

Fluxos de CO₂ através da interface atmosfera / solo relvado de uma área verde urbana do Norte Interior de Portugal

Alan Victor da Silva

*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 - Câmpus Medianeira.*

Orientado por

Manuel Feliciano (IPB)

Maria do Sameiro Patrício (IPB)

Fabiana Schultz UTFPR)

Bragança

2021

Fluxos de CO₂ através da interface atmosfera / solo relvado de uma área verde urbana do Norte Interior de Portugal

Alan Victor da Silva

*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 - Câmpus Medianeira.*

Orientado por

Manuel Feliciano (IPB)

Maria do Sameiro Patrício (IPB)

Doutora Fabiana Schultz UTFPR)

Bragança

2021

AGRADECIMENTOS

Começo os meus agradecimentos às principais pessoas que possibilitaram a realização deste trabalho, os meus professores orientadores: Prof. Doutor Manuel Feliciano, Prof.^a Doutora Maria do Sameiro Patrício e Prof.^a Doutora Fabiana Schultz. Obrigado por me ofertarem o trabalho, direcionarem, ensinarem e corresponderem a todas as minhas necessidades pessoais sem esquecerem as minhas responsabilidades, que certamente possibilitou o meu crescimento profissional e amadurecimento pessoal.

Agradeço às duas instituições de ensino: Instituto Politécnico de Bragança (IPB) e Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), que possibilitaram a execução deste trabalho através da disponibilização das estruturas e de conhecimentos, e, ainda, da promoção da intercomunicação entre as duas nações. E dentro desse espaço não posso deixar de reconhecer todos os excelentes professores que passaram e deixaram-me um pouco de seus conhecimentos e valores, em especial o Prof. Doutor Jean Lafay, Prof. Doutor Orlando Rodrigues, Profa. Anabela Martins e Prof. Doutor Eduardo Lied. Evolui muito trabalhando aos vossos lados.

Agradeço também à minha mãe, Silvana Ribeiro Cordeiro e ao meu pai, Almir Pereira da Silva por em momento nenhum, em minha jornada acadêmica, duvidarem do meu potencial de alcançar todos os meus objetivos. Sigo eternamente grato pelo apoio em quaisquer que fosse a causa, além de todo o exemplo que vocês me deram para me tornar a pessoa que eu devo ser. Por fim, não posso deixar de agradecer ao Antônio Castro pelo incentivo fundamental, e a todos os amigos e colegas que estiveram presentes durante esta fase, sendo meus companheiros, meu alicerce e por me incentivarem a seguir cada vez mais longe. Em especial ao Matheus Dias e Eloiza Piovesan, que conviveram comigo a cada dia dessa caminhada.

RESUMO

As alterações climáticas tornaram-se um dos assuntos ambientais mais preocupantes da atualidade, pois os seus efeitos transpõem todas as fronteiras, sejam elas naturais ou antrópicas. Atualmente a grande generalidade da comunidade científica justifica a agudização das alterações climáticas às elevadas emissões dos Gases do Efeito Estufa, como o dióxido de carbono. Muitas formas de mitigar este efeito estão sendo estudadas, e entre elas tem surgido o fomento de espaços verdes urbanos enquanto potenciais sumidouros de CO₂. Neste estudo procurou-se avaliar o potencial de um espaço verde relvado localizado na cidade de Bragança, região de Trás-os-Montes no norte de Portugal, como sumidouro de carbono, recorrendo à medição da transferência de dióxido de carbono através da interface atmosfera/superfície num espaço relvado, submetido a cortes regulares, durante o período compreendido entre fevereiro e junho de 2021. Os fluxos de CO₂ foram medidos em contínuo com recurso ao sistema LI-8100A da LI-COR Biosciences®, equipado com câmara transparente. O estudo envolveu também a monitorização de parâmetros edáficos, meteorológicos e, ainda, de parâmetros vegetativos como a percentagem de coberto vegetal e a biomassa produzida. Os resultados obtidos mostram a existência de um padrão intradiário expectável em que a superfície relvada se comporta como sumidouro durante uma parte considerável das horas solares e como emissor no período complementar. Este padrão foi visível ao longo do período de observação, mas marcado por uma diminuição das capacidades absorção de CO₂ pela superfície e, simultaneamente, pelo aumento das emissões deste constituinte, ao longo do período de observação. Em termos médios, a superfície comportou-se como fonte de CO₂ durante o período de avaliação, com um fluxo líquido de emissão de aproximadamente 0,7 g C m⁻² d⁻¹. Os resultados demonstraram igualmente uma forte relação entre os parâmetros do solo, vegetação e meteorológicos na magnitude e variabilidade dos fluxos de CO₂, sendo os fatores que mais favoreceram a absorção a radiação solar, temperatura do solo, temperatura do ar ambiente e fitovolume e os que mais promoveram as emissões a precipitação, a humidade relativa do ar e o teor de humidade do solo. Com os modelos matemáticos multiregressivos desenvolvidos foi também possível demonstrar a capacidade preditiva de fluxos de CO₂ a partir da utilização exclusiva de parâmetros apenas meteorológicos ou de parâmetros edafoclimáticos e vegetativos.

ABSTRACT

The climate changes became one of the most worrying environmental issues today, as their effects cross all borders, whether natural or anthropogenic. Currently, the great generality of the scientific community justifies the aggravation of climate changes to the high categories of greenhouse gases, such as carbon dioxide. Many ways to mitigate this effect are being studied, and among them has emerged the promotion of urban green spaces as potential CO₂ sinks. In this study we plan to evaluate the potential of a green grassy space located in the city of Bragança, Trás-os-Montes region in northern Portugal, as a carbon sink, using the reference of carbon dioxide transfer through the atmosphere / surface in a lawn area, submitted to regular cuts, during the period between February and June 2021. CO₂ fluxes were measured continuously using the LI-COR Biosciences ® LI-8100A system, equipped with a transparent chamber. The study also involved the analysis of edaphic and meteorological parameters and also of vegetative parameters such as the percentage of vegetation cover and the biomass covered. The results found show the existence of an expected intraday pattern in which the grassed surface behaves as a sink during a substantial part of the solar hours and as an emitter in the complementary period. This pattern was visible throughout the observation period, but marked by a reduction in the capacity of CO₂ absorption by the surface and, at the same time, by the increase emission of this constituent, throughout the observation period. In average terms, the surface behaved as a source of CO₂ during the evaluation period, with a net emission flux of approximately 0.7 g C m⁻² d⁻¹. The results also showed a strong relationship between soil, vegetation and meteorological parameters in the magnitude and variability of CO₂ fluxes, being the factors that most favored the absorption solar radiation, soil temperature, ambient air temperature and phytovolume and those that most promoted emission precipitation, the relative humidity of the air and the moisture content of the soil. With the developed multiregressive mathematical models, it was also possible to demonstrate the predictive capacity of CO₂ fluxes from the exclusive use of meteorological parameters only or edaphoclimatic and vegetative parameters.

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 AMBIENTE URBANO E ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS	4
2.1.1 Ambiente urbano e influência antrópica.....	4
2.1.2 Urbanização e microclima urbano	6
2.2 ESPAÇOS VERDES URBANOS	8
2.3 CICLO DO CARBONO	10
2.4 CARBONO DO SOLO.....	12
2.5 RESPIRAÇÃO DO SOLO E FLUXOS DE CO ₂	13
2.6 PROCESSOS BIOLÓGICOS INFLUENTES.....	14
2.7 ASPETOS MORFOFISIOLÓGICOS DO RELVADO.....	17
2.8 MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE FLUXO DE CO ₂	19
2.8.1 Métodos Micrometeorológicos.....	20
2.8.2 Método da Caixa.....	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1 LOCAL DE ESTUDO	26
3.2 INSTRUMENTAÇÃO	29
3.2.1 Descrição dos equipamentos de medição	29
3.2.2 Metodologia de cálculo de fluxo	31
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	33
3.4 MEDIÇÃO DE OUTROS PARÂMETROS AMBIENTAIS	35
3.4.1 Parâmetros Meteorológicos	35
3.4.2 Avaliação do Coberto Vegetal.....	37
3.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 PARÂMETROS EDAFOCLIMÁTICOS.....	41
4.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS VEGETATIVOS.....	47

4.2.1	Análise do coberto herbáceo da superfície	47
4.2.2	Avaliação da biomassa	48
4.2.3	Avaliação do fitovolume	50
4.3	TRANSFERÊNCIA LÍQUIDA DE CO ₂ NA INTERFACE ATMOSFERA/SUPERFICIE	55
4.3.1	Fluxos de CO ₂ em superfície sem cobertura vegetal.....	55
4.3.2	Fluxos de CO ₂ em superfície com coberto vegetal.....	56
4.3.3	Balço líquido do fluxo CO ₂ ao longo do período de avaliação.	64
4.4	AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE FLUXOS DE CO ₂ E OS PARÂMETROS EDAFOCLIMÁTICOS E VEGETATIVOS	65
4.5	AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO FOTOSSINTÉTICA	70
4.6	MODELAÇÃO MATEMÁTICA DOS FLUXOS DE CO ₂	71
4.6.1	Modelo construído com base na informação meteorológica.....	71
4.6.2	Modelo construído com base em parâmetros edafoclimáticos e vegetativos.	72
5.	CONCLUSÃO	74
	REFERENCIAS	76

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ILHA DE CALOR URBANO: PERFIL DE TEMPERATURA AMBIENTE URBANA, SUBURBANA E RURAL.....	7
FIGURA 2 – BALANÇO ENERGÉTICO DA SUPERFÍCIE URBANA.....	8
FIGURA 3 – O CICLO DO CARBONO NO SISTEMA NATURAL TERRESTRE..	11
FIGURA 4 – CICLO GLOBAL DO CARBONO (NATURAL E ANTRÓPICO).....	12
FIGURA 5 – HORIZONTES BÁSICOS DO SOLO.	13
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FLUXO DE ENERGIA, CARBONO E NUTRIENTES NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ORGANISMO.	15
FIGURA 7 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DAS REAÇÕES DO CICLO DE CALVIN (SEM ESTEQUIOMETRIA).	16
FIGURA 8 – CRESCIMENTO POTENCIAL DE GRAMÍNEAS E LEGUMINOSAS FORRAGEIRAS EM RESPOSTA À TEMPERATURA.	17
FIGURA 9 – ESTRUTURA DE UM AFILHO 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) H1, H2, H3 = ALTURAS DE CORTE OU PASTOREIO.	18
FIGURA 10 – MAPA DO LIMITE ADMINISTRATIVO DO MUNICÍPIO DE BRAGANÇA, COM IDENTIFICAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO.	26
FIGURA 11 – LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE ANÁLISE E AS TIPOLOGIAS DE ESPAÇO VERDE INDICADAS POR CORES: CAB (PRIVADO; AMARELO); EIXO ATLÂNTICO (PÚBLICO; AZUL); ÁREA RESIDENCIAL E ESTÁDIO MUNICIPAL (TIPOLOGIA NÃO FORMALIZADA; VERMELHO).....	27

FIGURA 12 – ÁREA DE SOLO RELVADO CIRCUNDANTE AO PONTO DE INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS: A) B) C) D) E) PAISAGEM INTERNA AO CLUBE; F) PAISAGEM EXTERNA AO CLUBE.	28
FIGURA 13 - O MÓDULO DO ANALISADOR DE GÁS DA LI-COR BIOSCIENCES (MODELO LI-8100A): A) CÂMERA TRANSPARENTE DE LONGO PRAZO; B) CABINE DO ANALISADOR DE GÁS INFRAVERMELHO; C) INTERFACE DE SENSOR AUXILIAR; D) SENSOR QUÂNTICO LI-190R; E) SENSOR DE HUMIDADE DO SOLO; F) SONDA TERMISTOR DE TEMPERATURA DO SOLO 8100-203.....	30
FIGURA 14 - CONCENTRAÇÃO DE CO ₂ DENTRO DA CÂMARA, APÓS O FECHAMENTO DA MESMA. OS CÍRCULOS AZUIS REPRESENTAM A PRÉ-MEDIÇÃO; OS CÍRCULOS VERDES A EVOLUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DURANTE O PERÍODO DE MEDIÇÃO E A LINHA ROXA O AJUSTE EXPONENCIAL.	32
FIGURA 15 – ÁREAS DE AMOSTRAGEM DA TRANSFERÊNCIA LÍQUIDA DE CO ₂ : A) SOLO RELVADO, B) SOLO EXPOSTO.....	33
FIGURA 16 – DISPOSITIVO EXPERIMENTAL COM EQUIPAMENTOS E SENSORES INSTALADOS.	34
FIGURA 17 – ESQUEMA DO CÁLCULO DO DESLOCAMENTO DA CÂMARA EM RELAÇÃO A SUPERFÍCIE DO SOLO.....	35
FIGURA 18 – KIT DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA E ANALISADOR DE FLUXO INSTALADOS NO LOCAL DE ESTUDO.....	36
FIGURA 19 – COMPONENTES DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA: A) DATALOGGER; B) ANEMOSCÓPIO; C) ANEMÓMETRO; D) SENSOR DE TEMPERATURA E HUMIDADE RELATIVA; E) PIRANÓMETRO; F) RAIN GAUGE.	37
FIGURA 20 – MÉTODOS SECAGEM E PESAGEM DA BIOMASSA FRESCA E SECA.....	38
FIGURA 21 – PARÂMETROS EDAFOCLIMÁTICOS: A) EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA DO SOLO (°C); B) PERFIL MÉDIO DIÁRIO DA	

TEMPERATURA DO SOLO (°C); **C)** EVOLUÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA AMBIENTE (°C); **D)** PERFIL MÉDIO DIÁRIO DA TEMPERATURA AMBIENTE (°C); **E)** EVOLUÇÃO TEMPORAL DA HUMIDADE RELATIVA DO AR NO INTERIOR DA CAIXA (%); **F)** PERFIL MÉDIO DIÁRIO DA HUMIDADE RELATIVA DO AR NO INTERIOR DA CAIXA (%); **G)** EVOLUÇÃO TEMPORAL DA HUMIDADE RELATIVA DO AR AMBIENTE (%); **H)** PERFIL MÉDIO DIÁRIO DA HUMIDADE RELATIVA DO AR AMBIENTE (%)..... 42

FIGURA 22 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO (MM). SENDO AS BARRAS LARANJAS A PRECIPITAÇÃO ADVINDA DAS REGAS REALIZADAS PELO ZELADOR E AS BARRAS AZUIS ADVINDO DAS CHUVAS..... 44

FIGURA 23 – ROSA DOS VENTOS ACOPLADA À VELOCIDADE DOS VENTOS (M S⁻¹). 45

FIGURA 24 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO ESTADO VEGETATIVO DO SOLO RELVADO COM BASE NA ANÁLISE FOTOGRÁFICA DOS DIAS: **A)** 22 DE FEVEREIRO; **B)** 10 DE MARÇO; **C)** 24 DE MARÇO; **D)** 07 DE ABRIL; **E)** 28 DE ABRIL; **F)** 12 DE MAIO; **G)** 18 DE MAIO; **H)** 10 DE JUNHO; **I)** 19 DE JUNHO. ... 47

