

Transferência do dióxido de carbono entre a atmosfera e um relvado urbano do nordeste de Portugal

Joubert Soares Fuscaldi Marques

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Trabalho orientado por
Manuel Feliciano
Maria do Sameiro Patrício
José Hilton Bernardino de Araujo

Bragança
2023

Agradecimentos

Dedico este trabalho a todas as pessoas que estiveram ao meu lado durante esta jornada.

Agradeço de coração aos Professores Manuel Feliciano e Maria do Sameiro, pelo seu constante apoio, orientação e suporte ao longo deste trabalho. Sua dedicação e expertise foram fundamentais para o desenvolvimento dos meus estudos. Também gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Professor e orientador da UTFPR, José Hilton, por todo o apoio e por ter me ajudado a concretizar a oportunidade de realizar a dupla diplomação em Portugal.

Gostaria de fazer um agradecimento especial ao Alan Victor pela sua orientação e ajuda valiosa na execução da parte prática deste trabalho. Agradeço também ao Nathan e à minha amiga Nasty por seu apoio incondicional durante a execução da parte prática.

Não posso deixar de mencionar o apoio e a ajuda da minha família no Brasil. Vocês sempre estiveram presentes, oferecendo suporte emocional e encorajamento ao longo dessa trajetória. Sou imensamente grato por todo o amor e incentivo que recebi de vocês. Um agradecimento especial aos meus amigos da Big House em Bragança. Vocês tornaram essa jornada acadêmica mais leve e compartilharam comigo as experiências que vivemos juntos.

A todos que mencionei e também àqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta tese, o meu sincero agradecimento. Vocês fizeram parte desta conquista e foram essenciais para o meu crescimento como pesquisador. Àqueles que não foram mencionados, mas que tiveram um papel relevante em minha jornada, saibam que também sou grato por todo o apoio e encorajamento que me ofereceram.

Muito obrigado a todos!

Resumo

O aumento da preocupação com as alterações climáticas tem sido evidente ao longo do tempo, especialmente em áreas urbanas que abrigam um elevado número de pessoas e muitas atividades humanas. Nestas áreas, os impactos da poluição, as ilhas de calor e a emissão de gases de efeito estufa são frequentes e facilmente observáveis. Diante desta realidade, uma das formas de mitigar esses efeitos é através da instalação de espaços verdes, os quais apresentam diversos impactos positivos no ambiente urbano, entre os quais o seu potencial como sumidouros de carbono. Neste contexto, o presente estudo teve por objetivo principal avaliar a transferência vertical de dióxido de carbono numa área relvada urbana da região do nordeste de Portugal, de forma a avaliar as condições de gestão capazes de potenciar o papel deste tipo de áreas como sumidouros de carbono. O estudo foi realizado durante o período de janeiro de 2023 a maio de 2023 e envolveu a monitorização dos fluxos de CO_2 com recurso a um sistema LI-8100A (LI-COR Biosciences), a monitorização de parâmetros edafoclimáticos através da utilização do sistema anterior e de uma estação meteorológica e, ainda, de parâmetros da vegetação local, como o fitovolume, a biomassa foliar e a cobertura vegetal. Uma caracterização espacial na área de estudo foi realizada de forma a verificar a existência ou não de heterogeneidade em relação às variáveis com influência determinante nos fluxos. Os resultados demonstraram que mesmo existindo diferenças em algumas características dos pontos de medição, o comportamento dos fluxos de CO_2 foi o esperado face às heterogeneidades existentes, e foi coerente com as leituras observadas no ponto principal de medição. Em relação à análise principal, foi observado um padrão de perfil diário dos fluxos, no qual o espaço atuou como um sumidouro de carbono durante o período

diurno, e como um emissor no período noturno. Durante o período de análise, foi possível constatar um aumento nas taxas de sequestro de carbono ao longo do tempo. Em termos médios, a superfície estudada mostrou-se capaz de sequestrar carbono, apresentando uma taxa de sequestro maior do que a taxa de emissão. Os resultados evidenciaram uma forte relação entre os parâmetros edafoclimáticos e os fluxos de dióxido de carbono, possibilitando a criação de modelos matemáticos que representem essa relação. Esses modelos, por sua vez, apresentaram um alto grau de resposta, demonstrando a capacidade preditiva dos fluxos de carbono com base na utilização desses parâmetros. O presente estudo contribui para a compreensão dos mecanismos de sequestro de carbono em espaços verdes urbanos, fornecendo informação útil para um planejamento urbano sustentável e para a mitigação dos impactos das alterações climáticas. Os resultados deste estudo destacam ainda a importância dos espaços verdes urbanos como uma estratégia eficaz para mitigar as alterações climáticas, na medida em que podem atuar como sumidouros efetivos de carbono. Estas descobertas podem ajudar a implementação de políticas de planejamento urbano sustentável e medidas de gestão ambiental, visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a resiliência climática nas áreas urbanas.

Palavras-chave: alterações climáticas; espaços verdes urbanos; sumidouro de carbono; fluxos de carbono.

Abstract

The increase in concern about climate change has been evident over time, especially in urban areas that accommodate a high number of people and various human activities. In these areas, the impacts of pollution, heat islands, and greenhouse gas emissions are frequent and easily observable. Faced with this reality, one of the ways to mitigate these effects is through the installation of green spaces, which have various positive impacts on the urban environment, including their potential as carbon sinks. In this context, the main objective of this study was to evaluate the vertical transfer of carbon dioxide in an urban grassland area in the northeastern region of Portugal, in order to assess management conditions capable of enhancing the role of these types of areas as carbon sinks. The study was conducted from January 2023 to May 2023 and involved monitoring CO_2 fluxes using an LI-8100A system (LI-COR Biosciences), monitoring soil and climate parameters using the aforementioned system and a weather station, as well as parameters of the local vegetation such as phytovolume, leaf biomass, and vegetation cover. Spatial characterization in the study area was performed to verify if the main sampling point and the surrounding area responded similarly to the variables at play. The results showed that despite some differences in certain characteristics of the sampling points, they exhibited an expected response to these variations, similar to what was observed at the main study point. Regarding the main analysis, a daily flux profile pattern was observed, in which the area acted as a carbon sink during the daytime and as a source during the nighttime. Throughout the analysis period, an increase in carbon sequestration rates over time was observed. On average, the studied surface demonstrated its ability to sequester carbon, with a sequestration rate higher

than the emission rate. The results demonstrated a strong relationship between soil and climate parameters and carbon dioxide fluxes, enabling the creation of mathematical models that represent this relationship. These models, in turn, exhibited a high degree of response, demonstrating the predictive capacity of carbon fluxes based on the utilization of these parameters. This study contributes to the understanding of carbon sequestration mechanisms in urban green spaces, providing useful information for sustainable urban planning and the mitigation of the impacts of climate change. The findings of this study also highlight the importance of urban green spaces as an effective strategy for mitigating climate change since they can act as efficient carbon sinks. These discoveries can aid in the implementation of sustainable urban planning policies and environmental management measures aimed at reducing greenhouse gas emissions and promoting climate resilience in urban areas.

Keywords: climate change; urban green spaces; carbon sink; carbon fluxes.

Conteúdo

Resumo	v
Abstract	vii
Acrônimos, Siglas e Abreviaturas	xx
1 Introdução	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivos propostos	2
1.3 Estrutura da tese	3
2 Revisão bibliográfica	5
2.1 Ciclo do Carbono	5
2.2 Solos na dinâmica do Carbono	8
2.3 Respiração e fluxos de CO_2	11
2.4 Fatores edafoclimáticos influentes	11
2.4.1 Fotossíntese	13
2.4.2 Temperatura do Solo	14
2.4.3 Temperatura do ar	16
2.4.4 Conteúdo de água no solo	18
2.5 Espaços Verdes Urbanos	19
2.6 Morfologia do relvado	21
2.7 Ambientes urbanos e alterações climáticas	23

2.8	Métodos de quantificação de fluxos de CO_2	25
2.9	Método da caixa estática	27
3	Plano Experimental	31
3.1	Local de estudo	31
3.2	Equipamentos utilizados	34
3.3	Metodologia de cálculo de fluxo	36
3.4	Medição de parâmetros meteorológicos	37
3.5	Avaliação da cobertura vegetal	39
3.6	Procedimento experimental	41
3.7	Processamento de dados	43
4	Resultados e discussão	44
4.1	Parâmetros edafoclimáticos	44
4.2	Análise dos parâmetros vegetativos	50
4.2.1	Análise da cobertura vegetal	50
4.2.2	Avaliação da biomassa	52
4.2.3	Avaliação do fitovolume	55
4.3	Transferência líquida de CO_2	57
4.3.1	Fluxos de CO_2 em superfície sem cobertura vegetal	57
4.3.2	Fluxos de CO_2 em superfície com coberto vegetal	61
4.3.3	Balanco líquido do fluxo CO_2 ao longo do período de avaliação.	65
4.4	Avaliação da relação entre os fluxos de CO_2 e os parâmetros edafoclimáticos e vegetativos	66
4.5	Avaliação da contribuição herbácea	71
4.6	Caraterização espacial da área amostrada	75
4.7	Modelação matemática dos fluxos de CO_2	78
4.7.1	Modelo construído com base na informação meteorológica	78
4.7.2	Modelo construído com base em parâmetros edafoclimáticos.	80

Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros estatísticos descritivos dos fluxos de CO_2	52
4.2	Parâmetros estatísticos descritivos do fluxo de CO_2 do solo exposto por regressão exponencial e linear.	64

Lista de Figuras

2.1	Ciclo Global do Carbono adaptado de [11].	6
2.2	Ciclo do Carbono no solo [15].	7
2.3	A - Variação das taxas de emissão de CO_2 em função da temperatura; B - Variação das taxas de respiração em função da temperatura [19].	9
2.4	Horizontes do solo [21].	10
2.5	Fatores influentes na respiração do solo adaptado de [23].	12
2.6	Esquema das reações do RuBisCo [26].	14
2.7	Relação entre a temperatura do solo (T_{sd}) e a Razão entre a respiração média anual do solo (mean SR_{annual}) e a respiração do solo para a temperatura média anual (SR_{MAT}), para diferentes Q_{10} (Índice de resposta da respiração a variação de 10 graus). Os pontos de dados indicam os valores dos locais não limitados pela água para as classes de mean SR_{annual}/SR_{MAT} , T_{sd} e Q_{10} [34].	15
2.8	Relações entre variáveis morfogênicas e características estruturais da pastagem [57].	21
2.9	Estrutura de um rebento de gramínea. a) folhas expandidas e fotossinteticamente ativas; b) folhas que estão emergindo e que não atingiram sua capacidade fotossintética total; c) folhas que não emergiram e que dependem dos assimilados produzidos por folhas mais velhas; d) meristema apical; e) gemas axilares; f) h_1 , h_2 , h_3 = alturas de corte ou pastoreio. [59].	23
2.10	Perfil de temperatura do efeito ilha de calor [24].	24

2.11	Curva de efeito Keeling [68].	26
3.1	Mapa área de estudo.	32
3.2	Relvado da área de estudo	33
3.3	módulos e sensores do analisador de gás da LI-COR Biosciences (modelo LI-8100A) [81]	35
3.4	Variação da concentração de CO_2 durante o período de amostragem, a linha vermelha correspondendo ao ajuste exponencial e a verde o ajuste linear do fluxo de CO_2 [81]	37
3.5	Estação meteorológica usada no estudo	38
3.6	Componentes da estação metereológica, sendo estes: A) Datalogger; B)Rain Gauge; C)Sensor de temperatura e humidade relativa; D)Anemoscopio; E)Anemómetro; F) Piranómetro.	39
3.7	Procedimento de pesagem da biomassa	40
3.8	Mapa de localização dos pontos de amostragem no CAB	42
4.1	Perfil e evolução temporal dos parâmetros de temperatura do solo e temperatura do ar ambiente	45
4.2	Perfil medio diario e evolução temporal dos parâmetros de radiação solar e PAR	46
4.3	Perfil e evolução temporal dos parâmetros de humidade relativa e conteúdo de água do solo	48
4.4	Rosa dos ventos para todo o período de observação	49
4.5	Evolução temporal do estado estado vegetativo do relvado: A) 13 de Janeiro; B) 25 de Janeiro; C) 06 de Fevereiro; D) 23 de fevereiro; E) 02 de Março; F) 21 de Março; G) 03 de Abril; H) 18 de Abril; 05 de Maio	51
4.6	Evolução temporal da biomassa seca de carbono produzida, em g/m ² . Os valores A,B,C,D e E correspondente aos pontos da caracterização espacial enquanto M ao ponto principal do estudo	53

4.7	Matriz de correlação de Pearson entre variáveis impactantes na quantidade de biomassa	54
4.8	Evolução da biomassa frente a cobertura vegetal para os pontos de amostragem espacial e ponto principal de amostra	55
4.9	Evolução do fitovolume nos pontos de amostragem espacial e ponto principal de amostragem	56
4.10	Evolução temporal dos fluxos de CO_2 no solo exposto para o período de avaliação.	58
4.11	Perfil médio diário dos fluxos de CO_2 para o período de avaliação.	59
4.12	Matriz de correlação de Pearson entre fluxo e fatores edafoclimáticos influentes	60
4.13	Evolução temporal dos valores médios de fluxos de CO_2 ao longo do período de avaliação, obtidos pelo método de regressão linear e regressão exponencial.	62
4.14	Perfil médio diário dos fluxos de CO_2 para o período de avaliação, valores para regressão linear e exponencial.	63
4.15	Perfil médio diário dos fluxos de CO_2 para o meses de avaliação, valores para regressão exponencial.	64
4.16	análise do balanço líquido das frações de fluxo mássico ao longo do tempo.	65
4.17	Evolução dos fluxos de CO_2 no solo exposto em função da mudança de temperatura do solo.	67
4.18	Relação entre luminosidade e fluxos de CO_2	68
4.19	Matriz de correlação de Spearman para as variáveis de fluxo de CO_2 e meteorológicas na área relvada. Nota: Tamb: temperatura do ambiente($^{\circ}C$); HRamb: humidade relativa do ambiente (%); Luz: Radiação solar;VelVnt: velocidade dos ventos (ms^{-1}); Prp: precipitação (mm); Temp CH: Temperatura na camara de medição; F CO_2 : Fluxo de CO_2 ($\mu mol m^{-2}s^{-1}$); TSolo: temperatura do solo ($^{\circ}C$); HRsolo: conteúdo de água no solo; PAR: radiação fotossinteticamente ativa($\mu mol m^{-2}s^{-1}$ de fótons)	71

4.20	análise do balanço líquido das frações de fluxo mássico utilizando o método de regressão exponencial ao longo do tempo.	73
4.21	Matriz de correlação fatores analisados nas medições espaciais	75
4.22	Perfil médio dos fluxos de CO_2 e influencia do fitovolume e PAR	76
4.23	Perfil médio dos fluxos de CO_2 e influencia do fitovolume e PAR pontos A e B	77
4.24	Perfil médio diário gerado pelos dados medidos e equação empírica criada .	79
4.25	Perfil médio diário gerado pelos dados medidos e equação empírica criada .	81

Acrônimos, Siglas e Abreviaturas

<i>RuBisCO</i>	Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase / oxigenase
<i>RuBP</i>	Ribulose-1,5-bisfosfato
<i>T_s</i>	Temperatura do solo
<i>T_a</i>	Temperatura do ar
<i>T</i>	Temperatura
<i>P</i>	Pressão
<i>ICUs</i>	Ilhas de calor urbano
<i>F</i>	Fluxo mássico de Dióxido de Carbono
<i>Q</i>	Caudal, $m^3 s^{-1}$
<i>A</i>	Área, m^2
<i>C</i>	Concentração
<i>F_c</i>	Fluxo molar de Dióxido de Carbono, $\mu\text{mol } m^{-2} s^{-1}$
<i>t</i>	tempo, s
<i>GEE</i>	Gases do efeito estufa
<i>CAB</i>	Clube Académico de Bragança
<i>PTFE</i>	Politetrafluoretileno
<i>P_{he}</i>	Produção de biomassa herbácea, $g m^{-2} d^{-1}$
<i>BM_{seca}</i>	Biomassa seca, g
<i>A_{colar}</i>	Área do colar, m^2
<i>H_{relvado}</i>	Humidade da relva, %
<i>BM_{fresca}</i>	Biomassa fresca, g
<i>RS</i>	Radiação solar, $W m^{-2}$
<i>PAR</i>	Radiação fotossinteticamente ativa, $\mu\text{mol de fotons } m^{-2} s^{-1}$

<i>HR_{caixa}</i>	Humidade relativa do ar na caixa, %
<i>HR_{amb}</i>	Humidade relativa do ar ambiente, %
<i>FECO₂</i>	Fluxo de <i>CO</i> ₂ por meio da regressão exponencial, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
<i>FLCO₂</i>	Fluxo de <i>CO</i> ₂ por meio da regressão linear, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
S TEMP	Temperatura do solo, °C
AR TEMP	Temperatura do ar, °C
TSolo	Temperatura do solo, °C
Tamb	Temperatura do ambiente, °C
TempCH	Temperatura do ar na câmara de medição, °C
VelVnt	Velocidade dos ventos, m s^{-1}
<i>HR_{solo}</i>	Conteúdo de água relativa do solo, %
Prp	Precipitação, mm

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto e motivação

Os solos urbanos desempenham um papel importante no ciclo de carbono e na regulação do clima, mas ainda pouco se sabe sobre a contribuição dos mesmos na dinâmica do carbono em comparação com os solos rurais [1]. Como o segundo maior reservatório de carbono natural, atrás apenas do oceano [2], os solos urbanos podem ser uma fonte significativa de carbono, especialmente considerando que as cidades são responsáveis por cerca de 70% das emissões de gases de efeito estufa [3]. Portanto, a gestão dos solos urbanos pode ser uma importante via para reduzir essas emissões e mitigar os impactos das mudanças climáticas.

No entanto, as atividades humanas, como a construção e a remoção de edifícios e estradas, frequentemente perturbam os solos urbanos, o que pode afetar a sua capacidade de sequestro de carbono [4]. Além disso, as práticas de gestão dos solos urbanos, como o uso de fertilizantes e herbicidas, podem ter impactos significativos na quantidade de carbono armazenada nos solos [4].

Compreender o papel dos solos urbanos na dinâmica de carbono é importante não apenas para a gestão das emissões de gases de efeito estufa, mas também para maximizar a captura de carbono pelos solos. A utilização de práticas agrícolas sustentáveis, como a

agricultura de conservação, pode ajudar a aumentar a quantidade de carbono armazenada nos solos urbanos [5]. Além disso, a conservação de áreas verdes urbanas, como parques e jardins, pode ajudar a aumentar a quantidade de carbono armazenada nos solos [6].

Para entender melhor como os solos urbanos contribuem para a dinâmica do carbono, é necessário considerar as diferenças entre os conceitos de solo urbano e uso de solo urbano. O solo urbano refere-se à camada superficial do solo, enquanto o uso do solo urbano é definido pelas atividades humanas que ocorrem na superfície do solo [7]. Por exemplo, um solo urbano pode ser utilizado para atividades como construção de edifícios, parques e jardins, ou pode ser deixado no seu estado natural. A compreensão desses conceitos é fundamental para avaliar como as atividades humanas afetam a dinâmica do carbono nos solos urbanos.

Outros fatores que afetam a capacidade de sequestro de carbono nos solos urbanos incluem a composição química do solo, a presença de água e a temperatura do solo e a presença de matéria orgânica [4]. Por exemplo, solos com altos teores de matéria orgânica tendem a ter uma maior capacidade de sequestro de carbono do que solos com baixos teores de matéria orgânica [6]. O conteúdo de água no solo do solo também pode afetar a capacidade de sequestro de carbono, pois solos húmidos tendem a ter uma maior atividade microbiana do que solos secos [8].

1.2 Objetivos propostos

O presente estudo tem como objetivo principal avaliar o papel dos solos urbanos relvados na dinâmica de carbono, entre a atmosfera e um solo relvado, na região do nordeste transmontano de Portugal. Para isso, serão realizadas medições dos fluxos verticais de CO_2 numa área relvada de um espaço verde localizado na cidade de Bragança. Este estudo pretende avaliar se as áreas com esta tipologia de cobertura podem ser fontes ou sumidouros de carbono e quantificar a quantidade deste gás emitido ou sequestrado pelo solo e identificar as condições de gestão desses espaços que podem potenciar a maximização do sequestro.

Como objetivos específicos, pretende-se ainda:

- Avaliar a contribuição relativa do solo e da vegetação herbácea para as taxas de transferência de CO_2 ;
- Analisar a evolução temporal dos fluxos no período de estudo, bem como realizar uma caracterização espacial dos fluxos na área de estudo;
- Relacionar os fatores edafoclimáticos e da vegetação com o comportamento dos fluxos do solo, a fim de compreender os fatores limitantes do fenómeno.

Com os resultados deste estudo espera-se contribuir para a identificação de medidas de gestão mais sustentáveis dos espaços verdes urbanos relvados. A ideia é mitigar aspectos ambientais negativos e maximizar as potencialidades destas áreas como sumidouros de CO_2 . Além disso, embora limitado a um período temporal específico, este estudo, pode ser uma importante contribuição para a compreensão do papel dos solos urbanos na dinâmica de carbono e auxiliar na implementação de políticas públicas mais eficientes para a gestão de espaços verdes urbanos.

1.3 Estrutura da tese

Esta Dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos. O primeiro é a introdução, na qual o tema da tese será contextualizado, mostrando a importância e a necessidade do estudo ser desenvolvido. Além disso, os objetivos do trabalho serão apresentados, juntamente com a estruturação do documento, para que o leitor tenha uma visão geral do que será abordado ao longo do trabalho. No segundo capítulo, será realizada uma revisão bibliográfica sobre o ciclo do carbono e os principais fatores que contribuem para o armazenamento de carbono nos solos ou o torna uma fonte emissora de CO_2 . Serão avaliadas as características do solo que possibilitam uma maior taxa de sequestro de carbono. Essa secção será importante para que o leitor entenda os fundamentos teóricos que fundamentam a pesquisa. O terceiro capítulo visa a descrição detalhada da metodologia, no qual será descrita a área de estudo, bem como os equipamentos

utilizados e o tratamento dos dados. Essa secção será importante para que o leitor possa compreender como a pesquisa foi realizada e reproduzir os experimentos, caso necessário. No quarto capítulo, serão apresentados os resultados e realizada a discussão. Será feito o tratamento e análise dos dados obtidos ao longo das medições, comparando-se com os valores encontrados na literatura para permitir uma discussão mais consistente. Essa secção será importante para destacar as principais contribuições do trabalho. Por fim, no quinto capítulo, serão apresentadas as conclusões do trabalho, onde serão alinhadas as relações entre os resultados obtidos e os objetivos iniciais a que se propôs a pesquisa. Também serão propostas sugestões para investigações futuras, visando contribuir para o avanço do conhecimento na área.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Este capítulo tem como objetivo fornecer uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos que determinam os fluxos de CO_2 através da interface atmosfera/superfície. Inicialmente, apresentaremos uma abordagem sobre o ciclo global do carbono, abrangendo os principais reservatórios de carbono e as interações entre eles em termos de fluxos de carbono. Em seguida, será realizada uma análise sobre os principais processos que intervêm na dinâmica das trocas de carbono entre a superfície terrestre e a atmosfera. Adicionalmente, serão discutidos os estudos sobre a influência antrópica no ambiente, a importância dos espaços verdes urbanos e as dinâmicas e influências do carbono no ambiente terrestre. Também serão abordadas as características morfológicas do relvado, e os métodos utilizados na medição e quantificação dos fluxos de gases, incluindo o CO_2 , com particular ênfase para o método da caixa.

2.1 Ciclo do Carbono

O carbono é um elemento químico fundamental para a vida na Terra, e faz parte de todos os seres vivos, bem como de diversos compostos químicos que compõem o planeta. Na forma de metano (CH_4) e de dióxido de carbono (CO_2) é conhecido por ser um dos principais responsáveis pelo aquecimento global e pelas alterações climáticas. A atividade humana, especialmente a queima de combustíveis fósseis, tem aumentado a concentração

de CO_2 na atmosfera, modificando significativamente o ciclo global de carbono [9].

O ciclo do carbono, figura 2.1, é controlado por vários processos naturais, como a respiração e a decomposição de materiais orgânicos, a fotossíntese realizada pelas plantas, e os processos geológicos, como a erupção de vulcões e a formação de rochas sedimentares [10]. O ciclo do carbono é importante porque ajusta a quantidade de CO_2 na atmosfera, o que afeta o clima da Terra [2].

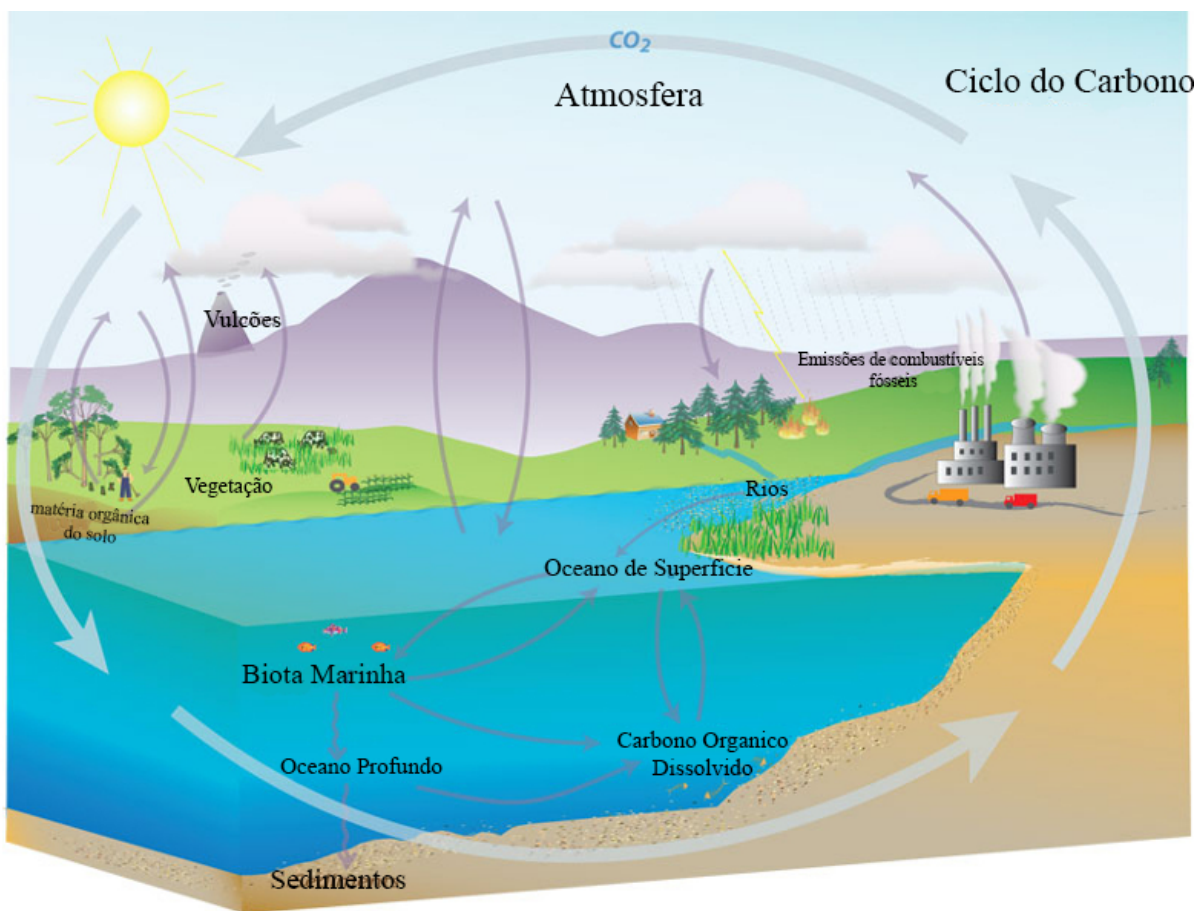


Figura 2.1: Ciclo Global do Carbono adaptado de [11].

Os humanos têm impactado o ciclo do carbono de várias maneiras, incluindo a queima de combustíveis fósseis, a desflorestação e a mudança do uso do solo [2]. Dadas as tendências relativas às necessidades energéticas, reservas de combustíveis fósseis e crescimento populacional, é provável que as concentrações de CO_2 na atmosfera continuem a aumentar nos próximos anos [12].

O carbono é armazenado em diferentes compartimentos do sistema terrestre, incluindo a atmosfera, oceanos, solo, biomassa e geólitos (petróleo, gás natural e carvão). Esse armazenamento de carbono na natureza e seu retorno com seus diferentes usos é conhecido como o ciclo de carbono.

Os oceanos constituem os maiores compartimentos de armazenamento de carbono, armazenando aproximadamente 50 a 60% do carbono global terrestre. O processo de armazenamento de carbono no oceano é conhecido como sequestro de carbono oceânico [13]. O carbono é libertado na atmosfera como CO_2 e transportado maioritariamente para o oceano pela água da chuva. Nos oceanos é dissolvido na superfície destes e é transportado para as suas profundezas pela circulação oceânica.

A biomassa terrestre, incluindo florestas, arbustos e gramíneas, também são um importante compartimento de armazenamento de carbono. A fotossíntese realizada por essas plantas capta o CO_2 da atmosfera e o transforma em carbono orgânico, que é armazenado na biomassa das plantas [14].

