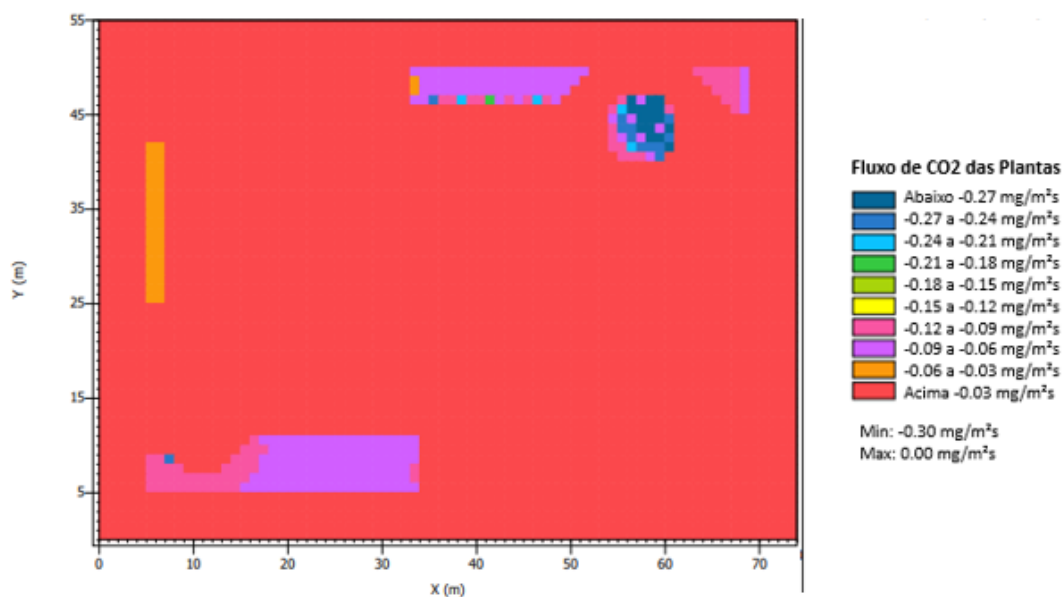


Figura 38: Fluxo de CO₂ das plantas no Cenário 1 em 2052, às 15:00.

Nota-se que para esse cenário, assim como o anterior, quase toda a área no horário de maior temperatura é caracterizada pela absorção de CO₂, indicada pelo sinal negativo na legenda. Um ponto relevante é que para essa situação os valores de absorção de dióxido de carbono são substancialmente mais elevados do que para o Cenário 1 de 2022, mostrando que no futuro a vegetação arbórea terá uma capacidade maior em termos de sequestro de carbono.

A cor predominante (vermelho) são áreas de asfalto, solo exposto, concreto e a maioria dos exemplares arbóreos presentes nas vias para essa situação, incluindo árvores jovens. Essa cor corresponde ao menor valor de absorção de dióxido de carbono, com média de -0,015 mg/m²s.

Outras cores relevantes no mapa acima são a roxa e a rosa, ambas presentes principalmente nas áreas relvadas ou de solo exposto. A parcela em roxo representa um valor de fluxo médio de -0,075 mg/m²s. Já a parte em rosa engloba um valor médio de -0,11 mg/m²s.

Na rotunda a cor em destaque é a azul escura, associada a um valor de médio de -0,29 mg/m²s. Nessa zona estão presentes árvores que eram jovens em 2022, mas que para simulação do ano de 2052, já foram consideradas como adultas, e portanto, com maior potencial fotossintético.

Por fim, outra cor menos relevante observada é a laranja, que corresponde a uma das intervenções do projeto INDNATUR, onde há presença de vegetação e superfície permeável. Tal cor também está presente em pontos da rotunda, representando as árvores jovens existentes no local, e está associada a um valor de fluxo de CO₂ de -0,05 mg/m²s.

Para se alcançar um montante, nesse caso, de absorção de CO₂ para o Cenário 1 previsto, primeiro obteve-se o valor das áreas das regiões representadas pelas principais cores presentes na Figura 38. Para isso foi utilizada uma ferramenta de sensoriamento remoto, o QGis. Nesse sentido os resultados obtidos foram:

- Área em roxo: aproximadamente 4.278 m²;
- Área em rosa: aproximadamente 2.190 m²;
- Área em azul: aproximadamente 762 m²;
- Área em laranja: aproximadamente 780 m²;
- Área em vermelho: aproximadamente 34.990 m².

A partir disso, multiplicou-se as áreas pela média dos fluxos representados por cada cor e pelo tempo em segundos equivalente a uma hora (3.600 segundos), já que o mapa retorna valores de intervalos horários, para a obtenção de um valor em massa da quantidade de dióxido de carbono emitida. A Tabela 25 abaixo apresenta os resultados obtidos a partir dessa análise.

Tabela 25: Valores de absorção de CO₂ pelo Cenário 1 previsto às 15:00.

Áreas do mapa	Absorção de CO ₂
Roxo	-1.155,06 g/h
Rosa	-867,24 g/h
Azul	-795,52 g/h
Laranja	-140,40 g/h
Vermelho	-1.889,46 g/h
TOTAL	-4.847,68 g/h

Os valores apresentados mostram que no total o Cenário 1, para o horário de maior temperatura, absorve aproximadamente 4,8 kg de CO₂ por hora. Também se nota que a área com vegetação arbórea e relva localizada na rotunda é a parcela que possui o maior fluxo de CO₂. Dessa vez, o valor total de absorção de CO₂ encontrado no Cenário

1 previsto, foi mais significativo, mostrando que a utilização de árvores como instrumentos de intervenção de SBN podem alcançar uma melhora ao longo do tempo.

4.3.3.2 Temperatura Potencial do Ar

Em termos de temperatura, na Figura 39 abaixo é apresentado o mapa temático das 15:00, horário de maior incidência solar para o parâmetro de Temperatura do Ar Potencial (°C). Assim, é possível analisar o comportamento da vegetação desenvolvida do Cenário 1 frente a um momento de grande incidência solar.

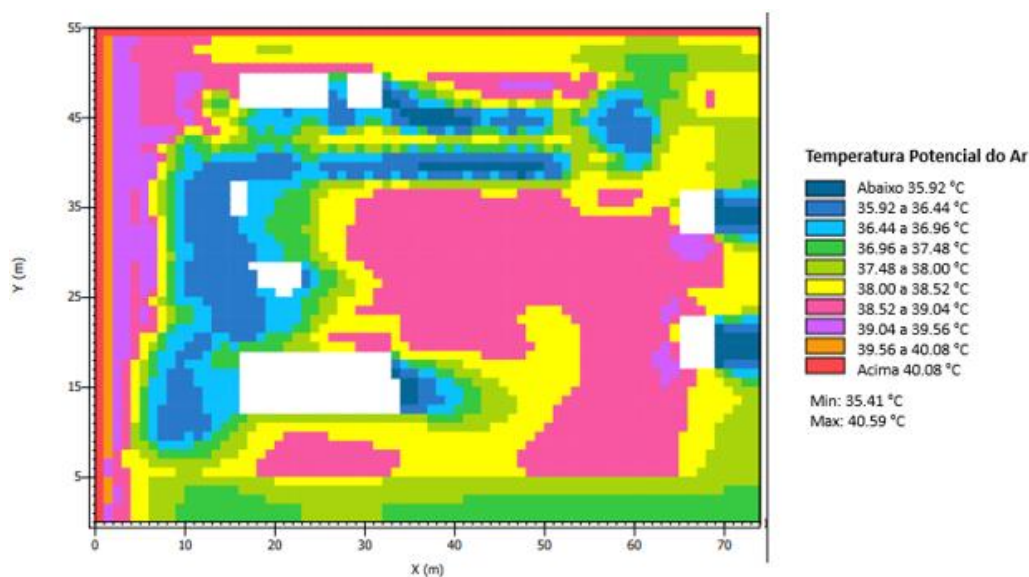


Figura 39: Temperatura potencial do ar no Cenário 1 em 2052, às 15:00

Observa-se que em comparação com os cenários anteriores, as temperaturas são ligeiramente menores. Há uma maior composição de cores no mapa, sendo que as partes caracterizadas por vias de asfalto e concreto, em sua maioria, não estão na parcela de maior temperatura, pois estão cobertos por árvores com maior área foliar, que consequentemente, ocasionam em uma maior área sombreada.

A maioria das áreas compostas solo exposto são caracterizadas pela cor rosa, que abrange a temperatura média de 38,78 °C. Já a área amarela engloba áreas, principalmente, de solo exposto e atingem uma temperatura média de 38,26 °C, ligeiramente menor que as áreas em rosa.

O aspecto relevante observado na Figura 37 são as áreas em azul, rodeadas por verde, que representam principalmente zonas sombreadas por árvores mais desenvolvidas ou pelos edifícios (em branco). Nesse mapa já é notável a formação de um corredor com

a coloração predominantemente azul, que possui uma temperatura média associada de 36,18 °C. Além disso, quanto mais próximo das árvores ou das edificações, menor é a temperatura, representado pela cor azul mais escura, que atinge um valor médio de 35,67 °C, e a cor verde clara possui uma temperatura média de 37,74 °C.

Em termos comparativos, nota-se que a diferença das áreas de maior temperatura, para áreas sombreadas pelas árvores ou pelos edifícios é de aproximadamente 3,11 °C, sendo ainda esse cenário com menores temperaturas, se comparado com Cenário 0 e Cenário 1 atual.

4.3.4 Cenário 2 atual

Para o Cenário 2 foram consideradas as duas simulações temporais, a referente ao ano 2022 e ao de 2052. Assim como feito para os outros cenários, as análises no Leonardo foram referentes às 15:00, horário de maior temperatura. A seguir são apresentados de forma segregada os resultados referentes ao fluxo de CO₂ das plantas e temperatura potencial do ar apenas para o Cenário 2 atual.

4.3.4.1 Fluxo de CO₂ das Plantas

Na Figura 40 abaixo é apresentado o mapa temático do parâmetro Fluxo de CO₂ das Plantas para às 15:00 do Cenário 2 do ano de 2022. Essa situação engloba todas as árvores previstas para o Cenário 1 do ano de 2022, com acréscimo de outros exemplares arbóreos compondo a área proposta de zona verde funcional, sendo considerado assim, o cenário com maior número de vegetação.

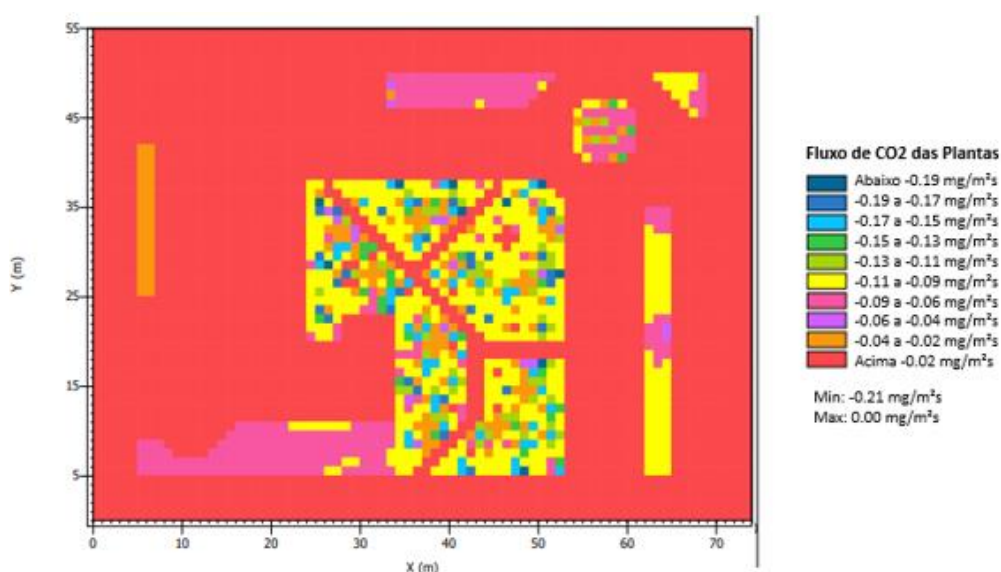


Figura 40: Fluxo de CO₂ das plantas no Cenário 2 em 2022, às 15:00.