FIGURA 25 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PERCENTAGEM DE COBERTO VEGETAL..... 48

FIGURA 26 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA BIOMASSA DE CARBONO PRODUZIDA, EM G/M² NO INTERIOR E NO EXTERIOR DO COLAR DE MEDIÇÃO NO PERÍODO EM ANÁLISE. 49

FIGURA 27 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PERCENTAGEM DE HUMIDADE DA BIOMASSA DO INTERIOR E DO EXTERIOR DO COLAR DE MEDIÇÃO AO LONGO DO TEMPO DE ANÁLISE. 50

FIGURA 28 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO FITOVOLUME NO INTERIOR (VERDE ESCURO) E NO EXTERIOR DO COLAR DE MEDIÇÃO (AMARELO) AO LONGO DO TEMPO DE ANÁLISE. A COLORAÇÃO VERDE CLARA REPRESENTA AS MEDIÇÕES FEITAS APÓS O CORTE DO RELVADO..... 50

FIGURA 29 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO FITOVOLUME DO RELVADO NA ÁREA DE MEDIÇÃO DOS FLUXOS, COM O CRESCIMENTO ENTRE INTERVALOS ESTIMADO LINEARMENTE..... 51

FIGURA 30 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO FITOVOLUME DA ÁREA DE MEDIÇÃO DOS FLUXOS PARA CADA MÊS DE ANÁLISE: A) FEVEREIRO E MARÇO; B) MARÇO E ABRIL; C) ABRIL E MAIO E D) MAIO E JUNHO.....	52
FIGURA 31 – A) EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS FLUXOS DE CO ₂ NO SOLO EXPOSTO PARA O PERÍODO DE AVALIAÇÃO, OBTIDOS PELO MÉTODO DE REGRESSÃO EXPONENCIAL E LINEAR; B) PERFIL MÉDIO DIÁRIO DOS FLUXOS DE CO ₂ PARA O PERÍODO DE AVALIAÇÃO, OBTIDOS PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR E EXPONENCIAL.	55
FIGURA 32 - BOXPLOT DO FLUXO NO SOLO EXPOSTO PELOS MÉTODOS DE REGRESSÃO EXPONENCIAL E LINEAR.....	56
FIGURA 33 – A) EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS FLUXOS DE CO ₂ AO LONGO DO PERÍODO DE AVALIAÇÃO, OBTIDOS PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR; B) PERFIL MÉDIO DIÁRIO DOS FLUXOS DE CO ₂ PARA O PERÍODO DE AVALIAÇÃO, OBTIDOS PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR; C) EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS FLUXOS DE CO ₂ AO LONGO DO PERÍODO DE AVALIAÇÃO, OBTIDOS PELO MÉTODO DE REGRESSÃO EXPONENCIAL; D) PERFIL MÉDIO DIÁRIO DOS FLUXOS DE CO ₂ PARA O PERÍODO DE AVALIAÇÃO, OBTIDOS PELO MÉTODO DE REGRESSÃO EXPONENCIAL. ...	57
FIGURA 34 - BOXPLOT DO FLUXO NO SOLO RELVADO PELOS MÉTODOS DE REGRESSÃO EXPONENCIAL E LINEAR.....	58
FIGURA 35 – BOXPLOT DO FLUXO NO SOLO RELVADO PELO MÉTODO DE REGRESSÃO EXPONENCIAL EM DIFERENTES PERÍODOS.	60
FIGURA 36 – BOXPLOT DO FLUXO NO SOLO RELVADO PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR EM DIFERENTES PERÍODOS.....	60
FIGURA 37 – A) COMPARAÇÃO DOS PERFIS MÉDIOS DIÁRIOS DE CADA MÊS DE ANÁLISE PELO MÉTODO DE REGRESSÃO EXPONENCIAL; B) COMPARAÇÃO DOS PERFIS MÉDIOS DIÁRIOS DE CADA MÊS DE ANÁLISE PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR.....	61
FIGURA 38 – BALANÇO LÍQUIDO DOS SOMATÓRIOS DAS FRAÇÕES DE FLUXO MÁSSICO NO DECORRER DO TEMPO DE ANÁLISE PELO MÉTODO DE REGRESSÃO EXPONENCIAL.....	64

FIGURA 39 – BALANÇO LÍQUIDO DO SOMATÓRIO DAS FRAÇÕES DE FLUXO MÁSSICO NO DECORRER DO TEMPO DE ANÁLISE PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR.	64
FIGURA 40 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DA MÉDIA DIÁRIA DA FRAÇÃO FOTOSSINTÉTICA PELA REGRESSÃO EXPONENCIAL – GLOBAL.	70
FIGURA 41 – A) EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS TRANSFERÊNCIA LÍQUIDA DE CO ₂ ESTIMADA PELA EQUAÇÃO EMPÍRICA DE MULTIREGRESSÃO LINEAR (DADOS ESTAÇÃO METEOROLÓGICA); B) PERFIL MÉDIO DIÁRIO DOS FLUXOS ESTIMADO PELA EQUAÇÃO EMPÍRICA (DADOS ESTAÇÃO METEOROLÓGICA) E PELOS AJUSTAMENTOS DE REGRESSÃO LINEAR E EXPONENCIAL.	72
FIGURA 42 – A) EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS FLUXOS DE CO ₂ AO LONGO DO PERÍODO DE AVALIAÇÃO, OBTIDOS PALE EQUAÇÃO EMPÍRICA DE MULTIREGRESSÃO LINEAR (DADOS EDAFOCLIMÁTICOS E VEGETATIVO); B) PERFIL MÉDIO DIÁRIO DOS FLUXOS PARA O PERÍODO DE AVALIAÇÃO PELA EQUAÇÃO EMPÍRICA, MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR E EXPONENCIAL.	73

LISTA DE TABELA

TABELA 1 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DESCRITIVOS RELATIVOS AOS PARÂMETROS EDAFOCLIMÁTICOS E METEOROLÓGICOS.	46
TABELA 2 – DADOS AMOSTRAIS DOS PARÂMETROS VEGETATIVOS.	54
TABELA 3 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DESCRITIVOS DO FLUXO DE CO₂ DO SOLO EXPOSTO POR REGRESSÃO EXPONENCIAL E LINEAR.	56
TABELA 4 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DESCRITIVOS DO FLUXO DE CO₂ DO SOLO RELVADO POR REGRESSÃO EXPONENCIAL E LINEAR.	59
TABELA 5 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DESCRITIVOS DO FLUXO DE CO₂ DO SOLO RELVADO POR REGRESSÃO EXPONENCIAL E LINEAR DE ACORDO COM OS MESES DE ANÁLISE.	61
TABELA 6 – COMPARAÇÃO DE FLUXOS DE CO₂ OBSERVADOS EM DIFERENTES ESTUDOS.	63
TABELA 7 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE SPEARMAN PARA AS VARIÁVEIS DE FLUXO DE CO₂ E CLIMÁTICAS NA ÁREA RELVADA.	69

LISTA DE EQUAÇÕES

$nCO_2 + nH_2O \xrightarrow{\text{Luz Solar}} (CH_2O)_n + nO_2$	(Eq. 1)..... 15
$RuDP + CO_2 + H_2O \longrightarrow 2[3fosfoglicerato] + 2H^+$	(Eq. 2) 16
$F = wc$	(Eq. 3)..... 20
$F = wc + w'c' = w'c'$	(Eq. 4)..... 20
$F_s = w's' = -K_s(z) \frac{\delta s}{\delta z}$	(Eq. 5)..... 21
$F_s = \frac{kuz}{\Phi(\frac{z}{L})} \frac{\delta s}{\delta z}$	(Eq. 6)..... 21
$Rn - \lambda E - H - G - P - M - h \approx 0$	(Eq. 7) 22
$\beta = H/\lambda E$	(Eq. 8) 22
$\lambda E = (Rn - G)/(1 + \beta)$	(Eq. 9) 22
$F = Q/A (C_e - C_s)$	(Eq. 10) 23
$F_c = Ca - CbA t$	(Eq. 11) 23
$F_c = \frac{Q C_o - C_i}{A M_v}$	(Eq. 12) 24
$F_c = \frac{\delta C}{\delta t} \frac{V}{A M_v}$	(Eq. 13) 24
$C' = C'_s + [C'_0 - C'_s]e^{-\alpha t}$	(Eq. 14) 32
$\frac{\delta C'}{\delta t} = \alpha [C'_s - C'_0]e^{-\alpha t}$	(Eq. 15) 32
$F_c = \frac{10V P_o (1-W_o)}{R A (T_o+273,15)} \frac{\delta C'}{\delta t}$	(Eq. 16) 32
$Offset = A - B$	(Eq. 17)..... 35
$FVcolar = hveg \times Acolar \times \%veg100$	(Eq. 18)..... 38
$Hrelva = (BMfresca - BMseca)/BMfresca$	(Eq. 19)..... 39
$Phe = BMseca/(15 \times Acolar)$	(Eq. 20)..... 39
$Fco2 = -0,78444 + 0,22321 Tamb + 0,00342 HRamb - 0,01261 RS + 0,23465 Prp - 1,609 VelVnt$	(Eq. 21)..... 71
$Fco2 = 1,89052 - 0,06994 Tamb + 0,01007 HRamb + 0,003311 RS - 0,05505 Prp - 1,40948 VelVnt - 0,0111 PAR + 0,37435 Tsolo - 0,00908 HRsolo - 0,00151FV$	(Eq. 22)..... 72

LISTA DE SIGLAS

GEE – Gases de Efeito Estufa
NO₂ – Dióxido de nitrogénio
NO₃ – Nitrato
SO₂ – Dióxido de Enxofre
SO₃ – Trióxido de Enxofre
CO₂ – Dióxido de Carbono
CO – Monóxido de Carbono
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas
AR5 – Quinto Relatório de Avaliação
ICU – Ilha de Calor Urbana
CH₄ – Metano
HCNM – Hidrocarbonetos não-metano
H₂O – Água
(CH₂)_n – Carbohidrato
NADP⁺ – Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato
NADPH – Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato Reduzido
ATP – Trifosfato de adenosina
RuBisCos – Ribulose Bisfosfato Carboxilase Oxidase
RuDP – Ribulose-1,5-difosfato
1,3-DPG – 1,3-difosfoglicerato
PAR – Radiação Fotossinteticamente Ativa
CAB – Clube Académico de Bragança
F – Fluxo mássico de Dióxido de Carbono
Fs – Fluxo da propriedade “S”
Fc – Fluxo molar de Dióxido de Carbono
w – Velocidade Vertical do Vento
z – Comprimento Vertical
δS/δz – Gradiente Vertical Médio da Propriedade “S”
K – Coeficiente de Difusão Turbulenta
k – Constante de *Von Karman*
u – Velocidade de Fricção

Φ – Função Adimensional de Correção do Efeito de Estabilidade Atmosférica sobre o Perfil Vertical de Temperatura

Q – Caudal

C – Concentração

A – Área

NDIR – Espectroscopia de Infravermelho não-dispersivo

FV – Fitovolume

FEco2 – Fluxo de CO₂ estimado por regressão exponencial;

FLco2 – Fluxo de CO₂ estimado por regressão linear

RS – Radiação Solar

Tsolo – Temperatura do Solo

Tamb – Temperatura do ar ambiente

HRamb – Humidade Relativa do ar ambiente

HRcaixa – Humidade Relativa do ar da caixa

H₀ - Hipótese nula

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As questões ambientais têm ganhado cada vez mais relevância e as respostas às mesmas assumem carácter de urgência. A tendência que se espera para o fim deste século, são cenários futuros cada vez mais preocupantes, no que respeita à obtenção e gestão de recursos naturais, entre outros. As pressões antrópicas exercidas sobre os ecossistemas estão cada vez mais fortes, causando efeitos irreversíveis e colocando em risco o planeta e o nosso modo de viver em sociedade.

A urbanização é bastante influente em contextos de mudanças climáticas e crescimento populacional. Em 1960 a fracção da população que vivia em cidades era de 34%, e em 2015 esse número subiu para 54%, fazendo com que a projeção para 2050 chegue a cerca de 66% da população global (Jorat et al., 2020). O crescimento urbano com a concomitante expansão de superfícies impermeáveis constitui uma das modificações mais extremas no ecossistema, gerando reflexos negativos a nível global (Wu et al., 2016; Gaston et al., 2013). Essas intervenções antropogénicas gera grande pressão sobre os recursos naturais, pois a degradação radical da cobertura vegetal, compromete toda a dinâmica do solo, impossibilitando a absorção de água, e com isso causando igualmente alterações nos sistemas hídrico e climático (Barbosa, 2016).

A interferência humana mais debatida tem sido aquela que tem contribuído para o desequilíbrio do balanço radiativo – o designado Efeito de Estufa ou Aquecimento Global, cuja origem tem vindo a ser associada às emissões antrópicas de Gases de Efeito Estufa (GEE), entre os quais se destaca o dióxido de carbono (CO_2). No entanto, uma parte da emissão também tem origem natural, como solos permeáveis, através da decomposição aeróbia da matéria orgânica feita pela microbiota do solo e da respiração de raízes, conjunto de processos denominado de respiração do solo (Dias, 2006).

Atualmente, estudam-se formas de mitigação destas mudanças climáticas causadas pelos GEE, pondo em pauta o sequestro e o acumulo natural de carbono que ocorrem nos solos de espaços verdes urbanos. Porém, um dos maiores desafios em avaliar o potencial de sumidouro desses espaços está na compreensão da dinâmica do ecossistema urbano, na influência de diferentes tipologias de solo (e.g., permeáveis vs impermeáveis, vegetação vs não vegetação) e na heterogeneidade espacial dessas superfícies (Jorat et al., 2020; Wu et al., 2016; Gaston et al., 2013).

Neste contexto, os espaços verdes urbanos, definidos no sentido mais amplo de área que não apresenta uma impermeabilização (vegetação remanescente, parques públicos, paisagismo público ou privado, jardins domésticos, campos desportivos, loteamentos, cemitérios, reservas naturais, terras abandonadas, entre outros) são elementos fundamentais da estrutura urbana e uma potencial tecnologia de contrabalançar o excedente de emissões de GEE. Contudo, os espaços verdes urbanos estão sobre uma forte pressão do processo de urbanização, devido ao contínuo aumento da densidade urbana, que resulta em necessidades elevadas de solo para construção (Stewart, 2020; Gaston et al., 2013).

1.2 OBJETIVOS

O presente estudo tem por objetivo principal quantificar os fluxos verticais de CO₂ numa área relvada de um espaço verde localizado na cidade de Bragança, de modo a avaliar o papel desta tipologia de área na dinâmica de carbono nesta região do nordeste transmontano de Portugal, ou seja, avaliar o potencial de áreas com esta tipologia de coberto como fontes e/ou sumidouros de carbono.