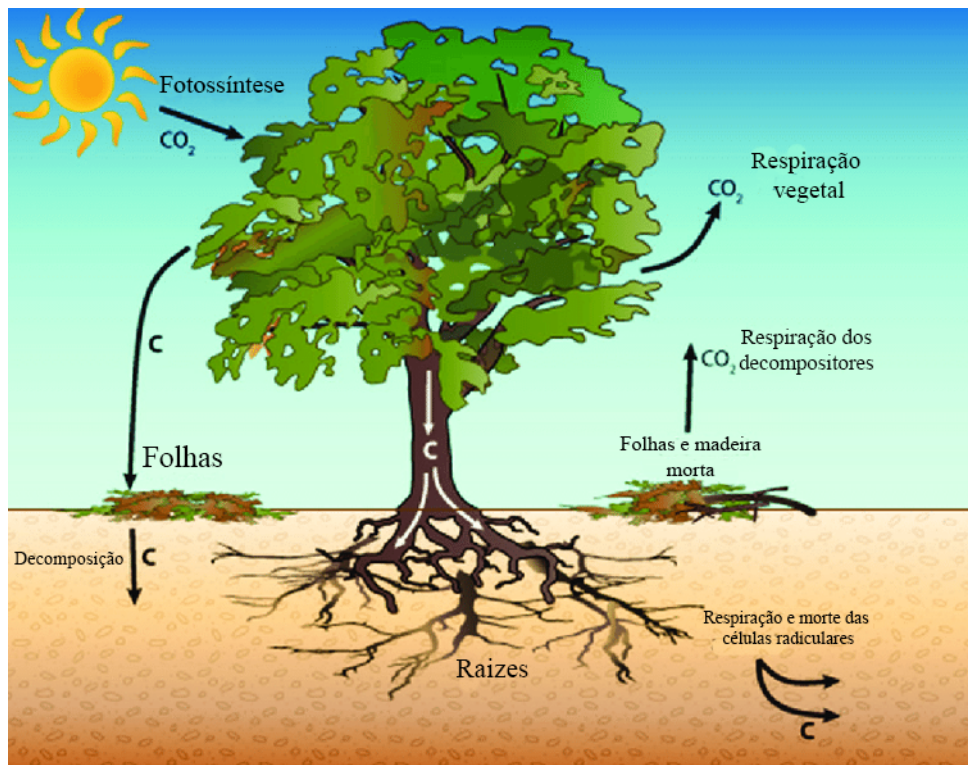


Figura 2.2: Ciclo do Carbono no solo [15].

Além disso, o solo é outro compartimento importante de armazenamento de carbono, armazenando cerca de 1500 a 2000 giga toneladas de carbono (GtC) [16] figura 2.2. O carbono é armazenado no solo como matéria orgânica, que é formada pela decomposição de materiais vegetais e animais no solo.

O solo é um componente importante do ciclo do carbono, já que armazena grandes quantidades de carbono e liberta gás carbônico para a atmosfera através da respiração dos organismos do solo [2]. O carbono armazenado nos solos pode ter um impacto significativo nas emissões de gases de efeito estufa e na regulação do clima, devido ao seu grande potencial de armazenamento [10].

2.2 Solos na dinâmica do Carbono

O solo é um componente fundamental dos ecossistemas terrestres e desempenha um papel crítico no ciclo global do carbono [17]. A maior parte do carbono orgânico é encontrada na camada superficial do solo, que é o berço da atividade biológica do solo, enquanto o carbono mineralizado é encontrado em camadas mais profundas [18]. A quantidade de carbono armazenado nos solos depende de vários fatores, incluindo as condições climáticas, as práticas de gestão do solo, e a presença de organismos do solo, como bactérias e fungos [4].

A quantidade de CO_2 libertada ou absorvida pelos solos depende de diversos fatores Figura 2.3, incluindo a atividade microbiana do solo, da qual depende a decomposição da matéria orgânica e as condições climáticas [5]. Os solos podem libertar ou absorver CO_2 , o que tem um impacto significativo na concentração desse gás na atmosfera [2]. O aumento da concentração de CO_2 na atmosfera pode afetar a atividade microbiana do solo, afetando a libertação ou absorção de CO_2 pelo solo [4].

Além disso, os solos são afetados pelas emissões de gases de efeito estufa, como o CO_2 , CH_4 e o óxido nitroso (N_2O) [2]. A distribuição do carbono no solo varia de acordo com a profundidade e os processos de mineralização sofridos por ele, com a maior parte concentrada nos primeiros 100 cm do solo, devido à baixa velocidade de decomposição

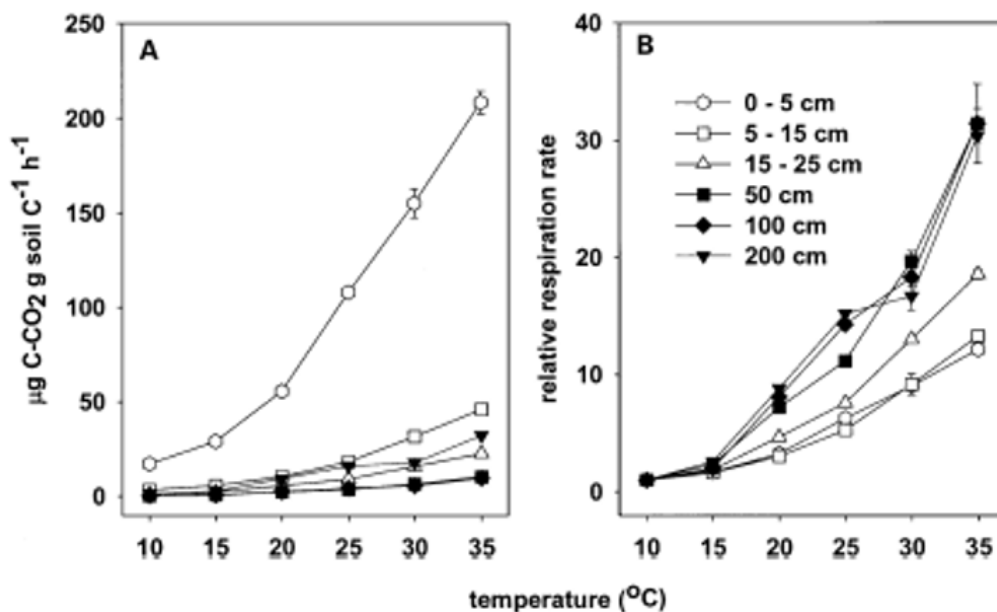


Figura 2.3: A - Variação das taxas de emissão de CO_2 em função da temperatura; B - Variação das taxas de respiração em função da temperatura [19].

da matéria orgânica [20]. A respiração do solo varia de acordo com a profundidade, temperatura e presença de água [2].

Os solos são compostos por camadas profundas que contêm grandes quantidades de carbono orgânico tanto na superfície quanto nas camadas subsuperficiais (Figura 2.4). Embora as concentrações de carbono orgânico nas camadas subsuperficiais sejam geralmente muito menores do que nas camadas superficiais, o volume total de solo nessas camadas é muito grande [19].

Além dos fatores mencionados anteriormente, o uso do solo também pode influenciar o teor de carbono no solo. Por exemplo, a conversão de solos naturais para uso agrícola pode levar à diminuição da matéria orgânica do solo e à perda de carbono [17]. A intensificação do uso do solo, como o uso de fertilizantes químicos e pesticidas, também pode levar a uma diminuição da atividade microbiana no solo e, portanto, à diminuição da capacidade do solo de sequestrar carbono [18].

Além disso, a mudança no uso do solo, como a conversão de áreas naturais em áreas urbanas, pode resultar em grandes perdas de carbono do solo.

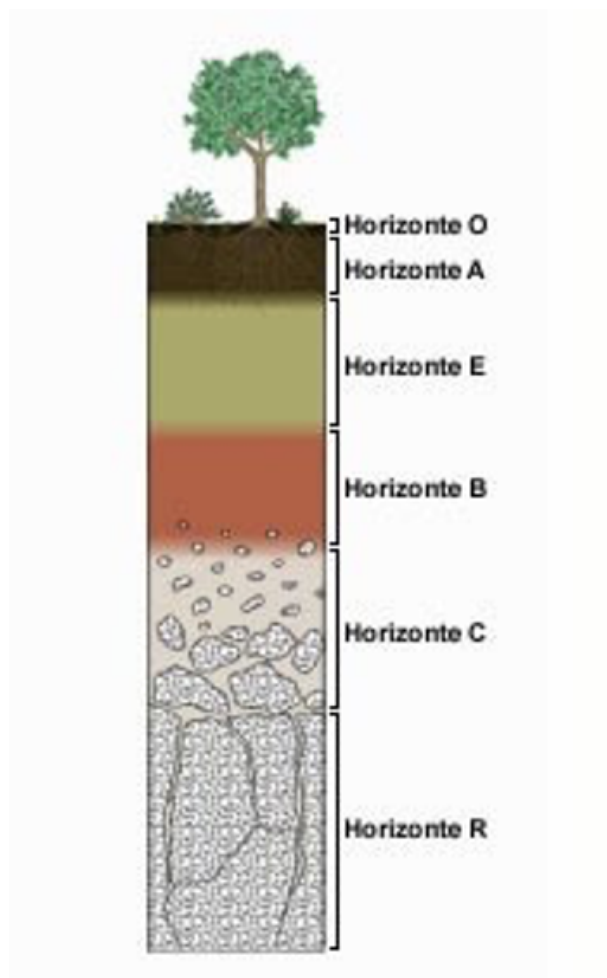


Figura 2.4: Horizontes do solo [21].

Para compreender adequadamente a dinâmica do carbono no solo e as mudanças que ocorrem devido ao uso do solo, é fundamental monitorizar as mudanças na quantidade de carbono no solo ao longo do tempo e em diferentes tipos de uso do solo. Essa abordagem pode ajudar a entender como as práticas de gestão do solo podem afetar a quantidade de carbono no solo e, conseqüentemente, o equilíbrio do ciclo global do carbono [17].

Portanto, a monitorização adequada do carbono no solo e da transferência líquida de CO_2 entre o solo e a atmosfera, bem como a adoção de práticas sustentáveis de gestão do solo, são fundamentais para mitigar as mudanças climáticas e promover a sustentabilidade a longo prazo dos ecossistemas terrestres.

2.3 Respiração e fluxos de CO_2

A respiração do solo é uma parte importante do ciclo do carbono, esse é o processo pelo qual os organismos do solo liberam gás carbônico para a atmosfera através da respiração. Esse é o caminho principal por onde o CO_2 fixado pelas plantas retornam a atmosfera e segue o seu ciclo [22].

Os fluxos de CO_2 entre o solo e a atmosfera são controlados por vários fatores, incluindo a temperatura do solo, o conteúdo de água no solo do solo, e a presença de matéria orgânica em decomposição [17]. A atividade microbiana do solo também pode afetar os fluxos de CO_2 , já que os micro-organismos do solo produzem CO_2 através da respiração e da decomposição de materiais orgânicos [5].

Os solos podem ser uma fonte ou um reservatório de CO_2 , dependendo da quantidade de matéria orgânica presente e da atividade microbiana [10]. Os solos com altos níveis de matéria orgânica tendem a ser um reservatório de CO_2 , enquanto os solos com baixos níveis de matéria orgânica podem ser uma fonte de CO_2 [17].

As alterações do uso do solo, como a desflorestação e a mudança do uso da terra, podem afetar os fluxos de CO_2 entre o solo e a atmosfera [16]. Analisar a magnitude e a dinâmica dessas alterações é de grande importância de forma a determinar as medidas a serem adotadas para compensação e alcançar os alvos de temperatura desejáveis para assegurar o controle climático [14]. Além disso, o aquecimento global pode alterar os fluxos de CO_2 através da mudança nas condições do solo, como a temperatura e a conteúdo de água [5].

2.4 Fatores edafoclimáticos influentes

A interação entre os fatores edafoclimáticos, como temperatura, presença de água e pH do solo, afetam diretamente a respiração do solo e os fluxos de CO_2 na atmosfera (Figura 2.5). Entender a influência desses fatores edafoclimáticos nos fluxos de CO_2 e na respiração do solo é de grande importância para que possamos desenvolver estratégias de mitigação de

emissões de gases de efeito estufa e de gestão sustentável dos solos [17].

Os processos biológicos desempenham um papel importante no papel dos solos urbanos na dinâmica de carbono. A atividade microbiana do solo é um fator importante que pode afetar a quantidade de carbono armazenada nos solos [5]. A atividade microbiana inclui a respiração e a decomposição de materiais orgânicos pelos microorganismos do solo, como bactérias e fungos [6].

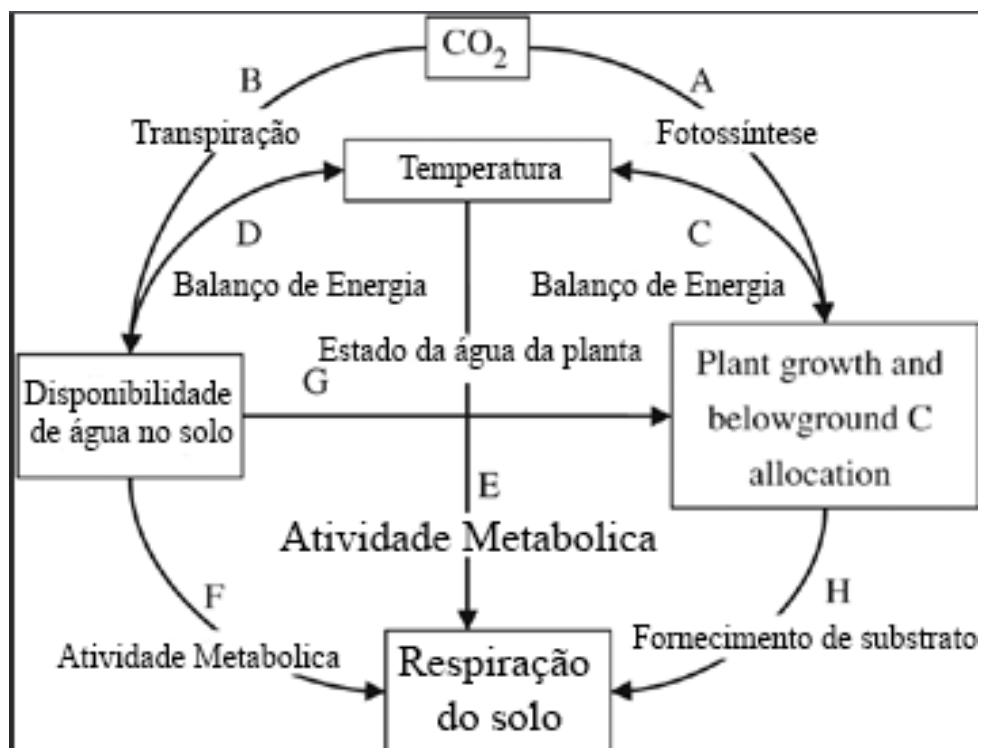


Figura 2.5: Fatores influentes na respiração do solo adaptado de [23].

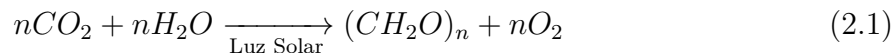
A adição de matéria orgânica ao solo também pode afetar a quantidade de carbono armazenada. A matéria orgânica pode ser adicionada ao solo através de processos como a decomposição de plantas e animais, a deposição de fezes de animais e a adição de compostos orgânicos [4]. A matéria orgânica pode ser decomposta pelos microorganismos do solo, libertando CO_2 para a atmosfera [10].

A presença de plantas também pode afetar o papel dos solos na dinâmica do CO_2 . As plantas realizam a fotossíntese, que é o processo pelo qual elas convertem CO_2 em matéria orgânica [17]. Esse processo pode ajudar a armazenar carbono nos solos através

da adição de matéria orgânica [4]. Junto a isso, as raízes das plantas podem ajudar a fixar o carbono no solo, impedindo que ele seja libertado para a atmosfera [6].

2.4.1 Fotossíntese

A fotossíntese é o processo através do qual as plantas, algas e algumas bactérias convertem a energia luminosa em energia química, produzindo assim compostos orgânicos a partir de CO_2 e água (H_2O) [24]. Este processo é vital para a sobrevivência desses organismos, uma vez que fornece a fonte primária de alimento e oxigênio para a maioria dos seres vivos do planeta.



A fixação de CO_2 é um processo chave na fotossíntese que envolve a incorporação de CO_2 atmosférico em compostos orgânicos, como açúcares e amidos, pelos organismos fotossintéticos [25]. A enzima responsável pela fixação de CO_2 é a RuBisCO (Ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase / oxigenase), que é considerada a enzima mais abundante na Terra.

A RuBisCO (Figura 2.7) é responsável por catalisar a primeira etapa da fotossíntese, que é a carboxilação da ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP) com o CO_2 atmosférico. Esse processo produz duas moléculas de 3-fosfoglicerato (3PGA), que posteriormente são utilizadas na síntese de açúcares e outros compostos orgânicos [27]. No entanto, a RuBisCO tem uma afinidade maior pela molécula de oxigênio (O_2) do que pelo CO_2 , o que leva à sua oxigenação em vez de carboxilação em ambientes de baixa concentração de CO_2 e alta concentração de O_2 , como ocorre em muitas plantas, o que leva à perda de energia fotossintética.

A mineralização microbiana da matéria orgânica do solo é a principal fonte de emissão de CO_2 do solo [17]. Esses processos são influenciados por vários fatores, como temperatura, disponibilidade de água, disponibilidade de nutrientes, pH e composição da biomassa microbiana [28].

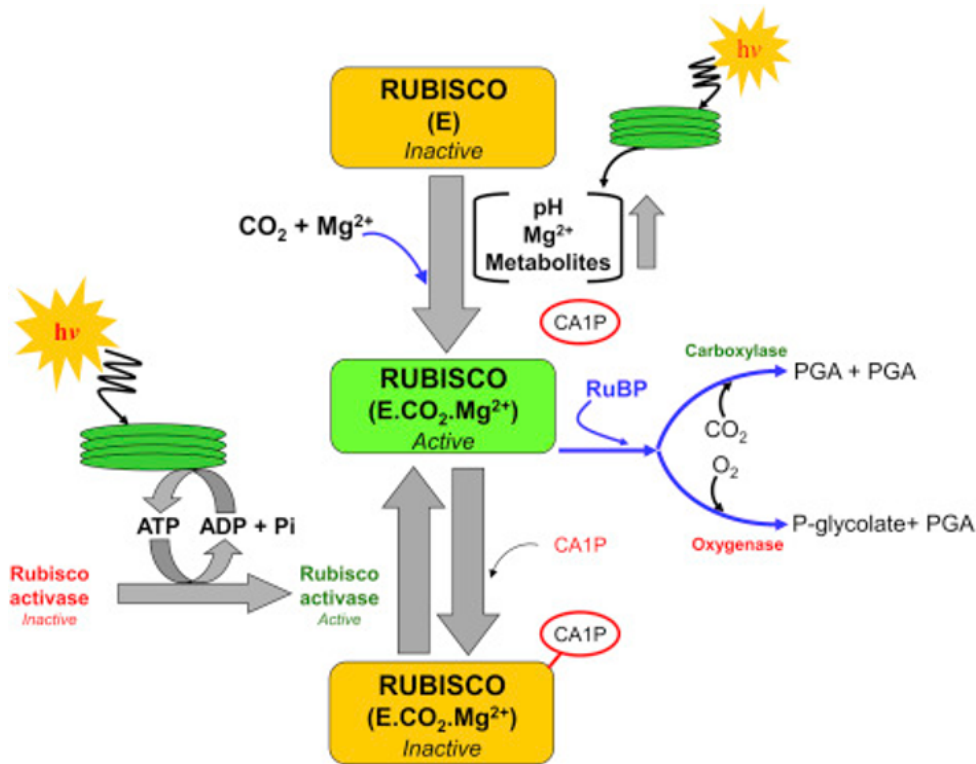


Figura 2.6: Esquema das reações do RuBisCo [26].

A atividade microbiana é mais intensa em solos ricos em matéria orgânica, onde há grande quantidade de substratos disponíveis para a decomposição pelos micro-organismos [29]. A taxa de mineralização microbiana de carbono orgânico do solo depende da qualidade da matéria orgânica, da atividade microbiana e da disponibilidade de nutrientes [30]. Além disso, a composição da comunidade microbiana pode afetar a decomposição da matéria orgânica, sendo que diferentes grupos de micro-organismos têm preferências distintas por diferentes substratos [31].

2.4.2 Temperatura do Solo

A respiração do solo é um processo chave no ciclo global de carbono, sendo responsável pela emissão de grandes quantidades de dióxido de carbono para a atmosfera. A temperatura do solo é um fator importante que afeta a respiração do solo, e a relação entre a taxa de respiração e a temperatura do solo tem sido amplamente estudada [32].

De acordo com Hutchinson [33], a taxa de respiração do solo aumenta aproximadamente duas vezes por cada aumento de 10°C na temperatura do solo (T_s) entre 5 e 30°C e diminui rapidamente acima de 40°C. Uma mudança de 1°C na T_s resulta em uma mudança de 7% na taxa de respiração. Como a maioria da atividade de respiração ocorre nos primeiros 25 cm do solo, é evidente que as técnicas de medição de fluxos devem minimizar as mudanças na temperatura do solo próximo à superfície durante a sua aplicação.

É praticamente impossível manter os mesmos fluxos de energia dentro e fora da câmara da medição de CO_2 , portanto, as temperaturas do ar e do solo dentro da câmara provavelmente diferem dos valores externos. Portanto, a temperatura do solo deve ser monitorada durante os períodos curtos e longos para avaliar os impactos potenciais na respiração do solo e permitir eventuais correções [34].

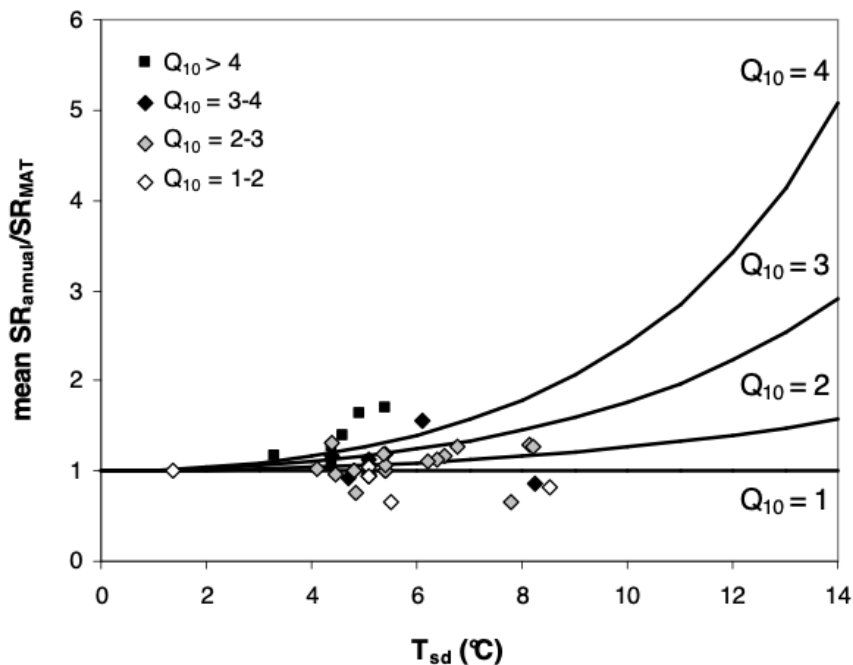


Figura 2.7: Relação entre a temperatura do solo (T_{sd}) e a Razão entre a respiração média anual do solo (mean SR_{annual}) e a respiração do solo para a temperatura média anual (SR_{MAT}), para diferentes Q_{10} (Índice de resposta da respiração a variação de 10 graus). Os pontos de dados indicam os valores dos locais não limitados pela água para as classes de mean SR_{annual}/SR_{MAT} , T_{sd} e Q_{10} [34].

No caso de períodos curtos de uso da câmara, a correção das mudanças na taxa de respiração do solo não é possível. Isso ocorre porque não se sabe com certeza como a produção de CO_2 irá responder às mudanças na temperatura do solo, ou quanto tempo levará para que essas mudanças sejam refletidas no perfil de concentração de CO_2 do solo [32]. Em períodos mais longos, podem ser utilizadas relações matemáticas simples para compensar as mudanças na temperatura do solo, mas é importante lembrar que essas correções não levam em conta possíveis interações com outras variáveis ambientais, como o conteúdo de água no solo ou a disponibilidade de nutrientes [34]. Além disso, as correções matemáticas não consideram a possibilidade de difusão lateral de CO_2 , o que pode levar a imprecisões na medição da respiração do solo [35].

Para evitar grandes diferenças de temperatura durante períodos curtos de implantação de câmaras para medição de trocas gasosas no solo, câmaras isoladas e refletivas são geralmente utilizadas [34]. Essas câmaras inibem a troca de energia com a atmosfera e são projetadas para limitar as variações de temperatura do ar e do solo (T_s), assumindo que pequenas variações restantes não afetam significativamente as trocas gasosas do solo. No entanto, durante períodos mais longos de implantação (>1 h), o design da câmara deve se concentrar em limitar as variações de T_s para evitar a modificação da taxa de respiração do solo [36].

2.4.3 Temperatura do ar

A temperatura do ar é um fator crucial que influencia a taxa de respiração do solo e, conseqüentemente, os fluxos de CO_2 . Como mencionado por Hutchinson [33], variações na temperatura do ar dentro das câmaras podem afetar as medições de fluxos de CO_2 induzindo variações na pressão ou volume do ar. A expansão ou contração do ar na câmara em resposta às mudanças de temperatura atua como um pistão, empurrando ou puxando o ar para fora do solo sob a câmara, alterando substancialmente o fluxo de gás medido na superfície do solo.

Em relação ao efeito da temperatura do ar na temperatura do solo (T_s) dentro da

câmara, os cálculos de balanço de energia e as medições in situ de Matthias e Peralta-Hernández [37] indicam que a temperatura do ar tende a ser próxima da superfície do solo dentro da câmara. Portanto, as câmaras que minimizam as variações de T_s resultam em variações significativas na temperatura do ar (T_a) e implantações prolongadas de câmaras quase inevitavelmente são afetadas pelas mudanças de pressão (ou volume) resultantes. Corrigir vazamentos quando a temperatura aumenta e o ar se expande durante o uso é simples se houver uma saída de ar. Nesse caso, a pressão (P) permanece essencialmente constante e o efeito de um aumento na temperatura (T) pode ser visto como um aumento "virtual" no volume, mesmo que, na realidade, o ar que flui pela saída de ar se misture com o ar ambiente. Em tais condições (aumento de T com P e umidade constantes), as funções integradas da maioria dos analisadores portáteis de CO_2 corrigem as variações de densidade de gás induzidas pela temperatura.

Por outro lado, corrigir uma tendência de queda na temperatura durante o uso é mais problemático. Nesse cenário, o ar da câmara se contrai e é contaminado pelo ar externo, portanto, as correções requerem conhecimento da $[CO_2]$ do ar que entra na saída de ar. Como essa concentração geralmente é desconhecida, as câmaras que resultam em resfriamento rápido do ar da câmara durante o uso devem ser evitadas [33]

Além disso, é importante considerar a relação entre a temperatura do solo e a temperatura do ar. A variação sazonal na temperatura do solo pode influenciar a temperatura do ar, especialmente durante a primavera e o verão. O aumento da temperatura do solo pode causar um aumento na temperatura do ar acima da superfície do solo e, conseqüentemente, aumentar as taxas de respiração do solo e a liberação de CO_2 para a atmosfera [38]. Além disso, mudanças nas condições climáticas podem influenciar a taxa de respiração do solo e os fluxos de CO_2 , como indicado por Zhou et al. [39], que reportaram uma redução significativa nos fluxos de CO_2 do solo durante períodos de seca prolongada, seguidos por um aumento significativo após as chuvas.

2.4.4 Conteúdo de água no solo

As variações no fluxo de CO_2 na superfície do solo estão fortemente relacionadas com as mudanças do teor de água no solo, principalmente devido à sua forte influência nas taxas de transporte quer na fase líquida quer na fase gasosa [33]. A disponibilidade de água no solo pode afetar diretamente a respiração do solo, alterando as atividades das raízes das plantas e dos microorganismos do solo, e indiretamente por meio da mudança no crescimento das plantas e no suprimento de substratos [23].

De maneira geral, a produção de CO_2 diminui tanto em condições de solo com teor de água muito baixo quanto em condições com teor de água muito alto. A redução em condições de solo com teor de água muito baixo ocorre devido à inibição da atividade metabólica do solo microbiano e radicular, enquanto em condições de teor de água muito alto, a redução pode ser causada pela falta de oxigênio ou pela acumulação de CO_2 , como resultado do preenchimento dos espaços porosos do solo com água [40].

Ao abordar as medições dos fluxos de CO_2 , é importante ter cuidado com a metodologia de medição para não impactar o regime de água na área de análise e, conseqüentemente, nos resultados do estudo. As câmaras instaladas permanentemente restringem o movimento natural de água, minerais e organismos, incluindo raízes, dentro e fora das áreas amostradas. As câmaras deixadas no local por algumas horas podem causar mudanças na quantidade de água nos horizontes do solo, diferentes das que ocorrem nas áreas de controle fora das câmaras. Esses efeitos afetam a respiração do solo e aumentam as taxas de emissão de CO_2 [41].

Esses problemas podem ser contornados com uma utilização da câmara em curtos intervalos de tempo. A condensação de vapor d'água nas paredes das câmaras ocorre, exceto quando o período de implantação é curto ou a taxa de evaporação é baixa. A água condensada influencia o desempenho das câmaras mudando o volume da análise e as taxas de absorção de CO_2 [42].