Também se tratando de uma situação em que predomina-se a absorção de CO₂, o Cenário 2 em 2022 seguiu a tendência de maior fluxo de dióxido de carbono absorvido devido a uma maior presença de árvores. Também é notável que a presença do parque verde proposto atua de forma positiva e relevante para a temática em questão, entretanto, por ser composto em sua maioria por árvores jovens, entende-se que tal área não atingiu seu maior potencial fotossintético.

As cores predominantes no mapa são vermelha e amarela. A primeira são áreas de asfalto, solo exposto, concreto e alguns exemplares arbóreos localizados nas principais vias. Essa cor corresponde ao menor valor de absorção de dióxido de carbono, com média de -0,01 mg/m²s.

Já a parcela amarela engloba principalmente as zonas onde estão sendo propostos a inserção de árvores para confecção da zona verde funcional, além de áreas laterais à nova via de acesso também considerada nesse modelo. O valor de fluxo de CO₂ considerado para essa cor tem valor médio de -0,1 mg/m²s.

A cor rosa também está presente em áreas relevantes, principalmente de relva, e possui um valor associado médio de -0,075 mg/m²s. Em laranja corresponde principalmente a uma das intervenções do projeto INDNATUR, onde há presença de vegetação e superfície permeável, e a pequenas áreas na área proposta e possui um valor médio associado de fluxo de CO₂ de -0,03 mg/m²s.

Também se observam diversos pontos azuis dispersos a longo da área verde proposta, provavelmente associados à certos exemplares arbóreos mais relevantes em termos de absorção de CO₂. A cor azul claro possui um valor associado de -0,16 mg/m²s, a azul escura possui valor médio máximo de absorção de -0,20 mg/m²s. Também nota-se a presença de pequenas manchas verdes, também associadas a presença de certas árvores que possuem um valor médio de fluxo de dióxido de carbono de -0,12 mg/m²s.

Para se alcançar um montante, nesse caso, de absorção de CO₂ para o Cenário 2 no ano de 2022, primeiro obteve-se o valor das áreas das regiões representadas pelas principais cores presentes na Figura 40. Para isso foi utilizada uma ferramenta de sensoriamento remoto, o QGIS. Nesse sentido os resultados obtidos foram:

- Área em laranja: aproximadamente 3.398 m²;

- Área em rosa: aproximadamente 7.520 m²;
- Área em amarelo: aproximadamente 10.234 m²;
- Área em azul claro: aproximadamente 1.290 m²;
- Área em azul escuro: aproximadamente 920 m²;
- Área em verde: aproximadamente 2.038 m²;
- Área em vermelho: aproximadamente 17.600 m².

A partir disso, multiplicou-se as áreas pela média dos fluxos representados por cada cor e pelo tempo em segundos equivalente a uma hora (3.600 segundos), já que o mapa retorna valores de intervalos horários, para a obtenção de um valor em massa da quantidade de dióxido de carbono emitida. A Tabela 26 abaixo apresenta os resultados obtidos a partir dessa análise.

Tabela 26: Valores de absorção de CO₂ pelo Cenário 2 no ano de 2022 às 15:00.

Áreas do mapa	Absorção de CO₂
Laranja	-366,98 g/h
Rosa	-2.030,40 g/h
Amarelo	-3.684,24 g/h
Azul claro	-743,04 g/h
Azul escuro	-662,40 g/h
Verde	-880,42 g/h
Vermelho	-633,60 g/h
TOTAL	-9.001,08 g/h

Os valores apresentados mostram que no total o Cenário 2 no ano de 2022, para o horário de maior temperatura, absorveria aproximadamente 9,0 kg de CO₂ por hora. Também se nota que a área verde proposta seria a parcela que possuiria o maior fluxo de CO₂. Dessa vez, o valor total de absorção de CO₂ encontrado nesse cenário foi mais significativo do que os analisados anteriormente, reforçando ainda mais a vantagem da utilização de árvores em zonas industriais em termos de absorção de CO₂.

4.3.4.2 Temperatura Potencial do Ar

Em termos de temperatura, na Figura 41 abaixo é apresentado o mapa temático das 15:00, horário de maior incidência solar para o parâmetro de Temperatura do Ar

Potencial (°C). Assim, é possível analisar o comportamento de um cenário com maior número de vegetação frente a um momento de grande incidência solar.

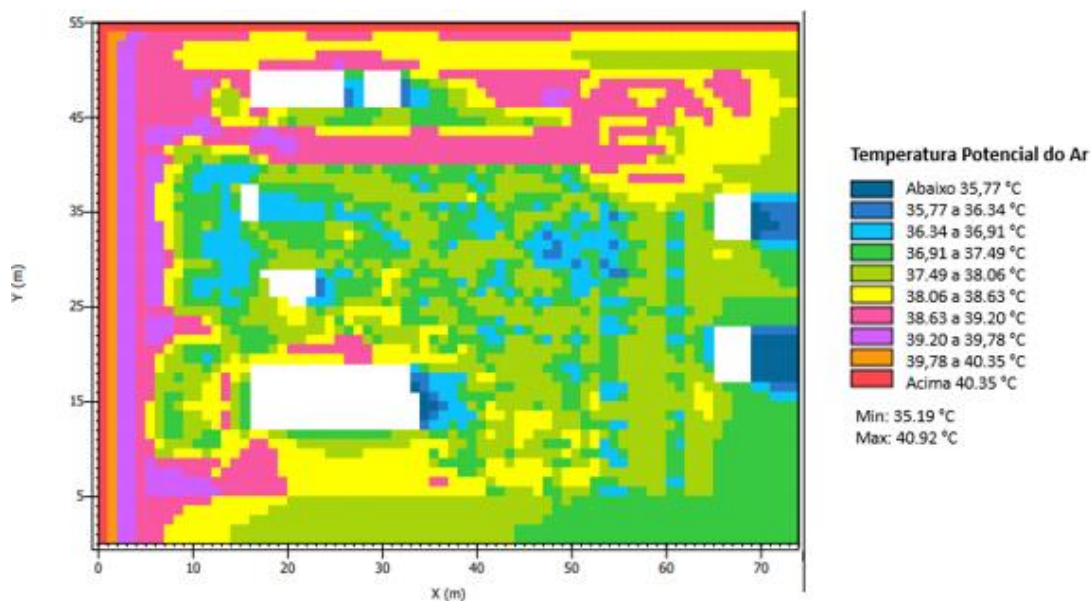


Figura 41: Temperatura potencial do ar no Cenário 2 em 2022, às 15:00.

Comparado com o cenário anterior, nota-se que nesse a presença de mais vegetação, mesmo que ainda jovem, faz com que a maior parte da área de estudo seja composta por zonas verdes, que possuem uma temperatura média de 37,49 °C, e por manchas azuis, que possuem temperatura média de 36,63 °C. Essa conformação mostra a influência positiva da presença de uma zona verde mais densa, que influencia positivamente toda a área ao redor em termos de arrefecimento da temperatura do ar.

Outras cores significantes presentes no mapa são a amarela, que engloba áreas principalmente de relva e solo exposto, e que está associada a uma temperatura média de 38,35 °C, e a rosa, que representa principalmente regiões com asfalto e concreto, e nesse caso, excluindo a *nesting área*, atinge a maior temperatura do cenário, alcançando um valor médio de 38,92°C.

Outro aspecto observado na Figura 41 são as áreas em azul escuro, que representam principalmente zonas sombreadas por um maior número de árvores mais desenvolvidas ou pelos edifícios (em branco). Quanto mais próximo das árvores ou das edificações, menor é a temperatura, representado pela cor azul mais escura, que atinge uma temperatura média de 35,48 °C.

Em termos comparativos, nota-se que a diferença das áreas de maior temperatura, para áreas sombreadas pelas árvores ou pelos edifícios é de aproximadamente 3,44 °C. Sendo a área de estudo considerada como uma zona não muito extensa, essa diferença se torna relevante, mostrando as vantagens de se ter zonas sombreadas em locais abertos. Além disso, de forma geral, a parte vegetal presente nesse cenário já mostra com um importante aspecto na conformação global das temperaturas da área de estudo.

4.3.5 Cenário 2 previsão

Para o Cenário 2 previsto, referente ao ano de 2052, foram consideradas árvores mais desenvolvidas no modelo. Assim como feito para os cenários anteriores, as análises no Leonardo foram referentes às 15:00, horário de maior temperatura. A seguir são apresentados de forma segregada os resultados referentes ao fluxo de CO₂ das plantas e temperatura potencial do ar.

4.3.5.1 Fluxo de CO₂ das Plantas

Na Figura 42 abaixo é apresentado o mapa temático do parâmetro Fluxo de CO₂ das Plantas para às 15:00 do Cenário 2 previsto. Por ser a situação com maior número de árvores e em seu maior grau de desenvolvimento, a análise de um momento de grande incidência solar se mostra como representativo em termos de fotossíntese, ainda mais considerando que as árvores já estariam em um momento de maior desenvolvimento estrutural.

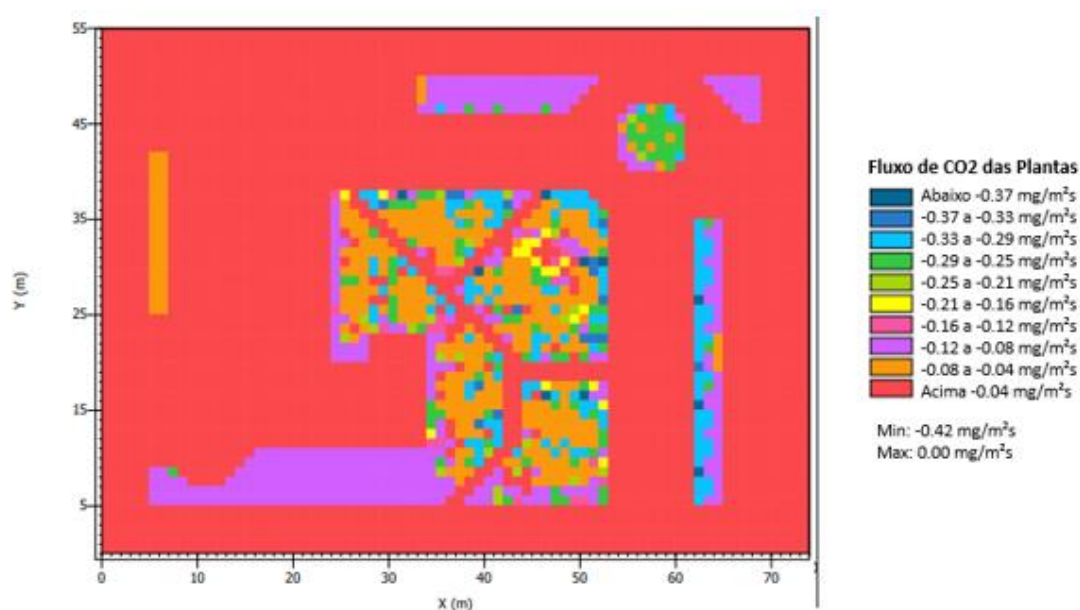


Figura 42: Fluxo de CO₂ das plantas no Cenário 2 em 2052, às 15:00.

Também se tratando de uma situação onde predomina-se a absorção de CO₂, o Cenário 2 em 2022 seguiu a tendência de maior fluxo de dióxido de carbono absorvido devido a uma maior presença de árvores. Nesse caso nota-se que o desenvolvimento das árvores propostas para zona verde funcional acarretam em áreas com diferentes tipos de tendências de fluxo de CO₂, entretanto, as colorações azuis, principalmente azul claro, que indicam uma maior absorção, está mais presente nessa região, tendo um valor associado de -0,31 mg/m²s.

As cores predominantes no mapa são vermelha, laranja e roxo. A primeira são áreas de asfalto, solo exposto, concreto e alguns exemplares arbóreos localizados nas principais vias. Essa cor corresponde ao menor valor de absorção de dióxido de carbono, com média de -0,02 mg/m²s.