Tendo como objetivos específicos medição do fluxo vertical do CO₂ e avaliação dos padrões de variação temporal, em duas características de solo distintas, uma contendo cobertura vegetal herbácea (solo relvado) e outra solo exposto (solo nu). Pretende-se também estudar a influência dos fatores edafoclimáticos, meteorológicos e da vegetação no comportamento dos fluxos do solo bem como compreender os fatores limitantes do fenómeno, a nível ambiental.

Espera-se ainda poder contribuir para identificar medidas de gestão mais sustentável dos espaços verdes urbanos, com o intuito de mitigar aspectos ambientais negativos e maximizar as potencialidades desta tipologia de áreas como possíveis sumidouros de CO₂.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A tese foi estruturada e dividida em 5 capítulos principais, incluindo a Introdução, que apresenta o enquadramento teórico do tema em estudo, contextualizando o cerne da problemática envolvida, suas justificativas e relevância, assim como a delimitação dos objetivos propostos para o estudo, e termina com uma breve descrição da estrutura do documento.

No segundo capítulo é apresentado o referencial teórico, onde se concentra toda a base de conhecimento necessária sobre os aspectos que envolvem a pesquisa, incluindo estudos sobre a influência antrópica no ambiente, a definição de espaços verdes, as dinâmicas e influências do carbono no ambiente, características do metabolismo vegetal e fatores influentes, descrevendo-se, por fim, os métodos utilizados na medição e quantificação dos GEE, principalmente, o CO₂.

No capítulo três é apresentada e descrita toda a parte metodológica do estudo, caracterizando-se a área de estudo, descrevendo-se a metodologia geral adotada, os equipamentos usados para quantificação e medição do CO₂ e outras variáveis ambientais e da vegetação, os instrumentos e métodos de processamento dos dados realizado pelo software para a determinação das análises temporais de fluxo do CO₂ e avaliação estatística.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante todo o período de avaliação. E, finalmente, no quinto capítulo, apresentam-se as principais conclusões extraídas dos resultados do estudo e propõem-se algumas propostas para investigação futura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se o referencial teórico e toda a base de conhecimento necessária sobre os aspectos que envolvem a pesquisa, incluindo estudos sobre a influência antrópica no ambiente, a definição e importância dos espaços verdes urbanos, as dinâmicas e influências do carbono no ambiente terrestres, características do morfofisiológica do relvado, e os métodos utilizados na medição e quantificação dos GEE, principalmente, o CO₂.

2.1 AMBIENTE URBANO E ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

2.1.1 Ambiente urbano e influência antrópica

Entende-se como ambiente, o meio físico que abrange todos os seres bióticos e abióticos, tanto quanto as interações entre todas as espécies vivas, recursos naturais, clima, e o ser humano e as suas atividades (Kato et al., 2015).

Há centenas de anos, a atividade humana tinha um impacto insignificante ou pouco significativo na Terra, porém, com as alterações do estilo de vida e o consequente aumento das necessidades que advieram da industrialização, passamos a assistir a uma deterioração cada vez mais intensa da relação do ser humano com o ambiente, afetando não só os ambientes naturais e as pessoas próximas a ele, como também aqueles que vivem em centros urbanos (Dincer & Abu-Rayash, 2020; Ison, 2018). A urbanização é atualmente um dos maiores interferentes do ambiente, por concentrar as atividades humanas e as populações e, concomitantemente, contribuir para a alteração do uso do solo e constituir uma das principais fontes de resíduos do planeta.

Uma das principais preocupação associada a urbanização está na utilização dos recursos naturais de forma exploratória, sem a previsão e projeção dos problemas associados a curto, médio e longo prazo (Cidreira-Neto & Rodrigues, 2017). As cidades estão a expandir-se de forma cada vez mais rápida, mesmo faltando recursos necessários para atender um padrão de vida de qualidade razoável ou até às necessidades básicas das pessoas. Além disso, aumentam gradualmente as extinções de espécies, as mudanças climáticas e a poluição ambiental de recursos naturais vitais como água, ar e solo (Azari & Singery, 2013).

Os gases de efeito de estufa (GEE) presentes na atmosfera são, segundo os mais recentes estudos desenvolvidos, os principais causadores das mudanças climáticas, sendo a redução das suas emissões como um dos maiores desafios do século XXI, mesmo havendo algumas incertezas quanto à contribuição do ser humano para tal acontecimento (IPCC, 2018; Okedere & Oyelami, 2021; Shen et al., 2020). A contribuição humana na emissão de GEE é resultado das múltiplas atividades industriais como a produção e queima de combustíveis fósseis, agricultura, construção civil entre outros setores industriais e também de atividades de natureza doméstica (Martins & Ferreira, 2011).

Dos poluentes atmosféricos destacam-se entre os mais comuns: os óxidos de azoto (NO, NO₂, óxidos de enxofre (SO₂, SO₃), dióxido de carbono (CO₂), e monóxido de carbono (CO) (Sadatshojaie & Rahimpour, 2020). Os gases à base de carbono são o segundo maior contribuinte para o Efeito Estufa, mesmo tendo concentrações de até 100 vezes menores ao de vapor de água (Molion, 2008).

O Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas (IPCC), órgão das Nações Unidas que avalia a ciência relacionada às mudanças climáticas, no seu Quinto Relatório de Avaliação (AR5), refere que as mudanças ocorrerão mesmo em diferentes cenários de emissão e que, a manter-se o atual ritmo, as previsões para o final do século apontam para um aumento da temperatura média global de 2,6 a 4,8 °C e uma subida do nível do mar de 45 a 82 cm (IPCC, 2013).

Dados do Relatório de Avaliação 6 (AR6), prevê o aumento da temperatura média global em diferentes cenários para o fim do século XXI. Numa visão otimista, se as emissões de GEE forem baixas, a temperatura média estará entre 1,0 a 1,8 °C, enquanto que para um cenário pessimista, com grandes emissões de GEE, o aumento da temperatura estará entre 3,3 a 5,7 °C (IPCC, 2021).

Esses efeitos causados pelas mudanças climáticas serão refletidos de acordo com as características intrínsecas do evento, que são desiguais em intensidade e distribuição espacial. É possível que alguns ecossistemas e sistemas humanos passem por mais eventos extremos como ondas de calor, secas, inundação, ciclones e fogos florestais. A maioria desses riscos globais concentrar-se-ão nas áreas urbanas, com diferentes tipologias de vulnerabilidade e exposição, originadas não só devido a fatores climáticos, mas outros de natureza distinta, destacando-se a desigualdade socioeconómica a qual pode ser responsável por uma maior vulnerabilidade aos efeitos do aquecimento global (IPCC, 2014).

2.1.2 Urbanização e microclima urbano

Em teoria, todas as necessidades humanas deveriam ser consideradas para o planejamento urbano, no entanto na atual sociedade capitalista, a principal preocupação é a econômica, deixando todas as outras considerações humanas para segundo plano (Lefebvre, 2008). Somado a falta de informações e conhecimentos sobre a importância dos serviços ecossistêmicos das cidades, resulta em decisões equivocadas que envolvem perdas significativas de capital natural (PBMC, 2016).

O processo da urbanização desenfreado causa um stress climático que gera efeitos em cadeia ao longo do tempo, resultando estes em efeitos adversos nas diferentes estruturas dos sistemas urbanos, como os setores ligados a saneamento, energia, transporte, entre outros. Os efeitos variam dependendo do seu grau de desenvolvimento, resiliência e adaptabilidade, gerando possíveis agravamentos de problemas ambientais já existentes na região ou criando eventos climáticos extraordinários com maiores frequências de ocorrência (PBMC, 2016).

O estudo de eventos climáticos, a climatologia, é uma área de grande importância uma vez que o clima é um sistema natural que transcende todas as fronteiras, tanto naturais quanto humanas, oriundas da interação dos elementos, como radiação solar, temperatura, humidade, ventos. Já o clima urbano, o subconjunto climatológico restrito a regiões urbanas, é definido como um sistema natural que abrange todo um espaço terrestre e sua urbanização, resultado das ações antrópicas em conjunto com as características geoambientais do sítio urbano (Carvalho, 2001).

Das consequências mais debatidas sobre este subconjunto climatológico, além dos eventos extremos, são as chamadas Ilhas de Calor Urbano (ICU), o fenómeno em que o balanço energético é mais positivo nos centros urbanos, em comparação com o das zonas suburbanas e rurais circundantes (Figura 1), resultando num aumento de temperatura média desses ambientes (Santamouris, 2019).

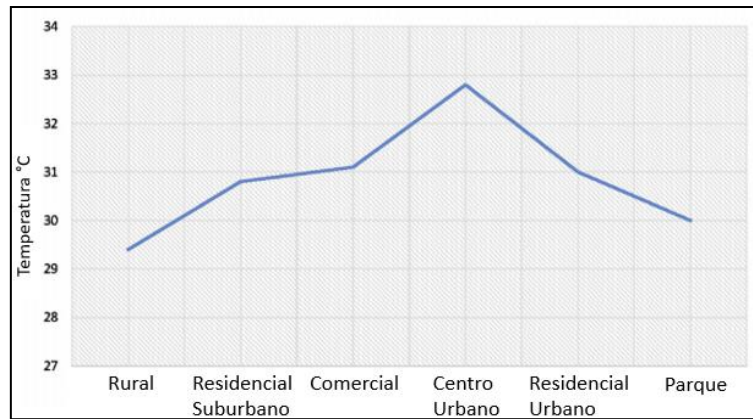


Figura 1 – Ilha de Calor Urbano: Perfil de temperatura ambiente urbana, suburbana e rural

Fonte: Adaptado (Santamouris, 2019)

As causas que envolvem a ocorrência desse fenômeno estão intrinsecamente relacionadas com a expansão urbana, que à medida que cresce transforma as coberturas vegetais húmidas em superfícies menos permeáveis, tais como telhados e pavimentos asfaltados e empedrados, geralmente secas e de cores escuras (Hulley, 2012).

Quanto mais escuro for a cor do material, menor será o seu albedo, ou seja, menor será a capacidade de refletir a energia que incide sobre o mesmo, transformando essa energia em calor que será transferido ao ambiente. Com isso, estes materiais de baixo albedo interferem no processo de aquecimento local, principalmente durante o dia nas regiões urbanas, onde a temperatura do ar logo acima da superfície urbana aquece de forma rápida, e logo se difunde pela atmosfera. Enquanto que durante a noite, as superfícies urbanas quentes começam a esfriar, porém, de forma diferente do que acontece em ambientes rurais, devido a temperatura do ar das cidades serem maiores, desacelerando o processo de esfriamento regional urbano (Hulley, 2012).

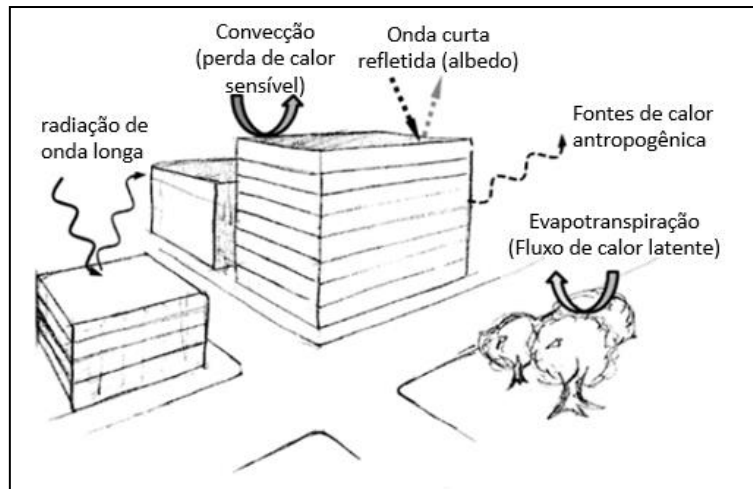


Figura 2 – Balanço energético da superfície urbana.
Fonte: Adaptado (Hulley, 2012)

Das fontes de calor antrópicas que contribuem significativamente para o aquecimento urbano estão a utilização de automóveis, equipamentos de controle térmico, atividades económicas entre outras. Podendo ser potencializado pela densidade populacional, onde à medida que uma área concentra maior número de habitantes, maior será a libertação de calor e o aquecimento local.

Outra causa da ICU está associada à estrutura urbana e geometria dos edifícios. Edifícios altos criam grandes superfícies refletoras e absorvedoras dos raios solares, que por sua vez aumenta a retenção e produção do calor urbano. Além disso, favorecem o bloqueio de ventos, inibindo o efeito de arrefecimento por convecção, assim como a dissipação dos poluentes concentrados nas zonas urbanas (Fernández et al., 2014).

Para algumas cidades o efeito da ICU pode até ser benéfico em períodos específicos, porém, é um assunto de bastante destaque para o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis, que desempenham estratégias de mitigação desse efeito. Como formas de mitigação propõem-se o uso de superfícies de cores mais claras, a consciencialização social, a utilização de telhados verdes e a presenças de grandes espaços verdes urbanos com árvores que geram sombras dentro da cidade (Fernández et al., 2014; Hulley, 2012).

2.2 ESPAÇOS VERDES URBANOS

Inicialmente, o conceito de espaço verde estava apenas associado ao valor estético e paisagístico, no entanto, várias outros conceitos foram assumidos no decorrer dos tempos, de acordo com as concepções urbanísticas que lhes eram associados (França, 2005). O conceito que conhecemos hoje apareceu fundamentalmente no século XIX,

como uma percepção de um ambiente biofísico que tem como propriedade a integração da natureza com a cidade (Sá, 2013).

As teorias de planeamento desses ambientes biofísico nas cidades, começaram a ser desenvolvidas a partir da metade do século XIX, onde procuravam salvaguardar espaços ecologicamente relevantes ou sensíveis. Em Portugal, a instrumentalização formal deste planeamento ocorreu no período do pós-25 de Abril, com a aplicação dos Planos Municipais de Ordenamento do Território, que integram os Planos Diretores Municipais, os Planos de Urbanização e os Planos Pormenores (Carvalho & Gonçalves, 2008).

Considerados indicadores de qualidade de vida, os espaços verdes desempenham vários papéis benéficos para o ambiente urbano, proporcionando campos de recreação e lazer para a população residente. A acessibilidade a esses locais é muito relevante, uma vez que se reflete num aumento do uso desses espaços e façam bastante eco em políticas públicas de saúde e planeamento urbano (Silva, 2016; Figueiredo, 2014).

Os espaços verdes urbanos podem assumir vários formatos, como praças com vegetação, parques urbanos, áreas arborizadas, espaços ligados ao trânsito, jardins residenciais, entre outros, e são classificados em diferentes tipologias, quer em termos de função quer de posse. Espaços de domínio privado são espaços que possuem algumas medidas de controle de acesso e uso, podendo ou não ser cobrada uma taxa pela sua utilização, tendo como exemplos jardins residenciais, hortas urbanas e espaços verdes semipúblico (Silva, 2016). Esta tipologia é bastante influente quando se tem grandes proximidades com os residentes, qualidade estética e opções de alimentação. Já os espaços verdes de condição pública, têm como garantia o uso coletivo para a população (Gonçalves, 2013).