2.5 Espaços Verdes Urbanos

Espaços verdes urbanos são definidos como "áreas verdes, parques e outras áreas públicas sem edifícios dentro de um ambiente urbano"[43]. Esses espaços são criados para oferecer aos moradores das cidades um ambiente natural que pode coexistir com o desenvolvimento urbano [44]. Os espaços verdes urbanos têm sido reconhecidos como elementos importantes para a promoção da saúde e do bem-estar dos moradores das cidades, bem como para a redução da poluição do ar e da água e para a conservação da biodiversidade [45].

O movimento dos espaços verdes urbanos remonta ao século XIX, quando os problemas de saúde associados à poluição do ar e à falta de espaços verdes foram identificados em Londres [46]. Os parques urbanos foram criados para fornecer áreas recreativas para as pessoas, melhorar a qualidade do ar e do solo, além de criar habitats para a fauna e a flora [47]. Durante o século XX, o movimento dos espaços verdes urbanos cresceu em importância, principalmente devido à urbanização acelerada e à necessidade de abordar questões ambientais como a poluição e as mudanças climáticas [48].

As teorias de planeamento ligadas aos ambientes urbanos destacam a importância de se projetar cidades com espaços verdes e áreas de lazer para melhorar a qualidade de vida dos moradores. A "cidade verde" é uma teoria que propõe a criação de mais espaços verdes urbanos para melhorar a qualidade do ar, controlar a temperatura, reduzir o ruído e a poluição sonora, além de proporcionar espaços para atividades recreativas [49].

Em Portugal, os espaços verdes urbanos tiveram seu início no início do século XX, com a criação de jardins e parques em diversas cidades do país. Contudo, foi somente a partir dos anos 80 que houve um planejamento mais abrangente e estruturado em relação aos espaços verdes urbanos. Atualmente, a criação de espaços verdes urbanos é uma prioridade para os governos municipais em Portugal. O Plano Nacional da Água e o Plano Nacional da Paisagem são exemplos de planos governamentais que visam à criação de espaços verdes urbanos em todo o país [50].

Os espaços verdes urbanos são áreas destinadas ao lazer, convívio e recreação em

ambientes urbanos que possuem características específicas. Eles podem ser caracterizados como áreas naturais ou construídas, públicas ou privadas, e se dividem em diversas formas, como parques, praças, jardins, entre outros [51].

Essas áreas oferecem diversos benefícios, incluindo a redução da poluição do ar, a regulação do clima, a melhoria da qualidade do solo e da água, além de promover a biodiversidade e o bem-estar das pessoas. A presença dessas áreas pode contribuir para a saúde e o bem-estar das pessoas, reduzindo o estresse e a pressão arterial, e proporcionando outras melhorias para a qualidade de vida das comunidades que as frequentam[52].

A presença de espaços verdes urbanos tem se tornado cada vez mais importante nas cidades, uma vez que essas áreas contribuem significativamente para a qualidade de vida dos habitantes e para a sustentabilidade urbana. Com isso, os governos têm investido na criação e manutenção desses espaços, visando promover o desenvolvimento urbano sustentável e melhorar a qualidade de vida da população [53].

Os espaços verdes urbanos desempenham um papel importante na redução do CO_2 na atmosfera. Além de fornecer sombra e reduzir a temperatura ambiente, as plantas presentes nesses espaços podem absorver o CO_2 presente na atmosfera, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Essa capacidade de absorção de CO_2 é chamada de sumidouro de carbono [54].

A capacidade de um espaço verde urbano em absorver o CO_2 depende de sua área, tipo de vegetação e densidade. Estudos têm mostrado que áreas verdes com grande densidade de árvores e vegetação são mais eficazes na captura do CO_2 , sendo consideradas sumidouros de carbono eficazes [55]. Além disso, áreas verdes localizadas em áreas densamente urbanizadas têm um impacto significativo na redução do CO_2 na atmosfera, especialmente em áreas com tráfego intenso [56].

A presença de áreas verdes em ambientes urbanos pode ajudar a reduzir as concentrações de CO_2 na atmosfera e, assim, contribuir para a mitigação das mudanças climáticas. Estes têm um papel importante na remoção de CO_2 em áreas urbanas densamente povoadas, que geralmente apresentam altas concentrações de poluentes atmosféricos [54].

2.6 Morfologia do relvado

A produção e desenvolvimento do relvado está principalmente ligada ao processo de fotossíntese. Esse processo é responsável por transformar os recursos do ambiente, como luz, água e CO_2 , em produtos como biomassa. A fotossíntese é um dos principais processos fisiológicos das plantas e é fundamental para a sobrevivência e crescimento das mesmas [57].

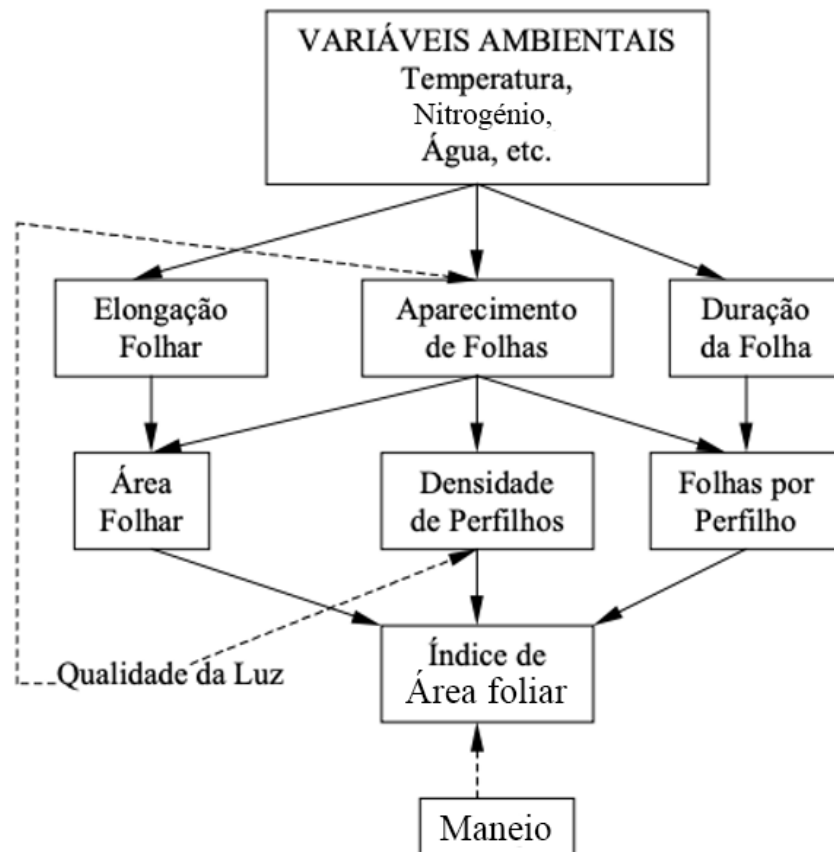


Figura 2.8: Relações entre variáveis morfogénéticas e características estruturais da pastagem [57].

Por meio da fotossíntese, as plantas conseguem capturar a energia solar e transformá-la em energia química, que é armazenada na forma de açúcares, amidos e outras moléculas orgânicas. Essas moléculas são utilizadas como fonte de energia para a planta e para o desenvolvimento das suas estruturas, como folhas, caules e raízes.

Os mesmos fatores responsáveis pelo desenvolvimento do relvado (Figura 2.8) podem funcionar como fatores limitantes no seu crescimento e desenvolvimento, podendo variar de acordo com as condições ambientais e as características genéticas de cada espécie. Alguns dos principais fatores que podem limitar o crescimento e a produtividade das gramíneas incluem a disponibilidade de nutrientes no solo, a disponibilidade de água, a temperatura e a intensidade da luz.

As gramíneas forrageiras são conhecidas pela sua capacidade de rebrotar após cortes ou pastagens sucessivas, o que garante a perenidade das mesmas. Isso é possível graças à habilidade dessas plantas de emitir folhas a partir de meristemas remanescentes, permitindo sua sobrevivência à custa da formação de uma nova área foliar.

De acordo com Taiz et al. [58], a perenidade das gramíneas é uma característica importante que as diferencia de outras plantas, como as anuais, que completam todo o seu ciclo de vida em um único ano. As gramíneas, por outro lado, são capazes de persistir por vários anos, graças a essas adaptações fisiológicas e morfológicas.

Costa et al. [59] descreve as características fisiológicas das gramíneas (Figura 2.9) e os efeitos e as intensidades do corte no desenvolvimento das espécies. Temos assim h1 a condição mais favorável para corte onde o seu crescimento é pouco afetado e não ocorre interrupção dos processos de fotossíntese, devido à não remoção total das folhas podendo ocorrer apenas paralisação temporária dos processos em condições não favoráveis para a planta. Por outro lado, temos a altura h2 como um cenário mais problemático, devido à grande remoção de folhas fotossinteticamente ativas e também pela perda de estruturas de reserva energética da planta. Por fim temos a altura h3 onde ocorre a remoção do meristema apical resultando em paralisação dos processos biológicos da planta e eventual morte da mesma.

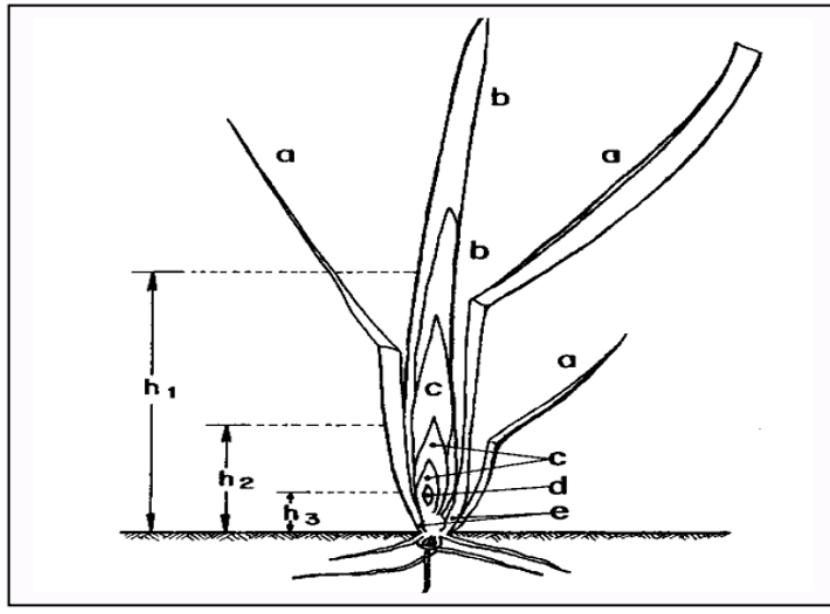


Figura 2.9: Estrutura de um rebento de gramínea. a) folhas expandidas e fotossinteticamente ativas; b) folhas que estão emergindo e que não atingiram sua capacidade fotossintética total; c) folhas que não emergiram e que dependem dos assimilados produzidos por folhas mais velhas; d) meristema apical; e) gemas axilares; f) h_1 , h_2 , h_3 = alturas de corte ou pastoreio. [59].

2.7 Ambientes urbanos e alterações climáticas

Os ambientes urbanos estão intimamente ligados às alterações climáticas, sendo que as cidades são responsáveis por cerca de 70% das emissões globais de gases de efeito estufa relacionados com a energia, como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso [60]. Essas emissões estão principalmente relacionadas com o uso de combustíveis fósseis para a geração de energia e transporte, além de atividades industriais e de construção.

Junto a isso as cidades apresentam o fenômeno das ilhas de calor urbano (ICUs) Figura 2.10, que são áreas urbanas que apresentam temperaturas mais elevadas do que as áreas rurais circundantes. Esse fenômeno ocorre devido às atividades humanas, como a construção de edifícios, pavimentação, tráfego e a falta de vegetação. As ICUs podem afetar o clima local, contribuindo para a formação de nuvens de poluição, mudanças na circulação atmosférica e aumento das precipitações em algumas áreas [24].

As emissões de calor antropogênicas aprimoradas, a redução do resfriamento evaporativo, o aumento da rugosidade da superfície, a diminuição dos albedos superficiais e a geometria estreita do *canyon* urbano associados às cidades frequentemente resultam na formação de ilhas de calor urbanas (ICUs), especialmente à noite, já que as temperaturas do ar urbano são mais altas em relação aos arredores naturais [61].

A formação de ICUs é um problema sério, pois pode levar a uma série de consequências negativas, como o aumento da poluição do ar, o aumento das necessidades de energia para resfriamento e a intensificação dos eventos climáticos extremos. Além disso, as ICUs podem afetar a saúde humana, especialmente em áreas densamente povoadas e mal ventiladas.

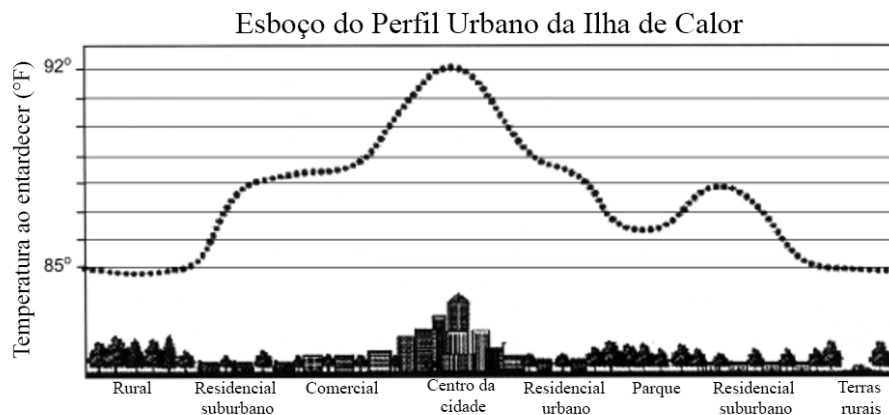


Figura 2.10: Perfil de temperatura do efeito ilha de calor [24].

Para lidar com os impactos das mudanças climáticas nas cidades, diversas soluções estão sendo propostas [62], [63]. A promoção de áreas verdes e a construção de infraestrutura resistente às condições climáticas extremas são estratégias eficazes para mitigar os efeitos das ICUs e melhorar a qualidade do ar [64].

A vegetação urbana, por exemplo, tem um efeito de resfriamento médio que pode variar de 1 a 4,7°C e se estender por uma área de 100 a 1000 metros, dependendo da quantidade de água disponível para a planta ou árvore [64]. Mesmo pequenas áreas verdes, como espaços de 0,15 ha, podem gerar um efeito significativo na redução da temperatura

urbana, com diminuição de até 1,5°C durante o dia e 3°C durante a noite [64].

Além disso, outras medidas podem ser adotadas para controlar as emissões de gases de efeito estufa nas cidades, como a utilização de energias renováveis e o melhoramento do transporte público [62]. A promoção de edifícios verdes e eficientes em termos energéticos também é uma opção que pode contribuir significativamente para reduzir as emissões de gases de efeito estufa nas cidades [62].

É importante ressaltar que a adoção dessas estratégias não só ajuda a controlar as emissões de gases de efeito estufa e mitigar os impactos das mudanças climáticas nas cidades, mas também contribui para a melhoria da qualidade de vida e saúde da população [64] [65]

2.8 Métodos de quantificação de fluxos de CO_2

No início do século XX, a medição da concentração de CO_2 na atmosfera era feita principalmente por meio de amostras coletadas em garrafas, que eram posteriormente analisadas em laboratório. O método era trabalhoso e não permitia uma coleta extensiva de dados em diferentes locais, mas foi fundamental para se obter uma primeira noção da concentração de CO_2 na atmosfera [66].

A partir da década de 1950, com o advento das técnicas de cromatografia gasosa, tornou-se possível medir a concentração de CO_2 com muito mais precisão. A partir dessas medições, o cientista Charles David Keeling foi capaz de mostrar que a concentração de CO_2 na atmosfera estava aumentando, o que se tornou conhecido como o "Efeito Keeling"[67] Figura 2.11.

Um dos primeiros métodos desenvolvidos para medir as emissões de CO_2 foi a análise de gases em laboratório. Essa técnica envolve a coleta de amostras de ar em locais específicos e a análise do teor de CO_2 usando técnicas de cromatografia gasosa ou espectroscopia [69]. Embora essa técnica seja precisa, ela é limitada em sua aplicabilidade, pois requer coleta de amostras em locais específicos e, portanto, não pode fornecer informações sobre os fluxos de CO_2 representativas de grandes áreas.

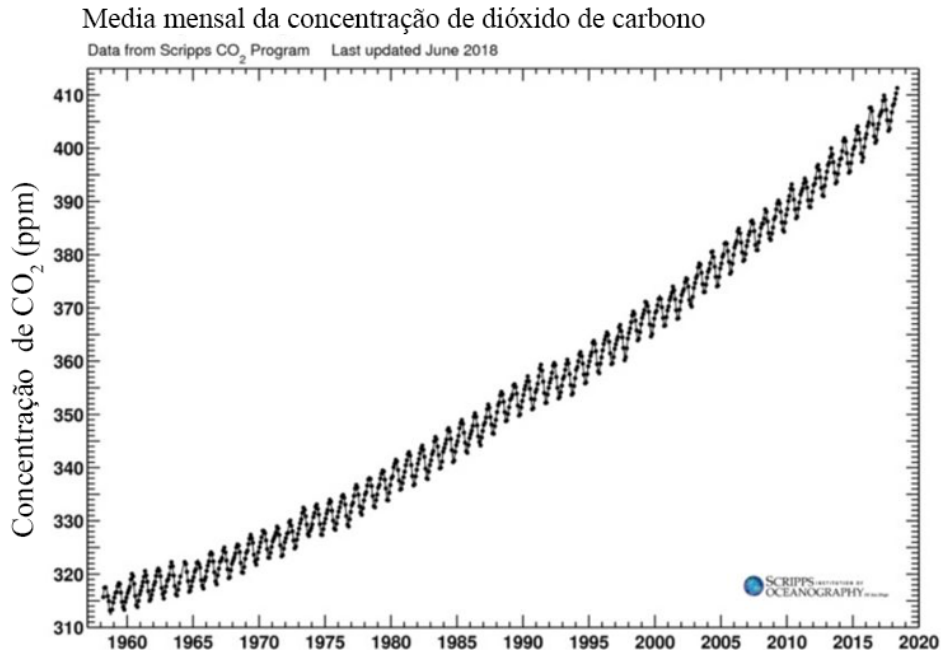


Figura 2.11: Curva de efeito Keeling [68].

Atualmente existem vários métodos utilizados para quantificar os fluxos de CO_2 entre o solo e a atmosfera. Um método comum é a medida do CO_2 emitido pelo solo através da respiração dos organismos do solo. Isso pode ser feito usando um aparelho chamado cilindro de CO_2 , que é colocado no solo e mede a quantidade de CO_2 emitida pelo solo em um determinado período de tempo [70].

Nos últimos anos, a técnica de sensoriamento remoto tem sido cada vez mais utilizada para a medição dos fluxos de CO_2 em grandes áreas. Essa técnica envolve o uso de satélites e aeronaves equipadas com sensores para medir a concentração de CO_2 em diferentes partes do mundo. O lançamento do satélite OCO-2 em 2014, por exemplo, permitiu uma medição mais precisa das emissões e absorções de CO_2 em todo o mundo [71].

Outra técnica avançada é a técnica de eddy covariance, que envolve a medição das trocas turbulentas de CO_2 entre a superfície da Terra e a atmosfera em tempo real. Essa técnica é particularmente útil para a medição de fluxos em ecossistemas terrestres e aquáticos e tem uma precisão muito alta [69].

Outros métodos utilizados para quantificar os fluxos de CO_2 incluem a medida do

conteúdo de carbono orgânico do solo e a medida do conteúdo de nitrogênio e fósforo [4]. Junto a isso, o método da caixa estática também vem sendo amplamente utilizado e aplicado em equipamentos para medição em tempo real desses fluxos. Esses métodos permitem estimar a quantidade de carbono armazenada no solo e a taxa de decomposição da matéria orgânica, respectivamente.

2.9 Método da caixa estática

O método da caixa é uma técnica amplamente utilizada para medir as trocas de CO_2 entre a superfície do solo e a atmosfera. Essa técnica consiste em uma caixa hermética que é colocada sobre a superfície do solo, onde o CO_2 é medido em intervalos regulares de tempo. Ao longo do tempo, essa técnica tem sido aprimorada e desenvolvida para melhorar a precisão e a eficiência das medições.

A técnica da caixa é baseada em princípios físicos e matemáticos bem estabelecidos. A fórmula básica para calcular as trocas de CO_2 é baseada na lei de difusão de Fick, que afirma que a taxa de transferência de uma substância de um local de alta concentração para um local de baixa concentração é diretamente proporcional ao gradiente de concentração e inversamente proporcional à distância [72]. Essa metodologia estima o fluxo de CO_2 analisando as taxas de acumulação ou decaimento do CO_2 dentro da câmara ao longo do tempo [73].

Esta técnica de medição tem como uma das suas principais características, a utilização do IRGA (Infrared Gas Analyzer) que faz com que os preços de operação e do equipamento se tornem menores, popularizando a técnica e viabilizando estudos e medições ao se comparar com métodos mais antigos como cromatografia de gás e métodos micrometeorológicos como o do eddy covariance [74]. O IRGA é um instrumento que permite a medição contínua e em tempo real da concentração de gases, como CO_2 e H_2O , em uma amostra gasosa. O funcionamento do IRGA é baseado na absorção da luz infravermelha pelo gás em questão, o que permite a determinação da sua concentração na amostra.

O método da caixa pode ser utilizado em dois regimes: estado estacionário (sistema dinâmico ou aberto) e estado não estacionário (sistema estático ou fechado). No estado estacionário, a caixa é colocada num ambiente onde as condições meteorológicas (vento, temperatura, humidade) permanecem constantes durante a medição. A taxa de fluxo de CO_2 é então calculada com base na diferença de concentração de CO_2 entre o interior e o exterior da caixa e na vazão de ar que atravessa a caixa. Já no estado não estacionário, a caixa é completamente selada e a taxa de fluxo de CO_2 é calculada a partir da taxa de aumento ou diminuição da concentração de CO_2 no interior da caixa [75].

Uma forma de determinar o fluxo de CO_2 através do método da caixa é por meio da diferença de concentração entre a entrada e a saída. Essa diferença pode ser quantificada utilizando a seguinte expressão (Eq. 2.2): “Q” representa o caudal ($m^3 s^{-1}$), “A” é a área (m^2), e “C” representa a concentração, com os índices de entrada e saída indicados pelos subscritos “e” e “s”, respectivamente ($g m^{-3}$).

$$F = \frac{Q}{A}(C_e - C_s) \quad (2.2)$$

O método da caixa estática ou caixa de absorção é uma das técnicas mais antigas desenvolvidas para análise do fluxo da interface solo/atmosfera in situ [76]. A caixa estática consiste na deposição de uma quantidade conhecida de uma substância alcalina reativa ao gás, que absorve uma quantidade do mesmo. A partir da titulação desse material referente à área de cobertura de solo a ser analisado, é possível determinar o fluxo de gás em $mol m^{-2} s^{-1}$ através da equação 2.3 [77]. O tempo de análise do gás é geralmente longo, podendo variar de 12 a 24 horas [76].

$$F_C = \frac{C_a - C_b}{A \times t} \quad (2.3)$$

Para reduzir interferências na medição dos fluxos, desenvolveu-se o método de caixa de estado estacionário com circulação de ar. Esse método fixa uma taxa conhecida do ar que passa pela caixa e permite medir os fluxos de CO_2 do solo para a atmosfera com mais precisão [78] [79]

Outra tipologia é a caixa não estacionária sem circulação de ar, que se baseia na acumulação da concentração de gás no interior da caixa emitido pela superfície. A medição pode ser feita *in situ* ou em laboratório [75]. Esse método é geralmente utilizado para analisar os fluxos gasosos atmosféricos de ambientes internos, pois analisa o estado do fluxo gasoso de um determinado volume fechado e sua interação ao longo do tempo [79].

O método é bastante similar ao cálculo de caixa de estado estacionário com circulação de ar, porém sem um caudal de arraste, e calcula a evolução da concentração do gás ao longo do tempo, obtendo um valor variável escalar da concentração em função do tempo [77].

De acordo com Reis (2019) [77], a limitação desse método está na pressão do interior da caixa, que pode variar com o tempo e influenciar no fluxo mássico do CO_2 . Diferenças de pressão abaixo de 1 Pa têm demonstrado causar incertezas nas medições do fluxo. É importante ressaltar que quanto maior o tempo de análise, maior serão suas influências e gradientes de concentração.

Comparando com a técnica da caixa de estado não estacionário sem circulação de ar, as caixas com circulação de ar permitem a monitorização quase contínua da concentração de CO_2 , proporcionando uma descrição detalhada do padrão de emissão/absorção do gás. Além disso, o maior número e frequência das medições também facilita o uso de um período mais curto e permite a detecção precoce de problemas experimentais. Outra vantagem dessa técnica é que ela apresenta menos problemas com perdas e difusão lateral e diminui as alterações de temperatura e presença de água da interface solo/atmosfera [42].

Essas vantagens promissoras nas medições dos fluxos gasosos tornaram este método amplamente adotado por especialistas e por fabricantes de equipamentos, como a Li-Cor Inc.; Lincoln, NE; PP-Systems, Hitchin, Inglaterra; BioScientific, Ltd.; Hoddesdon, Inglaterra; CID Inc. Camas, WA [77]. A técnica é comumente usada para análise dos gases de efeito de estufa (GEE), como CO_2 , metano e óxido nitroso. É possível estimar o fluxo desses compostos químicos de várias maneiras, mas a linearidade da relação entre a concentração do gás e o tempo de observação é uma das abordagens mais utilizadas, com

um tempo de observação recomendado entre 0,5 a 2 minutos [42].

No entanto, esta técnica apresenta algumas desvantagens, a concentração do esforço de amostragem no período com maior probabilidade de exibir influência da perturbação do solo, mudanças no regime de mistura de ar na superfície do solo, efeitos de pressão, entre outros também são desvantagens dessa técnica. Por conseguinte, é recomendado que as séries de dados obtidas sejam armazenadas para posterior análise, garantindo uma maior qualidade da avaliação [42].

Além disso, é importante considerar as variações na densidade do ar e na pressão da caixa que podem afetar os valores medidos das concentrações de CO_2 . No entanto, muitos analisadores comerciais possuem correções automáticas para essas variações, garantindo maior precisão dos resultados [80]. Em geral, apesar das desvantagens, a técnica de caixa não estacionária com circulação de ar é uma abordagem promissora para monitorar a concentração de gases e os fluxos de GEE em uma variedade de aplicações.

Capítulo 3

Plano Experimental

Neste capítulo, é apresentada a descrição metodológica do estudo, iniciando-se com a caracterização da área de pesquisa, a descrição da metodologia geral adotada e a apresentação dos equipamentos utilizados para medir e quantificar variáveis ambientais e de vegetação, incluindo o CO_2 . Além disso, são detalhados os instrumentos e os métodos utilizados no processamento de dados, bem como os softwares utilizados para a determinação das análises temporais de fluxo do CO_2 e a avaliação estatística.

3.1 Local de estudo

Com o intuito de compreender a influência dos espaços verdes urbanos no fluxo de CO_2 entre solo e atmosfera, foi realizado um estudo de transferência vertical deste gás numa área verde administrada pelo Clube Académico de Bragança (CAB), localizado no centro da cidade de Bragança, no Nordeste de Portugal (Figura 3.1).

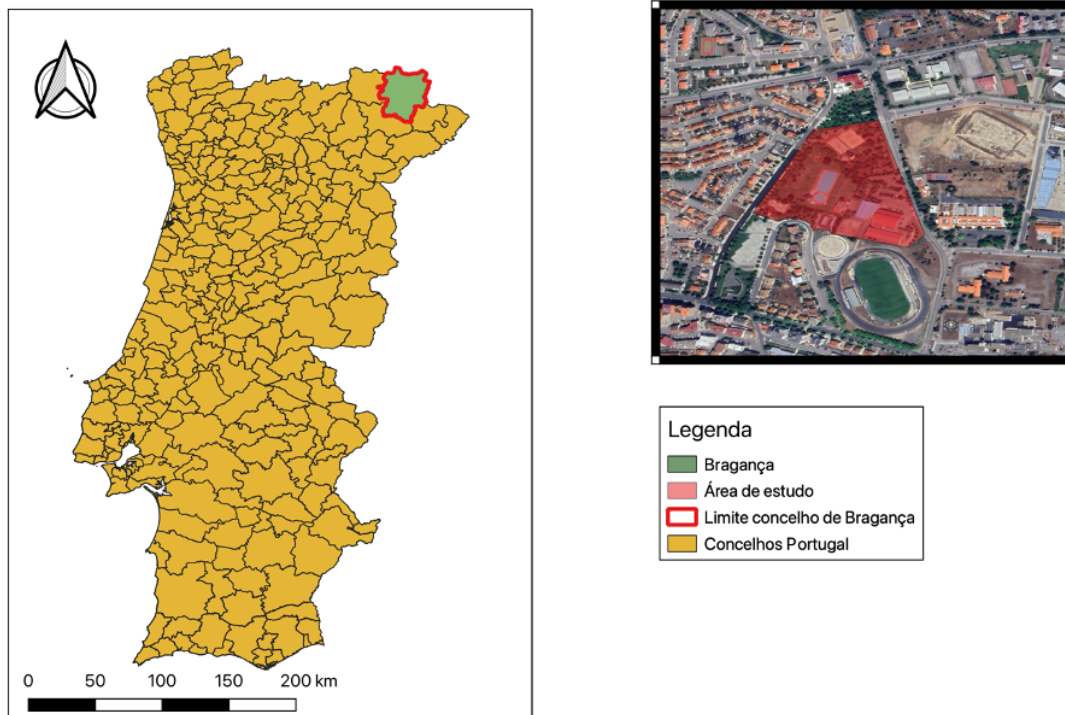


Figura 3.1: Mapa área de estudo.