Já a parcela em laranja engloba principalmente na área de intervenção proposta, e parte do projeto de intervenção de INDNATUR. O valor de fluxo de CO₂ considerado para essa cor tem valor médio de -0,06 mg/m²s.

A cor roxa também está presente em áreas relevantes, principalmente de relva, solo exposto e ainda regiões na zona verde proposta e possui um valor associado médio de -0,1 mg/m²s. Outra cor presente é a verde, aparente na rotunda e em algumas manchas e zona verde proposta, ela equivale a um valor médio de fluxo de CO₂ de -0,27 mg/m²s. A cor amarela presente em pequenos pontos na zona verde proposta representa um valor médio de -0,19 mg/m²s.

Os pontos azuis escuro dispersos a longo da área verde proposta, provavelmente associados à certos exemplares arbóreos mais relevantes em termos de absorção de CO₂, estão associados ao maior valor de absorção, alcançando um valor médio de -0,40 mg/m²s.

Para se alcançar um montante, nesse caso, de absorção de CO₂ para o Cenário 2 no ano de 2052, primeiro obteve-se o valor das áreas das regiões representadas pelas principais cores presentes na Figura 42. Para isso foi utilizada uma ferramenta de sensoriamento remoto, o QGis. Nesse sentido os resultados obtidos foram:

- Área em laranja: aproximadamente 7.792 m²;
- Área em roxo: aproximadamente 9.817 m²;

- Área em verde: aproximadamente 2.867 m²;
- Área em azul claro: aproximadamente 3.008 m²;
- Área em azul escuro: aproximadamente 629 m²;
- Área em amarelo: aproximadamente 368 m²;
- Área em vermelho: aproximadamente 18.519 m².

A partir disso, multiplicou-se as áreas pela média dos fluxos representados por cada cor e pelo tempo em segundos equivalente a uma hora (3.600 segundos), já que o mapa retorna valores de intervalos horários, para a obtenção de um valor em massa da quantidade de dióxido de carbono emitida. A Tabela 27 abaixo apresenta os resultados obtidos a partir dessa análise.

Tabela 27: Valores de absorção de CO₂ pelo Cenário 2 no ano de 2052 às 15:00.

Áreas do mapa	Absorção de CO ₂
Laranja	- 1.683,07 g/h
Roxo	- 3.534,12 g/h
Verde	- 2.786,72 g/h
Azul claro	- 3.356,93 g/h
Azul escuro	- 905,76 g/h
Amarelo	- 251,71 g/h
Vermelho	- 1.333,37 g/h
TOTAL	- 13.851,68 g/h

Os valores apresentados mostram que no total o Cenário 2 no ano de 2052, para o horário de maior temperatura, absorveria aproximadamente 13,9 kg de CO₂ por hora. Também é notável que a área verde proposta seria a parcela que possuiria o maior fluxo de CO₂. Outro fator importante a ser levado em consideração é que nesse cenário a área estaria mais vegetada e com as árvores já mais desenvolvidas, logo, entre todas as situações analisadas essa seria a mais relevante em termos de absorção de CO₂.

4.3.5.2 Temperatura Potencial do Ar

Em termos de temperatura, na Figura 43 abaixo é apresentado o mapa temático das 15:00, horário de maior incidência solar para o parâmetro de Temperatura do Ar Potencial (°C). Assim, é possível analisar o comportamento de um cenário com maior número de vegetação já desenvolvida frente a um momento de grande incidência solar.

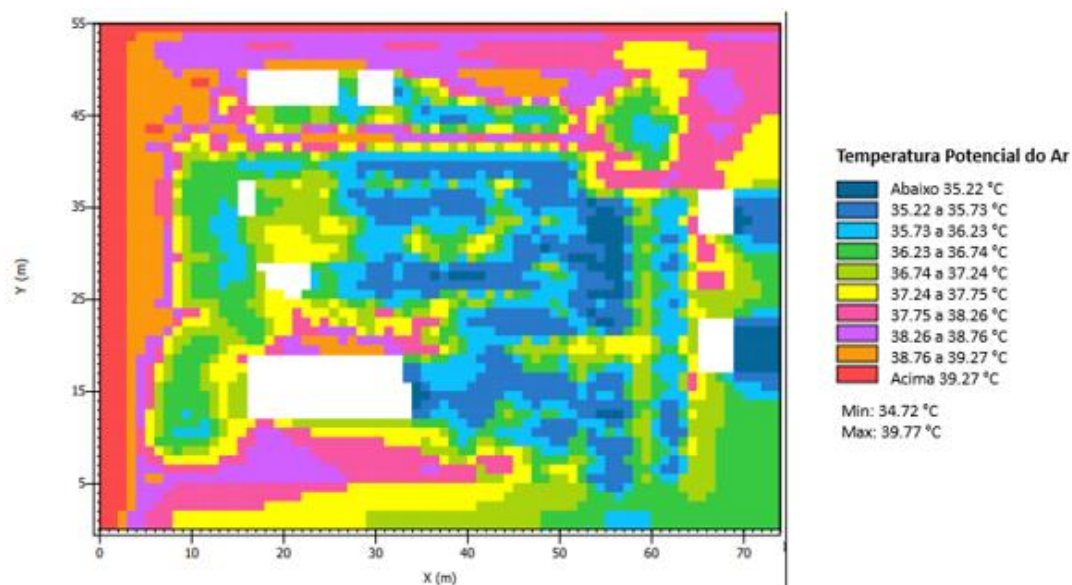


Figura 43: Temperatura potencial do ar no Cenário 2 em 2052, às 15:00.

Comparado com os cenários anteriores, nota-se que nesse a presença de mais vegetação em um estágio avançado de desenvolvimento, faz com que a temperatura global da área de estudo seja menor. A maior parte do Cenário 2, excluindo a *nesting area*, é composta por zonas azuis, abrangendo principalmente zonas mais frescas que possuem uma temperatura média de 35,73 °C, e por áreas em verde, que compreende a regiões com vegetação e que possuem temperatura média de 36,49 °C

Outras cores significantes presentes no mapa são a roxa e rosa, presentes principalmente em áreas de vias de acesso e solo exposto. A primeira está associada a uma temperatura média de 38,51 °C, e a rosa alcança um valor médio de 37, 86 °C.

Outro aspecto observado na Figura 43 são as áreas em azul escuro, que representam principalmente zonas sombreadas por um maior número de árvores mais desenvolvidas ou pelos edifícios (em branco), sendo que nesse cenário essas manchas são mais presentes. Tal temperatura atinge um valor médio de 34,97 °C.

Em termos comparativos, nota-se que a diferença das áreas de maior temperatura, para áreas sombreadas pelas árvores ou pelos edifícios é de aproximadamente 3,54 °C. Essa conformação mostra a influência positiva da presença de uma zona verde mais densa e desenvolvida, que influencia positivamente no arrefecimento da área, abaixando as temperaturas médias globais, principalmente quando comparado com os cenários anteriores.

4.4 Comparação dos Cenários pelo ENVI-met

Em relação aos valores obtidos a partir das simulações dos cenários no ENVI-met, foi possível realizar a comparação entre as três situações para 2022 e apenas para o Cenário 1 e Cenário 2 para o ano de 2052. Os resultados foram sintetizados na Tabela 28 abaixo.

Tabela 28: Comparação entre os cenários simulados no ENVI-met.

Parâmetro	Cenário 0 atual	Cenário 1 atual	Cenário 1 previsão	Cenário 2 atual	Cenário 2 previsão
Absorção de CO ₂	2,8 kg/h	2,7 kg/h	4,8 kg/h	9,0 kg/h	13,9 kg/h
Temperatura máxima	39,76 °C	39,24 °C	38,78 °C	38,92 °C	38,51 °C
Temperatura mínima	35,89 °C	35,71 °C	35,67 °C	35,48 °C	34,97 °C

Ao observar os resultados da tabela acima nota-se que na maioria dos cenários a medida que há um incremento no número de árvore, a quantidade de CO₂ absorvido aumenta. Um fator de influência relevante acerca desse parâmetro é o grau de desenvolvimento da vegetação. Ao comparar os resultados dos cenários previstos com seus pares atuais, é observado um aumento significativo na quantidade de dióxido de carbono absorvido pela área.

Em relação direta para os cenários atuais, a implantação de uma zona verde, como proposto, gera um aumento imediato de mais de 200% em relação a absorção de CO₂. Embora porcentagem decaia para aproximadamente 190% quando se compara os cenários previstos, com ambas as situações com árvores desenvolvida, ainda assim é um valor representativo.

Em relação a temperatura potencial do ar, observa-se uma tendência em diminuição gradativa das temperaturas à medida que se avança de cenário. Na Figura 44 abaixo é demonstrado de forma visual essa relação.

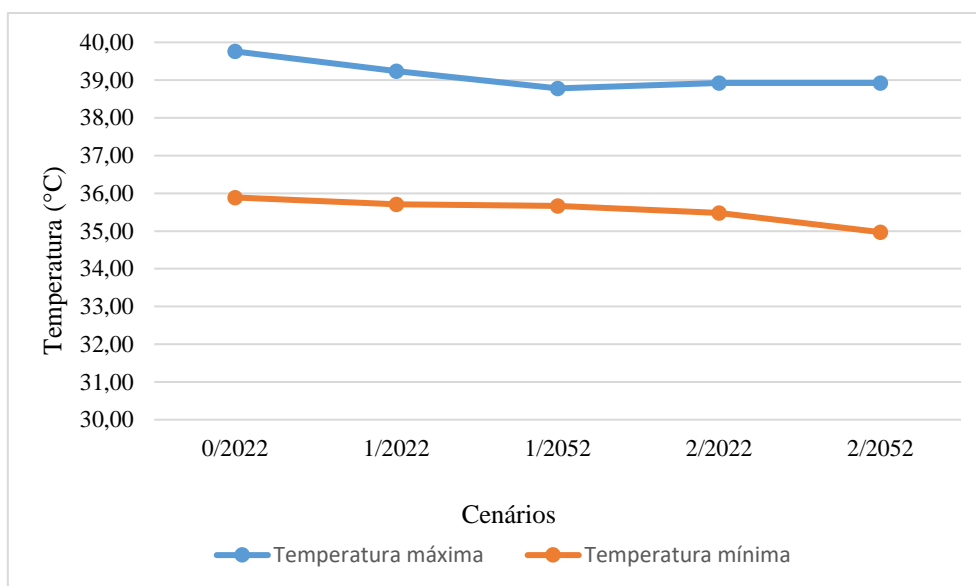


Figura 44: Gráfico comparativo das temperaturas simuladas pelo ENVI-met.

Sendo que os cenários estão representados pelo número/ano correspondente, é notável a diminuição da temperatura, tanto mínima quanto máxima, à medida que se insere um maior número de vegetação. Tal tendência é ainda mais nítida depois que a vegetação alcança um estágio relevante de grau de desenvolvimento.

Conclui-se então que as soluções baseadas na natureza, nesse caso específico referentes a introdução de árvores no local, influencia positivamente nos parâmetros de absorção de CO₂ e temperatura do ar.

Para a viabilidade dessa pesquisa considerou-se apenas a simulação de um determinado dia de verão para as análises, e, portanto, não foi possível obter valores globais anuais de absorção de CO₂ de cada cenário como feito anteriormente para o i-Tree, entretanto, ainda assim foi possível comprovar quantitativamente algumas vantagens da introdução de SBN em zonas industriais.

4.5 Comparação dos *software* i-Tree e ENVI-met

Os *software* trabalhados foram escolhidos devido a semelhança de alguns resultados que ambos os programas forneciam em relação a qualidade do ar. Entretanto, durante o decorrer da pesquisa as diferenças entre os dois sistemas ficaram mais nítidas, mostrando que a comparação direta dos valores quantitativos não seria viável para esse trabalho. Ao invés disso, foram comparados os usos e as características de trabalho de

cada *software*, expondo as principais vantagens e desvantagens da utilização de um sobre o outro.