Todavia, a funcionalidade dos espaços verdes urbanos ultrapassa esta diferenciação entre público e privado. Os seus benefícios são vastos e amplamente enumerados nas vertentes ambiental, social e económico, tais como: possibilitar contacto com a natureza; proteger a biodiversidade urbana; minimizar os riscos ambientais atmosférico e sonoro, mitigação de eventos climáticos extremos; criar condições impulsionadoras para a circulação pedonal; melhoria arquitetónica e paisagística; valorização de bens; relação entre saúde e o bem-estar físico, mental e produtividade; entre outros (World Health Organization, 2017; Silva, 2016; Figueiredo, 2014; Sá, 2013).

Num estudo realizado em Milão, Itália (Nicese et al., 2021), por meio de uma Análise de Ciclo de Vida, analisaram o balanço de carbono e o potencial de sumidouros

de diferentes tipologias de espaços verdes, levando em consideração intervenções de plantação e manutenção, equipamentos e veículos utilizados, e destino final dos vegetais residuais das podas. Este estudo mostrou que os impactos causados pelos espaços verdes urbanos são bastante distintos quanto à tipologia vegetal presente e aos diferentes métodos de plantação e manutenção. As chamadas florestas urbanas constituem a tipologia com maior potencial de sumidouro de carbono, caso não tenham uma frequência elevada de poda. Os relvados também podem apresentar um grande potencial sumidouro de carbono, porém, esse potencial pode ser bastante comprometido caso se utilize com frequência corta-relvas ou roçadoras.

2.3 CICLO DO CARBONO

O carbono é um dos elementos mais presentes nos materiais que compõem o planeta Terra, passando pelos meios fluidos (atmosférico e oceânico) e sólidos (rochas e solos). Ele é o constituinte essencial da matéria orgânica, estando nos principais processos químicos orgânicos, como a fotossíntese e a respiração, capaz de realizar até quatro ligações químicas, possibilitando-o assumir vários tipos de moléculas simples, como CO_2 , assim como de moléculas complexas de combinações virtualmente infinitas (Aduan et al., 2004). As principais formas apresentadas no seu ciclo global são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o hidrocarbonetos não-metano (HCNM) e o monóxido de carbono (CO) (Martins et al., 2003).

Os vários ciclos de fluxo por onde o carbono passam no planeta são chamados de Ciclo Global do Carbono. Contudo, o ciclo global inclui vários outros pequenos ciclos (Figura 3) entre a atmosfera, biosfera, geosfera e oceanos (Bennington, 2009). Sendo os carbonatos as formas inorgânicas, responsáveis por três terços do total de carbono, e o restante é constituído por moléculas orgânicas. Apenas 1% desse somatório está noutros reservatórios (atmosfera, biota do solo, húmus do solo, combustíveis fósseis, biota marinho e compostos dissolvidos) (Tonello, 2007).

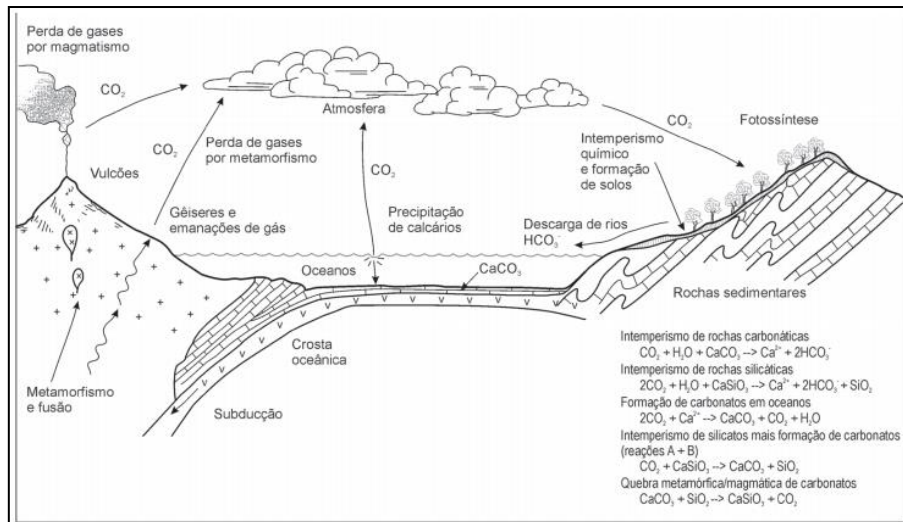


Figura 3 – O ciclo do carbono no sistema natural terrestre.

Fonte: (Toniolo, 2010)

A fixação ou o sequestro de carbono são designações usuais para descrever o processo de absorção do CO₂ por um dado meio. Este processo natural, faz parte da dinâmica do Sistema Terrestre (Figura 3), e tem vindo a ser usada como medida de prevenção da crescente emissão de CO₂, favorecida pela industrialização e pelas demais atividades antrópicas. O sequestro ocorre principalmente pelos processos fotossintéticos dos organismos vegetais, e em segundo plano, pelas reações químicas em rochas com capacidade de fixação do CO₂ (Toniolo, 2010). Assim, os organismos vegetais exercem a principal função no transporte do carbono dos meios abióticos para os meios bióticos. Todavia, através da própria respiração dos vegetais e outras formas de vida, o carbono na forma química (ATP) é utilizado e retorna para a forma inorgânica (CO₂). Esta forma inorgânica pode ser formada e liberada também por processos geológicos como vulcões e queima de origem natural ou antrópica (Reichle., 2020; Bennington, 2009;).

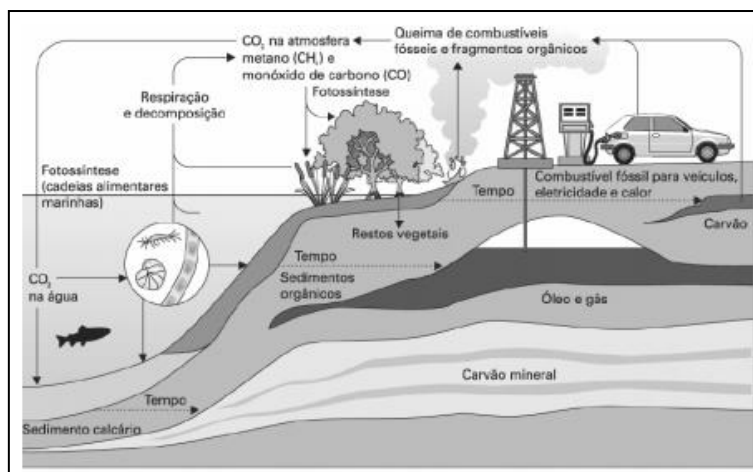


Figura 4 – Ciclo global do carbono (natural e antrópico).

Fonte: (Braga et al., 2002)

O ser humano também apresenta influência na dinâmica do ciclo do carbono, uma vez que tanto em espaços verdes urbanos quanto em áreas pavimentadas, há a capacidade de absorver o carbono atmosférico por meio de processos totalmente distintos uns dos outros. Em áreas verdes, o processo ocorre pelos organismos vegetais presentes, enquanto em meios pavimentados, ocorre a carbonatação por processo químico, onde o CO_2 atmosférico é fixado como minerais carbonáceos estáveis.

2.4 CARBONO DO SOLO

Os solos armazenam até três vezes mais carbono do que a atmosfera ou mesmo o meio vegetal terrestre. Assim, uma pequena mudança do ambiente terrestre pode gerar impacto significativo nas reservas de carbono, podendo-o lançar para a atmosfera, e, conseqüentemente, afetar a regulação climática e contribuir para o aquecimento global (Ramesh et al., 2019; Delgado-Baquerizo et al., 2018).

O carbono do solo é considerado um indicador crítico de fertilidade do solo, por favorecer as propriedades físicas, química, biológicas do solo, auxiliando na própria atividade microbiológica, no crescimento da raiz e nas atividades fisiológicas das plantas (Delgado-Baquerizo et al., 2018; Kang et al., 2000). Além disso, como matéria orgânica, o carbono favorece o sequestro de mais carbono, protegendo o stock e a disponibilidade dos nutrientes, reduzindo a degradação destes e diminuindo as emissões de CO_2 contidos no solo para a atmosfera (Delgado-Baquerizo et al., 2018; Panakoulia et al., 2017).

A concentração de CO_2 contido no solo varia de acordo com a profundidade, ou seja, cada um dos horizontes do solo apresenta uma especificidade própria em relação à capacidade de armazenamento de carbono. Sabe-se hoje que os vários estágios de

decomposição da matéria orgânica do solo ocorrem frequentemente nos horizontes O e A (Figura 5). Todavia, mesmo com a maior parte da matéria orgânica do solo estando presente na superfície (horizonte O) ou próxima dela (horizonte A), pode-se encontrar também em camadas mais profundas, devido ao processo de lixiviação (Stolt & Lindbo, 2010).



Figura 5 – Horizontes básicos do solo.

Fonte: (Cavalli et al., 2017)

Em meio urbano, as várias práticas de gestão de uso do solo, tais como remoção do solo superficial, limpeza, nivelamento e atividades ligadas a construção civil, são os grandes causadores da degradação da qualidade do solo, tanto em termos de fertilidade, erosão, cobertura vegetal, compactação do solo, infiltração, entre outros. Uma vez que solos que estejam expostos a perturbações constantes como acontece, por vezes, em ambientes urbanos, contribuem substancialmente para a emissão do CO₂ (Tang et al., 2020).

2.5 RESPIRAÇÃO DO SOLO E FLUXOS DE CO₂

A respiração do solo é definida como a oxidação da matéria orgânica existente no solo, em CO₂, através da respiração das raízes, dos fungos micorrízicos associada à raiz e da respiração dos organismos microbianos heterotróficos (Tang et al., 2020). Vulgarmente, a respiração do solo e o fluxo de CO₂ são utilizados como sinónimos, no entanto, o fluxo de CO₂ do solo engloba tanto a respiração do solo como a difusão passiva

do CO₂, representando assim o somatório total das transferências de CO₂ entre a superfície do solo e a atmosfera, incluindo os processos biológico e físico-químico associados à decomposição da matéria orgânica do solo (Dias, 2006).

Globalmente, a respiração do solo é o segundo maior contribuinte da emissão do carbono terrestre para a atmosfera (IPCC, 2007) e tem grande dependência do clima do local. Este processo é influenciado principalmente pela temperatura do solo e teor de humidade, ou da interação entre ambos, sendo estes utilizados como parâmetros de controle. Além disso, a respiração do solo é mensurada pelo carbono orgânico, biomassa microbiana, biomassa da raiz e manta morta de folhada (camada mais superficial do solo, acima do húmus, composta especialmente de matéria vegetal em decomposição) (Brito et al., 2009).

A precipitação é um importante evento que afeta esta dinâmica, uma vez que a infiltração de água nos espaços porosos favorece a libertação de quantidades significativas de CO₂ contidas no solo para a atmosfera, através do aumento da temperatura do solo em comparação com as gotículas de água proveniente da precipitação (Moitinho, 2017; Feliciano, 2001).

Assim, a compreensão da dinâmica do fluxo de CO₂ na interface solo/atmosfera é fundamental para conhecer os potenciais sumidouro dos espaços verdes urbanos e contribuir para a redução GEE, mitigando os efeitos climatológicos adversos. As pesquisas são comumente feitas pela relação de concentração do CO₂ e sua taxa de transferência, quantificando-se assim o fluxo líquido de carbono.

2.6 PROCESSOS BIOLÓGICOS INFLUENTES

Para entender o fluxo do carbono entre os ambientes atmosférico, terrestre e biológico, torna-se necessário compreender os processos biológicos designados como metabolismo do solo (Figura 6), um conjunto de reações químicas e bioquímicas responsáveis por converter formas de energia por meio de processos físico-químicos, realizados pelos microrganismos autónomos. Os processos de manutenção da vida são basicamente sustentados sobre dois processos opostos: a fotossíntese, que consiste na produção primária dos organismos autotróficos; e a decomposição e mineralização da matéria orgânica realizada por organismos heterotróficos.

Os RuBisCos (ribulose bifsosfato carboxilase oxidase) são enzimas bastante importantes no processo fotossintético e uma das mais abundantes na natureza, sendo responsável por toda a produção de biomassa na terra (cerca de 40 milhões de toneladas

na biosfera, equivalente a 10 kg/pessoa) (González, 2005). Estas enzimas absorvem a energia solar reduzindo o CO₂ atmosférico e produzindo compostos orgânicos complexos, que posteriormente são usados pelos organismos heterotróficos que não possuem essa capacidade de síntese (Moreira & Siqueira, 2006). Após este processo, o carbono da atmosfera é absorvido e incorporado na constituição das plantas, passando pelos diferentes níveis tróficos para depois retornar ao meio abiótico do solo na chamada necromassa (matéria orgânica morta). A necromassa decomposta pelos microrganismos e reincorporada ao solo, que mais uma vez poderá ser absorvida pelas plantas.

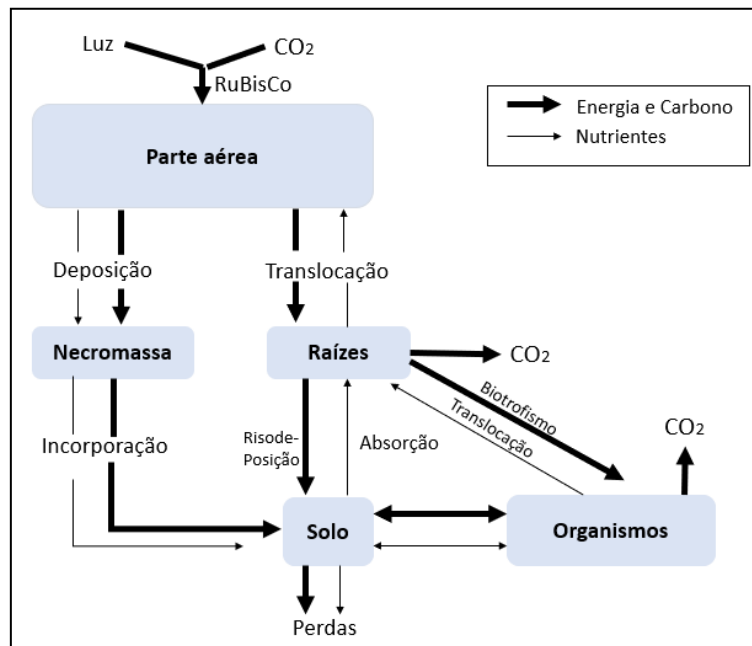
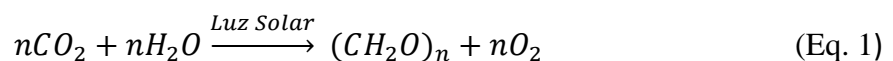


Figura 6 – Representação esquemática do fluxo de energia, carbono e nutrientes no sistema solo-planta-organismo.