O espaço em questão é um parque urbano com acesso controlado, criado para proporcionar lazer e recreação ao público em geral da cidade de Bragança. O complexo ocupa um quarteirão com vastas áreas verdes, incluindo a área envolvente do CAB, o espaço público verde do Eixo Atlântico e espaços verdes não formais, como o Estádio Municipal de Bragança e uma quadra residencial com espaços não ocupados por construções. O complexo do CAB abrange uma área total de aproximadamente 29.000 m^2 , sendo que 78% do solo é permeável. Parte da área é cercada pelo espaço verde do Eixo Atlântico, que tem uma área total de aproximadamente 28.400 m^2 , com 65% do solo permeável. Juntos, o CAB e o Eixo Atlântico têm cerca de 41.630 m^2 de solo permeável com vegetação rasteira, como gramíneas. As medições métricas foram realizadas usando as ferramentas de código aberto do Google Earth.

O complexo do CAB é composto por diversas instalações, incluindo um pavilhão

desportivo, um complexo de ténis e um complexo de piscinas que contém três tanques de água: um para crianças com 40 cm de profundidade e escorrega, , outro de dimensão intermédia com profundidade, variando de 80 cm a 120 cm, e um tanque principal com dimensões olímpicas, todos rodeados por uma área relvada. Este espaço de lazer é visitado anualmente por cerca de 50 mil pessoas e tem seu pico de visitas durante o verão (Clube Académico de Bragança, 2021).

A relva nesta área é uniformemente desenvolvida e recebe o mesmo tipo de tratamento ao longo do tempo (Figura 3.2). Para instalar os equipamentos de monitorização, foi selecionada uma área representativa do relvado dentro da área cercada, levando em conta critérios técnicos, e de outra natureza como a segurança e ter o mínimo impacto nas atividades periódicas de manutenção da relva.



Figura 3.2: Relvado da área de estudo

3.2 Equipamentos utilizados

Para a monitoração dos fluxos de CO_2 na interface solo/atmosfera, utilizou-se um sistema portátil e automatizado com o módulo de troca líquida de carbono LI-8100A, desenvolvido pela LI-COR Biosciences ®. Este módulo é composto por:

1. Câmara transparente de longo prazo 8100-104C (Figura 3.3A),
2. Sensor quântico LI-190R (Figura 3.3D) para medição da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), uma sonda termistor 8100-203 (Figura 3.3C) para medição da temperatura do solo, um colar de PVC para o solo,
3. Cabine com analisador de gás infravermelho (Figura 3.3E),
4. Sensor de água no solo GS1 (Figura 3.3F)
5. Extensão e comunicação sem fio,
6. Aplicativo de comando para dispositivos móveis e computadores
7. Interface de sensor auxiliar
8. Sonda termistor 8100-203
9. Colar de PVC (coleira)
10. Software SoilFluxPro TM para processamento e visualização dos dados coletados nas medições.

Este sistema foi desenvolvido para pesquisadores que desejam quantificar a troca líquida de carbono entre um ecossistema terrestre e a atmosfera.

A LI-COR Biosciences desenvolveu o módulo analisador de gás LI-8100A, que é uma caixa portátil e não-estacionária, com a capacidade de avaliar fluxos de CO_2 a curto, médio e longo termo. A caixa possui uma cúpula transparente móvel e uma base estrutural com pernas ajustáveis. Além disso, tem uma abertura circular ladeada por uma borracha para



Figura 3.3: módulos e sensores do analisador de gás da LI-COR Biosciences (modelo LI-8100A) [81]

evitar a entrada ou saída de ar que não é originária da área superficial em análise. A cúpula móvel tem dimensões de 33cm de altura, 22cm de diâmetro e base aberta de 317,8 cm², com volume de cerca de 4.080cm³, que pode ser alterado de acordo com a altura entre o solo e a superfície de base do equipamento.

O analisador LI-8100A assenta no princípio de medição indireta da atenuação da radiação infravermelha, utilizando o princípio de espectroscopia de infravermelhos não-dispersivo (NDIR), para medir a concentração de CO_2 na célula, seguindo a lei de Lambert-Beer. Opera em faixa de -20 a 45 °C com precisão de $\pm 0,5$ °C na faixa de 0-70 °C [82].

O equipamento tem uma interface auxiliar de sensor que conecta até 8 sensores distintos, sem que haja um sistema multiplexer. Esta interface pode ser utilizada para conectar sensores de temperatura do solo, conteúdo de água do solo, radiação solar e suplemento de energia elétrica por meio de baterias ou fontes externas. Os sensores

auxiliares incluem o sensor quântico LI-190R que mede a radiação fotossinteticamente ativa (PAR), um sensor de humidade do solo, que regista o conteúdo volumétrico de água no solo, e o kit do sensor de temperatura do solo, que consiste numa sonda de termistor de temperatura do solo e num adaptador de sonda que fornece a temperatura da camada superficial do solo, onde ocorrem as trocas gasosas.

3.3 Metodologia de cálculo de fluxo

O cálculo dos fluxos de gases do solo é uma tarefa complexa e exige metodologias precisas para obter resultados confiáveis. Tanto o ajustamento linear quanto o exponencial são utilizados para determinar a taxa de emissão de CO_2 , utilizando a variação das concentrações de CO_2 dentro da câmara de medição. Esse cálculo é baseado na metodologia descrita do método de caixa não estacionária com circulação de ar. A figura 3.4 demonstra a variação da concentração de CO_2 nos momentos que contemplam o funcionamento do equipamento, apresentando a variação dos gradientes de CO_2 desde o momento onde a câmara ainda se encontra aberta no estágio A até à sua estabilização com a câmara já fechada no estágio C.

No estudo em questão foi adotado um período de medição de 1 minuto e 30 segundos e os cálculos de fluxos exponencial e linear foram calculados nesse período de tempo, através do uso do software SoilFluxPro que recorre a ajustes linear e exponencial para determinar o fluxo de CO_2 a partir da variação das concentrações, dessa forma obtendo o fluxo em ($\mu\text{mol } m^{-2} s^{-1}$) para o período de análise, utilizando a seguinte equação 3.1.

$$F_c = \frac{10VP_0(1 - W_0/1000)}{RS(T_0 + 273.15)} \frac{\partial C'}{\partial t} \quad (3.1)$$

Na equação 3.1 temos assim: V o volume(cm^3), P_0 a pressão inicial(KPa), W_0 a fração molar de vapor de água($mmol mol^{-1}$), S área do solo dentro da câmara(cm^2), T_0 a temperatura inicial do ar ($^{\circ}C$), R a constante universal dos gases ideais ($Pa m^3 K^{-1} mmol^{-1}$) e por fim $\frac{\partial C'}{\partial t}$ que corresponde à taxa inicial de variação da fração molar de CO_2

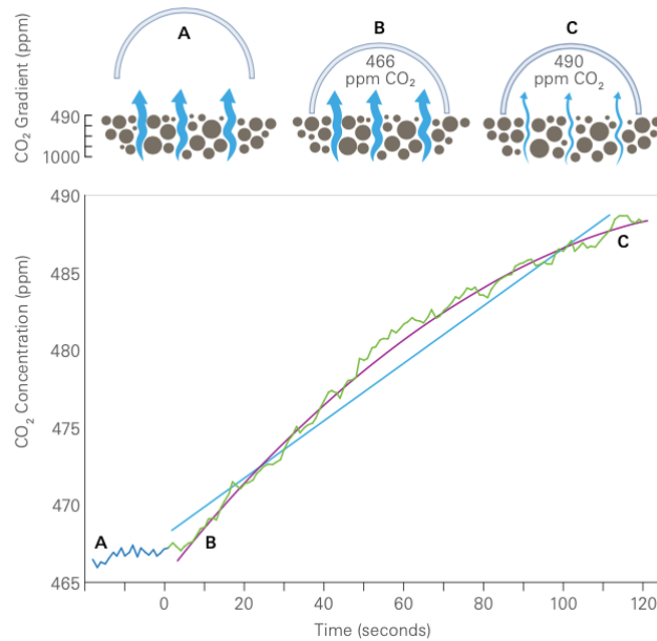


Figura 3.4: Variação da concentração de CO_2 durante o período de amostragem, a linha vermelha correspondendo ao ajuste exponencial e a verde o ajuste linear do fluxo de CO_2 [81]

corrigida para o efeito de diluição do vapor de água.

3.4 Medição de parâmetros meteorológicos

Uma estação meteorológica foi instalada próxima ao local onde os fluxos de CO_2 são medidos para monitorar os parâmetros meteorológicos convencionais, tais como velocidade e direção do vento, umidade relativa e temperatura do ar, radiação solar e precipitação (Figura 3.5). Esses parâmetros são utilizados para validar e fornecer uma análise em conjunto com os dados fornecidos pelo LI-COR LI-8100A.

O modelo CR200X da Datalogger (Figura 3.6A) é capaz de registrar e armazenar dados de forma autônoma em ambientes distantes e difíceis. Esse dispositivo possui múltiplos canais de entrada para conectar sensores adicionais, e pode ser usado em temperaturas extremas, variando de $-40^{\circ}C$ a $50^{\circ}C$ [83].

O ARG100 (Figura 3.6 B) é um sensor de precipitação, também conhecido como Rain



Figura 3.5: Estação meteorológica usada no estudo

Gauge, que possui um design clássico feito de plástico resistente a raios ultravioletas, conferindo alguma robustez ao instrumento e assegurando uma medição precisa. No entanto, é importante notar que em situações de ventos intensos próximos à abertura do sensor, esse formato pode resultar em medições subestimadas resultando numa redução na quantidade de precipitação coletada (até 25% em condições ventosas) [84].

O CS215 (Figura 3.6 C) é um dispositivo de sonda para medir temperatura e humidade relativa, este opera em uma faixa de temperatura de -40° a 70°C . A tampa externa do filtro funciona como mecanismo de proteção, sendo construída em polipropileno reforçado com vidro, enquanto o filtro interno é composto de PTFE expandido. O material do filtro apresenta uma porosidade de 64% e um tamanho de poro inferior a $3\ \mu\text{m}$ [85].

O sensor de velocidade do vento (Figura 3.6 D) e direção do vento (Figura 3.6 E) apresentam ambos um corpo composto por alumínio e resistente a maresia. Ambos os sensores operam até 80 m/s e possuem baixo gasto energético de operação $< 2\ \text{mA}$ [86].

O piranómetro (Figura 3.6 F) mede a radiação de onda curta variando de 300 a 1100 nm, projetado para medições contínuas outdoor e operando em faixa de temperatura de

-40° a 55°C [87].

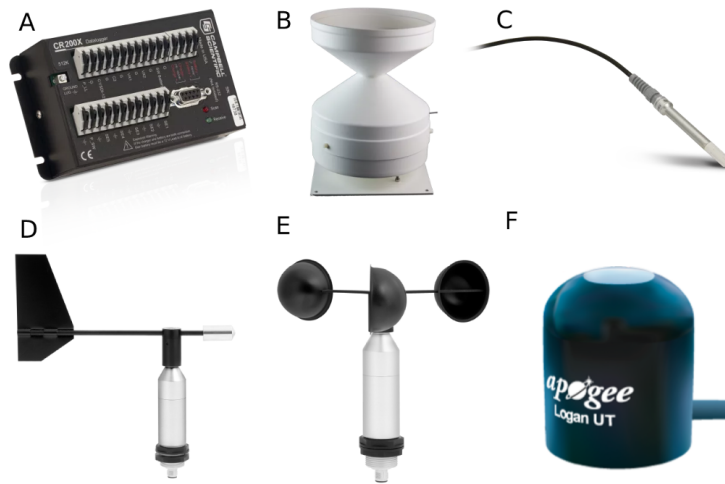


Figura 3.6: Componentes da estação meteorológica, sendo estes: A) Datalogger; B) Rain Gauge; C) Sensor de temperatura e umidade relativa; D) Anemoscópio; E) Anemómetro; F) Piranómetro.

3.5 Avaliação da cobertura vegetal

Para avaliar o coberto vegetal, realizamos uma monitorização do crescimento da relva ao longo do tempo, por amostragem, respeitando as operações de corte regulares para manter o relvado em boas condições. Seis amostras circulares com uma área de 0,0346 m^2 foram utilizadas compreendendo as mesmas amostras da caracterização espacial do relvado. Seguimos a metodologia de medir a altura da relva e a percentagem de cobertura em cada ponto de amostragem, adotando o período de observação mensal da caracterização espacial.

Para estimar a percentagem de cobertura vegetal, usamos o método do quadrado, cobrindo a área de amostragem com uma quadrícula virtual e dividindo o número de quadrados de solo exposto pelo total de quadrados presentes na área delimitada. A altura da relva foi medida em três pontos aleatórios dentro do colar de medição dos fluxos com uma régua graduada, e a percentagem de cobertura foi avaliada de forma aproximada e registrada em fotos.

Após medir a altura da vegetação, foi realizada uma colheita rente do coberto vegetal dentro do colar de medição. A relva coletada foi armazenada em sacos identificados e levada para o laboratório para determinação da biomassa. As amostras foram pesadas em fresco e depois secas em estufa a 70°C por 48 horas até peso constante, para obter o peso seco (Figura 3.7).

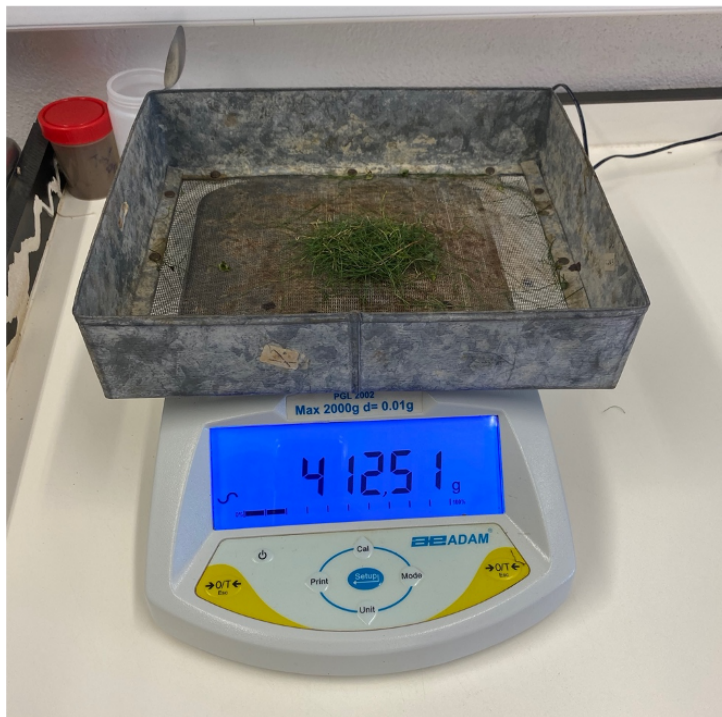


Figura 3.7: Procedimento de pesagem da biomassa

Para determinar o fitovolume (Equação 3.2), multiplicamos a altura do estrato vegetal pela área do colar e pela percentagem de cobertura vegetal. Realizamos a medição e colheita da biomassa nos seis pontos de amostragem, e recolhemos toda a relva produzida dentro do anel de amostragem.

$$FV_{colar} = h_{veg} \times A_{colar} \times \frac{\%_{veg}}{100} \quad (3.2)$$

O fitovolume e a biomassa são variáveis importantes para avaliar a produção da vegetação herbácea em ecossistemas naturais e geridos pelo Homem. O fitovolume representa o volume ocupado pela vegetação acima do solo, enquanto a biomassa se

refere à quantidade de matéria orgânica produzida pela vegetação. Ambos os parâmetros são influenciados pelas condições edafoclimáticas e pelo processo fotossintético [88].

A produção de biomassa herbácea (Equação 3.3) é um dos principais parâmetros que afetam o processo de trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, sendo importante para a compreensão dos fluxos de carbono em ecossistemas terrestres [89]. A biomassa também é um importante indicador da saúde e produtividade da vegetação e pode ser usada como base para avaliar a eficácia de práticas de manejo da vegetação [90].

A produção de biomassa herbácea foi calculada a partir da biomassa seca coletada, no período de cerca de 30 dias correspondente a caracterização do terreno. Para obter essa medida, a massa de carbono presente no colar (g) foi dividida pela área do colar ($A_{colar} = 0,03464 \text{ m}^2$) e pelo período de 30 dias.

$$P_{he} = \frac{BM_{seca}}{30 \times A_{colar}} \quad (3.3)$$

O cálculo da humidade da erva (Equação 3.4) é feito a partir da comparação da biomassa fresca com a biomassa seca. Para obter o resultado em percentagem, é utilizado a fórmula 3.4

$$H_{relvado} = \frac{BM_{fresca} - BM_{seca}}{BM_{fresca}} \times 100 \quad (3.4)$$

3.6 Procedimento experimental

No estudo em questão o equipamento LI-COR foi mantido no local de estudo, operando de forma contínua durante todo o período de análise. As medições foram efetuadas em contínuo durante seis dias da semana em espaço relvado e 1 dia em solo exposto, de forma a podermos diferenciar o contributo do solo e da vegetação. Medições mensais foram realizadas em 5 pontos do terreno em regiões mais afastadas de forma a caracterizar os fluxos na área e observar as variações espaciais a nível dos fluxos de dióxido de carbono e de outras variáveis.

A Figura 3.8 exibe o mapa da área de estudo com os pontos utilizados para caracterização espacial da área de estudo. Os pontos A,B,C,D e E em azul correspondem aos pontos de amostragem em quanto o ponto vermelho correspondente ao local principal de estudo.



Figura 3.8: Mapa de localização dos pontos de amostragem no CAB

A escolha desses pontos foi baseada na fonte de alimentação do equipamento, onde

não foi possível utilizar baterias para abranger uma área maior do terreno. Diante dessa restrição, optou-se por selecionar esses 5 pontos de forma a abordar áreas próximas ao ponto de análise, esperando que estivessem sujeitos a variações semelhantes ao ponto principal de amostragem.

Junto a essas medições mensais coletas do relvado foram realizadas de forma a observar a evolução do fluxo em função da massa vegetal verde disponível nas áreas analisadas. Os dados dos fluxos de CO_2 foram coletados ao fim de cada mudança de aparelho com o auxílio do software SoilFluxPro TM provido pela própria empresa fabricante do aparelho.

3.7 Processamento de dados

O software SoilFluxPro TM foi usado para processar os dados coletados da memória interna do dispositivo, que serão posteriormente exportados em formato csv. Esses dados de fluxo de CO_2 foram depois organizados em tabelas dinâmicas no Excel para análise mais fácil e eficiente. Para visualizar melhor as informações e entender o comportamento dos fluxos, utilizou-se o Microsoft Power BI para gerar gráficos e relatórios. O software ImageJ foi utilizado no processamento das imagens do relvado de forma a realizar a caracterização das percentagens de cobertura vegetal. Além disso, foi usado o software estatístico Past4 para analisar possíveis correlações entre as variáveis estudadas. Com isso, pudemos observar a influência das variáveis ambientais e determinar os fatores mais impactantes nos fluxos de CO_2 , permitindo-nos entender melhor como as variáveis ambientais afetam os fluxos de CO_2 e tomar decisões com base nessas informações.

Capítulo 4

Resultados e discussão

4.1 Parâmetros edafoclimáticos

Os fluxos de CO_2 são influenciados por uma série de fatores edafoclimáticos, que podem afetar diretamente a dinâmica da troca de gases entre a vegetação e a atmosfera. Na sua análise, foram levados em consideração diversos parâmetros, incluindo o conteúdo de água do solo, a temperatura do solo e do ar, a umidade relativa do ar, a radiação solar e fotossinteticamente ativa, a precipitação e a velocidade e direção dos ventos. Nas Figuras 4.1 e 4.2, é possível visualizar a evolução temporal dessas variáveis ao longo do período de análise, bem como o perfil médio diário, com exceção da direção e velocidade dos ventos e da precipitação, que foram analisados de forma geral.

A temperatura do solo e do ar ambiente são fatores fundamentais na compreensão dos fluxos de CO_2 entre a vegetação e a atmosfera. É possível observar na Figura 4.1 que esses dois parâmetros apresentaram uma evolução temporal muito semelhante ao longo do período de avaliação, com um comportamento similar ao longo do dia. Essa semelhança não é coincidência, pois a temperatura do solo e do ar estão intimamente ligadas e podem influenciar-se mutuamente [39]. Por exemplo, a temperatura do solo pode afetar a temperatura do ar, especialmente em ambientes onde a vegetação é densa e a umidade é elevada, pois o solo pode funcionar como um reservatório de calor. Por

outro lado, a temperatura do ar pode afetar a temperatura do solo, especialmente em regiões onde a insolação é intensa, pois a radiação solar pode aquecer diretamente o solo.

Além disso, tanto a temperatura do solo quanto do ar ambiente podem influenciar diretamente a atividade metabólica da vegetação e, conseqüentemente, os fluxos de CO_2 [91]. Por exemplo, temperaturas mais elevadas podem acelerar a taxa de respiração da vegetação e, conseqüentemente, aumentar as emissões de CO_2 , enquanto temperaturas mais baixas podem reduzir a atividade fotossintética e, conseqüentemente, diminuir a absorção de CO_2 .

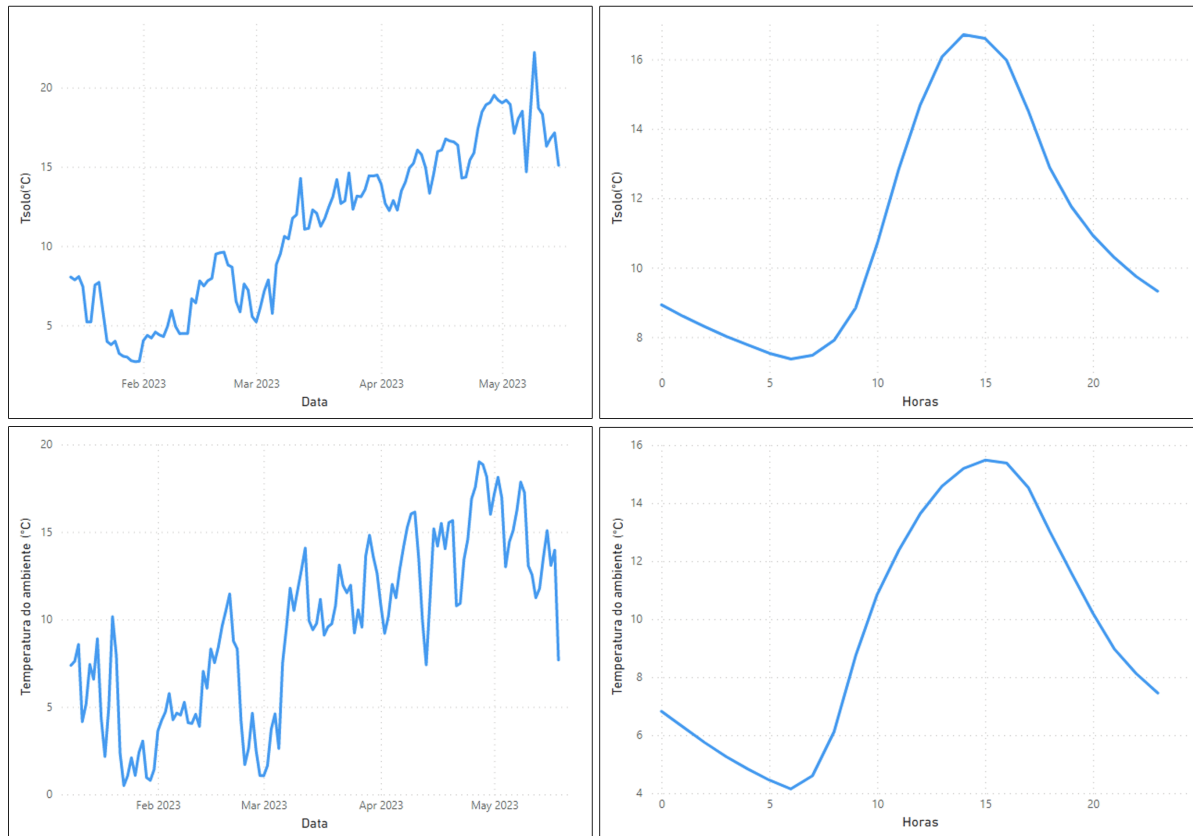


Figura 4.1: Perfil e evolução temporal dos parâmetros de temperatura do solo e temperatura do ar ambiente

De acordo com Goulden et al. (1996), a temperatura do solo possui uma relação exponencial com o balanço de CO_2 do solo durante a noite, indicando uma estreita ligação entre a temperatura do solo e os fluxos de CO_2 . Essa relação exponencial entre a

temperatura do solo e a emissão de CO_2 foi observada indicando que a temperatura do solo é um fator crucial para a atividade microbiana e, conseqüentemente, para os fluxos de CO_2 do solo.

Na Figura 4.2, é possível observar a evolução temporal da radiação solar (RS) e da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) ao longo do período de análise, apresentando valores máximos de $1,0221 \text{ KW m}^{-2}$ e $2305,48 \text{ mol de fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente, nos períodos de 12h40 e as 12h54.

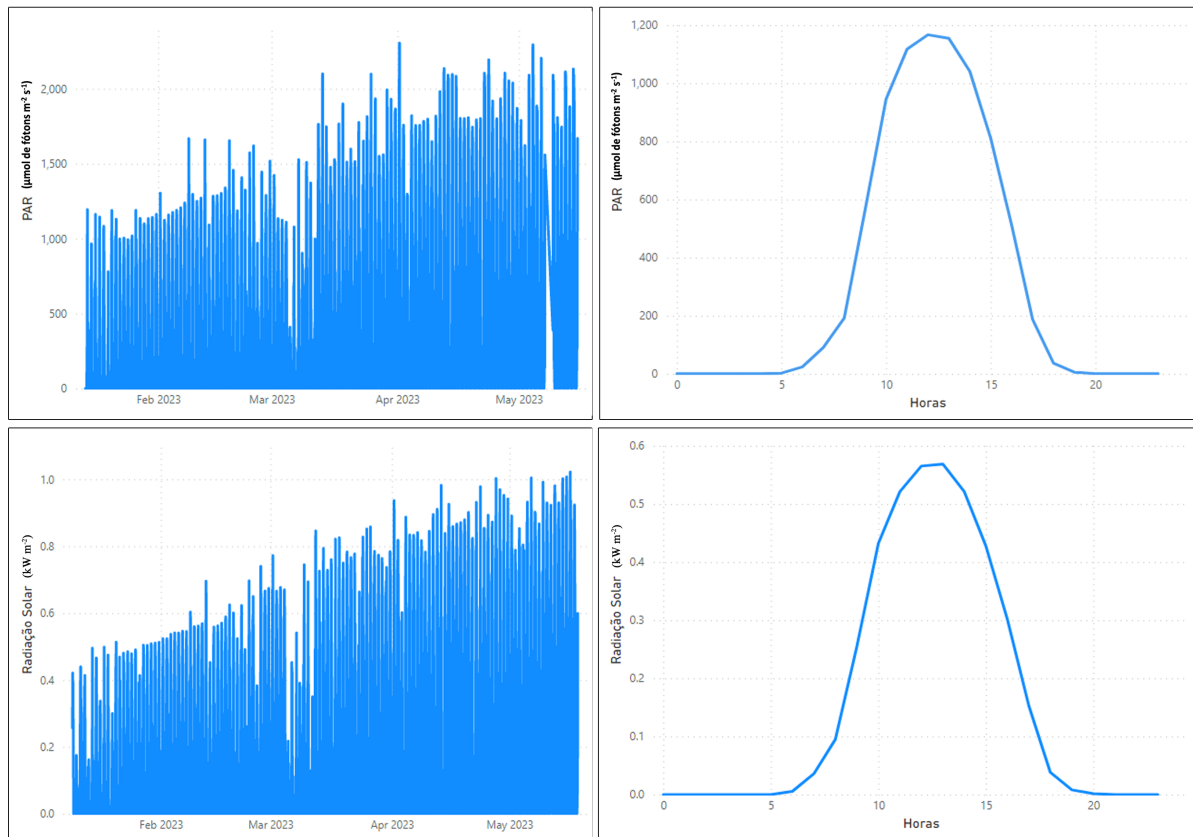


Figura 4.2: Perfil medio diario e evolução temporal dos parâmetros de radiação solar e PAR

A radiação solar é uma das principais fontes de energia que impulsiona a fotossíntese e a respiração das plantas. Já a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é a porção da radiação solar que é utilizada pela vegetação no processo fotossintético esse é um dos fatores ambientais mais importantes que influenciam a taxa de fotossíntese e,

consequentemente, os fluxos de CO_2 [92].

A humidade relativa do ar pode influenciar diretamente as trocas de CO_2 entre a atmosfera e o solo. Estudos mostram que a taxa de absorção líquida de dióxido de carbono diminui linearmente com o aumento da diferença de pressão de vapor, mesmo em casos onde as taxas de transpiração são mais altas em valores intermediários de diferença de pressão de vapor. Há um componente não-estomático na inibição da fotossíntese líquida pela baixa humidade, onde a concentração de dióxido de carbono intercelular permanece constante enquanto a fotossíntese líquida é reduzida pela baixa humidade. Assim, é importante considerar os efeitos da humidade relativa do ar na troca de CO_2 entre o solo e a atmosfera [93].

A humidade relativa do ar na caixa (HRcaixa) e a humidade relativa do ar ambiente medida pela estação meteorológica (HRamb) apresentaram comportamentos semelhantes ao longo do período de medição, com valores oscilando entre 20% e 100% em curtos períodos de tempo. Os valores máximos foram frequentemente observados durante os períodos crepusculares.