Ressalta-se que a comparação quantitativa dos resultados obtidos pelos sistemas trabalhados é possível, porém necessita de um tratamento maior de dados por parte do ENVI-met. No caso dessa pesquisa, por exemplo, foram obtidos os valores de absorção de CO₂ pelas plantas tanto para o i-Tree, quanto para o ENVI-met, entretanto. No primeiro esse valor foi dado anualmente, e de forma mais segregada mensalmente. Já no segundo o valor pode ser obtido a cada hora de cada dia simulado, e para se obter um valor em massa de dióxido de carbono foi necessário transformar valores de fluxo de CO₂ em mg/m²s em valores mássicos em gramas.

Ambos os sistemas aparentam disponibilizar alguns resultados semelhantes, como é o caso de absorção de CO₂. Entretanto os caminhos por onde tais informações são obtidas são distintos, sendo assim, a metodologia dos *software* não é comparável.

Na Tabela 29 abaixo foi compilada as principais características do i-Tree e do ENVI-met.

Tabela 29: Comparação entre o i-Tree e ENVI-met.

	i-Tree	ENVI-met
O que simula	Benefícios ecossistêmicos das árvores	Microclima, dispersão de poluentes, análise solar, física dos edifícios, conforto térmico, humidade e fluxo de ventos.
Contexto de análise	Árvores em áreas urbanas e rurais	Principalmente contexto urbano tridimensional
Valor	Gratuito	Pago – licenças de 290,00 € a 2.900,00 € (versão demo gratuita).
Nível de dificuldade	Fácil utilização / Simples e acessível	Complexo / mais robusto e possui maior dificuldade
Tipo de resultados	Quantitativos em forma de relatórios, gráficos e tabelas	Quantitativos em forma de mapas temáticos
Características dos resultados	Simples, globais e diretos	Complexos e específicos
Análise temporal	Modelo dinâmico onde os elementos evoluem com tempo	Modelo estático onde os elementos não sofrem mudanças temporais. A evolução requiere a definição de novos cenários.

4.6 Validação dos dados

Considerando que os *software* de simulações, em grande maioria, trabalham com aproximações, a validação dos dados simulados é importante para avaliar a fiabilidade dos resultados obtidos. Tal validação pode se dar de diferentes formas, entretanto, para modelos e simulações ambientais, é comum que se utilize dados meteorológicos medidos no local e os compare com os valores simulados (Liu et al., 2021).

Para o *software* i-Tree, a validação de dados para essa pesquisa não foi viável. Os resultados simulados não foram passíveis de medição em campo, uma vez que as análises giraram em torno de dados meteorológicos e de concentrações de poluentes iniciais que foram coletados automaticamente pela estação meteorológica de Ourense, a mais de 180 km de Bragança, logo, não foram utilizados dados de medições locais.

Já para o ENVI-met, a única simulação passível de validação é a referente ao Cenário 1 no ano de 2022, ou seja, o cenário mais atual possível. Como foram coletados no local dados de temperatura com um sensor localizado no X da Figura 45, comparou-se o valor médio coletado em campo de temperatura do ar para o dia 11/07/2022 às 15:00.

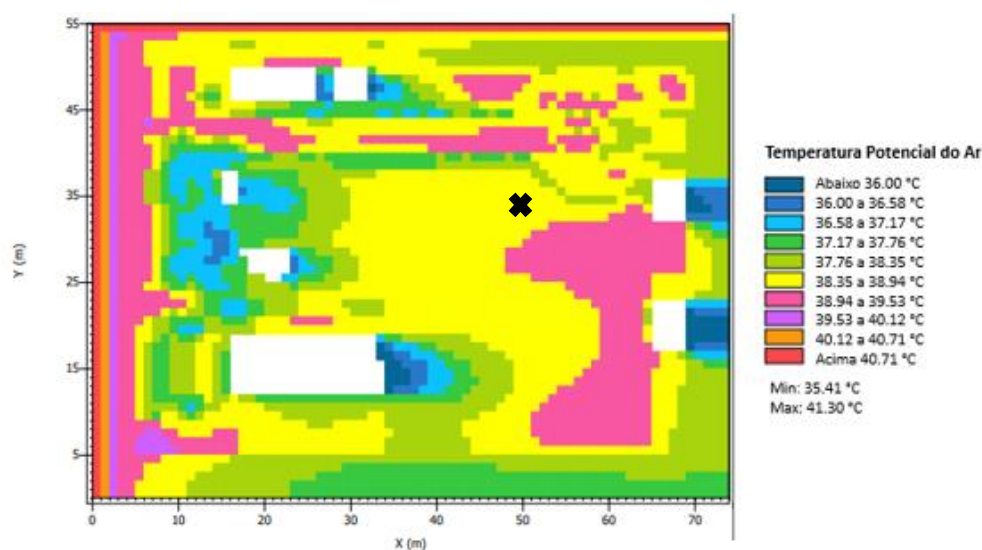


Figura 45: Localização do sensor de temperatura na área de estudo.

O sensor está localizado principalmente na zona de cor amarela, que corresponde a uma temperatura máxima de 38,94 °C. Já os dados medidos, para o intervalo horário das 15:00 do dia 11/07/2022 alcançou a temperatura de 38,36 °C. Comparando tais valores nota-se a proximidade dos dois, com um desvio menor que 1 °C, sendo esse um nível elevado de acerto, podendo ser considerado um modelo representativo da realidade.

5 CONCLUSÃO

A partir de todo trabalho desenvolvido ao longo dessa pesquisa foi possível concluir que a utilização de soluções baseadas na natureza, mais especificamente de árvores, é vantajosa em termos de qualidade do ar. Isso ficou comprovado com os resultados quantitativos obtidos com i-Tree e o ENVI-met.

O grau de desenvolvimento da população arbórea mostrou-se como um fator determinante na questão quantitativa de poluentes removidos, CO₂ absorvido e armazenado e temperatura do ar. Sendo assim, ressalta-se a importância da análise temporal futura da vegetação quando se objetiva mensurar os benefícios ecossistêmicos gerados pelas árvores.

A mensuração dos benefícios da implantação de uma área verde na zona urbana pode ser feita de diversas formas, incluindo modelações e simulações climáticas. Nesse sentido o i-Tree e o ENVI-met se mostram como *software* úteis.

Os dois sistemas possuem vantagens e limitações, e a utilização de cada um dependerá dos objetivos a serem alcançados e da disponibilidade de dados primários. Ambas as ferramentas podem e devem ser utilizadas na tomada de decisão em relação às intervenções de SBN, pois as duas permitem alcançar resultados acerca do comportamento de uma determinada área frente diferentes cenários.

Após trabalhar com os dois *software* conclui-se que o i-Tree é uma ferramenta mais simples, mais acessível para a sociedade civil e é indicada para a obtenção de resultados mais globais acerca de uma determinada área. Por não considerar toda a gama de complexidade que compõe um ambiente urbano, pode resultar em valores sub ou superestimados.

Já o ENVI-met é um *software* holístico voltado para modelação microclimática 3D de espaços urbanos, não muito extensos. Ele considera as relações superfície-ar-plantas para construção do modelo e simulação e, por isso, contempla mais interações complexas urbanas. Após trabalhar com tal ferramenta conclui-se que o ENVI-met demanda um maior conhecimento técnico para trabalhar na ferramenta, além disso, diferentemente do i-Tree, é indicado para análises mais locais, específicas e individualizadas, sendo que existem diversos parâmetros disponíveis para análises complexas e robustas.

Como um outro ponto limitante do ENVI-met é relacionado a evolução da vegetação, que não é prevista para esse software, a análise de cenários futuros não é tão eficaz. Diferentemente do i-Tree, que possui taxas de mortalidade de árvores, o ENVI-met não prevê nem o crescimento das árvores, nem a mortalidade na população arbórea, sendo assim, é necessário modelar um outro cenário imputando todas as características futuras.

Tendo em vista o desenvolvimento dessa pesquisa, foram obtidos resultados relevantes para o cumprimento dos objetivos propostos. Entretanto, também é possível destacar alguns pontos passíveis de desenvolvimento para serem trabalhados em pesquisas futuras.

Em relação a comparação direta dos resultados quantitativos dos dois *software* trabalhados, sugere-se que sejam feitas simulações de todos os dias do ano. Entretanto, entende-se que por vezes tal situação não é viável, ainda mais considerando o tempo de processamento de cada simulação, sendo assim, uma alternativa seria realizar amostras representativas de todas as estações do ano, tendo em vista se aproximar ao máximo do comportamento da vegetação que varia ao longo do ano.

Já em termos de poluição atmosférica, para o software ENVI-met sugere-se que sejam realizadas simulações com modelos que tenham alguma fonte de poluição presente na área de estudo. Assim, será possível obter resultados específicos em relação aos poluentes atmosféricos. Para essa pesquisa, como se buscou tentar manter as características dos cenários simulados para ambos os *software*, foram consideradas apenas as concentrações de poluentes de fundo, ou seja, presentes na atmosfera de toda área de estudo e não advinda de uma fonte específica do local.

No que tange a análise de cenários futuros do ENVI-met, um estudo mais aprofundado sobre o comportamento de cada espécie em relação a mortalidade e crescimento podem fornecer dados mais precisos para as simulações.

Por fim, ressalta-se que para toda simulação ambiental quanto maior a quantidade de dados de entrada disponíveis, melhores são os resultados. Logo, recomenda-se utilizar o máximo de dados primários possíveis para maior confiabilidade do modelo e da simulação, e sempre que possível, validar os dados simulados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aboelata, A. (2020). Vegetation in different street orientations of aspect ratio (H/W 1:1) to mitigate UHI and reduce buildings' energy in arid climate. *Building and Environment*, 172 (October 2019), 106712. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106712>

AEM. (2005). Relatório-síntese da avaliação ecossistêmica do milênio. In *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*. Disponível em: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.446.aspx.pdf>. Acesso 08/06/2022.

Agência Europeia do Ambiente. (2021). Um ar mais limpo poderia ter salvado pelo menos 178 000 vidas em toda a UE em 2019, 1–6. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/pt/highlights/um-ar-mais-limpo-poderia>. Acesso 03/05/2022.

Alegria, C. (2018). *Floresta Urbana: a Árvore Certa Para O Sítio Certo. Um Caso De Estudo Para a Cidade De Castelo Branco*. ii, 1–15. <https://repositorio.ipcb.pt/handle/10400.11/6232>

Alves, F. M. (2020). *Modelação Microclimática no Contexto Urbano-Industrial , Um Caso da Zona Industrial das Cantarias (Bragança) - Portugal*. Instituto Politécnico de Bragança.

Amorim, M. C. de C. T. (2019). ILHAS DE CALOR URBANAS: MÉTODOS E TÉCNICAS DE ANÁLISE. *Revista Brasileira de Climatologia*, 15 (Edição Especial). VIII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica.

Anderson, P. R., Júnior, C. M., Júnior, M. J. S., & Stein, C. R. (2021). *Simulação do Efeito Estufa, da intensificação do Efeito Estufa pela presença de CO2 e do impacto da mudança da cobertura da Terra na temperatura média do meio utilizando o Arduino*. 43, 1–4.

APA. (2019). *O que é a Qualidade do Ar?* Agência Portuguesa Do Ambiente. Disponível em: <https://qualar.apambiente.pt/node/o-que-e-a-qualidade-do-ar>. Acesso 21/09/2022.

APA. (2021a). *Índices de qualidade do ar*. Agência Portuguesa Do Ambiente. Disponível em: <https://apambiente.pt/ar-e-ruído/indices-de-qualidade-do-ar>. Acesso 21/09/2022.

APA. (2021b). *Poluição do ar*. Agência Portuguesa Do Ambiente. Disponível em:

<https://apambiente.pt/ar-e-ruído/poluicao-do-ar>. Acesso 14/09/2022.

Ayoade, J. O. (1988). *Introduction to Climatology for the Tropics*. S. B. Ltdl. 4 ed. https://www2.ifmg.edu.br/governadorvaladares/pesquisa/laboratorio-de-climatologia/livros/ayoad-j-o-_introducao_a_climatologia_para_os_tropicos.pdf

Bragança. (2021). *Bragança: Estratégia Municipal de Adaptação às Alterações Climáticas*. Disponível em: http://climadapt-local.pt/wp-content/uploads/2017/01/EMAAC_Braganca_re.pdf. Acesso 19/10/2022.