Fonte: Adaptado (Moreira & Siqueira, 2006)

A fotossíntese é o principal processos para a absorção do CO₂ presente na atmosfera. Com o auxílio da energia solar a reação geral do processo da fotossíntese envolve um conjunto de reações de oxidação-redução (Eq. 1), nas quais a H₂O constitui o composto dador de elétrões para reduzir CO₂, convertendo-o em carboidrato (CH₂)_n – a chamada fase luminosa -:



A água, o agente redutor da reação, não reduz diretamente o CO₂. A energia solar produz a oxidação fotoquímica do H₂O, produzindo dadores e recetores de elétrões, o NADP⁺ torna-se o recetor final, reduzindo-se em NADPH, enquanto que o oxigénio é

libertado na forma gasosa. Assim, o NADPH e o ATP (formado no processo chamado fotofosforilação) são utilizados para síntese redutiva dos carboidratos. A chamada fase clara (Heldt & Piechulla, 2005; Martins, 2011).

Já enzima Rubisco na forma de ribulose-1,5-difosfato (RuDP) é reduzida dando o produto de duas moléculas de 3-fosfoglicerato, que logo é fosforilada e gasta com o ATP para produzir duas moléculas de 1,3-difosfoglicerato (1,3-DPG), e depois reduzido a gliceraldeído-3-fosfato tendo o NADPH como agente redutor, e então o gliceraldeído-3-fosfato pode entrar na via glicolítica para gerar glicose nova e posteriormente ser regenerada no Ciclo de Calvin, a chamada fase escura (Figura 7) (González, 2005; Heldt & Piechulla, 2005):

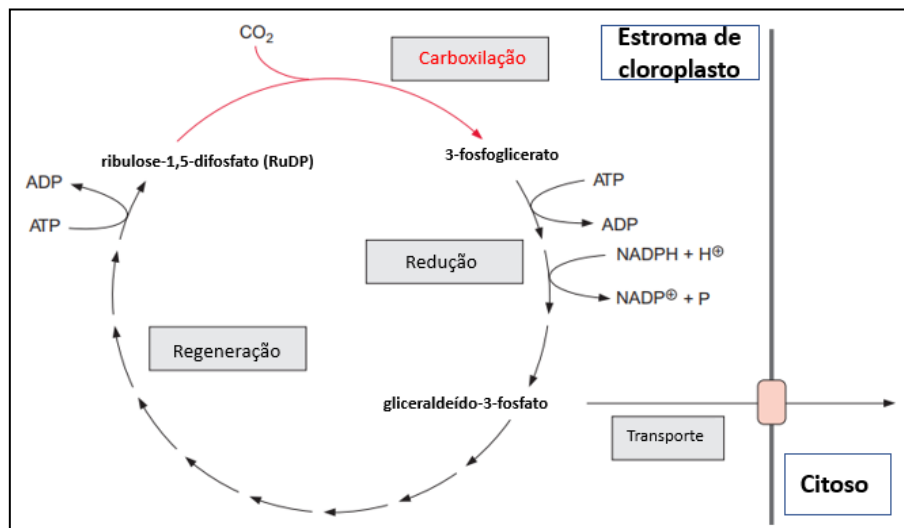
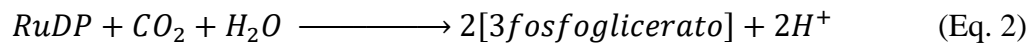


Figura 7 – Esquema simplificado das reações do Ciclo de Calvin (sem estequiometria).
Fonte: Adaptado (Heldt & Piechulla, 2005).

Além disso, os vegetais também participam do processo metabólico chamado de respiração, através do qual, numa base anual, podem devolver à atmosfera todo o carbono absorvido, para a construção de tecidos orgânicos. Geralmente, na primavera e verão esses fatores são mais favoráveis para a produção vegetal, levando a uma maior absorção de CO₂ e no outono e inverno com a morte dos vegetais e ataque por bactérias, propicia maior liberação de CO₂ (Pacheco & Helene, 1990). Sendo bastante dependente da temperatura e humidade que condicionam a atividade microbiana, podendo levar à sua inatividade.

2.7 ASPETOS MORFOFISIOLÓGICOS DO RELVADO

A emergência, o alongamento, a senescência e a morte da erva do relvado (total ou parcial) definem o fluxo de biomassa, juntamente com a quantidade de rizomas, vulgarmente designados por afilhos (estruturas secundárias originárias de meristemas apical). A dinâmica de geração e expansão da planta é denominada por morfogênese, descrita por três etapas básicas: aparecimento de folhas, alongamento das hastes, expansão das folhas e o tempo de vida das folhas. Esta dinâmica é influenciada pelas características genéticas e variáveis ambientais como a temperatura, disponibilidade hídrica e de nutrientes.

No caso das gramíneas forrageiras, a temperatura influência de forma acentuada e imediata no crescimento foliar (Figura 8), limitando a divisão e o alongamento celular, condicionando assim a própria atividade fotossintética da planta. A eficiência da fotossíntese é dependente da interação entre a vegetação e o ambiente, que são influenciados por elementos climáticos e edáficos bem como pela estrutura do coberto (dossel) que afeta a radiação incidente. Em condições não limitantes vários autores demonstram a linearidade da relação entre a massa seca total acumulada e a disponibilidade da Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR) (Costa et al., 2012).

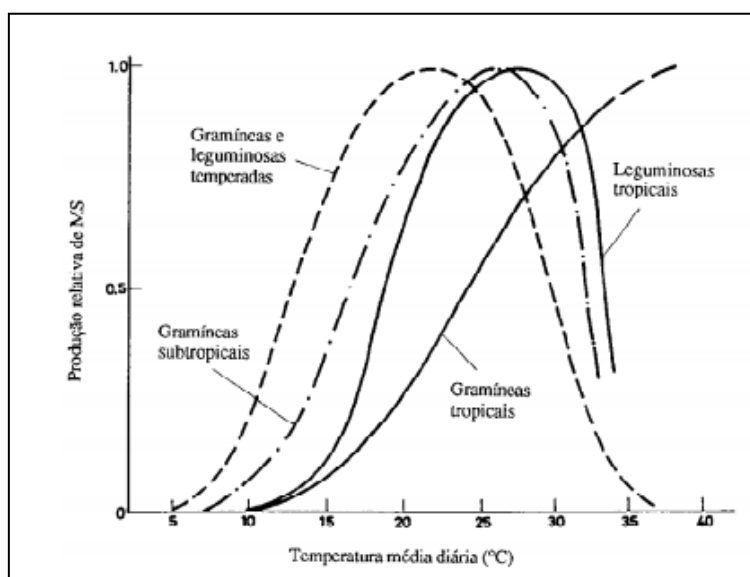


Figura 8 – Crescimento potencial de gramíneas e leguminosas forrageiras em resposta à temperatura.

Fonte: (Costa et al., 2012)

As gramíneas forrageiras têm a sua perenidade assegurada pela sua grande capacidade de rebentação e emitir folhas a partir de meristemas remanescentes após cortes

sucessivos, permitindo uma nova formação de área foliar. Geralmente, em fase vegetativa, os meristemas apicais mantêm-se próximos ao solo, enquanto na fase reprodutiva, com o alongamento dos meristemas apicais, a relva fica mais suscetível a corte dessa estrutura, influenciando o seu crescimento.

Na Figura 9 são apresentadas as estruturas básicas de uma gramínea forrageira, indicadas por letras distintas, e a sua relação para diferentes alturas. Segundo Costa et al. (2012) para a altura “h1”, quando em condições favoráveis, a planta não apresenta nenhum comprometimento fotossintético, uma vez que não é removida totalmente a área foliar. Todavia, caso se encontre em condições desfavoráveis, pode acarretar uma paralização do crescimento do sistema radicular, reduzindo-se assim a taxa de crescimento, mas não impedindo a capacidade de rebentar. Quando cortado na altura “h2”, além de eliminar grande parte da estrutura foliar responsável pela fotossíntese, pode causar danos à porção remanescente da planta (colo) mais próxima do solo. Nesta condição, a recuperação da planta depende da intensidade dos danos causados ao sistema radicular e da grande necessidade da planta de repor as folhas pelo meristema apical. Por fim, caso ocorra o corte na altura “h3”, o meristema apical será removido, e com isso terá uma grande paralização do crescimento e eventualmente a morte dos rizomas (afilhos) (Costa et al., 2004).

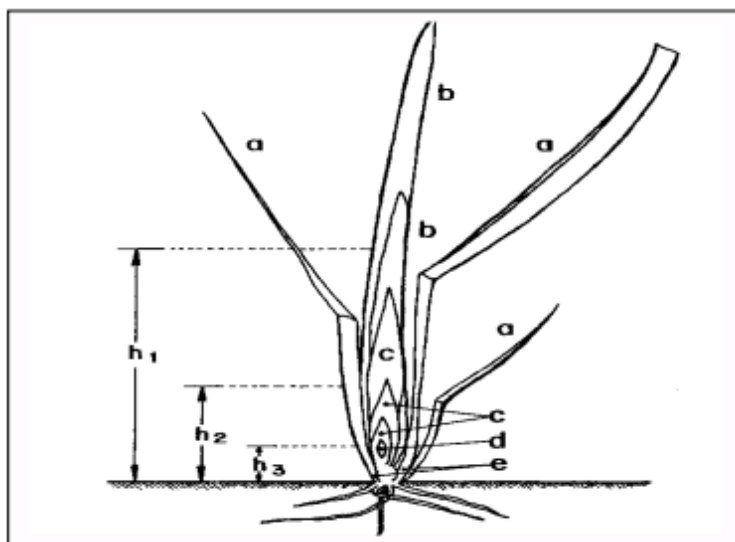


Figura 9 – Estrutura de um afixo de gramínea. a) folhas expandidas e fotossinteticamente ativas; b) folhas que estão emergindo e que não atingiram sua capacidade fotossintética total; c) folhas que não emergiram e que dependem dos assimilados produzidos por folhas mais velhas; d) meristema apical; e) gemas axilares; f) h1, h2, h3 = alturas de corte ou pastoreio.

Fonte: (Costa et al., 2004)

2.8 MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO DE FLUXO DE CO₂

Existem várias metodologias para a medição e quantificação de fluxos verticais de constituintes gasosos através da interface solo/atmosfera. Comumente divididas em métodos micrometeorológicos, que quantificam os fluxos verticais por meio de plataformas fixas (mastros, torres) ou móveis (aviões), e as não meteorológicas ou de superfície, que calculam o balanço de massa na superfície ou regiões próximas (Baldocchi, 2003; Feliciano, 2001)

Inicialmente as formas de monitorização desses fluxos eram efetuadas pela quantificação das taxas de evaporação, que se armazenavam em recipientes variados, com as quais era monitorizado cuidadosamente a quantidade de água contida nesses recipientes. Porém, esse método não tinha a precisão necessária, tornando-o pouco representativo.

Com o desenvolvimento do lisímetro de pesagem obteve-se um progresso considerável na medição das trocas gasosas das superfícies. Este tipo de sistema originou o desenvolvimento dos primeiros sistemas de medição, como o método das caixas e as determinações experimentais de transferências verticais de gases (Feliciano, 2001).

A metodologia da caixa foi a única capaz de dar respostas consistentes, e mesmo a quase mais de um século de existência, ainda hoje continua a ser uma das mais usada para esse tipo de análises. Todavia esta metodologia apresenta algumas limitações como as alterações do microambiente de análise, as incertezas, os entraves ao se analisar por um período de tempo muito longo e a impossibilidade de extrapolação dos dados para uma escala de macroambiente.

Para ultrapassar algumas dessas limitações, os métodos micrometeorológicos foram evoluindo e a sua aplicação foi-se generalizando. Entre os métodos micrometeorológicos, destacam-se os métodos do *eddy correlation* ou *eddy covariance* e o do gradiente de concentração, com o primeiro a ganhar terreno a partir de meados dos anos 60, com os grandes avanços das técnicas electrónicas de processamento de dados e a automatização de monitorização conectada a um *data logger*. O principal autor do feito foi o americano Arthur James Dyer que desenvolveu o primeiro sistema integrador electrónico de respostas rápidas (Grimmond et al., 1992). A integração destas duas metodologias é na maior parte dos casos a melhor solução para a quantificação dos fluxos e avaliação da dinâmica dos mesmos.

2.8.1 Métodos Micrometeorológicos

2.8.1.1 *Eddy covariance*

Esta técnica recorre à medição dos valores instantâneos da velocidade vertical do vento (w) em conjunto com a medição instantânea da concentração do ou dos escalares em estudo (c) (e.g., a concentração de CO_2). Para tal, necessita-se de um equipamento devidamente calibrado de aquisição e medição de resposta rápida, como um anemómetro ultrassónico tridimensional, para registar as flutuações da velocidade vertical do vento, e um analisador de concentração, que, usualmente, para o caso do CO_2 consiste num analisador de infravermelho não dispersivo (IRGA). O cálculo do fluxo vertical (F) pode ser expresso da seguinte forma (Eq. 3) (Baldocchi, 2003):

$$F = wc \quad (\text{Eq. 3})$$

Tanto a velocidade vertical do vento (w) (m s^{-1}) quanto a concentração (c) (g m^{-3}), correspondem a média aritmética dos valores de medição instantâneos analisado num determinado tempo de leitura, integrando as suas componentes flutuantes (w' e c'). Para tal, a velocidade horizontal deve ser nula.

O fluxo ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) então é determinado pela covariância das flutuações da velocidade vertical do vento e da concentração momentânea da componente (Eq. 4) (Baldocchi, 2003).

$$F = \overline{wc} + \overline{w'c'} = \overline{w'c'} \quad (\text{Eq. 4})$$

É importante salientar os cuidados inerentes ao processo de montagem dos equipamentos de análise, como a aferição da planimetria da superfície de análise, a correção planimétrica caso necessário, e outros interferentes que fujam a situação padrão de análise (Feliciano, 2001).

2.8.1.2 *Método do gradiente de concentração*

A técnica do gradiente de concentração foi muito usada antes de se atingir a maturidade do método do *eddy covariance* e atualmente constitui ou pode constituir uma alternativa em casos onde a utilização de sensores de respostas suficientemente rápidas, seja de baixa viabilidade técnica e financeira (Feliciano, 2001). Este método assenta na relação entre o transporte turbulento e a difusão molecular, análoga à Lei de Fick. A

expressão (Eq. 5) permite determinar o fluxo vertical de uma propriedade escalar (Loisy et al., 2013; Verma, 2009):

$$F_s = \overline{w's'} = -K_s(z) \frac{\delta \bar{S}}{\delta z} \quad (\text{Eq. 5})$$

A expressão “ $\delta S/\delta z$ ” traduz o gradiente vertical médio das propriedades “ S ” (exemplo $g\ m^{-3}$) e “ K_s ” representa o coeficiente de difusão turbulenta da própria unidade escalar ($m^2\ s^{-1}$), variando com a altura “ z ” ao longo do tempo (m^{-1}) (Verma, 2009; Feliciano, 2001). As principais incertezas em torno deste método, está na dependência para com a precisão do perfil vertical da propriedade escalar e com o cálculo estimativo do coeficiente de difusão turbulenta (Pereira et al., 2013).