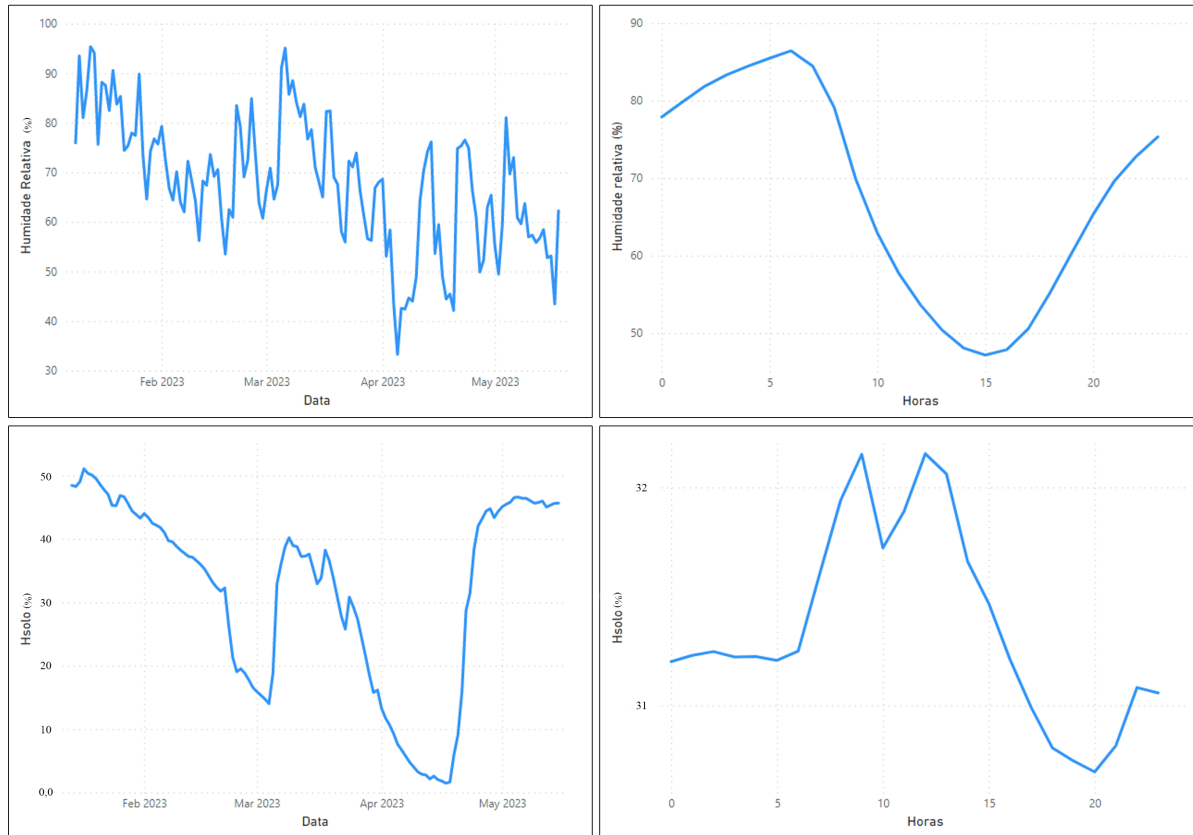


Figura 4.3: Perfil e evolução temporal dos parâmetros de humidade relativa e conteúdo de água do solo

A água presente no solo tem impacto significativo tanto na respiração quanto na absorção de CO_2 pelas plantas. A presença de água no solo pode aumentar a respiração do solo, o que aumenta a libertação de CO_2 pelos microrganismos que vivem no solo. Além disso, o excesso de água pode afetar a capacidade das raízes das plantas de absorver nutrientes e água, diminuindo sua capacidade de absorver CO_2 [94].

A disponibilidade de água no solo também pode afetar a atividade microbiana, que é responsável pela produção de CO_2 . Se o solo estiver muito seco, a atividade microbiana pode ser inibida, reduzindo a produção de CO_2 . Por outro lado, se o solo estiver muito húmido, a atividade microbiana pode ser aumentada, aumentando a produção de CO_2 [40].

Com relação ao conteúdo de água no solo, foram avaliados os fluxos em diferentes

condições, como próximas da saturação (50%) e com baixo teor (3%). No entanto, ao longo do dia, a superfície do solo apresentou um nível de quantidade de água satisfatório de cerca de 28% devido também ao sistema de rega presente na área de estudo.

Por fim, é importante destacar que a velocidade e direção dos ventos são outras variáveis que podem influenciar nos fluxos (Figura 4.4). Embora devido ao método de medição os ventos não afetarem diretamente esses podem estar afetando indiretamente devido a sua influência em outras variáveis impactantes na dinâmica dos fluxos.

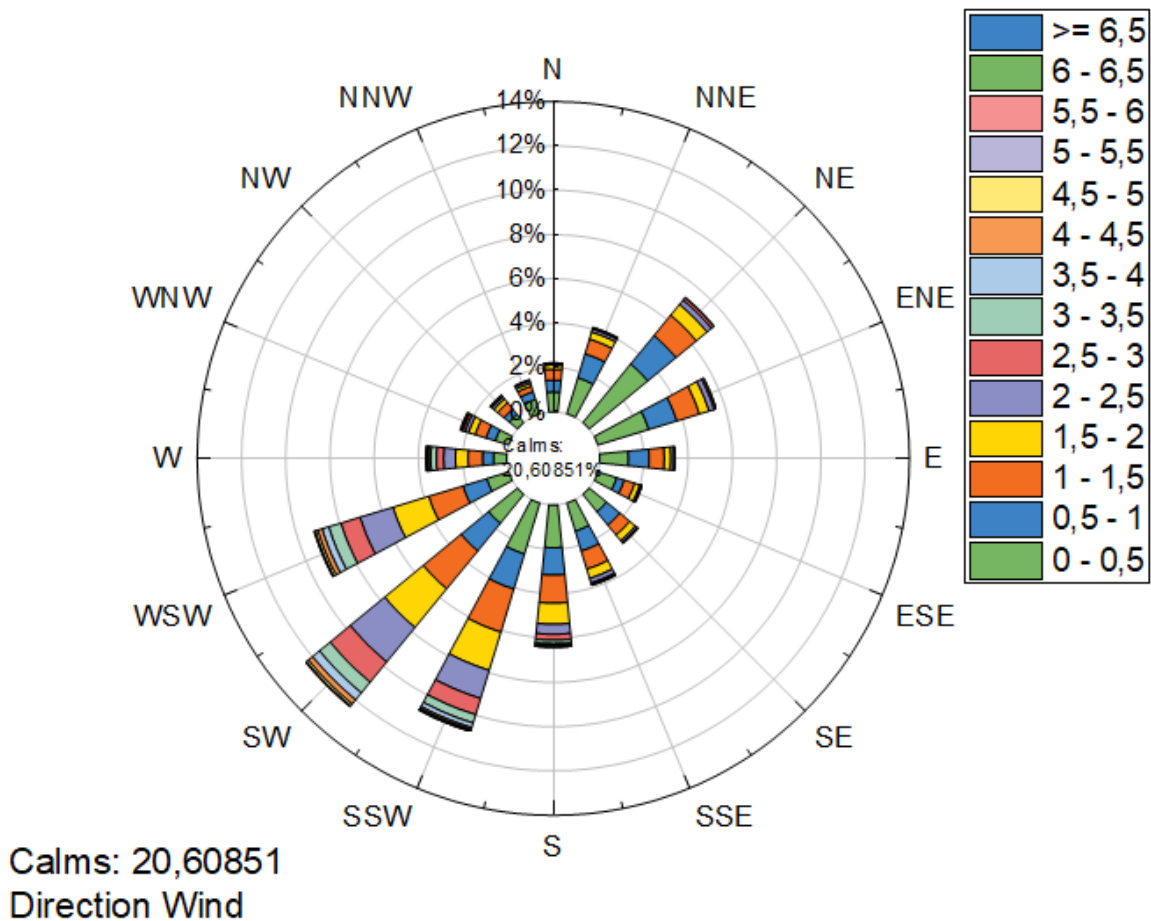


Figura 4.4: Rosa dos ventos para todo o período de observação

4.2 Análise dos parâmetros vegetativos

4.2.1 Análise da cobertura vegetal

Durante o período de amostragem, foi mensurada a percentagem de cobertura vegetal na área delimitada do anel. Na Figura 4.5, apresenta-se uma sequência de fotografias que demonstram a evolução do relvado na área delimitada para a análise dos fluxos.

Nos quatro meses de análises, observou-se uma flutuação nos valores de cobertura do relvado, variando entre valores máximos de 99,54% e mínimos de 97,22%. No entanto, no geral, não houve uma redução significativa na cobertura do relvado que pudesse impactar nos fluxos de carbono na área amostrada. Grande parte dessa conservação do relvado se deveu aos cuidados de manutenção do espaço em questão, como a prática de irrigação, que permitiu que o relvado se mantivesse saudável e homogêneo mesmo em períodos menos favoráveis.

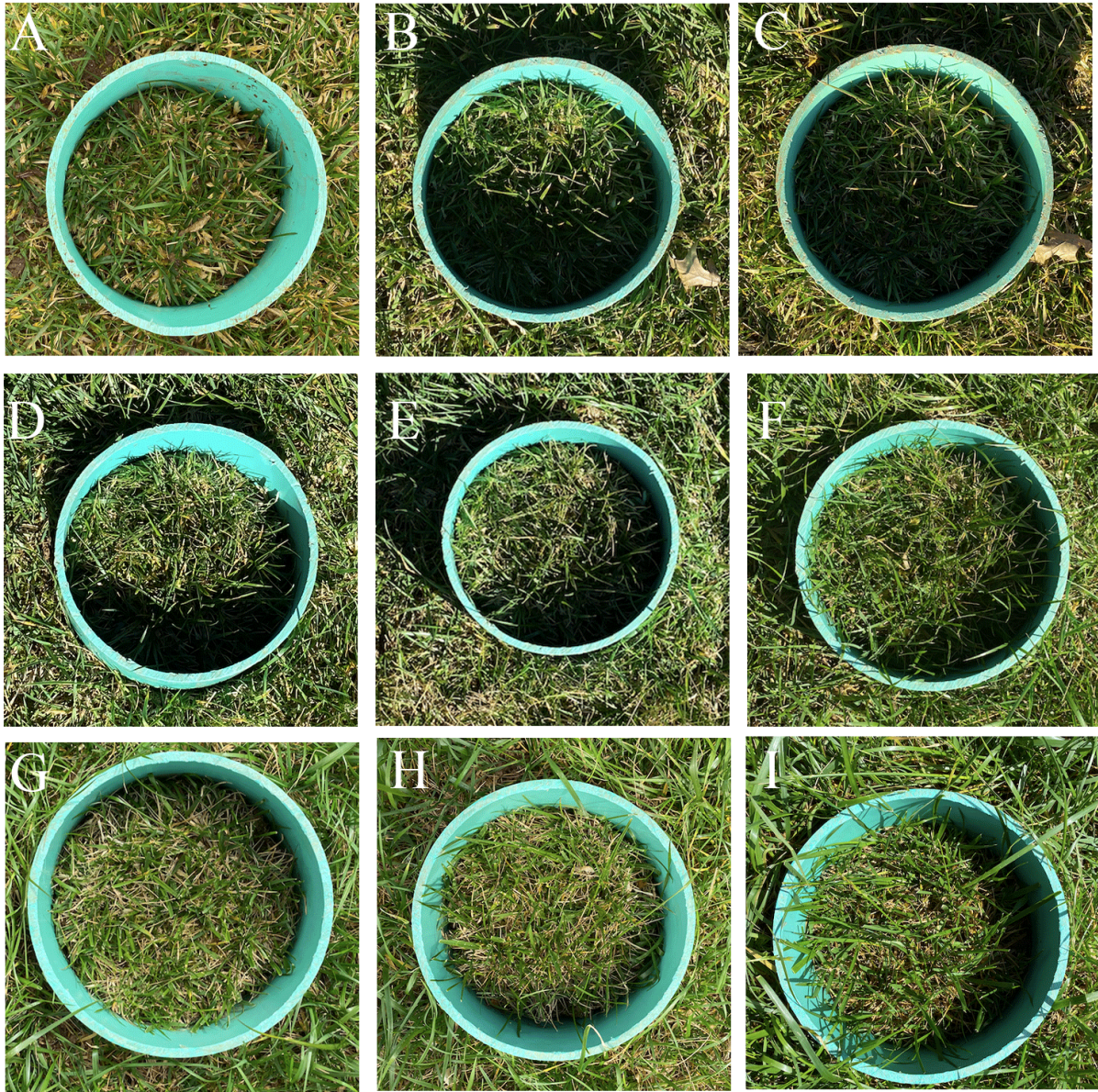


Figura 4.5: Evolução temporal do estado vegetativo do relvado: A) 13 de Janeiro; B) 25 de Janeiro; C) 06 de Fevereiro; D) 23 de fevereiro; E) 02 de Março; F) 21 de Março; G) 03 de Abril; H) 18 de Abril; I) 05 de Maio

Na tabela 4.1 podemos observar valores estatísticos sobre a área em questão para os dois métodos de análises realizados pelo equipamento fluxo com regressão exponencial (FECO₂) e fluxo com regressão linear (FLCO₂).

	$FECO_2(\mu\text{mol } m^{-2}s^{-1})$	$FLCO_2(\mu\text{mol } m^{-2}s^{-1})$
Média	-1,14	-0,35
Mediana	1,98	1,82
Desvio Padrão	8,91	5,90
Erro Padrão	0,05	0,03
Máximo	20,89	11,99
Dia Max	22/04/2023 14:04:00	01/05/2023 19:41:45
Mínimo	-129,68	-33,10
Dia min	14/05/2023 17:10:46	04/04/2023 10:09:54

Tabela 4.1: Parâmetros estatísticos descritivos dos fluxos de CO_2

4.2.2 Avaliação da biomassa

Na Figura 4.6, apresentam-se os valores de biomassa coletados em g/m^2 nos pontos de amostragem espacial e na área principal do estudo (Figura 3.8). Embora tenham sido notados valores diferentes para os pontos amostrados, foi observado um perfil de evolução da biomassa semelhante. No primeiro mês, houve uma discrepância em relação aos demais meses, devido a ser a primeira coleta e, conseqüentemente, haver uma maior quantidade de material vegetal. Já nos valores subsequentes, foi observada uma evolução da biomassa, tendo em vista o tempo de corte.

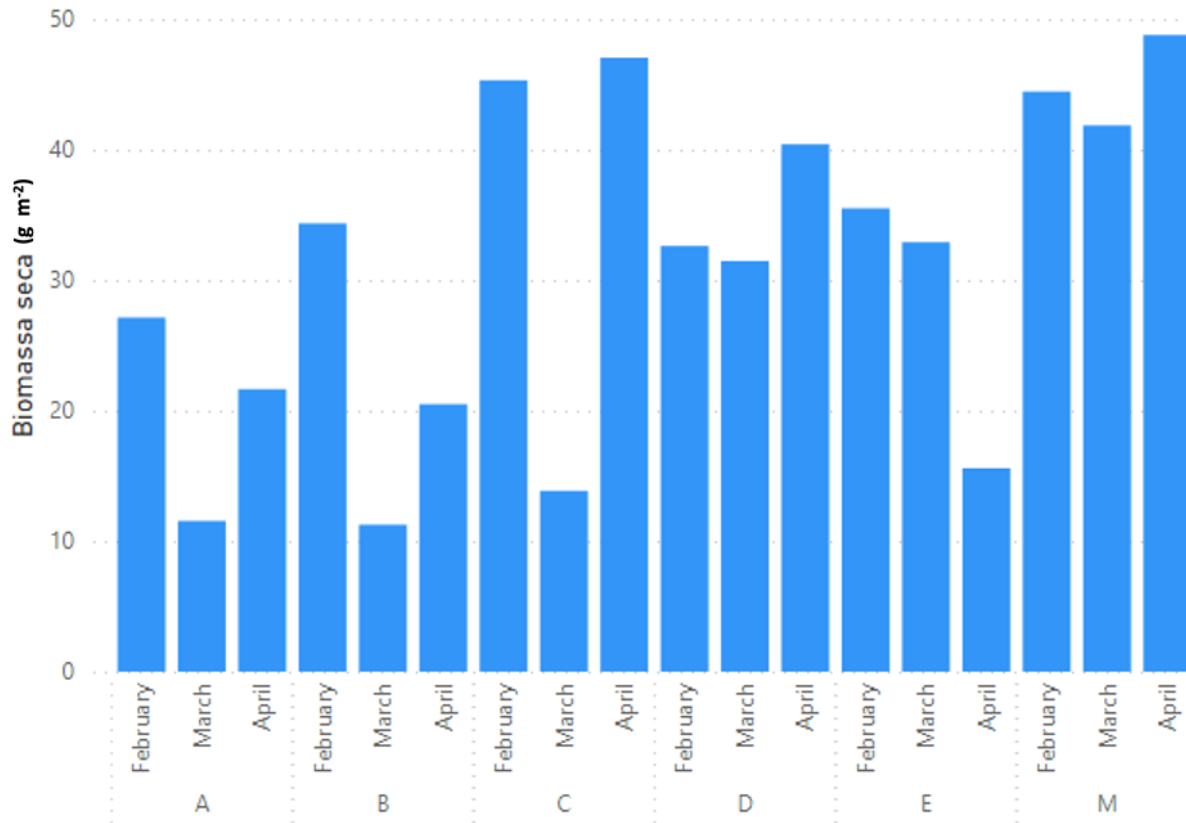


Figura 4.6: Evolução temporal da biomassa seca de carbono produzida, em g/m². Os valores A,B,C,D e E correspondente aos pontos da caracterização espacial enquanto M ao ponto principal do estudo

O ponto principal de amostragem obteve um média de biomassa seca $45,03 \text{ g m}^{-2}$ no período de coleta, com uma média diária de $1,50 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, enquanto os demais pontos de amostragem apresentaram valores que variaram entre $35,41 \text{ g m}^{-2}$ e $20,11 \text{ g m}^{-2}$. Mesmo tendo valores significativamente diferentes do ponto principal estes ainda são relevantes e demonstram um mesmo comportamento de evolução ao longo do tempo. Vale destacar que essa discrepância é devido a diversos fatores que compõem o relvado local como percentagem de cobertura e altura do relvado, na figura 4.7 podemos observar a matriz de correlação entre essas variáveis.

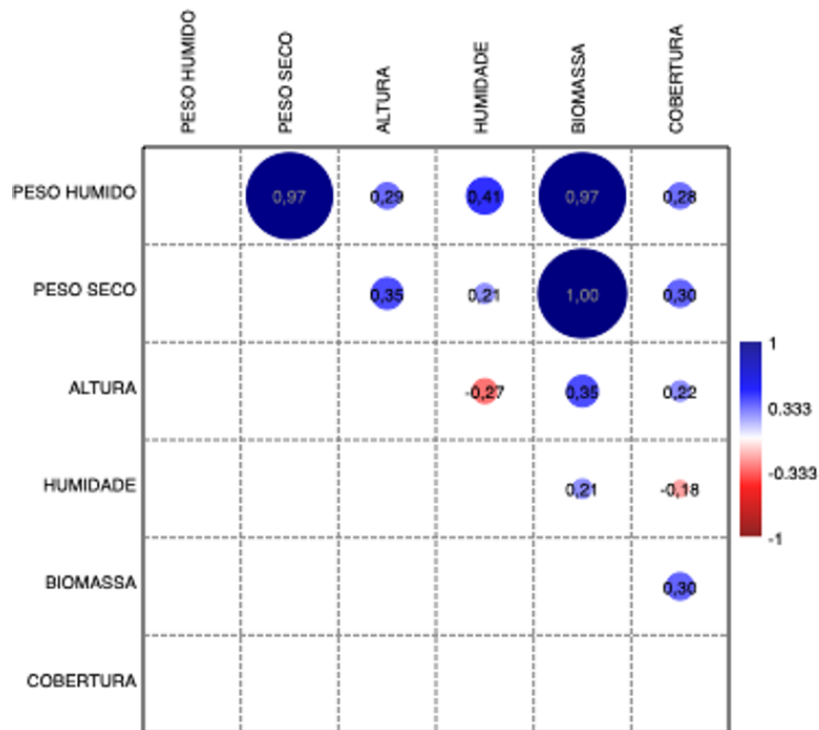


Figura 4.7: Matriz de correlação de Pearson entre variáveis impactantes na quantidade de biomassa

As variáveis de cobertura e altura das plantas têm um papel importante na produção de biomassa vegetal, uma vez que afetam a quantidade de luz que as plantas recebem, a taxa de fotossíntese e a alocação de recursos. Segundo estudos de Zhang et al.[95], a altura e cobertura das plantas estão diretamente relacionadas com a produção de biomassa. Na Figura 4.8, pode-se notar a evolução da biomassa em relação a diferentes percentagens de cobertura vegetal no terreno.

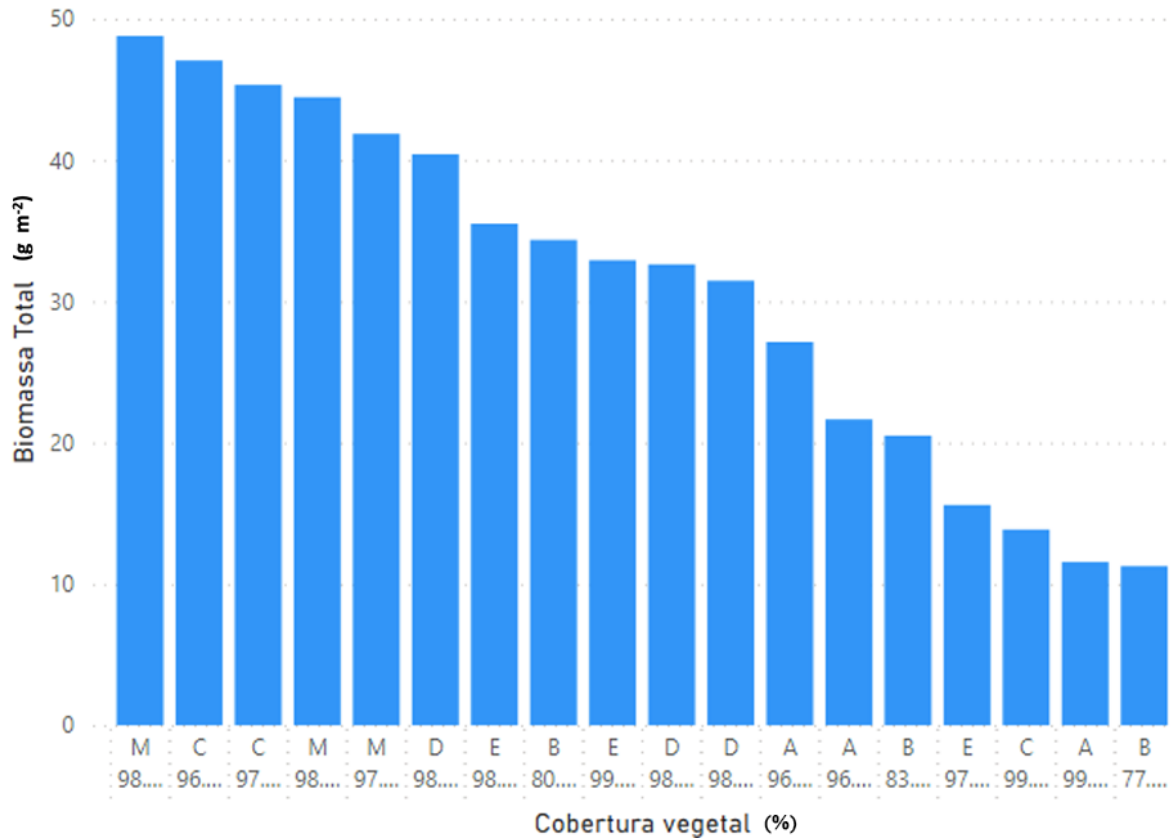


Figura 4.8: Evolução da biomassa frente a cobertura vegetal para os pontos de amostragem espacial e ponto principal de amostra

4.2.3 Avaliação do fitovolume

Na figura 4.9 temos os valores de fitovolume para os pontos amostrados na caracterização espacial do terreno (A,B,C,D e E) bem como o ponto principal de amostragem M. Essa medida é importante para a compreensão dos fluxos de CO_2 e da taxa fotossintética, uma vez que a quantidade de tecido vegetal está diretamente relacionada à produção de carbono e à taxa de fotossíntese.

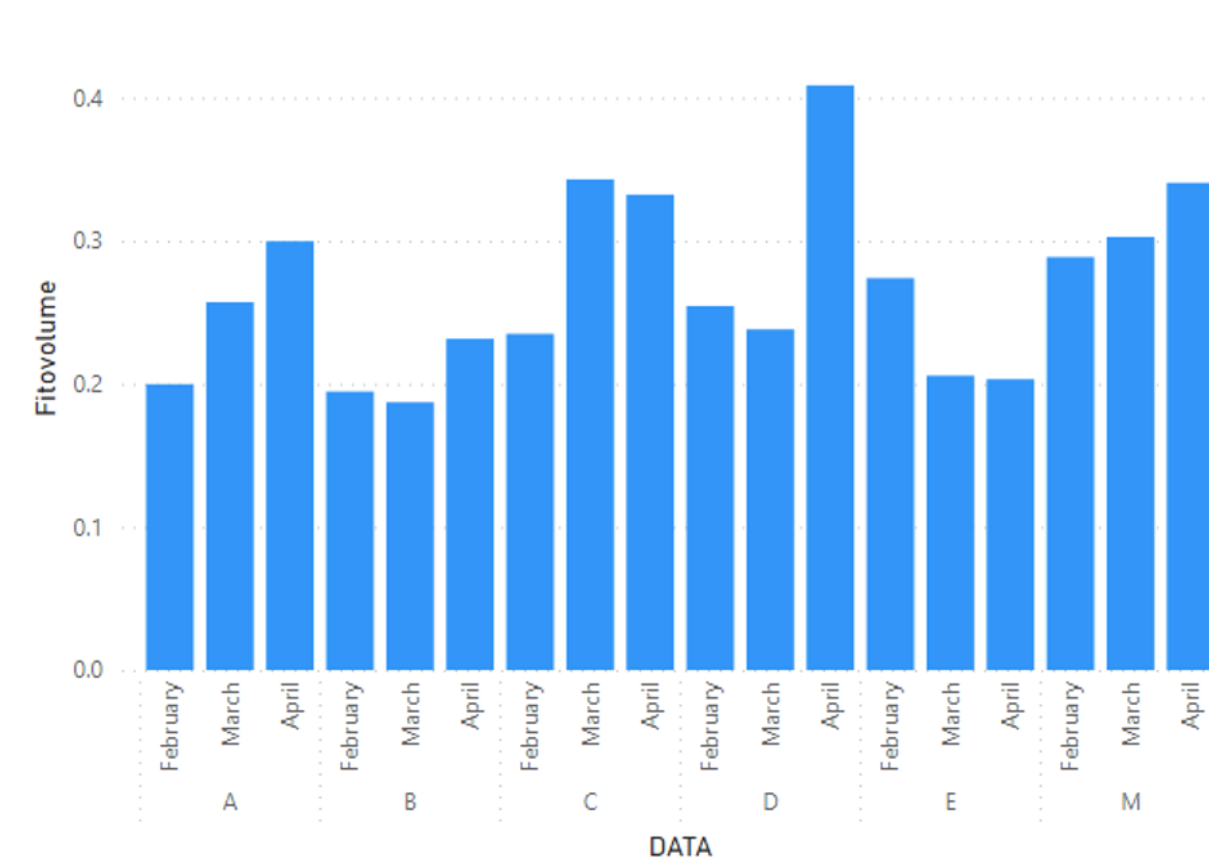


Figura 4.9: Evolução do fitovolume nos pontos de amostragem espacial e ponto principal de amostragem

De maneira geral, observou-se um comportamento semelhante entre os pontos de amostragem, com um aumento no crescimento durante o último período. Esse aumento pode ser explicado por diversos fatores, como a chegada da primavera e o aumento do período de iluminação solar. No entanto, alguns pontos, como B e E, apresentaram um comportamento um pouco atípico em relação aos demais. Isso pode ser explicado pela localização desses pontos na área de amostragem, que apresentava áreas de sombra, impedindo a incidência direta de luz solar em alguns períodos do dia. Esse facto comprometeu o crescimento da relva, principalmente após o primeiro corte. Apesar disso, nos últimos períodos, o crescimento voltou a estabilizar-se, acompanhando o aumento das taxas de iluminação diária.

Sabe-se que a luz é um fator chave para a fotossíntese e o crescimento das plantas.

De fato, a disponibilidade de luz pode afetar diretamente o tamanho e a densidade das folhas, o desenvolvimento de órgãos reprodutivos e a produção de biomassa vegetal [96]. Portanto, a disponibilidade de luz em diferentes áreas pode influenciar significativamente o crescimento das plantas e seu fitovolume.

4.3 Transferência líquida de CO_2

4.3.1 Fluxos de CO_2 em superfície sem cobertura vegetal

Conforme descrito na metodologia, foram realizadas medições semanais em solo exposto em dias selecionados para avaliar a contribuição dos solos nos fluxos de carbono. A Figura 4.10 apresenta o comportamento dos fluxos de carbono no período de análise, enquanto a Figura 4.11 exibe o perfil diário desses fluxos.