Buccolieri, R., Gatto, E., Manisco, M., Ippolito, F., Santiago, J. L., & Gao, Z. (2020). Characterization of urban greening in a District of Lecce (Southern Italy) for the analysis of CO₂ storage and air pollutant dispersion. *Atmosphere*, 11(9), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ATMOS11090967>

Campos, A. F. C. de M. (2021). *A poluição atmosférica nas áreas urbanas fatores desencadeantes, consequências e medidas de mitigação*. Universidade de Lisboa. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Relatório de Prática de Ensino Supervisionada.

Cardelino, C. A., & Chameides, W. L. (1990). Natural hydrocarbons, urbanization, and urban ozone. *Journal of Geophysical Research*, 95(D9), 18–20. <https://doi.org/10.1029/jd095id09p13971>

Cardoso, R. dos S. (2021). *Modelagem do microclima e estratégias de mitigação do calor urbano em zonas climáticas locais*. UNESP. Tese. Programa de Pós Graduação em Geografia.

Carvalho, H. (2015). *Avaliação dos efeitos de vento em linhas de transmissão*. Universidade Federal de Minas Gerais. Tese (doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas.

Castro, A. H. S., Araújo, R. S., & M., S. M. (2013). Qualidade do ar – parâmetros de controle e efeitos na saúde humana: uma breve revisão. *Holos*, 5, 107–121.

CCDR. (n.d.). *Qualidade do AR*. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional Do Algarve. Disponível em: <https://www.ccdr-alg.pt/site/info/qualidade-do-ar>. Acesso 14/09/2022.

CGE. (n.d.). *Umidade relativa do ar*. Centro de Gerenciamento de Emergência Da

Prefeitura de São Paulo. Disponível em: <https://www.cgesp.org/v3/umidade-relativa-do-ar.jsp>. Acesso 07/09/2022.

Cimburova, Z., & Barton, D. N. (2020). The potential of geospatial analysis and Bayesian networks to enable i-Tree Eco assessment of existing tree inventories. *Urban Forestry and Urban Greening*, 55(0855), 126801. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126801>

CNA. (n.d.). *Água no Planeta Terra*. Conselho Nacional Da Água. Disponível em: <https://conselhonacionaldaagua.weebly.com/aacutegua-no-planeta-terra.html>. Acesso 09/09/2022.

Costa, M. (2020). *Simulação microclimática com ENVI-met para o Bairro Rainha Santa Isabel em Bragança*. Instituto Politécnico de Bragança. Dissertação (mestrado). Departamento de Tecnologia Ambiental.

Dobos, B. E. (2020). Albedo. In CRC Press (Ed.), *Atmosphere and Climate*. 2 ed., p. 4.

Drumm, F. C., Gerhardt, A. E., Fernandes, G. D., Chagas, P., Sucolotti, M. S., & Kemerich, P. D. da C. (2014). Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. *Revista Eletronica Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGET*, 18(1), 66–78. <https://doi.org/10.5902/2236117010537>

EDGAR. (2020). *Emissions Database for Global Atmospheric Research* (Vol. 6). European Comission. Disponível em: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/index.php/dataset_pop60. Acesso 17/08/2022.

ENVI-met. (2022). *Programa ENVI-met*. Disponível em: <https://www.envi-met.com/pt-pt/software/>. Acesso 03/05/2022.

EPAL. (2022). *Ciclos da Água*. Grupo Águas de Portugal. Disponível em: <https://www.epal.pt/EPAL/menu/epal/comunicação-ambiental/ciclo-da-água>. Acesso 09/09/2022.

European Commission. (2015). *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature-based solutions and re-naturing cities*. Bruxelas.

Faivre, N., Fritz, M., Freitas, T., de Boissezon, B., & Vandewoestijne, S. (2017). Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and

environmental challenges. *Environmental Research*, 159(December 2016), 509–518. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.032>

Fernandes, A. L. F. (2007). *Os Impactos dos Espaços Verdes na Qualidade do Ar*. Universidade de Aveiro. Dissertação (mestrado). Departamento de Ambiente e Ordenamento.

Fernandes, K. M., & Higuchi, M. I. G. (2017). Parques verdes urbanos: espaços de sensibilização ambiental e bem-estar social. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 8(4), 23–36. <https://doi.org/10.6008/spc2179-6858.2017.004.0003>

Ferreira, J. V. A. (2018). *Lavadores de gases na indústrias: uma breve revisão sobre os impactos da sua utilização no controle da poluição atmosférica, atendimento a legislação ambiental e saúde humana*. Universidade Tecnológica do Paraná. Trabalho de conclusão e curso de especialização. Ponta Grossa.

Fraga, R. G. (2020). *Soluções baseadas na Natureza: elementos para a tradução do conceito às políticas públicas brasileiras*. Universidade de Brasília. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável.

Freitas, A. G. (2013). *A importância do microclima na simulação higrotérmica*. Universidade do Porto. DISSERTAÇÃO (mestrado). Departamento de Engenharia Civil.

Freitas, V. P., & Pinto, P. da S. (1998). Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção - Condensações Internas. In *Informação Técnica NIT 002: Vol. LFC 1998* (Issue Laboratório de Física das Construções).

Gabriel, G. T., Campos, A. T., Torres, A. F., & Martins, P. C. (2018). Validação De Modelo De Simulação Por Meio De Quatro Parâmetros: Estudo De Uma Linha De Montagem Controlada. *XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 1 a 14.

Gettelman, A., & Rood, R. B. (2022). *Demystifying Climate Models: A Users Guide to Earth System Models* (UNESCO—IHE Institute for Water Education (ed.); 2nd ed. Springer Open.

GFDL. (2018). Climate Modeling: What is a Global Climate Model? *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*, 1(845), 2. Disponível em: <https://www.gfdl.noaa.gov/climate-modeling/> . Acesso 13/11/2022.

Gomes, L. A. (2020). *Qualidade do ar em zonas industriais: análise dos Padrões*

temporais e espaciais de ozono e de óxidos de Azoto na zona industrial urbana de Mirandela (Portugal) instituto Politécnico de Bragança. Dissertação (mestrado). Departamento de Tecnologia Ambiental.

Google Earth. (2022). *O globo mais detalhado do mundo*. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-PT/earth/>. Acesso 15/07/2022.

Gotardo, R., Pinheiro, A., Kaufmann, V., Piazza, G. A., & Torres, E. (2019). Comparação entre variáveis microclimáticas de local aberto e florestal em um bioma da Mata Atlântica, sul do Brasil. *Ciência Florestal*, 29(3), 1415–1427. <https://doi.org/10.5902/1980509834832>

Heberle, M., Silva, B. M. D. C. da, Lima, C. D. S., Quintal, R. S., Rempel, C., & Dalzochio, M. S. (2017). Variações No Microclima E Características Do Solo Em Paisagens Com Diferentes Coberturas Vegetais: Ação De Campo Junto Ao Morro Da Harmonia – Teutônia/Rs. *Revista Destaques Acadêmicos*, 9(3), 283–295. <https://doi.org/10.22410/issn.2176-3070.v9i3a2017.1535>

Hernández, A., Fariña, J., Fernández, V., Gálvez, M. Á., Hernández, A., Urrutia, N., Astorga, C., Ceberio, I., Gonçalves, A., Castro, A., & Feliciano, M. (2013). *Manual de Diseño Bioclimático Urbano. Recomendaciones para la elaboración de normativas urbanísticas*. Disponível em: http://oa.upm.es/15813/1/2013-BIOURB-Manual_de_diseno_bioclimatico_b.pdf. Acesso 09/06/2022.

Honda, S. C. de A. L., Vieira, M. do C., Albano, M. P., & Maria, Y. R. (2015). Planejamento ambiental e ocupação do solo urbano em Presidente Prudente (SP). *Urbe*, 7(1), 62–73. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.007.001.AO04>

Howard, L. (1818). *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations, Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis* (Issue vol. 1). W. Phillips, George Yard, Lombard Street, sold also by J. and A. Arch, Cornhill; Baldwin, Cradock, and Joy, and W. Bent, Paternoster Row; and J. Hatchard, Picadilly. <https://books.google.pt/books?id=7skTAAAYAAJ>

i-Tree. (2021a). Field Guide. i-Tree Eco. In *Desert Weeds* (p. 57). https://doi.org/10.1007/978-3-030-45854-6_9

i-Tree. (2021b). *User's Manual 9.22.2021* (p. 103).

I-Tree. (2022). *O que é o i-Tree?*. Disponível em: <https://www.itreetools.org/about>. Acesso 03/05/2022.

Iberdrola. (2022). *As ilhas de calor urbanas e sus efeitos adversos pa habitantes*. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/ilha-de-calor>. Acesso 29/08/2022.

INDNATUR. (2021). *Projeto INDNATUR*. Interreg. Disponível em: <https://www.indnatur.eu/pt/>. Acesso 07/10/2022.

INE. (2021). *Censo 2021: conheça o município de Bragança*. Disponível em: www.epa.gov%0Awww.bt.cdc.gov/agent/cyanide/index.asp. Acesso 04/10/2022.

IPCC. (2021). *AR6 - Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]*. Cambridge University Press. In Press.

IPMA. (2022). *Previsão localidade horária*. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/otempo/prev.localidade.hora/#Bragança&Bragança>. Acesso 07/11/2022.

IUCN. (2016). *Nature-based Solutions to address global societal challenges* (E. Cohen-Shacham, G. Walters, C. Janzen, & S. Maginnis (eds.)).

Junges, A. L., Santos, V. Y. S., & Massoni, N. T. M. (2018). Efeito estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. *Experiências Em Ensino de Ciências. Cuiabá.*, 13(5), 126–151.

Kobiyama, M., & Manfroi, O. J. (1999). Importância da modelagem e monitoramento em bacias hidrográficas. In *Curso de Extensão: O Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal - UFPR* (pp. 111–118). XXIX Semana de Estudos do Curso Engenharia Florestal.

Leal, L. (2012). *A influência da vegetação no clima urbano da cidade de Curitiba - PR*. Universidade Federal do Paraná. Tese (doutorado). Pós-graduação em Engenharia Florestal.

Lera, M., Agra, R., Sandeep, S., Vidal, A., & Dickson, B. (2021). *Nature-based solutions for climate change mitigation*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/358833749_Naturebased_solutions_for_climate_change_mitigation.

Lima, T. F. M. de, Carneiro, T., & Câmara, G. (2010). *Modelagem e Simulação de Sistemas Terrestres utilizando o TerraME*. Universidade Federal de Ouro Preto. Cap 2.

Lima, S. M. S. A., Lopes, W. G. R., & Façanha, A. C. (2019). Desafios do planejamento urbano na expansão das cidades: entre planos e realidade. *Urbe*, 11, 1–16. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20180037>

Liu, Z., Cheng, W., Jim, C. Y., Morakinyo, T. E., Shi, Y., & Ng, E. (2021). Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4. *Building and Environment*, 200(May), 107939. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107939>

Maciel, C. de R., Luz, V. de S., Santos, F. M. de M., Nogueira, M. C. de J. A., & Nogueira, J. de S. (2014). Interação das variáveis microclimáticas e cobertura do solo em região urbana e limítrofe-urbana na cidade de cuiabá. *Caminhos de Geografia*, 15(51), 9–25.

Masson, V. (2006). Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1–3), 35–45. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0142-3>

Menezes, G. de O. (2017). *Análise do Clima Urbano da Cidade de Bragança (2012-2016): Estudo da Ilha de Calor*. Instituto Politécnico de Bragança. Dissertação (mestrado). Departamento de Tecnologia Ambiental.

Monte, E. Z., Toledo, T., Albuquerque, D. A., & Reisen, V. A. (2016). Impactos das Variáveis Meteorológicas na Qualidade do Ar Impacts of Meteorological Variables on Air Quality in The Region of. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 13(4), 546–554. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786312314b20150100>

Monteiro, C. A. (1976). *Teoria e clima urbano*. Universidade de São Paulo. Série “Teses e Monografias n° 25”, São Paulo, Instituto de Geografia da USP, 1976. 181pp.