Existem dois procedimentos que se distinguem entre si, o método aerodinâmico e o método do balanço de energia. Apesar das distinções, os dois métodos são aplicados para medições de fluxos para períodos médios de meia a uma hora, evitando sempre períodos menores, principalmente em dia com pouca iluminação (nublados), e períodos superiores a duas horas para os horários crepusculares, uma vez que, são referidos como condição não estacionárias (Reis, 2019).

2.8.1.2.1 Método Aerodinâmico

O método aerodinâmico, assente na teoria de similaridade de *Monin-Obukhov*, preconiza que a massa e a energia são transportadas similarmente na atmosfera, por difusão turbulenta, significando que os coeficientes de difusão turbulentas das espécies químicas e de calor serão exatamente iguais, e assim, determinando que $K_s = K_H$. Então o fluxo pode ser estimado pela expressão (Eq. 6):

$$F_s = \frac{ku_z}{\Phi(\frac{z}{L})} \frac{\delta s}{\delta z} \quad (\text{Eq. 6})$$

Sendo “ u ” a velocidade de fricção ($m^2\ s^{-1}$), “ K ” ($\cong 0.4$) a constante de *Von Karman*, determinadas experimentalmente, e “ Φ ” a função adimensional de correção do efeito de estabilidade atmosférica sobre o perfil vertical de temperatura, estabelecida de forma empírica (Dyer & Hicks, 1970).

2.8.1.2.2 Balanço de Energia

O método do balanço de energia, também conhecido como método da razão de Bowen, assente na relação fluxo/gradiente (Eq. 5), porém, sem a necessidade de medição ou estimativa dos parâmetros turbulentos. O método determina o coeficiente de difusão turbulenta a partir da equação do balanço de energia da superfície terrestre subjacente. Este balanço é expresso pela Eq. 7 (Monteith & Unsworth, 2013; Baldocchi, 2003):

$$R_n - \lambda E - H - G - P - M - h \approx 0 \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$\lambda E = \frac{R_n - G - P - M - h}{1 + \beta} \quad (\text{Eq. 9})$$

Sendo todas fluxos de energia dados em W m^{-2} ($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), o “ R_n ” apresenta a quantidade de energia radiativa disponível na superfície, “ H ” os fluxos de calor sensível do ar, “ λE ” calor latente para a evaporação ou condensação da água, “ G ” o calor necessário para mudanças de temperatura do solo, “ P ” fluxo de energia fotoquímica, e “ M ” o termo o fluxo de energia de armazenamento de elementos do dossel (canópi) e “ h ” o fluxo advectivo de transporte de energia na direção horizontal. Como os parâmetros “ P ” “ M ” “ h ” representam geralmente uma pequena fração de “ R_n ”(3%, $\pm 5\%$ e 2% respectivamente), utiliza-se apenas parâmetros “ G ” para uma formulação aproximada válida (Meirelles et al., 1999; Alves et al., 1926).

A razão de Bowen, sendo a razão do calor latente e o calor sensível, é dada pela expressão (Eq. 8) que ao ser substituída na expressão (Eq. 7) com as devidas operações matemáticas temos a expressão (Eq. 9). O método necessita de uma medição da radiação líquida e do fluxo de calor do solo. Com isso, podem ser determinados os demais termos envolvidos ou obtidos por medições de temperatura e de pressão de vapor dentro da camada de fluxo constante (região na qual é a camada mais inferior da atmosfera, que corresponde em torno de 10% da profundidade da camada limite da atmosfera).

2.8.2 Método da Caixa

O método vulgarmente designado por método da caixa é usado na determinação dos fluxos de constituintes químicos na interface atmosfera/superfície terrestre, tendo por base os registos temporais de concentração num dado volume de ar adjacente à superfície. Esse volume encontra-se limitado por um invólucro (caixa ou câmara) que pode admitir

várias dimensões, mas que necessita de ser construída num material inerte, de modo a não reagir com os constituintes químicos do gás a ser analisado. Como já referido anteriormente, as principais limitação deste método é a não representatividade da influência dos ventos nesta dinâmica de fluxos gasosos, a perturbação induzida na superfície de análise e a baixa representatividade (Feliciano, 2001).

Estes sistemas podem ser operados em estado estacionário (sistemas dinâmicos ou abertos) ou em estado não-estacionários (sistema estáticos ou fechados), com ou sem circulação de ar (Livignston & Hutchinson, 1995). O caudal gasoso a ser analisado, por via de regra, deve ser otimizado para gerar um gradiente vertical constante, o qual diminui ou aumenta em altura, dependendo da emissão ou deposição do agente químico. Assim pela diferença de concentração entre a entrada e a saída, pode-se determinar o fluxo pela expressão (Eq. 10), sendo “ Q ” o caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), “ A ” a área (m^2), e “ C ” a concentração, com os índices de entrada e saída, respectivamente, “ e ” e “ s ” (g m^{-3}).

$$F = \frac{Q}{A} (C_e - C_s) \quad (\text{Eq. 10})$$

As principais vantagens desse método, em comparação aos métodos micrometeorológicos, são a sua fácil implementação, o custo reduzido e por ser capaz de avaliar a contribuição dos processos de superfície de deposição e emissão. Tendo como limitação a natureza física de superfície que não se colocam em relação a estes métodos, e nas perturbações induzidas no fluxo por superfícies pouco representativas (Feliciano, 2001).

A tipologia mais antiga do método da caixa é a de estado estacionário sem circulação de ar, comumente referido como caixas estáticas ou caixas de absorção. Foi um dos primeiros métodos desenvolvidos para análise do fluxo da interface solo/atmosfera *in situ*, uma vez que se baseia na deposição de uma quantidade conhecida de uma substância alcalina reativa ao gás, absorvendo uma quantidade do mesmo. Após isso, por meio de titulação desse material referente à área de cobertura de solo a ser analisado, é determinado o fluxo ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) pela expressão (Eq. 11):

$$F_c = \frac{C_a - C_b}{A t} \quad (\text{Eq. 11})$$

Sendo “ t ” tempo de análise do gás (geralmente longos períodos de 12 a 24h), enquanto aos índices de concentração (a e b ; μmol) referem-se, respectivamente, ao gás

absorvido pelo local analisado e a concentração de uma caixa que será posicionada em um local onde não há emissão de particulado (Branco) (Reis, 2019).

Ressalta-se que esse método por vezes é descrito como impreciso, tendo valores que podem não condizer com a realidade. Mas ainda assim é uma boa alternativa técnica e econômica para análises em locais remotos e de difícil acesso (Rochette & Hutchinson, 2005; Rochette et al., 1992).

Com isso desenvolveu-se o método de caixa de estado estacionário com circulação de ar, projetado para reduzir as interferências na medição dos fluxos. Nos seus primeiros protótipos, as câmaras recorriam também a uma substância química capaz de absorver o CO₂ do ar, usualmente utilizando soluções de KOH e NaOH para a titulação dos reagentes que não sofreram reação. Esse método fixa uma taxa conhecida do ar que passa pela caixa (Q ; m³ s⁻¹), e assim a expressão para se obter o fluxo de CO₂ é dada por:

$$F_c = \frac{Q}{A} \frac{C_o - C_i}{M_v} \quad (\text{Eq. 12})$$

Sendo “ A ” a área do solo contido na caixa, “ M_v ” (m³ mol⁻¹) o volume molar do ar nas condições de temperatura e pressão no interior da caixa. “ C_i ” e “ C_o ” são as concentrações de CO₂ (μmol mol⁻¹) do ar de entrada e saída, respectivamente (Reis, 2019; Rochette & Hutchinson, 2005).

O método de caixas de estado não estacionário sem circulação de ar, popularmente dita por caixas fechadas estáticas, baseia-se na acumulação da concentração de gás no interior da caixa, emitido pela superfície pelo período de tempo determinado. A medição pode ser feita *in situ*, e em tempo real, através de analisadores específicos, ou recolhendo amostras do gás em intervalos de tempos iguais, e posteriormente analisadas em laboratório. Bastante similar com o cálculo de caixa de estado estacionário com circulação de ar (Eq. 12), mas sem um caudal de arraste, o método calcula a evolução da concentração do gás ao longo do tempo, obtendo-se assim um valor variável escalar da concentração em função do tempo. Onde o $\delta C / \delta t$ (μmol mol⁻¹ s⁻¹) é o diferencial da concentração em função do tempo e “ V ” (m³) o volume da caixa (Reis, 2019).

$$F_c = \frac{\delta C}{\delta t} \frac{V}{A M_v} \quad (\text{Eq. 13})$$

O método é utilizado geralmente para se analisar os fluxos gasosos atmosféricos de ambientes internos, pois analisa o estado do fluxo gasosos de um determinado volume

fechado e sua interação ao longo do tempo. Quando maior o tempo de análise maior será suas influências e gradientes de concentração. A limitação encontrada nesse método está na pressão do interior da caixa, que pode variar com o tempo, e essa variação influencia no fluxo mássico do CO₂. Diferenças de pressão abaixo de 1 Pa tem demonstrado causar incertezas nas medições do fluxo (Reis, 2019).

Por fim o método não estacionário com circulação de ar, em comparação aos demais já referidos, apresentam algumas vantagens. Uma vez que este método é capaz de fornecer dados contínuos da concentração do químico desejado, e, conseqüentemente, do padrão de emissão ou absorção. Além disso, permitem ainda avaliar os fluxos com uma frequência mais elevada, detectar mais rapidamente os problemas experimentais, diminuir o descarte de dados de baixa consistência e apresentar menos problemas com perdas e difusão lateral e, ainda, diminuir as alterações de temperatura e humidade da interface solo/atmosfera. Por último, possibilitam ou podem possibilitar a monitorização continua de períodos diários, semanais, sazonais ou até anuais (Rochette & Hutchinson, 2005).

Por apresentar essas vantagens promissoras nas medições dos fluxos gasosos, esse método tornou-se amplamente adotado por vários especialistas e, por consequência, bastantes fabricantes de equipamentos passaram a investir neste método. No mercado temos empresas referência em equipamentos dessa técnica, como a Li-Cor Inc.; Lincoln, NE; PP-Systems, Hitchin, Inglaterra; BioScientific, Ltd.; Hoddesdon, Inglaterra; CID Inc. Camas, WA (Reis, 2019).

Este método é bastante usado para análise dos GEE, como CO₂, metano e óxido nítrico. Para o cálculo do fluxo desses compostos químicos existe uma vasta possibilidade de se estimar este valor, porém, usualmente utiliza-se a linearidade da relação da concentração do gás em função do tempo de observação; recomenda-se um tempo de observação entre 0,5 a 2 minutos. Assim, usam a variação dessa reta para estimar o valor escalar ($\delta C/\delta t$).

Algumas desvantagens dessa técnica encontram-se na dificuldade em medir em simultâneo outros gases, apresentar bastantes influências nos dados devido a perturbações do solo, mudança no regime de mistura do ar ou do solo, e algumas interferências climáticas. Por esta razão, é recomendado o maior número de medidas sobre um grande intervalo de tempo, para que garanta as representações mais adequadas do fluxo analisado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se toda a parte metodológica do estudo, caracterizando-se a área de estudo, descrevendo-se a metodologia geral adotada, os equipamentos usados para quantificação e medição do CO₂ e outras variáveis ambientais e da vegetação, os instrumentos e métodos de processamento dos dados realizados pelos softwares utilizados para a determinação das análises temporais de fluxo do CO₂ e avaliação estatística.

3.1 LOCAL DE ESTUDO

Com o objetivo de entender o papel dos relvados urbanos na dinâmica do fluxo do CO₂ na interface solo/atmosfera, realizou-se um estudo de avaliação transferência vertical deste constituinte numa área verde gerida pelo Clube Académico de Bragança (CAB), situada no centro da cidade de Bragança, Concelho de Bragança, Nordeste de Portugal. Especificamente, o local situa-se nas coordenadas geográficas 41°48'20,18" N, 6°46'17,60" W e com uma altitude de aproximadamente 710 metros (Figura 10).

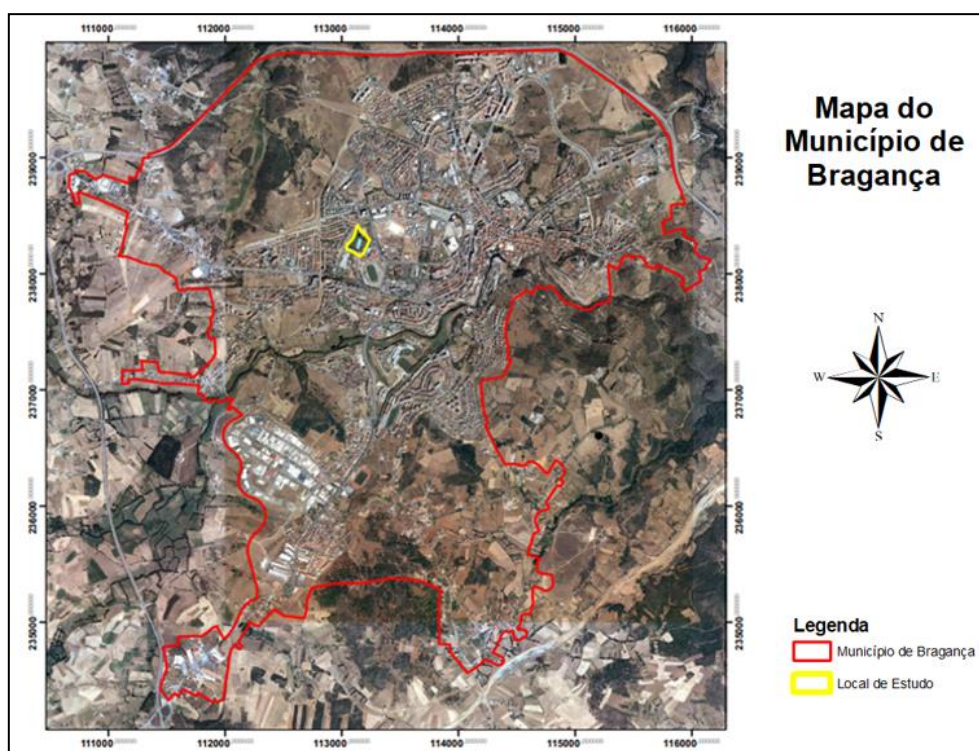


Figura 10 – Mapa do limite administrativo do município de Bragança, com identificação do local de estudo.

Fonte: Executado no ArcMap 10.8.