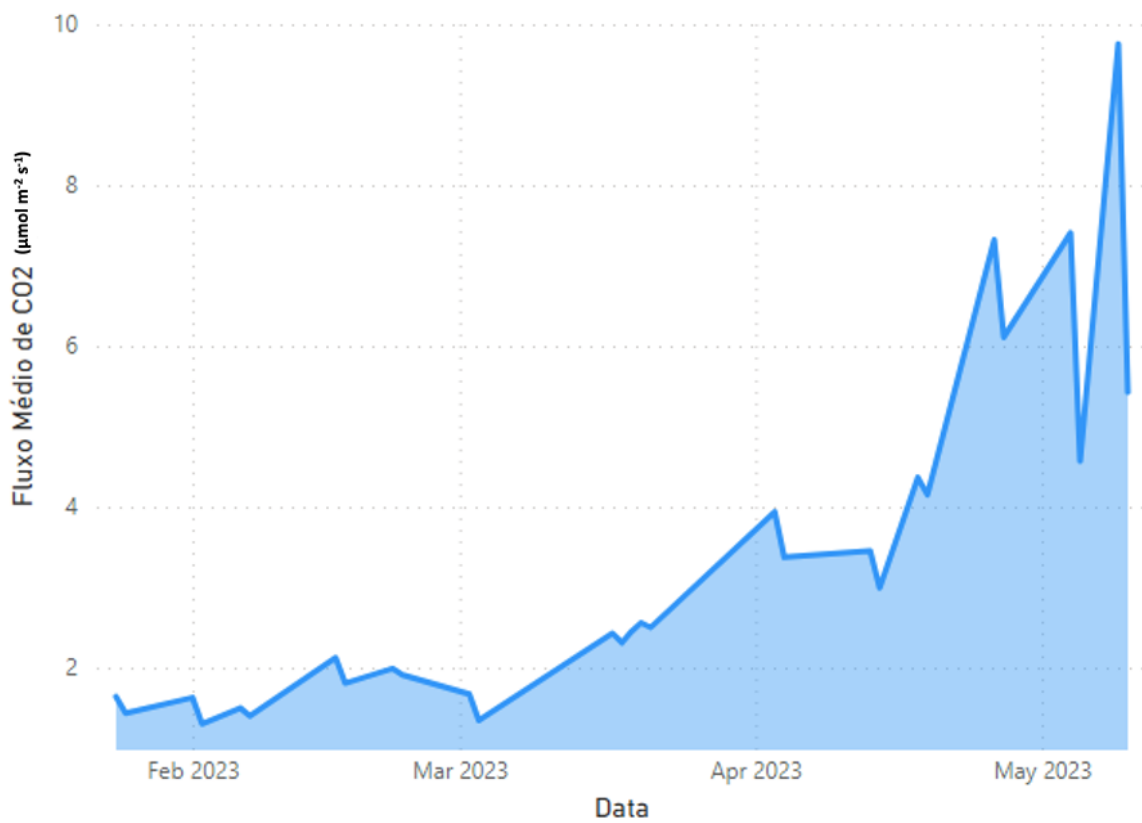


Figura 4.10: Evolução temporal dos fluxos de CO_2 no solo exposto para o período de avaliação.

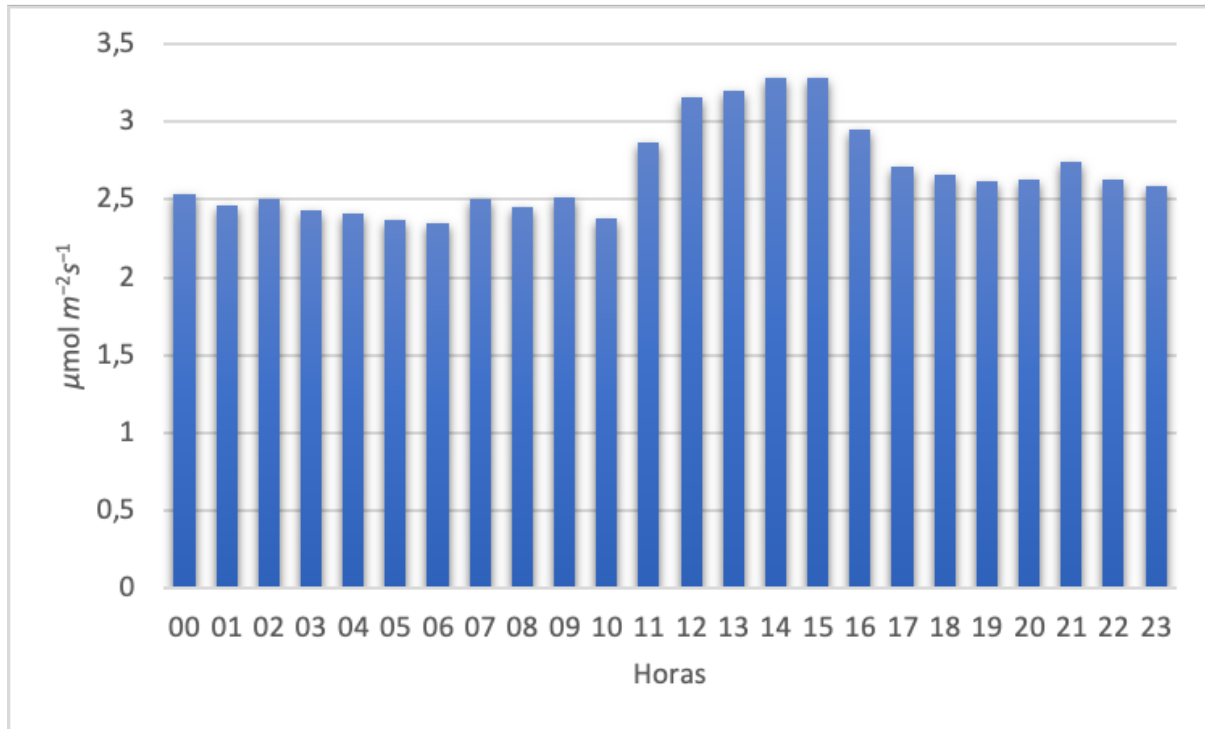


Figura 4.11: Perfil médio diário dos fluxos de CO_2 para o período de avaliação.

Os dados analisados revelaram um aumento na emissão dos fluxos de CO_2 pelo solo ao longo do período do estudo, com destaque para o período de transição do inverno para a primavera, em particular no final de março. Esse aumento pode ser atribuído, em grande parte, ao aumento da temperatura local coincidente com a mudança de estação.

O perfil diário de emissão revelou que os fluxos de CO_2 aumentaram nos períodos de maior incidência solar, o que aumenta a temperatura do solo e, conseqüentemente, a atividade microbiana, tendo resultado numa maior emissão de CO_2 para a atmosfera. Mesmo os períodos diários sendo os períodos de maior emissão eles são contornados com a captura de CO_2 pela vegetação presente

Considerando a análise da matriz de correlação apresentada na Figura 4.12, podemos observar a influência de fatores edafoclimáticos como temperatura do solo (S TEMP), humidade e temperatura do ar nos (AR TEMP) fluxos de CO_2 . Dentre esses fatores, destaca-se a forte influência da temperatura do solo nos fluxos, conforme evidenciado por estudos anteriores [91]. De acordo com Goulden et al. [91], há uma correlação positiva e

exponencial entre os fluxos de CO_2 do solo e sua temperatura, o que foi confirmado pelos resultados dessa análise.

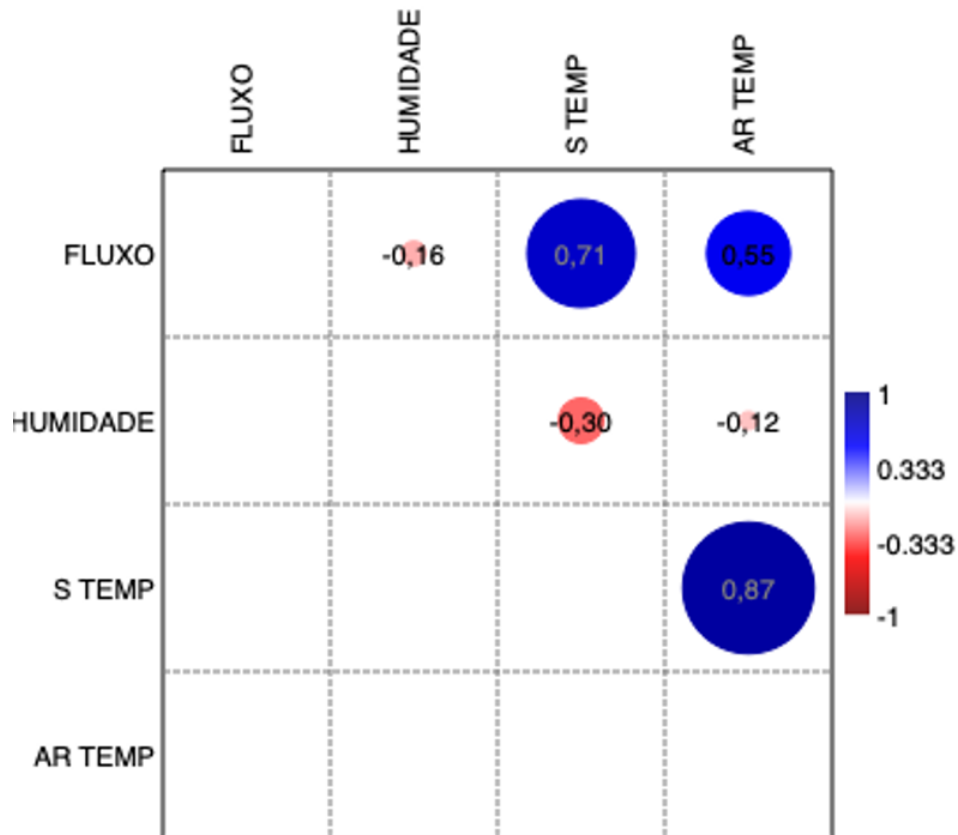


Figura 4.12: Matriz de correlação de Pearson entre fluxo e fatores edafoclimáticos influentes

A análise dos dados coletados apresentou uma média de emissão de $2,65 \mu\text{mol } m^{-2}s^{-1}$ e máximos de $13,69 \mu\text{mol } m^{-2}s^{-1}$. Contudo, foi detetada uma anomalia no dia 17/03/2023 às 13:42, quando foi registada uma medição de pico de CO_2 de $69,38 \mu\text{mol } m^{-2}s^{-1}$. Esse valor pode ter sido ocasionado por erros de leitura do aparelho, tendo em vista que foi o primeiro valor registado desde o início da medição em solo e os valores subseqüentes apresentaram níveis mais baixos, como observado noutros dias.

Os resultados apontam que o solo é um importante agente na emissão de CO_2 , contribuindo significativamente para a transferência de carbono para a atmosfera. Os gráficos obtidos a partir dos dados coletados demonstram um aumento constante nas emissões de CO_2 ao longo do estudo, refletindo a influência de fatores edafoclimáticos no processo.

4.3.2 Fluxos de CO_2 em superfície com coberto vegetal

Durante o período de estudo, foram realizadas medições contínuas na área relvada, sendo interrompidas apenas durante a análise do solo exposto, conforme descrito na metodologia. A evolução temporal da transferência líquida de CO_2 entre a superfície vegetal e a atmosfera foi registrada e pode ser observada na figura 4.13, que apresenta os gráficos de emissões para o CO_2 com correções lineares e exponenciais do aparelho.

A análise dos fluxos é um tema crucial para a compreensão dos processos envolvidos na transferência de gases entre a superfície da terra e a atmosfera. Em áreas com vegetação, é possível notar um claro padrão de variação diário, com uma maior emissão de CO_2 durante a noite e um maior sequestro durante o dia devido à atividade fotossintética das plantas.

Na figura 4.14 podemos notar a variação média diária dos fluxos, onde temos que o período de maior sequestro ocorre entre as 11 e as 13 horas, quando a atividade fotossintética se encontra no seu máximo. Nesse momento, as plantas estão consumindo grandes quantidades de dióxido de carbono para produzir açúcares através da fotossíntese, o que faz com que haja uma queda nos níveis de CO_2 na atmosfera próxima à superfície da terra.

Além disso, é possível notar um aumento da quantidade de carbono sequestrado com a mudança das estações e a chegada da primavera (Figura 4.13). Isso ocorre porque os fatores edafoclimáticos que influenciam o regime de fluxo mudam, o que permite um aumento na taxa de fotossíntese e, conseqüentemente, um maior sequestro de CO_2 pela vegetação.

Podemos notar que existem visíveis diferenças entre os valores de fluxos a partir dos



Figura 4.13: Evolução temporal dos valores médios de fluxos de CO_2 ao longo do período de avaliação, obtidos pelo método de regressão linear e regressão exponencial.

dois métodos de ajustes linear e exponencial. Mesmo representando o mesmo perfil de fluxo existem diferenças estatísticas entre ambos que podem levar a diferentes leituras de acordo com o período de análise.

De acordo com Kutzbach [73] durante o ensaio experimental, os fatores que influenciam os fluxos de CO_2 não são constantes e não se pode esperar um aumento ou diminuição linear da concentração de CO_2 ao longo do tempo dentro da câmara. Análises detalhadas desses ensaios demonstraram que a regressão linear frequentemente não é apropriada para a determinação dos fluxos de CO_2 por meio de métodos de câmara fechada, mesmo que os tempos de fechamento sejam curtos. As estimativas de fluxo de CO_2 por regressão linear podem ser tão baixas quanto 40% das estimativas de fluxo de regressão exponencial para pequenos intervalos de tempo[73].

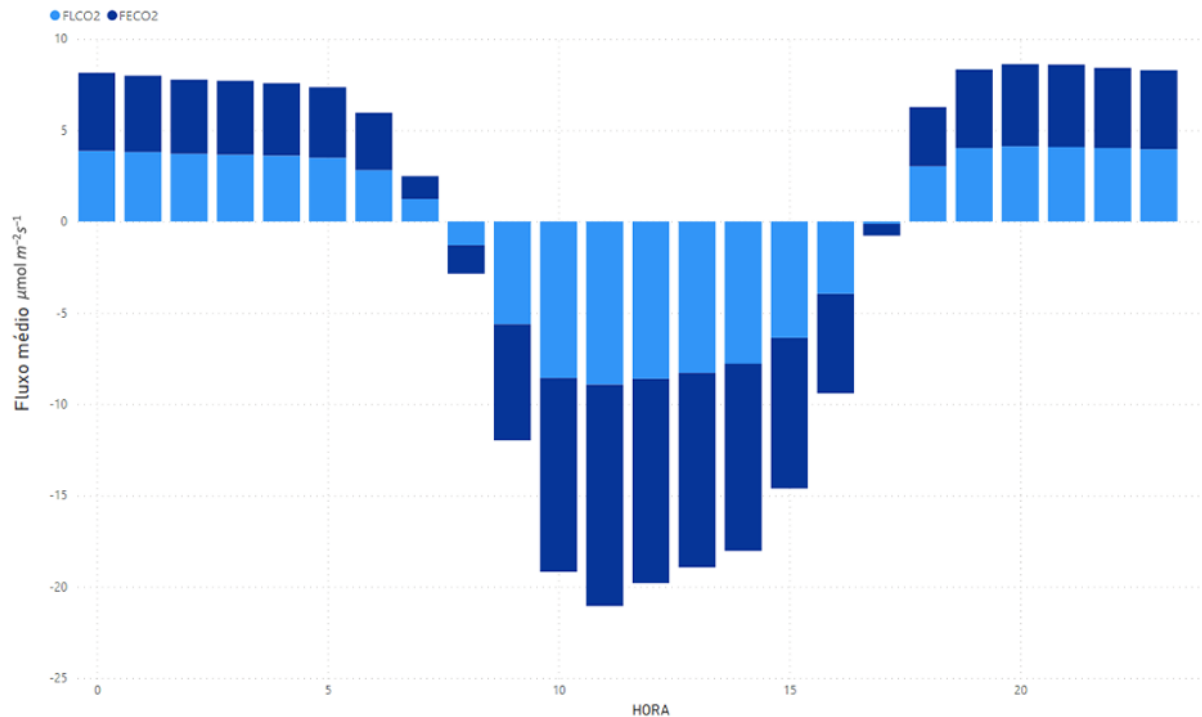


Figura 4.14: Perfil médio diário dos fluxos de CO_2 para o período de avaliação, valores para regressão linear e exponencial.

Assim podemos notar na tabela 4.2 as diferenças estatísticas entre os dois métodos de análises.

Mesmo representando de forma similar a dinâmica dos fluxos de carbono, podemos notar uma representação estaticamente diferente entre os dados. O estudo de Kutzcbach [73] ajuda a evidenciar esse cenário onde a análise linear pode não ser a mais indicada em cenários como esse onde existe uma gama maior de fatores edafoclimáticos influenciando os fluxos dessa amostra. Dessa forma, a análise dos fluxos com a correção exponencial foi adotada nas análises realizadas a posteriori.

De forma a melhor evidenciar a dinâmica dos fluxos durante o período da avaliação foram representados os perfis diários para os respectivos meses de análise na figura 4.15

Após realizar a análise de fluxo, os resultados obtidos foram bastante significativos. Observou-se um aumento na fração absorvida, conforme o esperado, em virtude das alterações nos fatores edafoclimáticos, tais como o incremento do tempo de exposição à

	$FE\text{CO}_2(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$	$FL\text{CO}_2(\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1})$
Média	-0,93	-0,40
Mediana	1,95	1,80
Desvio Padrão	7,90	5,67
Erro Padrão	0,04	0,03
Máximo	20,86	11,99
Dia Max	16/03/2023 13:47:04	01/05/2023 19:41:45
Mínimo	-60,73	0,73
Dia min	04/05/2023 10:14:49	04/04/2023 10:09:54

Tabela 4.2: Parâmetros estatísticos descritivos do fluxo de CO_2 do solo exposto por regressão exponencial e linear..

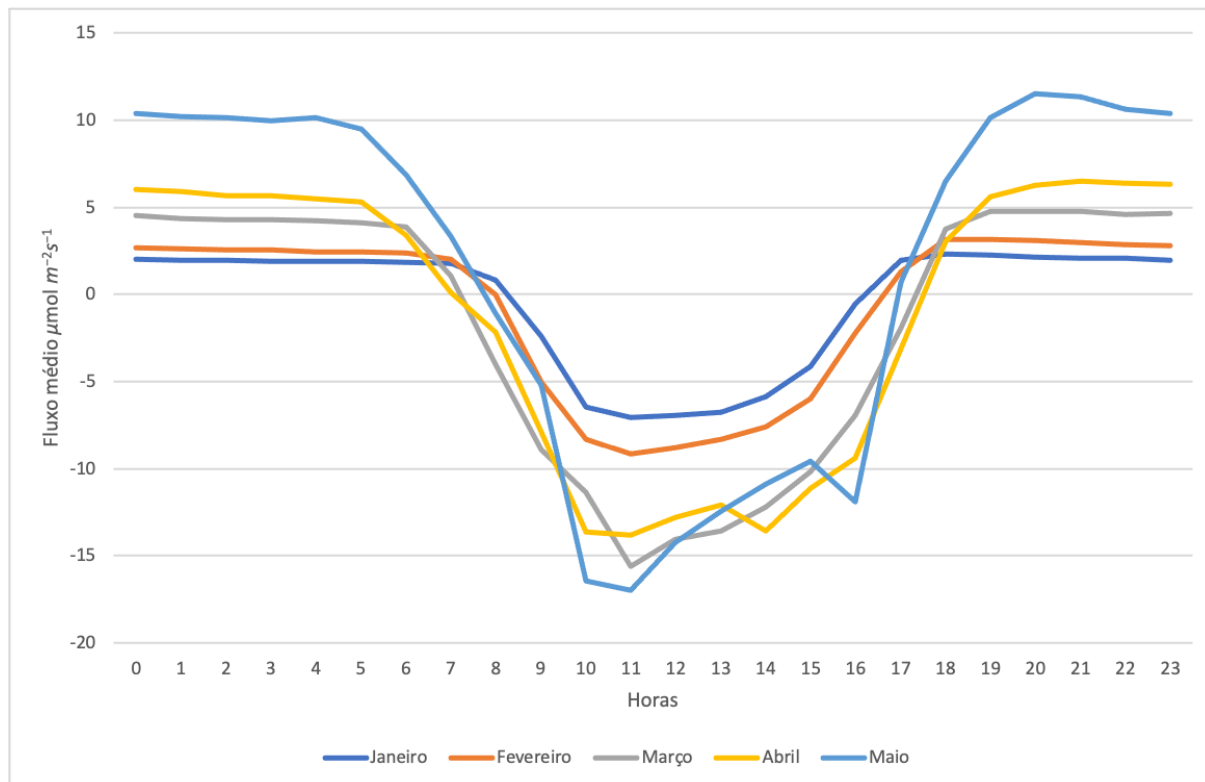


Figura 4.15: Perfil médio diário dos fluxos de CO_2 para o meses de avaliação, valores para regressão exponencial.

luz solar em decorrência da mudança das estações invernais para as estivais e as modificações na disponibilidade hídrica.

Essa mudança nos fatores ambientais foi comprovada pelo aumento na absorção global de CO_2 . Como se sabe, a vegetação desempenha papel essencial na absorção de dióxido

de carbono, e, diante da alteração dos fatores edafoclimáticos, observou-se significativo incremento na capacidade de assimilação do CO_2 pelas plantas.

4.3.3 Balanço líquido do fluxo CO_2 ao longo do período de avaliação.

De forma a analisar o balanço líquido dos fluxos de carbono, emissão e absorção foi elaborada a figura 4.16 .

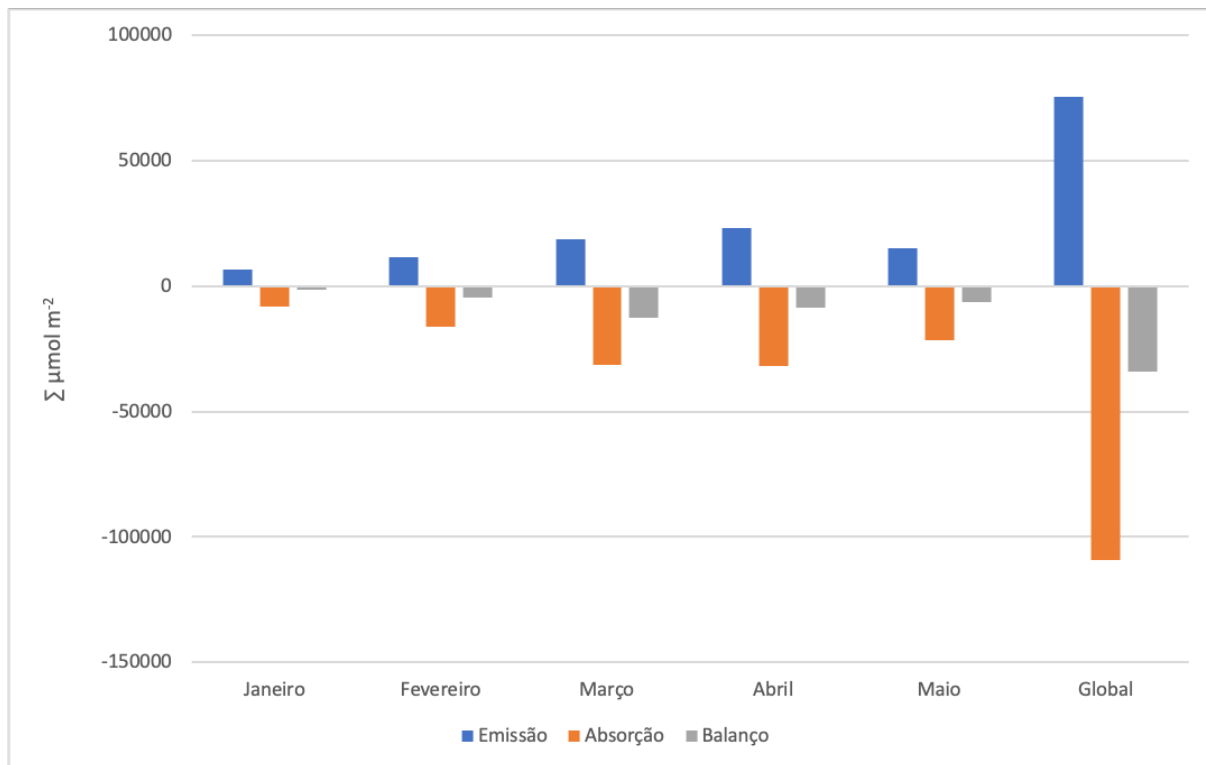


Figura 4.16: análise do balanço líquido das frações de fluxo mássico ao longo do tempo.

A análise realizada indicou que, em média, a superfície relvada atuou como um sumidouro de CO_2 , absorvendo mais do que emitindo. Utilizando o método de cálculo de ajustamento por regressão exponencial, foi observada uma emissão diária média de $-1,15 \mu mol CO_2 m^2 d^{-1}$. Durante todo o período de observação, a superfície relvada apresentou uma emissão líquida de, aproximadamente, $-1,5 kg de CO_2 m^2$.

Estes valores demonstram que o relvado urbano, nas condições estudadas, junto com as

interações dos fatores edafoclimáticos sobre o terreno contribuíram para apresenta fortes características como sumidouro de CO_2 .

Durante todos os meses do estudo, observou-se um balanço negativo nas emissões de CO_2 , com valores médios próximos, com exceção do primeiro mês, onde o valor foi de $-1655,52 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^2$. É importante salientar que o estudo teve início no meio do primeiro mês, o que pode ter influenciado na análise desse período em relação aos demais meses. No entanto, nos meses subsequentes, a análise foi realizada considerando todo o período de tempo, permitindo uma avaliação mais precisa das emissões de CO_2 ao longo do tempo.

Durante a análise dos fluxos de carbono, foi possível inferir um favorecimento da fração do solo relacionada à captura de CO_2 . Esse resultado pode ser explicado por diversos fatores, tais como a presença de raízes de plantas que aumentam a atividade microbiana do solo, favorecendo a formação de carbono orgânico e, conseqüentemente, a captura de CO_2 . Além disso, a atividade fotossintética das plantas também é um fator de grande influencia tendo em vista a captura de CO_2 nos períodos com luz solar.

4.4 Avaliação da relação entre os fluxos de CO_2 e os parâmetros edafoclimáticos e vegetativos

Diversas pesquisas já apontaram a existência de correlações positivas entre as variáveis edafoclimáticas e vegetativas e os fluxos de CO_2 , o que justifica a realização deste estudo. Durante a pesquisa, foram realizadas medições e coletas de dados em diferentes momentos e condições climáticas, permitindo uma análise mais abrangente e precisa dos resultados. Ao longo do trabalho, foram observadas várias relações positivas entre as variáveis, o que sugere a influência mútua e interdependência entre elas.

As temperaturas do solo e do ar apresentaram uma tendência crescente na emissão de CO_2 principalmente por estar ligada aos processos de respiração do solo. Na Figura 4.17, podemos visualizar a evolução dos fluxos de CO_2 em decorrência da mudança de

estação e, conseqüentemente, do aumento da temperatura ao longo do período analisado. Essa relação entre a temperatura e a emissão de CO_2 reforça a importância de considerar as variações climáticas em estudos sobre os fluxos de gases de efeito estufa e os ciclos biogeoquímicos do solo.

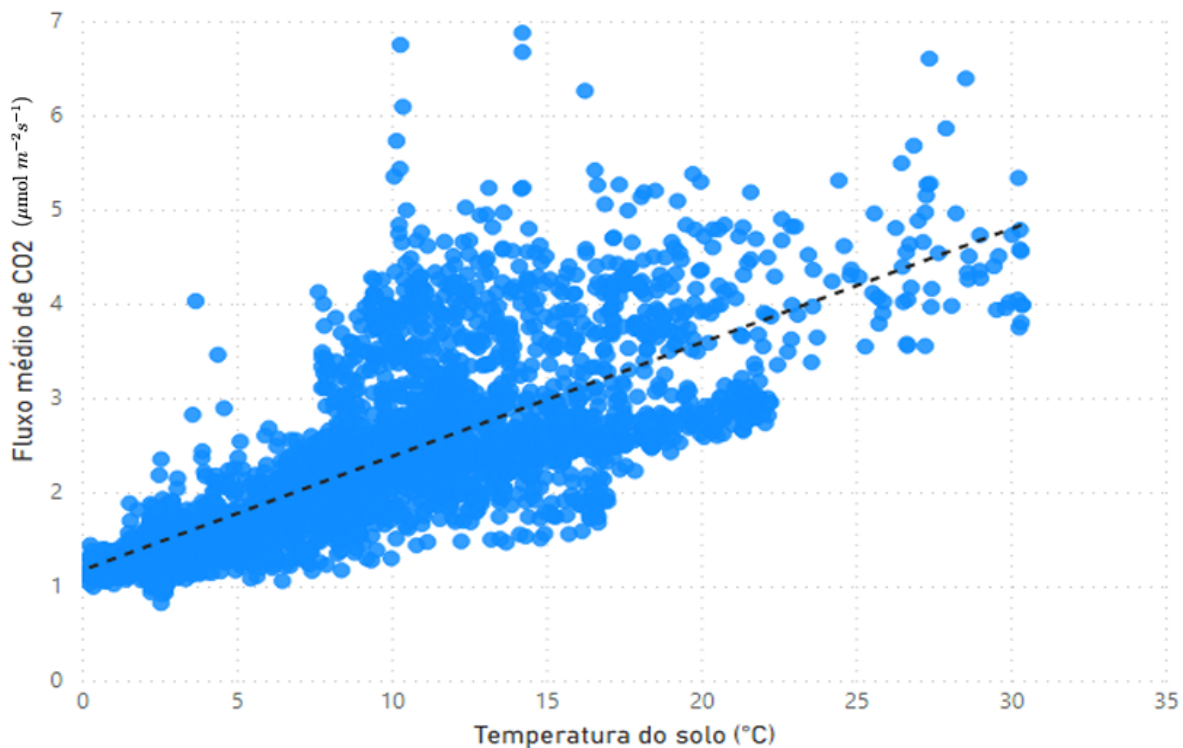


Figura 4.17: Evolução dos fluxos de CO_2 no solo exposto em função da mudança de temperatura do solo.