Moraes, H. A. D. E. (2017). *Monóxido de carbono e material particulado na atmosfera de Brasília-DF: Estudo preliminar das emissões veiculares e efeito do vento e da*

precipitação monóxido de carbono e material particulado na atmosfera de Brasília-DF: Estudo preliminar das emissões. Universidade de Brasília - UnB. Monografia. Curso de Ciências ambientais.

Muñoz, A. M. M., & Freitas, S. R. (2017). Importância dos Serviços Ecossistêmicos nas Cidades: Revisão das Publicações. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – GeAS*, 6(2), 89–104. <https://doi.org/10.5585/geas.v6i2.853>

Naime, R. (2019). Microclima e áreas verdes. *Ecodebate*, 1–9. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2019/07/02/microclima-e-areas-verdes-artigo-de-oberto-naime/>. Acesso 29/08/2022.

National Weather Service. (2015). *Discussion on Humidity*. National Weather Service. Disponível em: <https://www.weather.gov/lmk/humidity>. Acesso 07/09/2022.

Nowak, D. J. (2020). Understanding i-TREE.: Summary of Programs and Methods. In *USDA FOREST SERVICE* (Vol. 26, Issue 9). Disponível em: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=eih&AN=22496856&site=ehost-live&scope=site>. Acesso 11/07/2022.

Nowak, D. J., Maco, S., & Binkley, M. (2018). i-Tree: Global Tools to Assess Tree Benefits and Risks to Improve Forest Management. *Arboricultural Consultant*, 51(4)(4), 10–13. Disponível em: https://www.itreetools.org/resources/intl_overview.php. Acesso 11/07/2022.

Olgyay, A., Lyndon, D., Victor, W., & Victor, J. (1963). *Design with Climate*. Princeton University Press.

Oliveira, Z. B., & Knies, A. E. (2019). Análise bioclimática e investigação do conforto térmico em ambiente externo na região central do RS. *Energia Na Agricultura*. Botucatu. V 34. n 3. p. 377- 388.

Oliver, J. E., & Fairbridge, R. W. (1987). *The Encyclopedia of Climatology* (Vol. 69).

ONU. (2019a). *GEO-6 healthy planet , healthy people*. Global Environmental Outlook. United Nations ENvironmental Programs. Cambridge.

ONU. (2019b). *ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050*. ONU News. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>. Acesso

13/05/2022.

ONU. (2021). *Cinco ecossistemas nos quais soluções baseadas na natureza proporcionam enormes benefícios*. ONU news. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/159057-cinco-ecossistemas-nos-quais-solu%C3%A7%C3%B5es-baseadas-na-natureza-proporcionam-enormes-benef%C3%ADcios>. Acesso 03/05/2022.

ONU. (2022). *Europa tem verão mais quente da história em 2022*. Onu News. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2018/06/1625911>. Acesso 19/01/2023.

Pace, R. (2020). *Modeling ecosystem services of urban trees to improve air quality and microclimate*. Universität München Dissertation. TUM School of Life Sciences. Disponível em: <http://mediatum.ub.tum.de/?id=1548491>

Pança, F. A. (2021). *Bragança Avaliação dos Benefícios Ambientais de Soluções Baseadas na Natureza com o software i-Tree-O caso da Zona Industrial de Bragança-Portugal*. Instituto Politécnico de Bragança.

Pereira, E. M. (2013). *Planejamento urbano no Brasil: conceitos, diálogos e práticas* 2nd ed. Argos Editora da Unochapecó.

Pinheiro, J. (2008). *Clima Urbano E Suas Influências*. 1–7. Disponível em: <http://www.webartigos.com/artigos/clima-urbano-e-suas-influencias/10118/>. Acesso 11/08/2022.

Popek, R., Gawrońska, H., & Gawroński, S. W. (2015). The Level of Particulate Matter on Foliage Depends on the Distance from the Source of Emission The Level of Particulate Matter on Foliage Depends on the Distance from the Source of Emission. *International Journal of Phytoremediation*, 17(12), 1262–1268. <https://doi.org/10.1080/15226514.2014.989312>

Raymundo, E. P. B., Biondi, D., Dacól, F. V., Leal, M. D. S., & Reksidler, K. (2020). Efeitos Microclimáticos De Um Fragmento De Floresta Urbana Em Curitiba-Pr. *Revista Da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, 15(3), 18. <https://doi.org/10.5380/revsbau.v15i3.72677>

REA. (2021). *AR E RUÍDO - Índice de Qualidade do Ar*. Relatório Do Estado Do Ambiente - Agência Portuguesa Do Ambiente. <https://rea.apambiente.pt/content/índice-de-qualidade-do-ar>. Disponível em: <https://rea.apambiente.pt/content/índice-de-qualidade-do-ar>

qualidade-do-ar. Acesso 21/09/2022.

Ribeiro, A. G. (1993). As escalas do clima. *Boletim de Geografia Teoretica*, 23(45–46), 288–294. Disponível em: <http://biblat.no-ip.org/revista/boletim-de-geografia-teoretica/articulo/as-escalas-do-clima>.

Romero, M. A. B., Baptista, G. M. de M., Lima, E. A. de, Werneck, D. R., Vianna, E. O., & Sales, G. de L. (2019). Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas. In *Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas* (1st ed.). <https://doi.org/10.18830/isbn.978-85-67405-25-4>

Santa Maria da Feira. (2020). *Carvalho-americano*. Catálogo Arbóreo-Arbustivo. Câmara de Santa Maria da Feira. Disponível em: <https://cm-feira.pt/carvalho-americano>. Acesso 16/12/2022.

Santamouris, M., & Fiorito, F. (2021). On the impact of modified urban albedo on ambient temperature and heat related mortality. *Solar Energy*, 216(February), 493–507. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.031>

Serralves. (2009). *Liquidambar styraciflua*. Vol. 0, pp. 1–5. Disponível em: <http://sig.serralves.pt/pt/flora/detalhe.php?id=1023>. Acesso 16/12/2022.

Serralves. (2011). *Platanus x hispanica Mill. ex Münchh.* Flora Do Parque. <http://sig.serralves.pt/pt/flora/detalhe.php?id=1169>. Acesso 16/12/2022.

Silva, B. A., Xavier, T. C., Silva, F. T., & Alvarez, C. E. (2015). O impacto da distribuição de vegetação no microclima de ambientes urbanos. Proceedings of EURO ELECS 2015, 247–256. Guimarães.

Silva, M. S. (2021). *Vegetação e o microclima urbano em área de ocupação consolidada: aplicação do modelo ENVI-met ao Conjunto Confisco em Belo Horizonte, MG*. Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação. Programa de Pós Graduação Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável.

Simon, H. (2016). Modeling urban microclimate: Development, implementation and evaluation of new and improved calculation methods for the urban microclimate model ENVI-met. Universität Mainz. Dissertação (doutorado).

Simon, H., Lindén, J., Ho, D., Braun, P., Bruse, M., & Esper, J. (2018). *Landscape and Urban Planning Modeling transpiration and leaf temperature of urban trees – A case*

study evaluating the microclimate model ENVI-met against measurement data. 174(February), 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.003>

Simona, H., Lindenb, J., Hoffmann, D., Braund, P., Brusea, M., & Espera, J. (2018). *Machine Translated by Google Paisagismo e Planejamento Urbano Modelagem da transpiração e temperatura foliar de árvores urbanas – Um estudo de caso avaliando o modelo de microclima ENVI-met contra dados de medição Machine Translated by Google.* 174, 33–40.

Smith, K. (1975). *Principles of Applied Climatology* . Vol. 101, Issue 1. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.49710143030>

Snirh. (n.d.). *Água: Fonte de Vida*. Serviço Nacional de Informação de Recursos Hídricos. Disponível em: https://snirh.apambiente.pt/junior/trabalhos_escolas/flavioferreiracinfaes/AnaAmanda_AnaCoelho/ciclo_da_água.htm. Acesso 09/09/2022.

Sosa, B. S., Banda-Noriega, R. B., & Guerrero, E. M. (2013). Industrias de fundición: Aspectos ambientales e indicadores de condición ambiental. *Revista de Metalurgia*, 49(1), 5–19. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1171>

Souza, N. S., Santos, F. M. de M., Nogueira, J. de S., & Nogueira, M. C. de J. A. (2018, October). Interação entre variáveis microclimáticas e configuração urbana em cuiabá-mt. *8º congresso luso-brasileiro para o planeamento urbano, regional, integrado e sustentável (PLURIS 2018)*, 13. Universidade Federal do Mato Grosso. Coimbra.

Stöberl, A. P. M., Diaz, L. T., Cecy, T. M., & Vellozo, L. D. (2019). Trajetória do conceito Soluções Baseadas na Natureza e a relação com o brasil. Uma análise bibliográfica. *ENANPUR*, 16. Anais XVIII ENANPUR 2019. Natal.

Sun, Y., Zwolińska, E., & Chmielewski, A. G. (2015). Technology Abatement technologies for high concentrations of NO_x and SO₂ removal from exhaust gases : A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(2), 119–142. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1063334>

Toxopeus, H., Kotsila, P., Conde, M., Katona, A., van der Jagt, A. P. N., & Polzin, F. (2020). How ‘just’ is hybrid governance of urban nature-based solutions? *Cities*, 105(June), 102839. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102839>

UICN. (2020). *Relatório Anual 2019 - América do Sul Escritório Regional*. União Internacional para a Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais. Quito.

Vezzani, F. M. (2015). Revista Brasileira de Geografia Física Solos e os serviços ecossistêmicos Soils and the Ecosystem Services. *Revista Brasileira de Geografia Física V. Número Especial IV SMUD, 08*, 673–684.

Vianna, E. O. (2018). *O Campo Térmico Urbano. Ilhas de Calor em Brasília - DF*. Universidade de Brasília. Tese (doutorado). Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/33012>

Vieira, J., Matos, P., Mexia, T., Silva, P., Lopes, N., & Freitas, C. (2018). Green spaces are not all the same for the provision of air purification and climate regulation services: The case of urban parks. *Environmental Research, 160*(August 2017), 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.10.006>

Word Bank. (2008). *Biodiversity, Climate Change and Adaptation: Nature-Based Solutions from the World Bank Portfolio*. 1–112. Washington.

WRI. (2018). *Qual o impacto da poluição do ar na saúde?* WRI Brasil. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/qual-o-impacto-da-poluicao-do-ar-na-saude>. Acesso 14/09/2022.

Yanting, H., Zhao, P., Niu, J., Sun, Z., Zhu, L., & Ni, G. (2016). Canopy stomatal uptake of NO_x, SO₂ and O₃ by mature urban plantations based on sap flow measurement. *Atmospheric Environment, 125*(X), 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.019>

Zellweger, F., De Frenne, P., Lenoir, J., Rocchini, D., & Coomes, D. (2019). Advances in Microclimate Ecology Arising from Remote Sensing. *Trends in Ecology and Evolution, 34*(4), 327–341. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.12.012>