O local trata-se de um espaço verde urbano privado e de acesso controlado, que tem como objetivo a recreação e lazer para o público geral de Bragança, O complexo encontra-se implantado num quarteirão de vastas áreas verdes que inclui a área envolvente do CAB, o espaço verde público do Eixo Atlântico e os espaços verdes não formais indicados pela cor vermelha na Figura 11, sendo um o Estádio Municipal de Bragança e uma quadra residencial com espaços não ocupados por construção. O complexo CAB numa área total de aproximadamente de 29.000 m², sendo 78% de solos permeáveis, parte dele é rodeada pelo espaço verde do eixo atlântico que é constituído por uma área total de aproximadamente 28.400 m², sendo 65% de solos permeáveis. O CAB e o Eixo Atlântico representam cerca de 41.630 m² de solos permeáveis de vegetação rasteira (tipo gramíneas). Estas medições métricas foram realizadas pelas ferramentas abertas desenvolvidas pelo Google Earth.

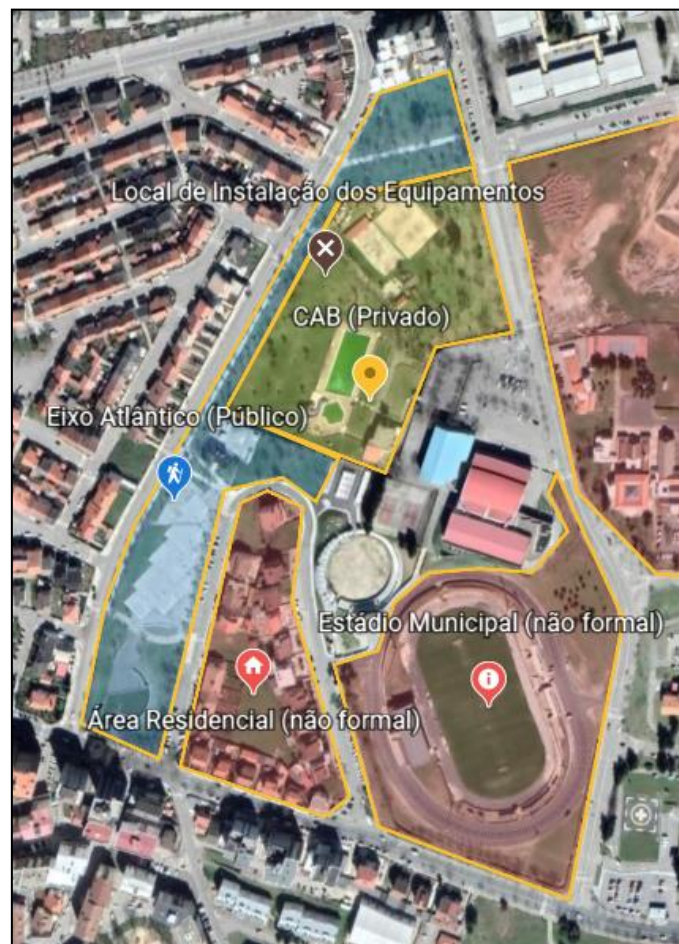


Figura 11 – Local de instalação dos equipamentos de análise e as tipologias de espaço verde indicadas por cores: CAB (Privado; Amarelo); Eixo Atlântico (Público; Azul); área Residencial e Estádio Municipal (Tipologia não formalizada; Vermelho).

Fonte: Adaptado Google Earth (2021)

O CAB é constituído por um conjunto de instalações que envolvem um pavilhão desportivo, complexo de ténis e um complexo de piscinas que é composto por 3 tanques de água, um focado para o público infantil, com 40 cm de profundidade e escorrega; uma intermediária com profundidade que varia de 80 cm à 120 cm; e o tanque principal com dimensões olímpicas; rodeados por uma área relvada. Este complexo de lazer recebe anualmente cerca de 50 mil visitantes nas suas acomodações, tendo seu pico de visitas na estação do Verão (Clube Académico de Bragança, 2021).

O relvado apresentava um desenvolvimento homogéneo, tendo sido submetido ao mesmo tipo de tratamento ao longo do tempo (Figura 12). Para a instalação do equipamento de monitorização seleccionou-se uma área representativa do relvado na área vedada, tendo por base critérios técnicos, de perturbação mínima nos trabalhos de manutenção periódica da relva e de segurança (Figura 12 A e Figura 12 B).



Figura 12 – Área de solo relvado circundante ao ponto de instalação dos equipamentos: A) B) C) D) E) paisagem interna ao clube; F) paisagem externa ao clube.

Na classificação de Köppen a cidade de Bragança inclui-se no tipo de clima *Csb* que corresponde a um clima temperado com invernos suaves (temperatura do mês mais frio entre -3 e 18 °C) (Classe C); verão seco (mês de verão mais seco com precipitação inferior a 40 mm e a 1/3 da precipitação do mês de inverno mais húmido) (Subclasse Cs); verão longo e fresco (temperatura média de todos os meses abaixo de 22 °C; com pelo menos quatro meses com temperatura média acima de 10 °C) (Sub-subclasse Cb).

De um modo geral, a cidade de Bragança apresenta normais climatológicas (médias 1971-2000) com temperaturas médias de 12,3 °C e valores máximos e mínimos variando entre 38,8 °C e -11,6°C, respectivamente; precipitação média anual de 758,3 mm, sendo mais concentradas no período de inverno; insolação de 2520 horas anuais, sendo julho o mês com maior tempo de exposição solar e dezembro com o menor valor; e velocidade média dos ventos de 9,9 km/h e a humidade relativa de 77% (IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera, n.d.).

Os solos da cidade de Bragança possuem predominantemente material litológico formado quase exclusivamente por rochas particularmente ricas em minerais ferromagnesianos, chamadas de Máficas e Ultramáficas. A região onde se encontra o objeto de estudo é caracterizado por Regossolos, solos pouco evoluídos e material não consolidado, de textura que pode variar de franca a franco-argilosa, e alta capacidade de troca catiónica (Afonso & Arrobas, 2009).

3.2 INSTRUMENTAÇÃO

3.2.1 Descrição dos equipamentos de medição

Para monitorizar os fluxos de CO₂ na interface solo-atmosfera, utilizou-se um equipamento portátil e automatizado, com módulo quantitativo de transferência líquida de carbono, o LI-8100A, desenvolvido pela LI-COR Biosciences ®. O módulo completo é constituído de 10 componentes:

1. Uma câmara transparente de longo prazo 8100-104C (LI-COR Biosciences Lincoln, NE, EUA) (Figura 13A));
2. Um analisador de gás infravermelho (Figura 13B));
3. Uma interface de sensor auxiliar (Figura 13C));
4. Um sensor quântico de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) LI-190R (Figura 13D));
5. Um sensor de humidade do solo GS1 (Figura 13E));

6. Uma sonda termistor 8100-203 (Figura 13F));
7. Um colar de PVC (Coleira);
8. Conectores de bateria e comunicação sem fio;
9. Aplicação de operação para telemóveis e computadores;
10. Software SoilFluxPro™ para visualização e processamentos dos dados coletados.

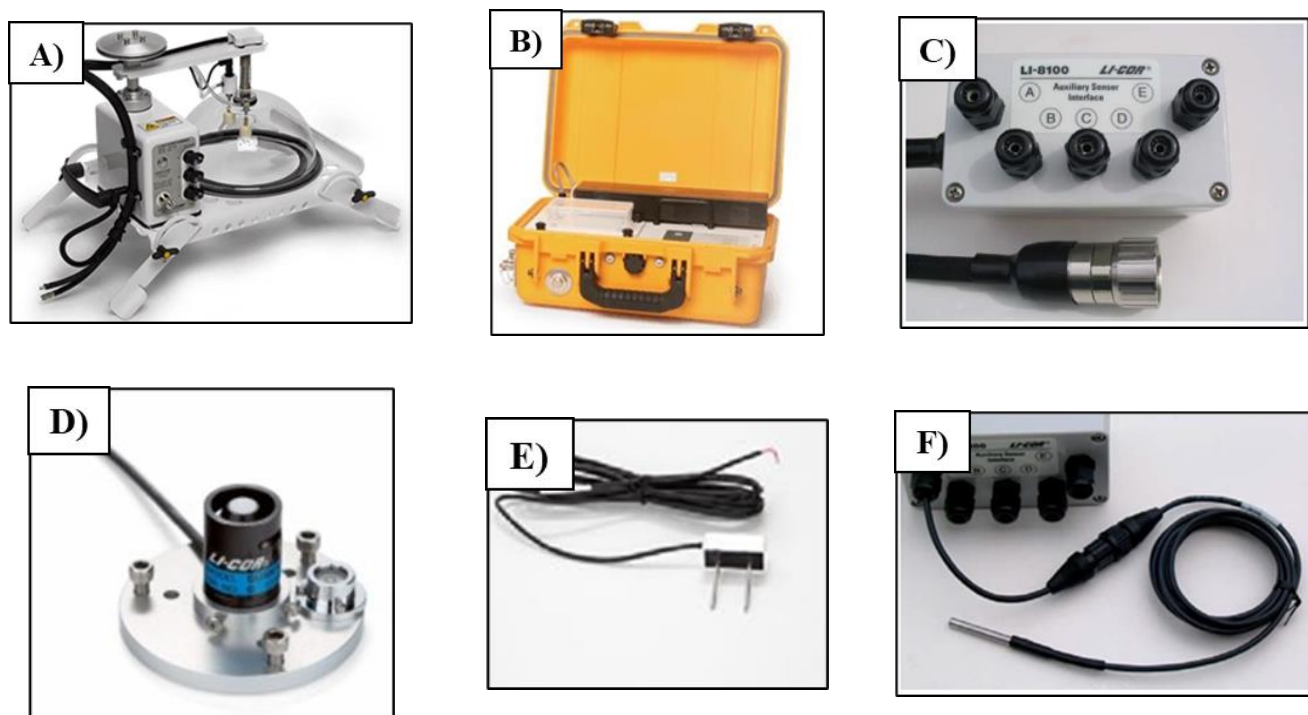


Figura 13 - O módulo do analisador de gás da LI-COR Biosciences (modelo LI-8100A): **A)** Câmara transparente de longo prazo; **B)** Cabine do analisador de gás infravermelho; **C)** Interface de sensor auxiliar; **D)** Sensor quântico LI-190R; **E)** Sensor de humidade do solo; **F)** Sonda termistor de temperatura do solo 8100-203.

Fonte: (LI-COR, 2010)

O módulo do analisador de gás da LI-COR Biosciences (modelo LI-8100A) consiste num sistema do tipo caixa, operado em estado não-estacionário, recolhendo e analisando as amostras de ar na câmara transparente, permitindo avaliações de fluxos de CO₂ (F_{CO2}) de curto, médio ou longo termo. A caixa é constituída por uma cúpula transparente móvel, permitindo a entrada de luz solar para o interior, e por uma base estrutural de pernas ajustáveis, que contém uma abertura circular, ladeada por uma borracha ao longo do seu perímetro, afim de evitar entradas ou saídas de ar que não seja originária da área superficial em análise.

A cúpula móvel faz movimentos de 180° e tem dimensões de 33 cm de altura, 22 cm de diâmetro e base aberta de 317,8 cm², um volume de aproximadamente 4.080

cm³, sendo o volume alterável dependendo da altura entre o solo e a superfície de base do equipamento.

O analisador de espectroscopia de infravermelhos não-dispersivo (NDIR) baseia-se na medida indireta da atenuação da radiação infravermelha que passa entre o transmissor, a amostra e o receptor. Essa variação então é traduzida na concentração de CO₂ na célula, seguindo a lei de Lambert-Beer. O analisador é operável na faixa de -20 a 45 °C e com precisão de ± 0,5 °C acima de 0-70 °C.

A Interface auxiliar de sensor tem como função conectar até 8 sensores distintos, sem que haja um sistema multiplexer. Normalmente é utilizado para conectar com sensores de temperatura do solo, humidade do solo e radiação solar, mas também proporciona uma conectividade para um suplemento de energia elétrica por meio de baterias ou fontes externas (LI-COR, 2010).

Os sensores auxiliares utilizados foram, o Sensor quântico LI-190R que mede a radiação fotossinteticamente ativa (PAR, em $\mu\text{mol de f\u00f3tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), par\u00e2metro importante, em raz\u00e3o dos organismos vegetais utilizarem a luz no comprimento de onda preferencialmente de 400 a 700 nm para realizar a fotoss\u00edntese, podendo variar um pouco em fun\u00e7\u00e3o das esp\u00e9cies vegetais. Todavia, em linhas gerais, o sensor tem a capacidade de medir a PAR e fornecer dados consistentes de poss\u00edveis respostas para a atividade fotossint\u00e9tica da planta, independente do espectro luminoso (LI-COR, 2021).

O sensor de humidade do solo (GS1 8150-205), regista o conte\u00fado volum\u00e9trico de \u00e1gua no solo, por meio de sensores diel\u00e9tricos. Este sensor mede com uma frequ\u00eancia de 10 ms e opera em condi\u00e7\u00f5es t\u00e9rmicas compreendidas entre -40 °C a 50 °C (METOS Pessl Instruments GmbH, 2021).

Finalmente, o kit do sensor de temperatura do solo consiste numa Sonda de Termistor de Temperatura do Solo (n/p 8150-203) e num adaptador de Sonda (n/p 9981-150) que fornece a temperatura da camada superficial do solo, onde ocorrem as trocas gasosas.

3.2.2 Metodologia de c\u00e1lculo de fluxo

Os fluxos s\u00e3o calculados com base na metodologia descrita no item 2.8.2 – m\u00e9todo da caixa n\u00e3o estacion\u00e1rio com circula\u00e7\u00e3o de ar – com recurso a ajustes lineares e exponenciais da evolu\u00e7\u00e3o da concentra\u00e7\u00e3o do CO₂ no interior da c\u00e2mara ao longo do per\u00edodo de medi\u00e7\u00e3o, que no presente estudo foi estabelecido em 1 minuto e 30 segundos.

O sistema recorre a uma função linear e exponencial (Eq. 14) para computar a concentração instantânea da fracção molar de CO₂ (C'), e posteriormente, a partir da curva de evolução das concentrações de CO₂ ($\frac{\delta C'}{\delta t}$) (Figura 14 e Eq. 15) é estimada a taxa de emissão de CO₂ (F_C ; $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para o tempo de observação por meio da expressão (Eq. 15) (LI-COR, n.d.):

$$C' = C'_s + [C'_0 - C'_s]e^{-\alpha t} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\frac{\delta C'}{\delta t} = \alpha [C'_s - C'_0]e^{-\alpha t} \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde C'_s (mol mol^{-1}) é a fracção molar de CO₂ na camada superficial do solo dentro da câmara, C'_0 (mol mol^{-1}) é referente à primeira estimativa após fechar a câmara, α (s^{-1}) uma taxa constante.