Durante o estudo, foi possível observar um comportamento semelhante entre os valores de radiação solar e radiação fotossinteticamente ativa em relação aos fluxos de CO_2 . Foi constatada uma relação direta entre o aumento dos níveis de radiação e os fluxos de CO_2 , o que pode ser explicado pela influência direta da radiação nos processos fotossintéticos do relvado presente na área de estudo. Na Figura 4.18, pode-se notar uma tendência de aumento na captura de CO_2 , evidenciada pelos fluxos negativos, à medida que os níveis de radiação solar e fotossinteticamente ativa aumentam. Esses resultados corroboram a importância da luz solar na fotossíntese e na respiração vegetal, o que afeta diretamente

os fluxos de CO_2 .

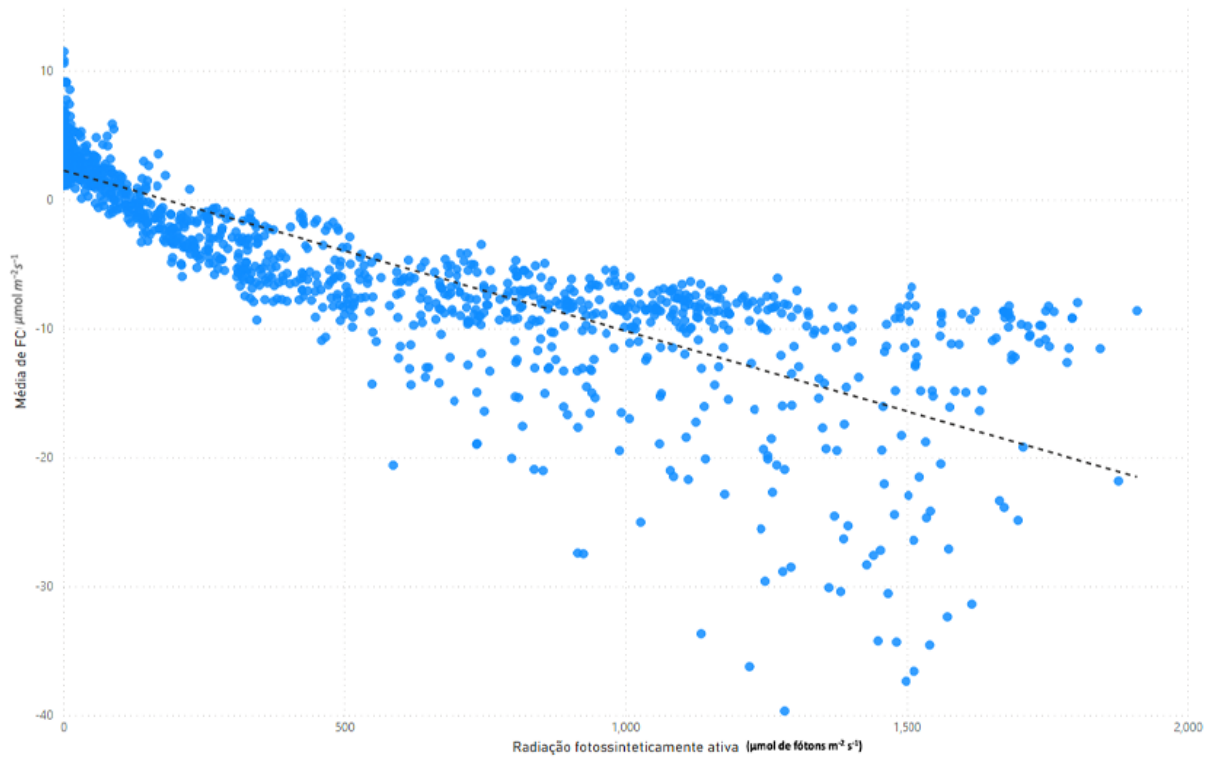


Figura 4.18: Relação entre luminosidade e fluxos de CO_2

Com o objetivo de avaliar de forma mais precisa as correlações entre as variáveis amostradas, foi elaborada a matriz de correlação de Spearman, apresentada na figura 4.19. Essa medida de correlação é calculada a partir dos postos ou ordens dos valores das duas variáveis, permitindo uma avaliação robusta da relação entre elas, mesmo em casos de dados não paramétricos, como os do estudo em questão.

A matriz de correlação de Spearman é uma ferramenta estatística útil para entender a força e direção das associações entre as variáveis. Ela permite visualizar de forma clara e objetiva quais variáveis estão mais fortemente relacionadas entre si, o que pode ajudar a identificar padrões e direcionar futuras análises estatísticas e experimentais.

Vale ressaltar que a matriz de correlação de Spearman é particularmente útil em estudos ambientais, nos quais as variáveis podem ser influenciadas por múltiplos fatores e apresentar distribuições não normais. Sendo assim, sua utilização no estudo em questão

contribuiu significativamente para uma análise mais precisa e robusta das relações entre os parâmetros edafoclimáticos, vegetativos e os fluxos de CO_2 .

Contrariando as expectativas, não foi identificada uma correlação direta entre os fluxos de CO_2 e a precipitação durante o período de estudo. Diversos fatores podem ter influenciado essa ausência de relação, dentre eles destaca-se a presença de rega mecanizada na área de estudo, que pode ter afetado a disponibilidade de água no solo. Além disso, a ausência de grandes períodos de seca pode ter contribuído para que o solo mantivesse características de humidade relativamente constantes ao longo do período de amostragem. Esses fatores podem ter reduzido a influência direta da precipitação nos fluxos de CO_2 , sugerindo que outros fatores ambientais devem ser considerados para explicar a dinâmica desses fluxos na área estudada.

Apesar de não apresentar uma influência direta nos fluxos de CO_2 estudados na área, a precipitação (Prp) apresentou uma correlação indireta com esses fluxos devido à sua influência na humidade relativa do ar (HRamb). Foi observado um coeficiente de correlação positivo de 0,36 entre a HRamb e os fluxos de CO_2 . Essa relação é de grande relevância, uma vez que as taxas fotossintéticas estão diretamente relacionadas com a transpiração, que, por sua vez, é controlada pelos défices de humidade atmosférica [97].

Os resultados obtidos na matriz de correlação de Spearman destacam a forte relação entre os fluxos de CO_2 e dois parâmetros chave: a Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) e a Radiação Solar (luz), com coeficientes de -0,81 para ambos. Esses resultados indicam uma forte ligação entre a atividade fotossintética da vegetação e a absorção de CO_2 , destacando o importante papel que as plantas desempenham nos transportes de CO_2 .

Através da fotossíntese, as plantas convertem a energia solar em energia química, captando o dióxido de carbono da atmosfera para produzir açúcares e outros compostos orgânicos, liberando oxigénio como subproduto. Sendo assim, a forte correlação negativa encontrada entre os fluxos de CO_2 e os valores de PAR e radiação solar (luz) evidenciam a importância da atividade fotossintética na captura e armazenamento de carbono pelas plantas, influenciando diretamente o transporte de CO_2 na atmosfera.

A temperatura do ambiente (T_{amb}) e a temperatura do ar na câmara de medição (Temp CH) apresentaram forte influência nas medidas de fluxo de CO_2 , com coeficientes de correlação de -0,22 e -0,47, respectivamente. A temperatura da câmara representa mais fielmente a temperatura do ar próximo ao relvado, já que é medida junto ao equipamento de determinação de fluxos. Além disso, esses valores influenciam diretamente a temperatura do solo (T_{Solo}), que apresentou uma correlação de -0,13 com os fluxos de CO_2 . É importante destacar que os fluxos de CO_2 estão fortemente relacionados com a temperatura do solo nos primeiros 2 cm do perfil e a temperatura do ar em 2 cm acima da área de medição [91].

A velocidade dos ventos (Vel_{Vnt}) apresentou forte correlação negativa com os fluxos, com um coeficiente de -0,41. Essa variável tem um papel importante como facilitadora das trocas gasosas nas plantas, além de atuar como um forte dispersor de gases poluentes. Além disso, a velocidade dos ventos mostrou-se influente em outras variáveis correlacionadas com os fluxos, como a temperatura da câmara de medição (Temp CH) e a temperatura do solo (T_{Solo}). Portanto, é importante considerar a influência da velocidade dos ventos nas medições de fluxos de CO_2 , especialmente em ambientes abertos onde a ação do vento pode ser significativa.

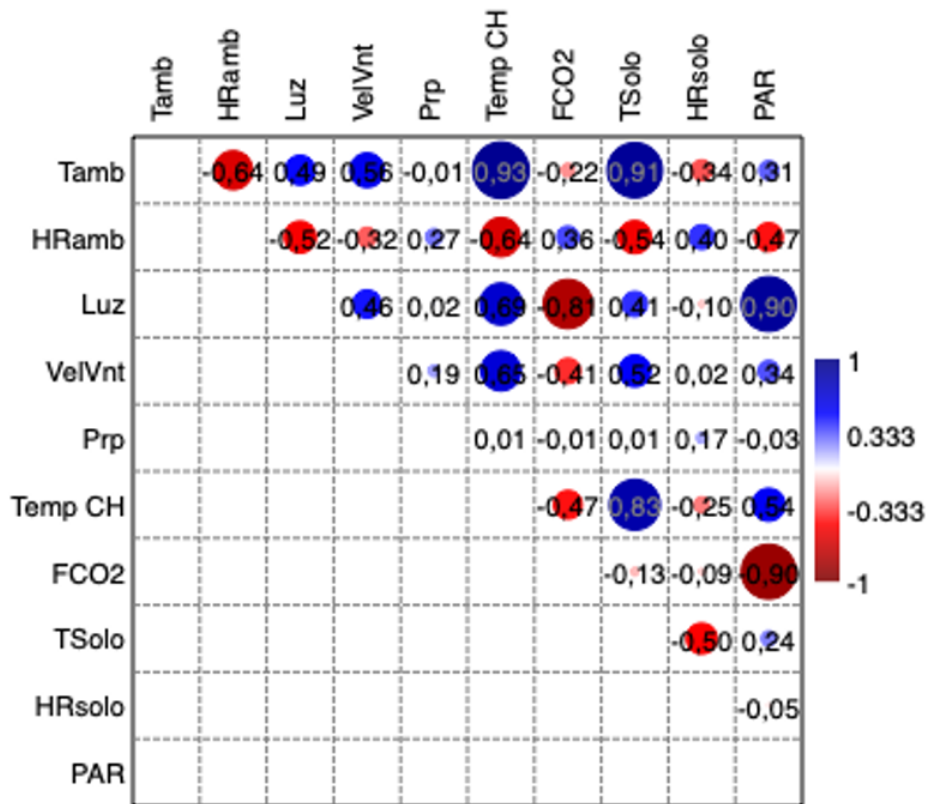


Figura 4.19: Matriz de correlação de Spearman para as variáveis de fluxo de CO_2 e meteorológicas na área relvada. Nota: Tamb: temperatura do ambiente($^{\circ}C$); HRamb: humidade relativa do ambiente (%); Luz: Radiação solar; VelVnt: velocidade dos ventos (ms^{-1}); Prp: precipitação (mm); Temp CH: Temperatura na camara de medição; FCO_2 : Fluxo de CO_2 ($\mu mol m^{-2}s^{-1}$); TSolo: temperatura do solo ($^{\circ}C$); HRsolo: conteúdo de água no solo; PAR: radiação fotossinteticamente ativa($\mu mol m^{-2}s^{-1}$ de fótons)

4.5 Avaliação da contribuição herbácea

O cálculo da contribuição herbácea é um parâmetro importante na análise dos fluxos de CO_2 uma vez que os processos de fotossíntese e respiração celular afetam diretamente esses fluxos. A fotossíntese é um processo que absorve CO_2 da atmosfera e, portanto,

pode reduzir a quantidade desse gás de efeito estufa na atmosfera. Nesse sentido, é crucial avaliar a contribuição da fotossíntese no balanço total de CO_2 .

Para calcular a contribuição herbácea, foi utilizada a metodologia que considera que os fluxos finais são resultado das emissões do solo, das plantas e do sequestro de carbono pelas plantas durante a fotossíntese. Para quantificar apenas os fluxos provenientes das plantas, foi feita uma média dos valores diários e adicionada uma média das emissões apenas do solo exposto, provenientes de amostragens realizadas em terreno exposto.

A determinação do período diário foi realizada a partir do sensor quântico de luminosidade presente no equipamento. Foram utilizados valores a partir de 20 W para estimar o período em que a fotossíntese estava ocorrendo. Com isso, foi possível obter uma estimativa da contribuição fotossintética diária ao balanço de CO_2 .

A avaliação da contribuição herbácea é fundamental para compreender a dinâmica do carbono em ecossistemas terrestres e pode ser usada como uma ferramenta para avaliar a efetividade de estratégias de mitigação de emissões de CO_2 . Além disso, o método utilizado para estimar essa contribuição pode ser aplicado em diferentes ambientes e escalas, o que o torna uma ferramenta útil para a avaliação dos fluxos de carbono em diferentes contextos. A figura 4.16 representa a estimativa diária do fluxo herbácea em $\mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^2 d^{-1}$.

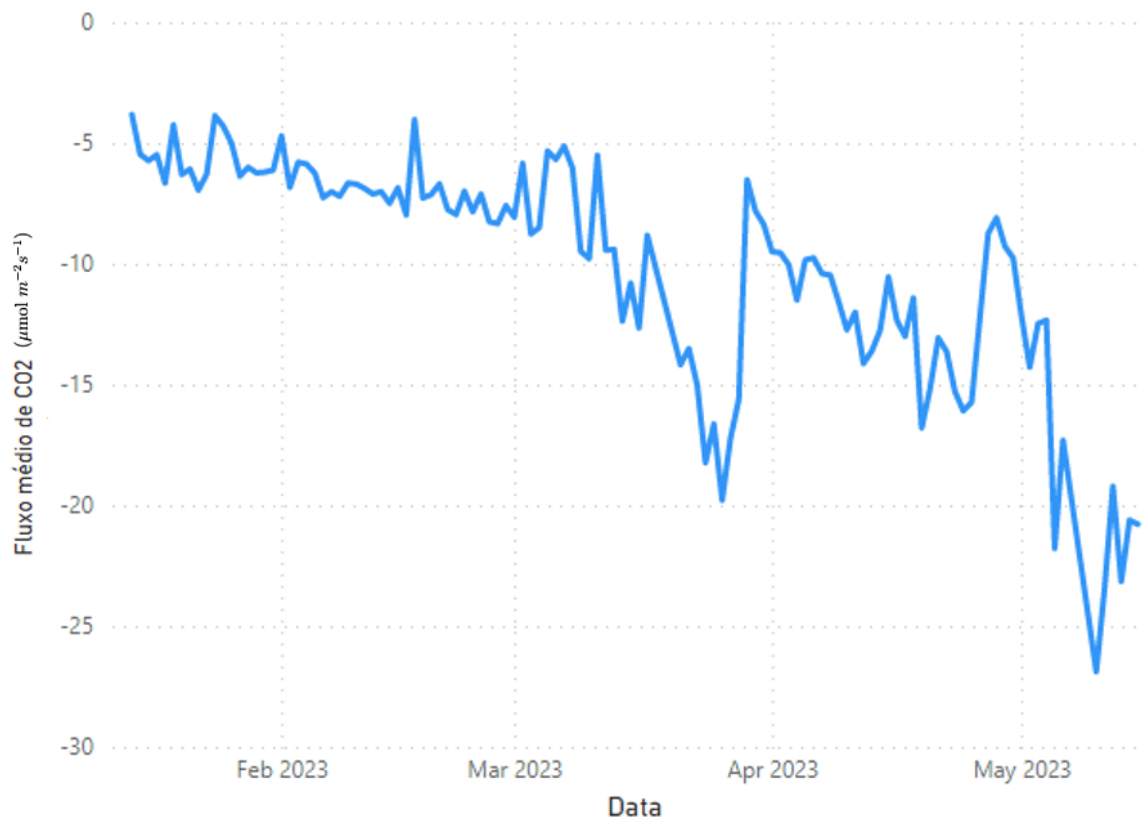


Figura 4.20: análise do balanço líquido das frações de fluxo mássico utilizando o método de regressão exponencial ao longo do tempo.

A análise dos dados herbáceos é uma ferramenta importante para entendermos o comportamento das plantas em relação à absorção e emissão de carbono, bem como para avaliar a contribuição da vegetação na mitigação das mudanças climáticas. Durante o período de estudo, verificou-se que, no geral, a superfície comportou-se diariamente como um sumidouro de carbono da atmosfera, tendo sido igualmente evidente o crescimento gradual da sua capacidade de sequestro ao longo do tempo.

Esse aumento pode ser explicado por diversos fatores edafoclimáticos, tais como o aumento do período de luz solar com a mudança da estação, a temperatura, a humidade, a disponibilidade de biomassa foliar e o próprio regime de poda do relvado. A influência do clima sobre a fotossíntese é amplamente conhecida, sendo que períodos mais quentes e húmidos podem favorecer o processo. Além disso, a quantidade da luz disponível também é um fator determinante para a fotossíntese, a ação dessa sobre a biomassa foliar impacta diretamente na conversão do dióxido de carbono em compostos orgânicos.

Outro fator relevante a ser considerado é o regime de corte do relvado. O corte impacta diretamente na quantidade de biomassa foliar e conseqüentemente nos processos fotossintéticos uma vez que a diminuição dessa biomassa reduz a área útil possível de realizar a fotossíntese, portanto alterando os fluxos. Nesse sentido, foi possível observar um período no gráfico com maior fluxo do que os outros, o que pode estar relacionado a esses mesmos fatores edafoclimáticos.

No entanto, é importante destacar que no dia 29/03, final de março, houve uma queda brusca nos fluxos fotossintéticos. Essa queda pode ser fortemente explicada pelo corte do relvado na área de estudo. o corte afetou diretamente a fotossíntese das plantas, prejudicando assim a absorção de nutrientes e a emissão de carbono.

A análise dos fluxos de CO_2 mostrou uma contribuição fotossintética significativa, o que é importante ao analisar as emissões de CO_2 . O sequestro de carbono pelas plantas durante a fotossíntese pode compensar as emissões do solo. Para calcular essa contribuição, utilizamos a metodologia dos fluxos finais, que são um resultado das emissões do solo e do sequestro de carbono pelas plantas durante a fotossíntese.

Dessa forma, a análise dos dados herbáceos é fundamental para entendermos como os fatores edafoclimáticos afetam a fotossíntese e os fluxos de carbono. Além disso, pode fornecer-nos informações valiosas para o desenvolvimento de estratégias que maximizem o sequestro de carbono pelas plantas, contribuindo assim para a mitigação das mudanças climáticas.

4.6 Caraterização espacial da área amostrada

De forma a melhor avaliar os valores influentes nos pontos de amostragem foi realizada a matriz de correlação de Spearman figura 4.21. Analisando essas variáveis foi possível notar uma forte influencia da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), o fitovolume bem como a temperatura do solo nos fluxos de CO_2 . Os demais parâmetros analisados em virtude da quantidade de medições e a pequena variação nos cenários analisados não se mostrou suficientemente relevantes e não foram utilizadas nessa análise.

Por se tratar de áreas relvadas onde as medições foram realizadas durante o dia foram utilizados os parâmetros de PAR e fitovolume como os principais parâmetros de analise, tendo em vista que durante esse período era esperado forte influencia da fração fotossintética sobre os pontos de amostra.

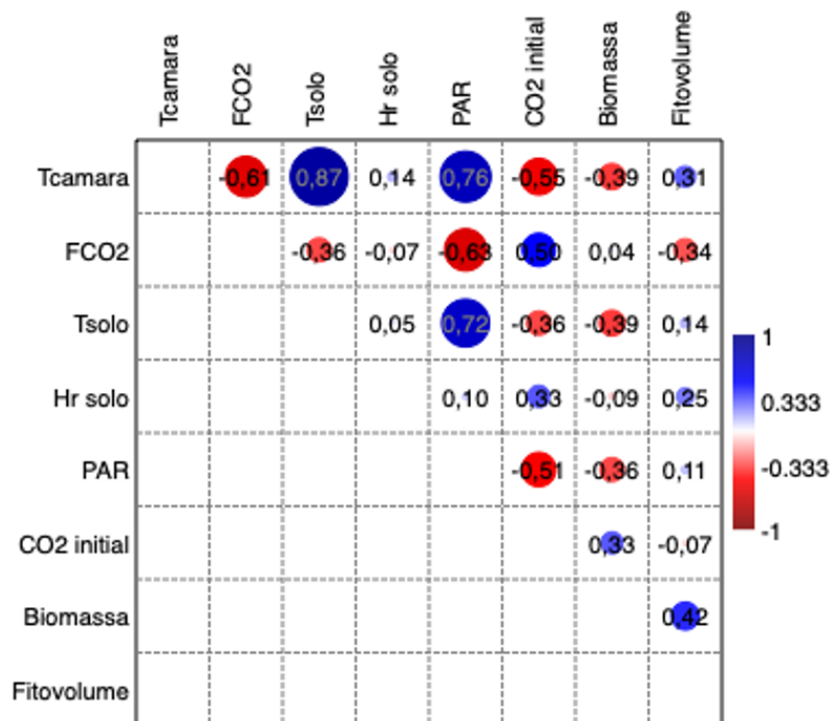


Figura 4.21: Matriz de correlação fatores analisados nas medições espaciais

Na figura 4.22 podemos observar o perfil médio dos pontos obtidos no período de análise, conforme esperado todos os pontos tiveram um comportamento como sumidouros de carbono, existindo, todavia, uma visível diferença entre os pontos A e B. Essa diferença pode ser explicada pelo baixos valores de fitovolume em ambos dos pontos e forte influencia também do PAR. Vale destacar que mesmo se tratando de uma mesma área sempre ira existir diferenças entre as variáveis atuantes em diferentes partes do terreno em períodos diferentes do dia, entretanto é importante analisar como os fluxos se comportam frente a essas mudanças e verificar se eles respondem da mesma forma em toda sua extensão.

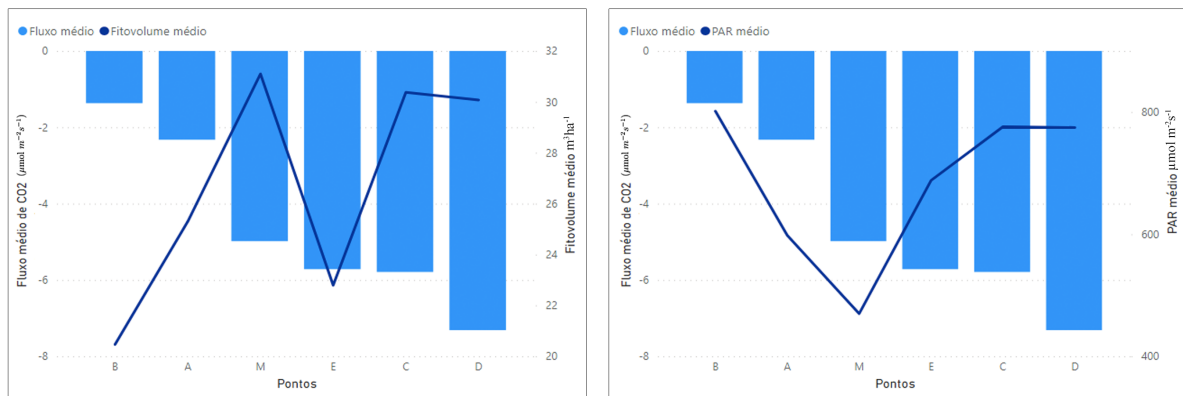


Figura 4.22: Perfil médio dos fluxos de CO_2 e influencia do fitovolume e PAR

Analisando especificamente esses dois pontos mais fora do perfil apresentado nos demais observamos uma forte variação dessas variáveis figura 4.23 que ocasionaram essa divergência no perfil acumulativo. Esses pontos em específicos situavam em áreas com mais períodos de sombra devido a influencia da vegetação ao redor e também o ponto B em específico estava localizado em uma área com uma dispersão mais irregular da vegetação rasteira.

Ao analisarmos esses dois pontos em particular, que se destacam em relação ao perfil apresentado pelos demais, observamos uma notável variação no fitovolume e PAR (conforme mostrado na Figura 4.23). Essa divergência no perfil acumulativo foi ocasionada pela presença de áreas com maior incidência de sombra devido à vegetação circundante. Além disso, o ponto B em questão estava localizado em uma região com

uma dispersão mais irregular da vegetação rasteira o que pode ter impactado nos fluxos desse ponto.

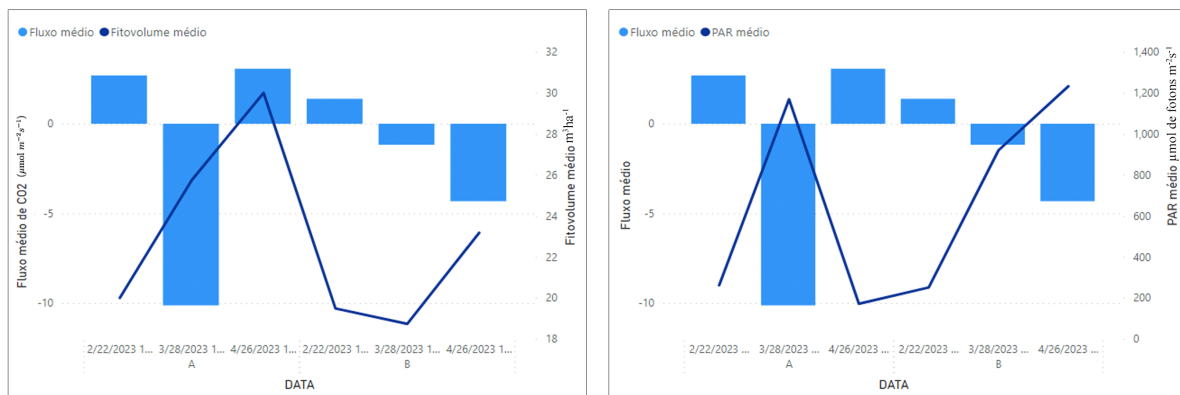


Figura 4.23: Perfil médio dos fluxos de CO_2 e influencia do fitovolume e PAR pontos A e B

Numa análise geral, estes fatores culminaram numa diferença do perfil e da magnitude dos fluxos, mas reforçam a influência de tais fatores bem como as técnicas de gestão desses espaços verdes. Tendo em consideração as interferências existentes nesses pontos específicos, o relvado comportou de maneira similar em toda a sua extensão, obtendo a resposta esperada conforme o observado no ponto principal de amostragem.

Dessa forma mesmo existindo balanços diferentes dos fluxos nas áreas analisadas, o espaço analisado comportou da mesma forma em todos os pontos, tendo as mesmas resposta frente a variação nas suas variáveis edafoclimáticas influentes. Os pontos diferentes serviram para mostrar a dinâmica e heterogeneidade de um relvado natural e como as diferentes práticas de gestão e as heterogeneidades locais podem afetar esse balanço dos fluxos.

4.7 Modelação matemática dos fluxos de CO_2

4.7.1 Modelo construído com base na informação meteorológica

Os dados obtidos da estação meteorológica e a correlação analisada entre as variáveis foram utilizados para criar um modelo matemático capaz de descrever o comportamento dos fluxos de CO_2 . Para isso, foram utilizados os parâmetros T_{amb} , HR_{amb} , RS , Prp e $VelVnt$ na quantificação da fórmula 4.1.

Estes modelos, além de contribuírem para um entendimento mais completo da dinâmica dos fluxos, podem, após validação, ser aplicados noutras regiões para estimar comportamento dos fluxos de CO_2 , sem recorrer a sensores específicos. A modelação matemática é uma ferramenta poderosa para entender e prever o comportamento de sistemas complexos como os fluxos de CO_2 , permitindo que sejam tomadas medidas preventivas e corretivas para mitigar os impactos ambientais negativos.

$$F_{CO_2} = 3,88709 + 0,127768T_{amb} - 0,0146266HR_{amb} - 27,9902R \\ - 0,131631Prp - 0,851045VelVnt + Prp \quad (4.1)$$

A equação matemática obtida a partir dos dados da estação meteorológica apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,7811, o que indica uma boa correlação entre os fluxos de CO_2 e os fatores meteorológicos considerados na modelagem. É importante ressaltar que, apesar dessa forte relação, os fluxos de CO_2 também podem ser influenciados por outros fatores, como a interferência humana e processos fisiológicos das plantas presentes na área de estudo.

No entanto, mesmo com essa dependência e influência de outros fatores, a equação desenvolvida pode ser uma ferramenta útil para a previsão do comportamento dos fluxos de CO_2 em períodos futuros ou em regiões onde não há sensores específicos disponíveis. Dessa forma, a análise dos dados meteorológicos pode auxiliar na compreensão dos processos que afetam a dinâmica do carbono na atmosfera e no desenvolvimento de

estratégias para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

O R^2 é um coeficiente de determinação amplamente utilizado em estatística para avaliar o quão bem um modelo estatístico se ajusta aos dados observados. O valor do R^2 varia de 0 a 1 e é interpretado como a proporção da variação na variável dependente que é explicada pelo modelo.

Na figura 4.24 observa-se os gráficos de perfil médio diário gerados a partir dos dados fluxos e da equação empírica.