ANEXOS

- Dados coletados para o i-Tree em relação ao Cenário 1

Nº	Espécie (científico)	DAP - cm	Uso da terra	Altura da árvore - m	Altura ate a base da copa - m	Largura da copa (Norte Sul) - m	Largura da copa (leste Oeste) - m	Saúde da coroa (Dieback)	Exposição à luz da copa
1	Liquidambar styraciflua	4,14	Comercial/industrial	2,68	1,67	0,62	0,55	10%-15%	5
2	Liquidambar styraciflua	3,18	Comercial/industrial	3,32	1,45	0,84	0,67	10%-15%	5
3	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	3,23	1,27	1,03	0,78	10%-15%	5
4	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	2,79	1,20	1,05	1,29	10%-15%	5
5	Liquidambar styraciflua	3,18	Comercial/industrial	2,98	1,55	1,33	1,27	10%-15%	5
6	Liquidambar styraciflua	3,18	Comercial/industrial	2,76	1,86	0,72	0,46	10%-15%	5
7	Liquidambar styraciflua	3,50	Comercial/industrial	3,63	1,58	0,77	1,09	10%-15%	5
8	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	3,26	1,42	1,06	0,65	10%-15%	5
9	Liquidambar styraciflua	4,77	Comercial/industrial	3,59	1,61	1,06	0,84	10%-15%	5
10	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	4,13	1,75	1,48	1,32	10%-15%	5
11	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	3,01	1,56	1,08	0,52	10%-15%	3
12	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	4,18	2,25	1,02	0,92	10%-15%	3
13	Liquidambar styraciflua	4,14	Comercial/industrial	4,31	2,39	1,05	1,82	10%-15%	2
14	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	4,13	1,70	0,82	0,68	10%-15%	2
15	Liquidambar styraciflua	4,77	Comercial/industrial	3,02	1,58	0,91	1,05	10%-15%	3
16	Liquidambar styraciflua	4,14	Comercial/industrial	4,05	1,89	0,54	0,44	10%-15%	5
17	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	4,01	1,73	1,24	1,3	10%-15%	5
18	Liquidambar styraciflua	3,50	Comercial/industrial	3,24	1,51	0,81	0,98	10%-15%	5
19	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	3,6	1,71	0,97	1,35	10%-15%	5
20	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	2,87	1,43	1,49	1,05	10%-15%	5
21	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	3,86	1,69	1,28	1,17	10%-15%	5
22	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	3,74	1,75	1,17	1,34	10%-15%	5
23	Liquidambar styraciflua	4,14	Comercial/industrial	3,88	1,76	1,49	1,6	10%-15%	5
24	Liquidambar styraciflua	5,41	Comercial/industrial	4,08	1,6	1,23	0,96	10%-15%	5
25	Liquidambar styraciflua	4,77	Comercial/industrial	3,51	1,65	1,42	1,25	10%-15%	5
26	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	3,13	1,89	1,58	1,06	10%-15%	5
27	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	4,23	2,02	0,95	0,81	10%-15%	3
28	Quercus rubra	4,77	Comercial/industrial	4,02	1,88	1,57	1,58	10%-15%	5
29	Quercus rubra	21,96	Comercial/industrial	7,64	2,26	5,89	5,83	10%-15%	2
30	Quercus rubra	20,37	Comercial/industrial	7,02	3,02	6,7	6,32	10%-15%	1
31	Quercus rubra	5,09	Comercial/industrial	4,49	2,34	0,91	2,20	10%-15%	0
32	Quercus rubra	12,10	Comercial/industrial	4,71	1,75	2,55	2,64	10%-15%	3
33	Quercus rubra	4,46	Comercial/industrial	4,92	2,35	1,39	1,59	10%-15%	1
34	Platanus occidentalis	18,14	Comercial/industrial	8,81	2,4	5,88	6,97	10%-15%	2
35	Quercus rubra	4,46	Comercial/industrial	4,69	1,94	1,83	1,79	10%-15%	2
36	Platanus occidentalis	17,83	Comercial/industrial	7,42	2,33	5,45	5,50	10%-15%	2
37	Quercus rubra	4,46	Comercial/industrial	4,15	2,43	1,37	1,53	10%-15%	3
38	Quercus rubra	12,41	Comercial/industrial	4,17	2,05	2,82	2,98	10%-15%	3
39	Quercus rubra	17,19	Comercial/industrial	6,75	2,26	4,30	3,01	10%-15%	3

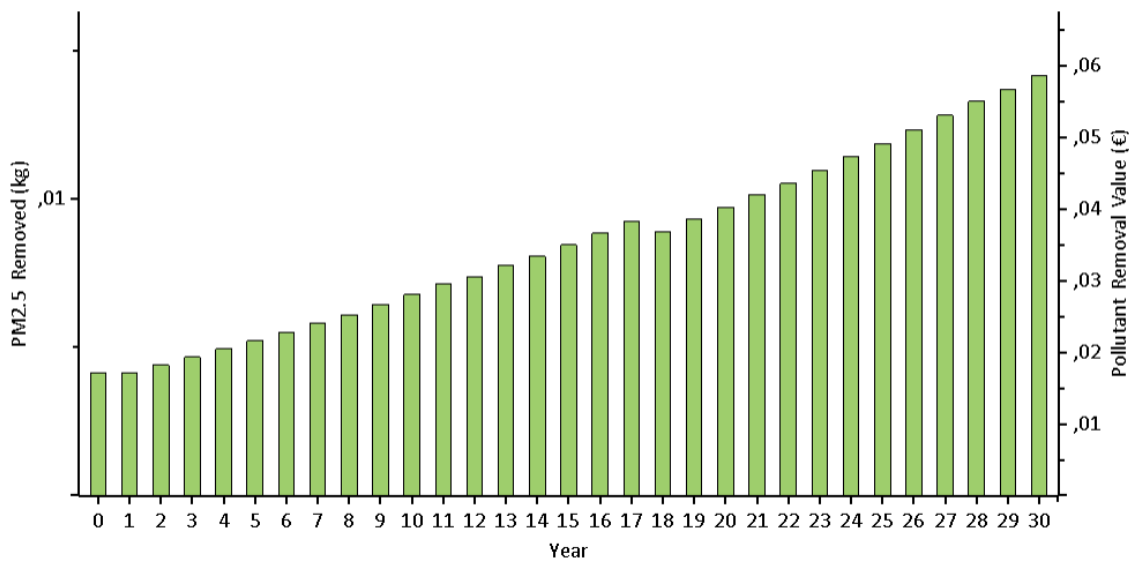
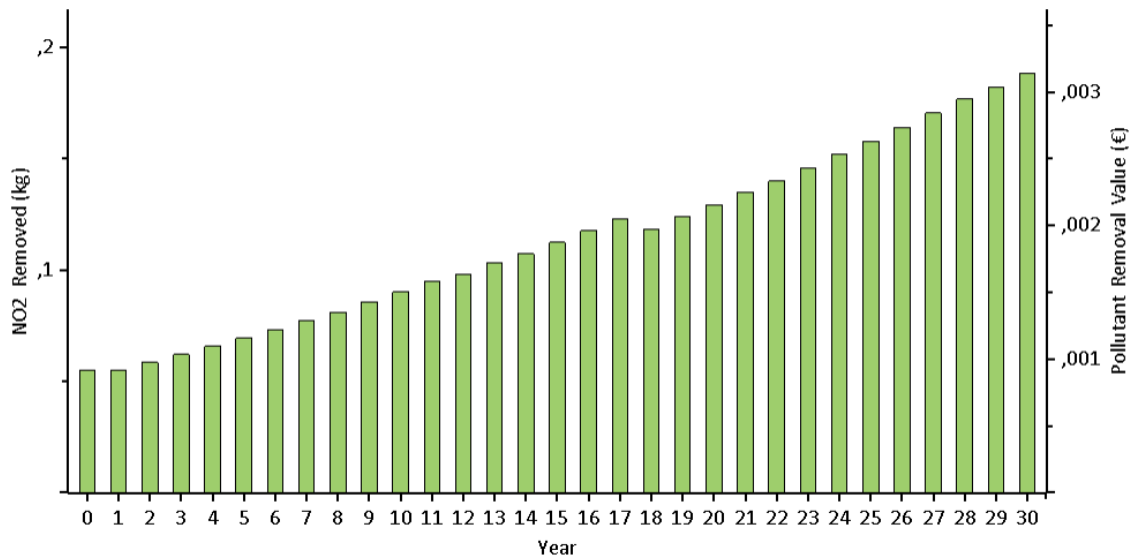
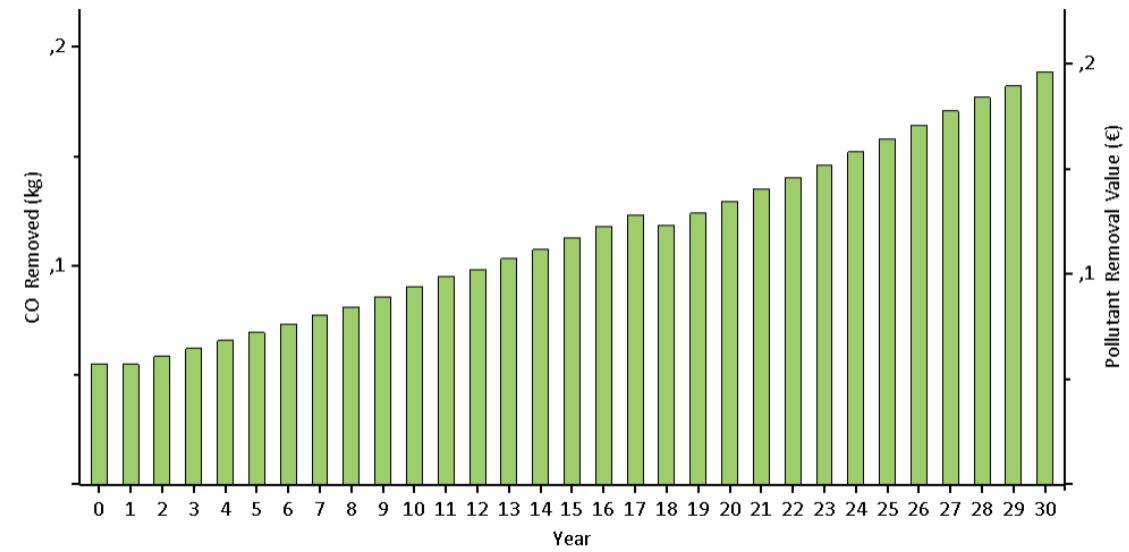
Nº	Espécie (científico)	DAP - cm	Uso da terra	Altura da árvore - m	Altura ate a base da copa - m	Largura da copa (Norte Sul) - m	Largura da copa (leste Oeste) - m	Saúde da coroa (Dieback)	Exposição à luz da copa
40	<i>Quercus rubra</i>	17,51	Comercial/industrial	3,93	1,73	4,86	2,00	10%-15%	3
41	<i>Aesculus hippocastanum</i>	9,23	Comercial/industrial	3,04	1,52	1,29	6,90	10%-15%	3
42	<i>Quercus rubra</i>	10,82	Comercial/industrial	3,27	1,95	2,33	1,12	10%-15%	4
43	<i>Liquidambar styraciflua</i>	5,09	Comercial/industrial	2,88	1,51	1,09	2,54	10%-15%	4
44	<i>Platanus occidentalis</i>	42,34	Comercial/industrial	11,5	3,03	10,95	11,30	10%-15%	3
45	<i>Platanus occidentalis</i>	10,82	Comercial/industrial	4,3	2,19	3,04	3,02	10%-15%	2
46	<i>Platanus occidentalis</i>	22,60	Comercial/industrial	8,63	3,58	7,41	7,01	10%-15%	2
47	<i>Platanus occidentalis</i>	15,28	Comercial/industrial	6,62	2,32	3,64	3,22	10%-15%	2
48	<i>Platanus occidentalis</i>	20,69	Comercial/industrial	8,5	1,89	4,91	4,85	10%-15%	4
49	<i>Zanthoxylum cleve-herculis</i>	7,96	Comercial/industrial	3,3	1,62	1,99	1,77	10%-15%	1
50	<i>Platanus occidentalis</i>	21,65	Comercial/industrial	8,62	2,42	6,52	6,55	10%-15%	2
51	<i>Platanus occidentalis</i>	23,55	Comercial/industrial	8,64	2,03	8,47	7,35	10%-15%	3
52	<i>Platanus occidentalis</i>	16,55	Comercial/industrial	6,52	2,48	5,65	4,80	10%-15%	3
53	<i>Platanus occidentalis</i>	14,64	Comercial/industrial	6,25	2,10	4,12	4,52	10%-15%	3
54	<i>Platanus occidentalis</i>	13,37	Comercial/industrial	10,12	2,15	6,82	6,63	10%-15%	5
55	<i>Liriodendron tulipifera</i>	11,78	Comercial/industrial	4,72	2,30	2,05	3,28	10%-15%	1
56	<i>Liriodendron tulipifera</i>	6,05	Comercial/industrial	4,03	1,90	2,08	1,45	10%-15%	1
57	<i>Celtis Australis</i>	18,46	Comercial/industrial	4,93	2,15	5,58	5,02	10%-15%	5
58	<i>Celtis Australis</i>	4,14	Comercial/industrial	3,02	2,80	0,65	0,98	10%-15%	5

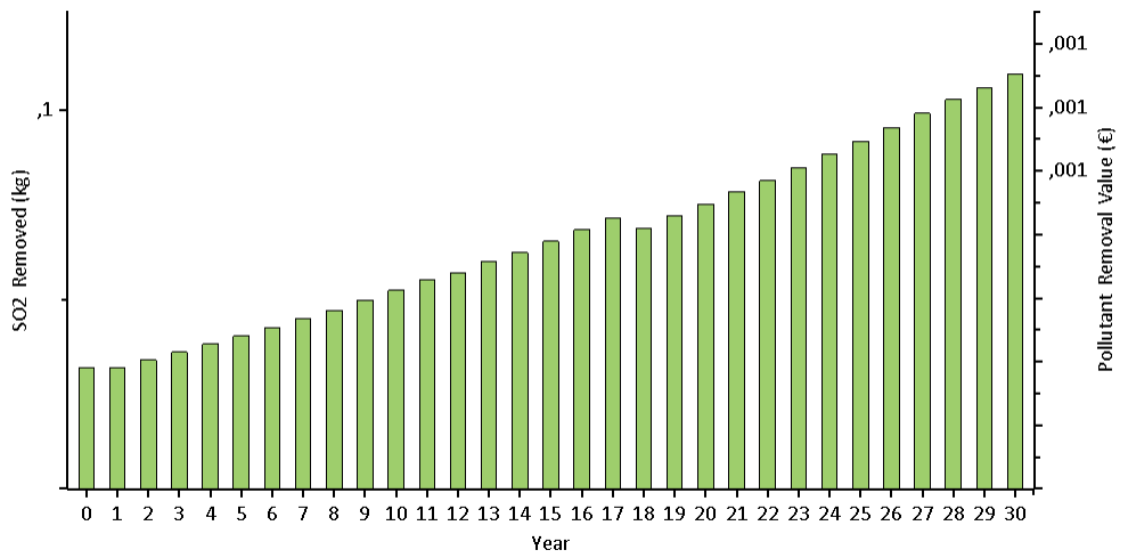
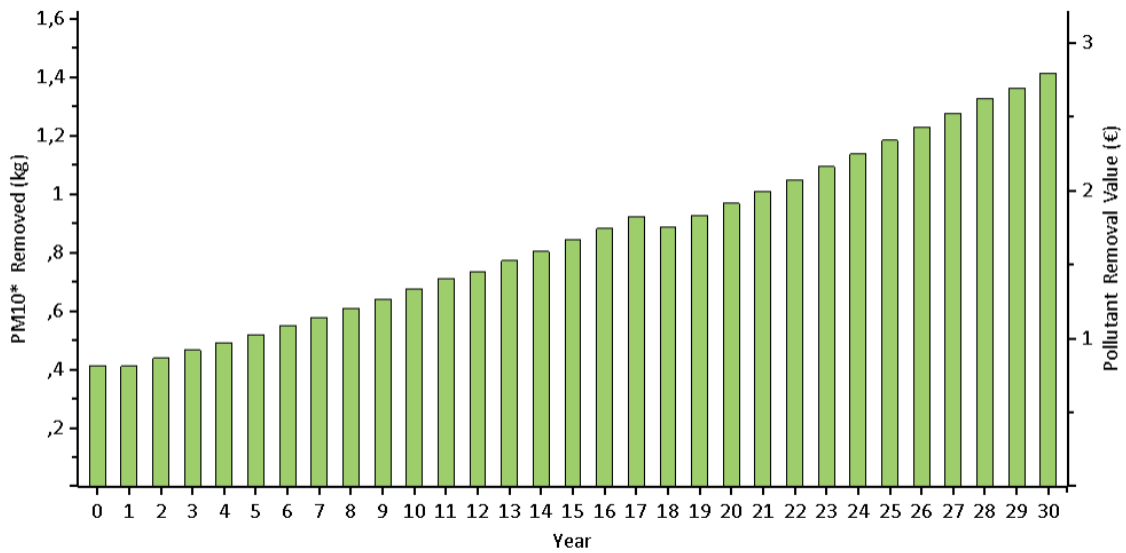
- Dados coletados e previstos para o i-Tree em relação ao Cenário 2

Nº	Espécie (científico)	DAP - cm	Uso da terra	Altura total da árvore - m	Saúde da coroa (Dieback)
1	Liquidambar styraciflua	4,14	Comercial/industrial	2,68	10%-15%
2	Liquidambar styraciflua	3,18	Comercial/industrial	3,32	10%-15%
3	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	3,23	10%-15%
4	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	2,79	10%-15%
5	Liquidambar styraciflua	3,18	Comercial/industrial	2,98	10%-15%
6	Liquidambar styraciflua	3,18	Comercial/industrial	2,76	10%-15%
7	Liquidambar styraciflua	3,50	Comercial/industrial	3,63	10%-15%
8	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	3,26	10%-15%
9	Liquidambar styraciflua	4,77	Comercial/industrial	3,59	10%-15%
10	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	4,13	10%-15%
11	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	3,01	10%-15%
12	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	4,18	10%-15%
13	Liquidambar styraciflua	4,14	Comercial/industrial	4,31	10%-15%
14	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	4,13	10%-15%
15	Liquidambar styraciflua	4,77	Comercial/industrial	3,02	10%-15%
16	Liquidambar styraciflua	4,14	Comercial/industrial	4,05	10%-15%
17	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	4,01	10%-15%
18	Liquidambar styraciflua	3,50	Comercial/industrial	3,24	10%-15%
19	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	3,6	10%-15%
20	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	2,87	10%-15%
21	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	3,86	10%-15%
22	Liquidambar styraciflua	3,82	Comercial/industrial	3,74	10%-15%
23	Liquidambar styraciflua	4,14	Comercial/industrial	3,88	10%-15%
24	Liquidambar styraciflua	5,41	Comercial/industrial	4,08	10%-15%
25	Liquidambar styraciflua	4,77	Comercial/industrial	3,51	10%-15%
26	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	3,13	10%-15%
27	Liquidambar styraciflua	4,46	Comercial/industrial	4,23	10%-15%
28	Quercus rubra	4,77	Comercial/industrial	4,02	10%-15%
29	Quercus rubra	21,96	Comercial/industrial	7,64	10%-15%
30	Quercus rubra	20,37	Comercial/industrial	7,02	10%-15%
31	Quercus rubra	5,09	Comercial/industrial	4,49	10%-15%
32	Quercus rubra	12,10	Comercial/industrial	4,71	10%-15%
33	Quercus rubra	4,46	Comercial/industrial	4,92	10%-15%
34	Platanus occidentalis	18,14	Comercial/industrial	8,81	10%-15%
35	Quercus rubra	4,46	Comercial/industrial	4,69	10%-15%
36	Platanus occidentalis	17,83	Comercial/industrial	7,42	10%-15%
37	Quercus rubra	4,46	Comercial/industrial	4,15	10%-15%
38	Quercus rubra	12,41	Comercial/industrial	4,17	10%-15%
39	Quercus rubra	17,19	Comercial/industrial	6,75	10%-15%
40	Quercus rubra	17,51	Comercial/industrial	3,93	10%-15%
41	Aesculus hippocastanum	9,23	Comercial/industrial	3,04	10%-15%
42	Quercus rubra	10,82	Comercial/industrial	3,27	10%-15%
43	Liquidambar styraciflua	5,09	Comercial/industrial	2,88	10%-15%
44	Platanus occidentalis	42,34	Comercial/industrial	11,5	10%-15%
45	Platanus occidentalis	10,82	Comercial/industrial	4,3	10%-15%
46	Platanus occidentalis	22,60	Comercial/industrial	8,63	10%-15%
47	Platanus occidentalis	15,28	Comercial/industrial	6,62	10%-15%
48	Platanus occidentalis	20,69	Comercial/industrial	8,5	10%-15%
49	Zanthoxylum clava-herculis	7,96	Comercial/industrial	3,3	10%-15%
50	Platanus occidentalis	21,65	Comercial/industrial	8,62	10%-15%
51	Platanus occidentalis	23,55	Comercial/industrial	8,64	10%-15%
52	Platanus occidentalis	16,55	Comercial/industrial	6,52	10%-15%
53	Platanus occidentalis	14,64	Comercial/industrial	6,25	10%-15%
54	Platanus occidentalis	13,37	Comercial/industrial	10,12	10%-15%
55	Liriodendron tulipifera	11,78	Comercial/industrial	4,72	10%-15%
56	Liriodendron tulipifera	6,05	Comercial/industrial	4,03	10%-15%
57	Celtis Australis	18,46	Comercial/industrial	4,93	10%-15%
58	Celtis Australis	4,14	Comercial/industrial	3,02	10%-15%
59	Liquidambar styraciflua	4,00	Parque	3,50	10%-15%
60	Liquidambar styraciflua	4,00	Parque	3,50	10%-15%
61	Liquidambar styraciflua	4,00	Parque	3,50	10%-15%

Nº	Espécie (científico)	DAP - cm	Uso da terra	Altura total da árvore - m	Saúde da coroa (Dieback)
125	<i>Pinus strobus</i>	5,00	Parque	3,50	10%-15%
126	<i>Pinus strobus</i>	5,00	Parque	3,50	10%-15%
127	<i>Pinus strobus</i>	5,00	Parque	3,50	10%-15%
128	<i>Pinus strobus</i>	5,00	Parque	3,50	10%-15%
129	<i>Pinus strobus</i>	5,00	Parque	3,50	10%-15%
130	<i>Liriodendron tulipifera</i>	4,00	Parque	3,50	10%-15%
131	<i>Liriodendron tulipifera</i>	4,00	Parque	3,50	10%-15%
132	<i>Liriodendron tulipifera</i>	4,00	Parque	3,50	10%-15%
133	<i>Liriodendron tulipifera</i>	4,00	Parque	3,50	10%-15%
134	<i>Liriodendron tulipifera</i>	4,00	Parque	3,50	10%-15%
135	<i>Liriodendron tulipifera</i>	4,00	Parque	3,50	10%-15%
136	<i>Castanea sativa</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
137	<i>Castanea sativa</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
138	<i>Castanea sativa</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
139	<i>Castanea sativa</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
140	<i>Castanea sativa</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
141	<i>Castanea sativa</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
142	<i>Castanea sativa</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
143	<i>Castanea sativa</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
144	<i>Castanea sativa</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
145	<i>Castanea sativa</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
146	<i>Castanea sativa</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
147	<i>Castanea sativa</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
148	<i>Acer saccharinum</i>	5,00	Parque	3,50	10%-15%
149	<i>Acer saccharinum</i>	5,00	Parque	3,50	10%-15%
150	<i>Acer saccharinum</i>	5,00	Parque	3,50	10%-15%
151	<i>Acer saccharinum</i>	5,00	Parque	3,50	10%-15%
152	<i>Acer saccharinum</i>	5,00	Parque	3,50	10%-15%
153	<i>Acer saccharinum</i>	5,00	Parque	3,50	10%-15%
154	<i>Acer saccharinum</i>	5,00	Parque	3,50	10%-15%
155	<i>Quercus rubra</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
156	<i>Quercus rubra</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
157	<i>Quercus rubra</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
158	<i>Quercus rubra</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
159	<i>Quercus rubra</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
160	<i>Quercus rubra</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
161	<i>Quercus rubra</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
162	<i>Quercus rubra</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
163	<i>Quercus rubra</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
164	<i>Platanus occidentalis</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
165	<i>Platanus occidentalis</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
166	<i>Platanus occidentalis</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
167	<i>Platanus occidentalis</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
168	<i>Platanus occidentalis</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
169	<i>Platanus occidentalis</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
170	<i>Platanus occidentalis</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
171	<i>Platanus occidentalis</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
172	<i>Platanus occidentalis</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
173	<i>Quercus robur</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
174	<i>Quercus robur</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
175	<i>Quercus robur</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
176	<i>Quercus robur</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
177	<i>Quercus robur</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
178	<i>Quercus robur</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
179	<i>Quercus robur</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
180	<i>Quercus robur</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
181	<i>Quercus robur</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%
182	<i>Quercus robur</i>	6,00	Parque	3,50	10%-15%

- Gráficos da remoção de poluentes simulados pelo i-Tree para o Cenário 1 previsto





- Gráficos da remoção de poluentes simulados pelo i-Tree para o Cenário 2 previsto