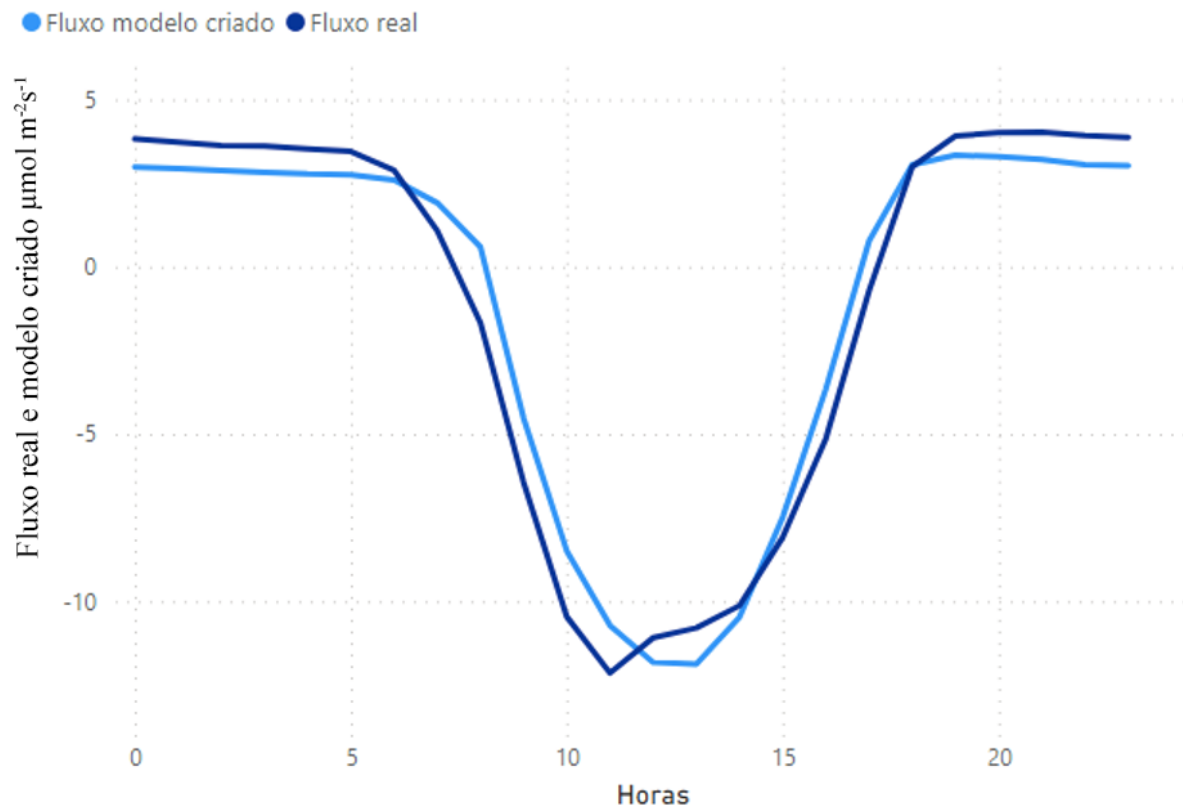


Figura 4.24: Perfil médio diário gerado pelos dados medidos e equação empírica criada

4.7.2 Modelo construído com base em parâmetros edafoclimáticos.

Assim como o modelo matemático construído pelos dados meteorológicos optou se também por desenvolver um modelo de regressão com base nos demais parâmetros mensurados. Todavia alguns valores como o fitovolume e cobertura vegetal não foram levados em conta por não existirem dados suficientes que contemplassem toda a gama de valores medidos na demais variáveis.

Dessa forma foram analisados os parâmetros T_{amb} , HR_{amb} , RS , Prp , $VelVnt$, PAR , T_{solo} e HR_{solo} obtendo assim a equação 4.2.

$$F_{CO_2} = 4,26209 + 0,165791T_{amb} - 0,00492675HR_{amb} - 22,37752RS - 0,11843Prp - 0,758422VelVnt - 0,00256515PAR - 0,0691371T_{solo} - 2,903991HR_{solo} + Prp \quad (4.2)$$

Essa equação obteve um coeficiente de determinação R^2 de 0,7836, sendo assim mais representativa que o modelo anterior por determinação meteorológica. A figura 4.25 apresenta os gráficos de perfil médio diário para o modelo criado e o observado com as medições de fluxos.

No geral, ambos os modelos foram capazes de representar o perfil médio de emissões sendo esse segundo mais representativo devido a maior quantidade de variáveis analisadas.

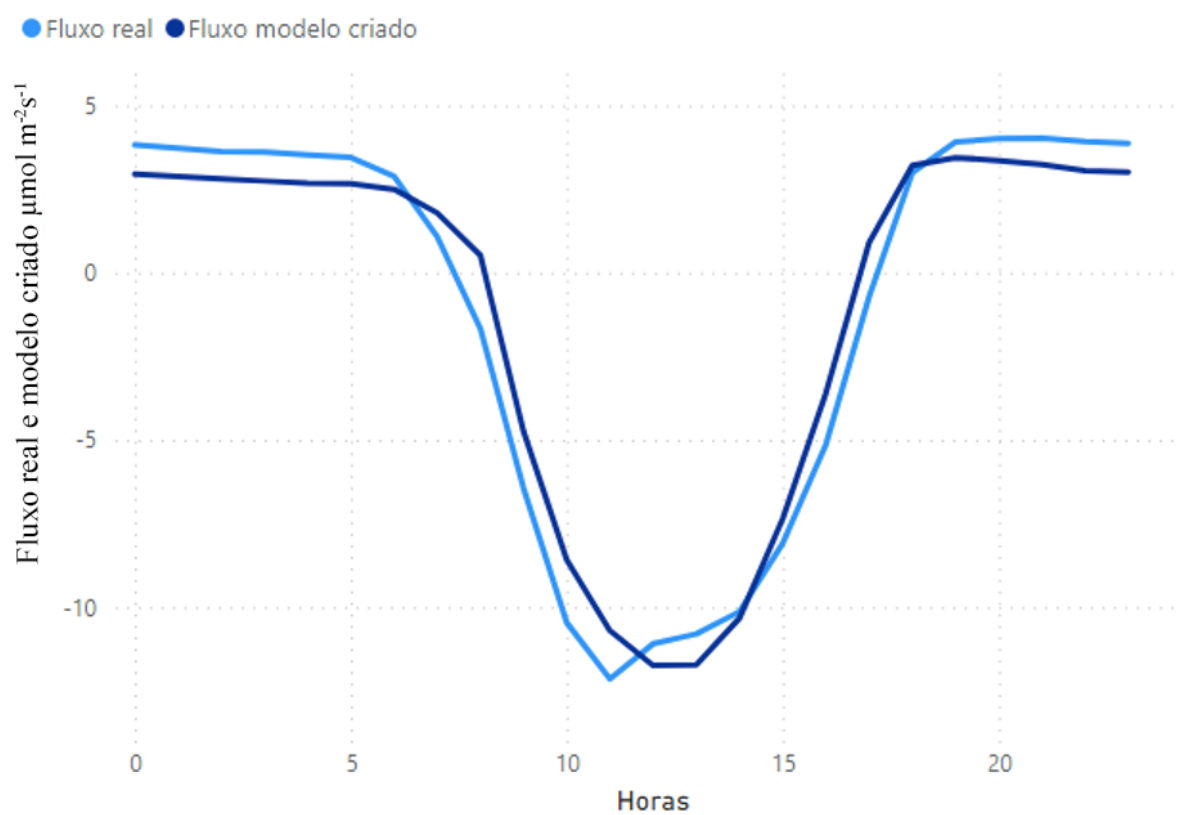


Figura 4.25: Perfil médio diário gerado pelos dados medidos e equação empírica criada

Capítulo 5

Conclusão

O estudo dos fluxos de CO_2 em espaços verdes é de grande importância para a compreensão da dinâmica desses sistemas e para o desenvolvimento de estratégias de gestão adequadas. No presente estudo, foram avaliados diversos fatores como a humidade relativa do ar ambiente, radiação fotossinteticamente ativa, temperatura do solo, teor de água do solo, humidade relativa do ambiente, radiação solar, temperatura do ar ambiente, precipitação e velocidade dos ventos, bem como a influência destes na magnitude e no comportamento dos fluxos de CO_2 , durante o período de janeiro a maio de 2023, compreendendo partes do inverno e da primavera na cidade de Bragança, Portugal.

Os resultados indicaram que o relvado da área de estudo se comportou como um sumidouro de carbono, absorvendo mais carbono do que foi emitido, ou seja, a parcela absorvida durante o período diurno superou as emissões diurnas e noturnas. De entre as variáveis analisadas, os fatores edafoclimáticos mostraram-se mais relevantes, devido à sua forte influência sobre a vegetação e pelos próprios processos do solo que contribuem para a produção e libertação de CO_2 . Deste modo, a gestão adequada dos cortes e rega da relva é de grande relevância para a otimização da superfície como sumidouro de CO_2 .

É importante destacar que a ação antrópica, como a rega, adubação e cortes, pode alterar essas características, impactando no balanço dos fluxos, sendo necessário um cuidado na gestão desses espaços. Variáveis como a radiação fotossinteticamente ativa,

radiação solar, temperatura do solo e temperatura do ar ambiente, segundo análise matemática da matriz de Spearman, mostraram-se determinantes nas taxas de absorção de CO_2 .

A evolução dos fluxos com a mudança da estação e suas respectivas mudanças em parâmetros climáticos pôde ser observada, e a caracterização espacial mostrou-se importante com o solo da região analisada se comportando estatisticamente igual em toda a sua extensão, apesar de algumas diferenças devido a variações em alguns parâmetros. Embora os resultados tenham sido positivos, temos consciência de que é importante integrar no período de avaliação todo o ciclo de crescimento anual deste tipo de vegetação. Todavia, por razões várias não foi possível fazê-lo neste estudo. Em conclusão, a compreensão dos fatores que influenciam os fluxos de CO_2 em espaços verdes é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de gestão adequadas e para a promoção da sustentabilidade desses sistemas. O estudo das variáveis edafoclimáticas mostrou-se relevante na identificação dos fatores mais determinantes da dinâmica dos fluxos verticais de CO_2 , e a gestão das variáveis relacionadas com o crescimento vegetativo pode contribuir significativamente para assegurar um elevado potencial de sumidouro de carbono por parte das superfícies com esta tipologia.

Bibliografia

- [1] European Environment Agency, *Soil, Land and Climate Change*, <https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2019-content-list/articles/soil-land-and-climate-change>.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C. W. Team, R. Pachauri e L. Meyer, eds. Geneva, Switzerland. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- [3] UN-HABITAT, *State of the World's Cities 2010/2011: Bridging the Urban Divide*. London, UK: Earthscan, 2011.
- [4] L. B. Guo e R. M. Gifford, "Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis," *Global Change Biology*, vol. 8, pp. 345–360, 4 abr. de 2002, ISSN: 13541013. DOI: 10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x.
- [5] M.-F. Dignac, D. Derrien, P. Barré et al., "Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review," *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 37, p. 14, 2 abr. de 2017, ISSN: 1774-0746. DOI: 10.1007/s13593-017-0421-2.
- [6] S. Wurst, G. de Deyn e K. Orwin, *Soil biodiversity and functions*, English, D. Wall, R. Bardgett, V. Behan-Pelletier et al., eds. Oxford University Press, 2012, pp. 28–44, ISBN: 9780199575923.

- [7] P. Smith, J. I. House, M. Bustamante et al., “Global change pressures on soils from land use and management,” *Global change biology*, vol. 22, n.º 3, pp. 1008–1028, 2016.
- [8] R. O’Riordan, J. Davies, C. Stevens, J. N. Quinton e C. Boyko, “The ecosystem services of urban soils: A review,” *Geoderma*, vol. 395, p. 115 076, ago. de 2021, ISSN: 00167061. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115076.
- [9] I. C. Prentice, G. Farquhar, M. Fasham et al., *The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide*, 2001.
- [10] A. C. Dioxide, “the Global Carbon Cycle,” *Department of Energy ER-0239, Washing*, 1985.
- [11] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), *Carbon Cycle*, Online, Acesso em: 11 de abril de 2023. URL: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/climate/carbon-cycle>.
- [12] P. Falkowski, R. J. Scholes, E. Boyle et al., “The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System,” *Science*, vol. 290, pp. 291–296, 5490 out. de 2000, ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.290.5490.291.
- [13] C. L. Sabine, R. A. Feely, N. Gruber et al., “The Oceanic Sink for Anthropogenic CO_2 ,” *Science*, vol. 305, pp. 367–371, 5682 jul. de 2004, ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.1097403.
- [14] J. G. Canadell e M. R. Raupach, “Managing Forests for Climate Change Mitigation,” *Science*, vol. 320, pp. 1456–1457, 5882 jun. de 2008, ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.1155458.
- [15] S. Larson, R. Busby, W. Martin et al., “Sustainable Carbon Dioxide Sequestration as Soil Carbon to Achieve Carbon Neutral Status for DoD Lands.,” nov. de 2017.
- [16] U. Stockmann, M. A. Adams, J. W. Crawford et al., “The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon,” *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 164, pp. 80–99, 2013.

- [17] R. Lal, “Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security,” *Science*, vol. 304, pp. 1623–1627, 5677 jun. de 2004, ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.1097396.
- [18] P. Mehra, B. Sarkar, N. Bolan, S. Chowdhury e J. Desbiolles, “Impact of carbonates on the mineralisation of surface soil organic carbon in response to shift in tillage practice,” *Geoderma*, vol. 339, pp. 94–105, abr. de 2019, ISSN: 00167061. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.12.039.
- [19] N. Fierer, A. S. Allen, J. P. Schimel e P. A. Holden, “Controls on microbial CO_2 production: a comparison of surface and subsurface soil horizons,” *Global Change Biology*, vol. 9, pp. 1322–1332, 9 set. de 2003, ISSN: 13541013. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00663.x.
- [20] S. Yang, Y. Dong, X. Song et al., “Vertical distribution and influencing factors of deep soil organic carbon in a typical subtropical agricultural watershed,” *Agriculture, Ecosystems Environment*, vol. 339, p. 108 141, 2022, ISSN: 0167-8809. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108141>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880922002900>.
- [21] F. Pereira, *ENVIRONMENTAL CHEMISTRY Part 1 (in portuguese); QUÍMICA AMBIENTAL Parte 1*, mai. de 2015. DOI: 10.13140/RG.2.2.36125.51689.
- [22] W. H. Schlesinger e J. A. Andrews, “Soil respiration and the global carbon cycle,” *Biogeochemistry*, vol. 48, pp. 7–20, 2000.
- [23] S. WAN, R. J. NORBY, J. LEDFORD e J. F. WELTZIN, “Responses of soil respiration to elevated CO_2 , air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland,” *Global Change Biology*, vol. 13, pp. 2411–2424, 11 nov. de 2007, ISSN: 1354-1013. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01433.x.
- [24] B. Stone e M. O. Rodgers, “Urban Form and Thermal Efficiency: <i>How the Design of Cities Influences the Urban Heat Island Effect</i>,” *Journal of the*

- American Planning Association*, vol. 67, pp. 186–198, 2 jun. de 2001, ISSN: 0194-4363. DOI: 10.1080/01944360108976228.
- [25] J. A. Bassham e M. Calvin, *The path of carbon in photosynthesis*. Springer Berlin Heidelberg, 1960, pp. 884–922. DOI: 10.1007/978-3-642-94798-8_30.
- [26] A. Raghavendra, B. Sunil e R. Bapatla, *C 3 Plants*. Elsevier, 2017, pp. 44–51. DOI: 10.1016/B978-0-12-394807-6.00090-3.
- [27] T. J. Andrews e S. M. Whitney, “Manipulating ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase in the chloroplasts of higher plants,” *Archives of Biochemistry and Biophysics*, vol. 414, pp. 159–169, 2 jun. de 2003, ISSN: 00039861. DOI: 10.1016/S0003-9861(03)00100-0.
- [28] Y. Kuzyakov, “Sources of CO_2 efflux from soil and review of partitioning methods,” *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 38, pp. 425–448, 3 mar. de 2006, ISSN: 00380717. DOI: 10.1016/j.soilbio.2005.08.020.
- [29] E. Paul, S. Morris e S. Bohm, “The determination of soil C pool sizes and turnover rates: Biophysical fractionation and tracers,” *Assessment Methods for Soil Carbon*, pp. 193–206, jan. de 2001.
- [30] R. L. Sinsabaugh, C. L. Lauber, M. N. Weintraub et al., “Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale,” *Ecology Letters*, vol. 11, pp. 1252–1264, 11 nov. de 2008, ISSN: 1461023X. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x.
- [31] J. Six, R. T. Conant, E. A. Paul e K. Paustian, “Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils 155,” *Plant and Soil*, vol. 241, pp. 155–176, 2 2002, ISSN: 0032079X. DOI: 10.1023/A:1016125726789.
- [32] E. Davidson, K. Savage, L. Verchot e R. Navarro, “Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 113, pp. 21–37, 1-4 dez. de 2002, ISSN: 01681923. DOI: 10.1016/S0168-1923(02)00100-4.

- [33] P. Rochette e G. L. Hutchinson, “Measurement of soil respiration in situ: chamber techniques,” *Micrometeorology in agricultural systems*, vol. 47, pp. 247–286, 2005.
- [34] M. Bahn, M. Reichstein, E. A. Davidson et al., “Soil respiration at mean annual temperature predicts annual total across vegetation types and biomes,” *Biogeosciences*, vol. 7, pp. 2147–2157, 7 jul. de 2010, ISSN: 1726-4189. DOI: 10.5194/bg-7-2147-2010.
- [35] J. Lloyd e J. Taylor, “On the temperature dependence of soil respiration,” *Functional ecology*, pp. 315–323, 1994.
- [36] A. Matthias, A. Blackmer e J. Bremner, “A simple chamber technique for field measurement of emissions of nitrous oxide from soils,” Wiley Online Library, rel. téc., 1980.
- [37] A. Matthias e A. P. Hernández, “Modeling temperatures in soil under an opaque cylindrical enclosure,” *Agricultural and forest meteorology*, vol. 90, n.º 1-2, pp. 27–38, 1998.
- [38] E. A. Davidson e I. A. Janssens, “Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change,” *Nature*, vol. 440, n.º 7081, pp. 165–173, 2006.
- [39] T. Zhou, P. Shi, D. Hui e Y. Luo, “Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration (Q₁₀) and its implications for carbon-climate feedback,” *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, vol. 114, n.º G2, 2009.
- [40] R. Jassal, T. Black, G. Drewitt, M. Novak, D. Gaumont-Guay e Z. Nestic, “A model of the production and transport of CO₂ in soil: predicting soil CO₂ concentrations and CO₂ efflux from a forest floor,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 124, pp. 219–236, 3-4 ago. de 2004, ISSN: 01681923. DOI: 10.1016/j.agrformet.2004.01.013.
- [41] N. T. Edwards, “A moving chamber design for measuring soil respiration rates,” *Oikos*, pp. 97–101, 1974.

- [42] P. Rochette e G. L. Hutchinson, “Measurement of soil respiration in situ: chamber techniques,” *Micrometeorology in agricultural systems*, vol. 47, pp. 247–286, 2005.
- [43] L. Taylor e D. F. Hochuli, “Defining greenspace: Multiple uses across multiple disciplines,” *Landscape and Urban Planning*, vol. 158, pp. 25–38, fev. de 2017, ISSN: 01692046. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2016.09.024.
- [44] C. W. Thompson, “Urban open space in the 21st century,” *Landscape and Urban Planning*, vol. 60, pp. 59–72, 2 jul. de 2002, ISSN: 01692046. DOI: 10.1016/S0169-2046(02)00059-2.
- [45] M. Kondo, J. Fluehr, T. McKeon e C. Branas, “Urban Green Space and Its Impact on Human Health,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, p. 445, 3 mar. de 2018, ISSN: 1660-4601. DOI: 10.3390/ijerph15030445.
- [46] H. Madureira, T. Andresen e A. Monteiro, “Green structure and planning evolution in Porto,” *Urban Forestry Urban Greening*, vol. 10, pp. 141–149, 2 jan. de 2011, ISSN: 16188667. DOI: 10.1016/j.ufug.2010.12.004.
- [47] M. Rakhshandehroo, M. Mohd Yusof, R. Arabi, M. Parva e A. Nochian, “The environmental benefits of urban open green spaces,” *Alam Cipta*, vol. 10, n.º 1, pp. 10–16, 2017.
- [48] C. Hickman, “‘To brighten the aspect of our streets and increase the health and enjoyment of our city’: The National Health Society and urban green space in late-nineteenth century London,” *Landscape and Urban Planning*, vol. 118, pp. 112–119, out. de 2013, ISSN: 01692046. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2012.09.007.
- [49] T. Beatley, *Biophilic cities: integrating nature into urban design and planning*. Island Press, 2011.
- [50] Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, *Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território*. Lisboa: Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 2008.

- [51] M. P. R. Pereira, “Espaços Verdes Urbanos: Contributo para a optimização do planeamento e gestão Freguesia de Oeiras e São Julião da Barra,” Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2011. URL: https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/5318/1/ulfa096262_tm_Mariana_Pereira.pdf.
- [52] J. Felipe, M. V. P. Rodrigues, A. D. Ferreira, E. S. Fonseca, G. G. d. S. Ribeiro e A. R. A. Arana, “Physical activity and environment: the influence of urban green spaces on health,” *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, vol. 25, pp. 305–309, 2019.
- [53] A. C. K. Lee e R. Maheswaran, “The health benefits of urban green spaces: a review of the evidence,” *Journal of Public Health*, vol. 33, pp. 212–222, 2 jun. de 2011, ISSN: 1741-3842. DOI: 10.1093/pubmed/fdq068.
- [54] P. Tor-ngern e L. Puangchit, “Effects of varying soil and atmospheric water deficit on water use characteristics of tropical street tree species,” *Urban Forestry Urban Greening*, vol. 36, pp. 76–83, dez. de 2018, ISSN: 16188667. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.10.010.
- [55] M. Ariluoma, J. Ottelin, R. Hautamäki, E.-M. Tuhkanen e M. Mänttari, “Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki,” *Urban Forestry Urban Greening*, vol. 57, p. 126939, jan. de 2021, ISSN: 16188667. DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126939.
- [56] A. Makhelouf, “The effect of green spaces on urban climate and pollution,” 2009.
- [57] A. de Moraes e A. L. Palhano, “Fisiologia da produção de plantas forrageiras,” 2002.
- [58] L. Taiz, E. Zeiger, I. M. Møller e A. Murphy, *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. Artmed Editora, 2017.
- [59] N. Costa, J. Magalhães, C. Townsend e V. Paulino, “Fisiologia e Manejo de Plantas Forrageiras,” em jan. de 2004, pp. 9–30, ISBN: 85-98654-01-9.

- [60] United Nations, *Emissions Gap Report 2019*. United Nations Environment Programme, 2019.
- [61] T. R. Oke, “The energetic basis of the urban heat island,” *Quarterly journal of the royal meteorological society*, vol. 108, n.º 455, pp. 1–24, 1982.
- [62] UNEP, *District Energy in Cities: Unlocking the Potential of Energy Efficiency and Renewable*. 2016.
- [63] *Resilient Cities 2015: 6th Global Forum on Urban Resilience and Adaptation*, 2015.
- [64] L. Kleerekoper, M. van Esch e T. B. Salcedo, “How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 64, pp. 30–38, jul. de 2012, ISSN: 09213449. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.06.004.
- [65] E. J. Gago, J. Roldan, R. Pacheco-Torres e J. Ordóñez, “The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 25, pp. 749–758, 2013.
- [66] C. D. Keeling, “The influence of Mauna Loa Observatory on the development of atmospheric CO_2 research,” *In Mauna Loa Observatory. A 20th Anniversary Report. (National Oceanic and Atmospheric Administration Special Report*, pp. 36–54, 1978.
- [67] C. D. Keeling, “The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere,” *Tellus*, vol. 12, pp. 200–203, 2 mai. de 1960, ISSN: 00402826. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1960.tb01300.x.
- [68] National Geographic Education, *The Keeling Curve*, <https://education.nationalgeographic.org/resource/keeling-curve>, Acesso em: 20 Feb. 2023.
- [69] D. Baldocchi, “Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—the state and future of the eddy covariance method,” *Global change biology*, vol. 20, n.º 12, pp. 3600–3609, 2014.

- [70] J. P. Anderson, “Soil respiration,” *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, vol. 9, pp. 831–871, 1983.
- [71] D. Crisp, H. R. Pollock, R. Rosenberg et al., “The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 10, n.º 1, pp. 59–81, 2017.
- [72] D. D. BALDOCCHI, “Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future,” *Global Change Biology*, vol. 9, pp. 479–492, 4 abr. de 2003, ISSN: 13541013. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x.
- [73] L. Kutzbach, J. Schneider, T. Sachs et al., “CO₂ flux determination by closed-chamber methods can be seriously biased by inappropriate application of linear regression,” *Biogeosciences*, vol. 4, pp. 1005–1025, 6 nov. de 2007, ISSN: 1726-4189. DOI: 10.5194/bg-4-1005-2007.
- [74] Y. Bekku, H. Koizumi, T. Nakadai e H. Iwaki, “Measurement of soil respiration using closed chamber method: An IRGA technique,” *Ecological Research*, vol. 10, pp. 369–373, 3 dez. de 1995, ISSN: 09123814. DOI: 10.1007/BF02347863.
- [75] M. Aubinet, T. Vesala e D. Papale, *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [76] L. Jensen, T. Mueller, K. Tate, D. Ross, J. Magid e N. Nielsen, “Soil surface CO₂ flux as an index of soil respiration in situ: A comparison of two chamber methods,” *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 28, pp. 1297–1306, 10-11 out. de 1996, ISSN: 00380717. DOI: 10.1016/S0038-0717(96)00136-8.
- [77] L. B. Reis, “Estudo Comparativo dos Fluxos de CO₂ na Interface Solo-Atmosfera em Sistema Agroflorestal com Maneio Contrastante no Nordeste de Portugal,” tese de doutoramento, Instituto Politecnico de Braganca (Portugal), 2019.

- [78] D. D. Baldocchi, B. B. Hincks e T. P. Meyers, “Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods,” *Ecology*, vol. 69, n.º 5, pp. 1331–1340, 1988.
- [79] M. Reichstein, A. Rey, A. Freibauer et al., “Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices,” *Global biogeochemical cycles*, vol. 17, n.º 4, 2003.
- [80] E. Davidson, K. Savage, L. Verchot e R. Navarro, “Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 113, n.º 1-4, pp. 21–37, 2002.
- [81] LI-COR, *LI-8100A Automated Soil Gas Flux System*, <https://licor.app.boxenterprise.net/s/yya24c0b4nfcg2vqglsq>, Acesso em: 24 de abril de 2023.
- [82] LI-COR, *LI-190R Sensor Quântico*, <https://www.licor.com/env/products/light/quantum>, 2023.
- [83] Campbell Scientific, Inc., *CR200X - Datalogger*, <https://www.campbellsci.com/cr200x>, Acesso em: 25 de abril de 2023, 2021.
- [84] I. Campbell Scientific, *ARG100 - Tipping Bucket Raingauge (0.2mm/tip)*, <https://www.campbellsci.eu/arg100>, [Online; Acesso em: 27 de abril de 2023], 2021.
- [85] C. Scientific, *CS215-L - Temperature and Relative Humidity Probe*, <https://www.campbellsci.com.br/cs215-1>, 2021.
- [86] L. Meteo, *ORA Wind direction sensor*, 2021. URL: <https://www.lambrecht.net/en/products/wind/wind-direction-sensor-ora>.
- [87] *Pyranometer*, <https://www.apogeeinstruments.com/pyranometer/>, Acesso em: on: 27 de abril de 2023.

- [88] D. Armand, M. Etienne, C. Legrand, J. Marechal e J. Valette, “Phytovolume, phytomasse et relations structurales chez quelques arbustes méditerranéens,” *Annales des Sciences Forestières*, vol. 50, pp. 79–89, 1 1993, ISSN: 0003-4312. DOI: 10.1051/forest:19930106.
- [89] F. S. Chapin, P. A. Matson, H. A. Mooney e P. M. Vitousek, “Principles of terrestrial ecosystem ecology,” 2002.
- [90] A. Kross, H. McNairn, D. Lapen, M. Sunohara e C. Champagne, “Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 34, pp. 235–248, 2015.
- [91] M. L. Goulden, J. W. Munger, S.-M. Fan, B. C. Daube e S. C. Wofsy, “Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy,” *Global change biology*, vol. 2, n.º 3, pp. 169–182, 1996.
- [92] K. Sakowska, L. Vescovo, B. Marcolla, R. Juszczak, J. Olejnik e D. Gianelle, “Monitoring of carbon dioxide fluxes in a subalpine grassland ecosystem of the Italian Alps using a multispectral sensor,” *Biogeosciences*, vol. 11, n.º 17, pp. 4695–4712, 2014.
- [93] J. A. Bunce, “Effects of humidity on photosynthesis,” *Journal of Experimental Botany*, vol. 35, n.º 9, pp. 1245–1251, 1984.
- [94] A. M. Almeida et al., “Fluxo de CO_2 proveniente da respiração do solo sob pastagens e fragmentos de Floresta Atlântica em regeneração (RJ),” 2010.
- [95] P. Zhang, X. Zhou, J. Li, Z. Guo e G. Du, “Space resource utilisation: A novel indicator to quantify species competitive ability for light,” *Scientific Reports*, vol. 5, p. 16 832, nov. de 2015. DOI: 10.1038/srep16832.

- [96] V. P. Gutschick, “Photosynthesis model for C3 leaves incorporating CO_2 transport, propagation of radiation, and biochemistry, 1: Kinetics and their parametrization [Glycine max].,” *Photosynthetica*, 1984.
- [97] D. Baldocchi, R. Valentini, S. Running, W. Oechel e R. Dahlman, “Strategies for measuring and modelling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems,” *Global change biology*, vol. 2, n.º 3, pp. 159–168, 1996.