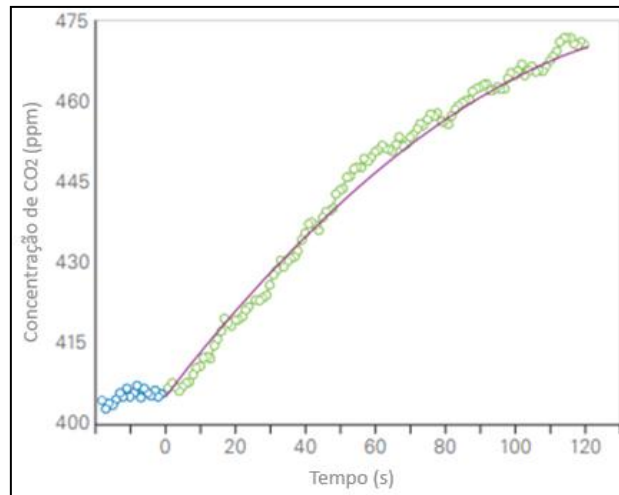


Figura 14 - Concentração de CO₂ dentro da câmara, após o fechamento da mesma. Os círculos azuis representam a pré-medição; os círculos verdes a evolução da concentração durante o período de medição e a linha roxa o ajuste exponencial.

Fonte: Adaptado (LI-COR, n.d.)

Estimada a taxa de emissão, é calculado então o fluxo dos parâmetros medidos pela expressão:

$$F_C = \frac{10V P_0 (1-W_0)}{R A (T_0+273,15)} \frac{\delta C'}{\delta t} \quad (\text{Eq. 16})$$

Sendo o volume (V ; cm^3), a pressão inicial (P_0 ; kPa), a fracção molar de vapor de água inicial (W_0 ; mmol mol^{-1}), a área de solo no interior da câmara (A ; cm^2), a temperatura inicial do ar (T_0 ; $^{\circ}\text{C}$); e a constante universal dos gases ideais (R ; $\text{Pa m}^3 \text{K}^{-1} \text{mol}^{-1}$).

A análise dos fluxos abrange as duas metodologias de cálculo integradas no sistema de medição – a regressão linear e a regressão exponencial -, de forma a avaliar-se também a diferença entre os dois. O Método por regressão linear apresenta menos ruído nos dados coletados, no entanto esse valor pode não ser tão preciso com a realidade pela atenuação da curva de concentração das câmaras. Enquanto o método por regressão exponencial, se assemelha mais com a curva de concentração, mas apresenta maiores ruídos de dados e por vezes pode sobre-estimar alguns valores obtidos (Forbrich et al., 2010; Smith & Conen, 2000).

Além disso, também convém realçar que se adotou o que está internacionalmente convencionado em termos de sentido dos fluxos - valores positivos representam o fluxo de emissão líquido do CO₂ do solo para a atmosfera, enquanto que os valores negativos um fluxo de sentido contrário (Fang et al., 2020; Chu et al., 2019; Teemusk et al., 2019; Elsgaard et al., 2012).

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

De modo a avaliar a contribuição da relva na dinâmica do fluxo de CO₂, procedeu-se a medições de fluxos em dois locais próximos, distanciados de 1 m, com as seguintes características diferenciadoras: solo completamente relvado (Figura 15 A) *versus* solo sem cobertura vegetal (Figura 15 B). Em cada um desses locais instalaram-se dois anéis de PVC, vulgarmente designados por colares, com 21 cm de diâmetro e 11,5 cm de altura.

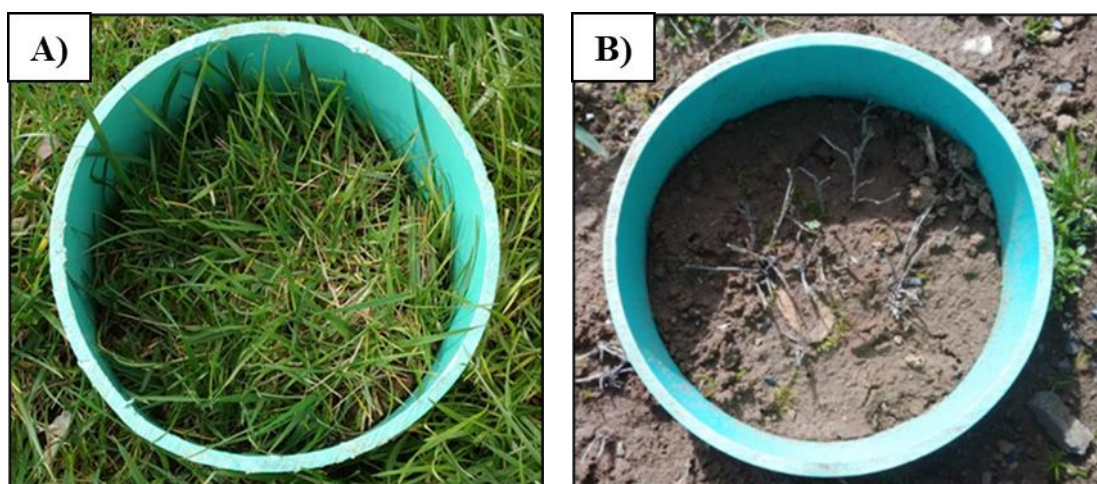


Figura 15 – Áreas de amostragem da transferência líquida de CO₂: **A)** Solo relvado, **B)** Solo exposto.

A medição dos fluxos do solo relvado ocorreu de forma contínua de 22 de fevereiro de 2021 a 19 de junho de 2021 (período de primavera), afim de adquirir a maior série temporal possível. Para o solo exposto foram realizadas medições dos fluxos cíclicas, seguindo uma rotina de 6 dias da semana na área relvada, e 1 dia no solo exposto.

Após a fixação dos colares e a instalação de todos os componentes do equipamento junto com os seus sensores (Figura 16), procedeu-se à configuração do analisador. O tempo de observação (tempo de medição) com duração de 1 minuto e 30 segundos, período de integração (= 1 s), o tempo de pré-purga (tempo de espera antes da medição) estabelecido em 30 s, o tempo de pós-purga de 45 s (tempo de espera após completar o tempo de observação), totalizando 1 minuto e 15 segundos de espera entre as observações (este tempo assegura que a medição anterior não interfere na medição subsequente) totalizando um ciclo de análise de 2 minutos e 45 segundos. Este procedimento foi configurado em triplicatas, em intervalos de 15 minutos de contagem iniciada em conjunto com o início do primeiro ciclo.



Figura 16 – Dispositivo experimental com equipamentos e sensores instalados.

O equipamento utiliza a expressão Eq. 16 para o cálculo do fluxo, onde a maioria dos valores são medidos e determinados automaticamente, faltando apenas o valor do volume para que o cálculo do fluxo possa ser realizado. Para tal o equipamento solicita a

medição do chamado “*off-set*”, que se trata da deslocação da base estrutural aberta do equipamento em relação ao solo analisado (Figura 17).

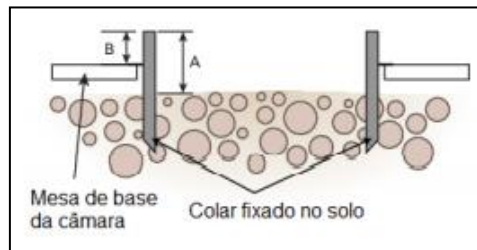


Figura 17 – Esquema do cálculo do deslocamento da câmara em relação a superfície do solo.

Fonte: (Reis, 2019)

A determinação do valor de *off-set* (cm) é dado pela expressão (Eq. 17), que permite fazer a correção do volume do espaço interior da câmara:

$$Offset = A - B \quad (Eq. 17)$$

Sendo “A” a altura interna do colar em relação ao solo (cm) e “B” a altura externa do colar relativamente à base estrutural do equipamento (cm).

Após as devidas configurações do sistema, o equipamento realizou as medições de forma autónoma e armazenou-as num *data logger*. Posteriormente, com ajuda de um dispositivo de rede local sem fio, extraíram-se os dados para uma planilha dinâmica para posteriores tratamentos.

3.4 MEDIÇÃO DE OUTROS PARÂMETROS AMBIENTAIS

3.4.1 Parâmetros Meteorológicos

Os parâmetros meteorológicos convencionais (i.e., velocidade e direção do vento, humidade relativa e temperatura do ar, radiação solar e precipitação) foram monitorizados com uma estação meteorológica instalada junto ao local de medição dos fluxos de CO₂ (Figura 18).



Figura 18 – Kit da estação meteorológica e analisador de fluxo instalados no local de estudo.

A estação meteorológica é constituída por seis componentes (Figura 19):

- *Datalogger* modelo CR200X, para registo e armazenamento de dados de forma autónoma em ambientes distantes e adversos. Este aparelho possui vários canais de entrada para incluir sensores adicionais, podendo ser operado em temperaturas de - 40 °C a 50 °C (Campbell Scientific, 2021b) (Figura 19 A).

- Sensor de direção (cata vento) em conjunto com um sensor de velocidade do vento (anemómetro de copos) (Figura 19 B & Figura 19 C). Os dois sensores são inteiramente feitos de metal, com rotor de copos, com limite de velocidade de impacto de 80 m/s (Lambrecht Meteo, 2021b, 2021a).

- Sonda de temperatura e humidade relativa (modelo CS215) feita de alumínio anodizado, com escudo de radiação, porosidade de 64% e tamanho de poro de mais de 3 µm, operável na faixa de temperatura entre -40 °C a 70 °C (Figura 19 D) (Campbell Scientific, 2021c).

- Piranómetro (modelo PYR-S), capaz de medir todo o espectro de luz solar (300 a 1100 nm), podendo ser operado sobre temperaturas de - 40 a 55 °C e humidade relativa até 100% (Figura 19 E) (Apogee Instruments, n.d.).

- Sensor de precipitação (*Rain Gauge*) (Modelo ARG100), um instrumento de formato clássico feito de plástico resistente a raios ultravioletas. Este formato pode trazer valores subestimados caso haja presença de muito vento perto do orifício do sensor, podendo chegar a valores de 75% dependendo da intensidade dos ventos (Figura 19 F) (Campbell Scientific, 2021a).

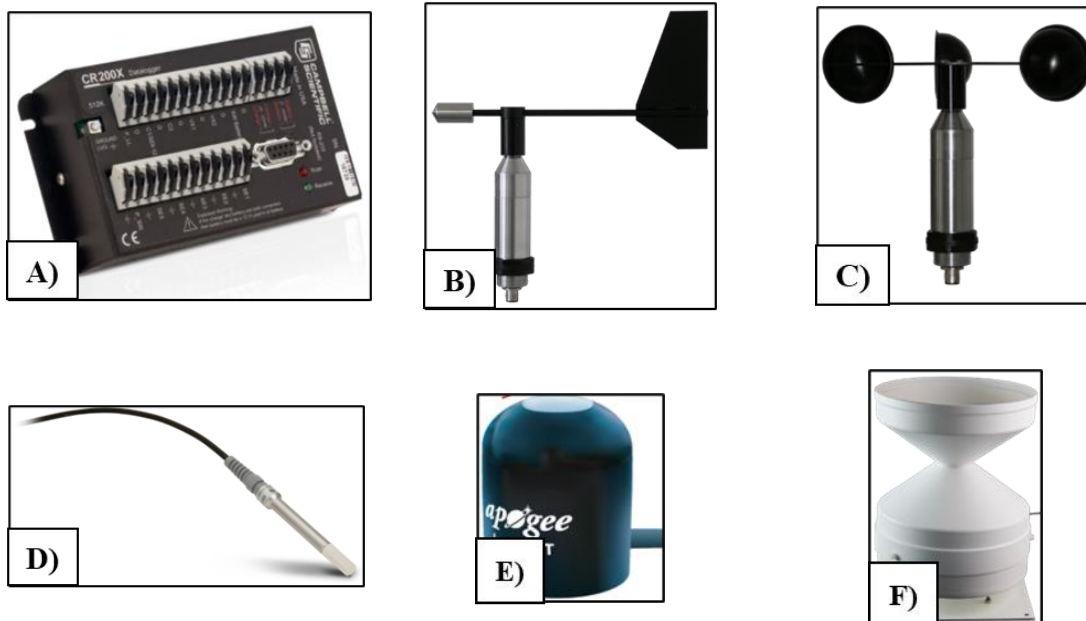


Figura 19 – Componentes da estação meteorológica: **A)** Datalogger; **B)** Anemoscópio; **C)** Anemómetro; **D)** Sensor de temperatura e humidade relativa; **E)** Piranómetro; **F)** *Rain gauge*.

Fonte: (Apogee Instruments, n.d.; Campbell Scientific, 2021a, 2021c, 2021b; Lambrecht Meteo, 2021b, 2021a)

3.4.2 Avaliação do Coberto Vegetal

A avaliação do coberto vegetal foi feita com base na monitorização do crescimento da relva ao longo do tempo, por amostragem, respeitando as operações de corte a que normalmente é submetida para a manutenção do relvado em boas condições, por parte do zelador do espaço.

Foram consideradas 3 amostras circulares com uma área de 0.0346 m² (área do colar de medição dos fluxos), representativas do relvado. As medições e colheita da biomassa nos pontos de amostragem foram feitas com uma periodicidade de cerca de 15 dias, tentando-se seguir a rotina de operações do corte efetuadas no restante relvado para a sua manutenção. Em cada ponto de amostragem/período de observação mediu-se a altura da relva e a percentagem de coberto para avaliação do fitovolume e recolheu-se toda a relva produzida dentro do anel de amostragem para determinação da biomassa. Além disso, o mesmo era feito para a área de medição dos fluxos, no entanto, o período era realizado apenas em conjunto com a manutenção da relva feita pelo zelador.

Para estimar a percentagem de cobertura vegetal utilizou-se o método do quadrado, ou seja, a área de amostragem foi coberta com uma quadrícula virtual

sobreposta na fotografia da respetiva amostra. A percentagem de coberto foi obtida dividindo o número de quadrados de solo exposto pela totalidade de quadrados presentes na área delimitada, onde cada quadrado equivalia a 1,526 cm².

A medição da altura (m) da relva foi obtida com uma régua graduada com aproximação ao mm. A altura da relva foi medida em três pontos aleatórios dentro do respetivo colar a fim de obter o valor médio da altura atingida em cada ponto/período observado. Paralelamente avaliou-se a percentagem da cobertura vegetal desta mesma área de forma aproximada e tiraram-se fotos para ajustamento posterior.

O fitovolume (FV_{colar} ; m³) foi calculado através da multiplicação da altura do estrato vegetal (h_{veg} ; m) pela área do colar ($A_{colar}=0,0346$ m²) e pela percentagem de cobertura vegetal ($\%_{veg}$) (Eq. 18).

$$FV_{colar} = h_{veg} \times A_{colar} \times \frac{\%_{veg}}{100} \quad (\text{Eq. 18})$$

Após a medição da altura herbácea procedeu-se ao corte rente do coberto vegetal presente no interior do colar. A relva recolhida foi armazenada em sacos de plástico devidamente identificados e depois levados para o laboratório para determinação da biomassa. No laboratório as amostras recolhidas foram pesadas em fresco (Figura 20), numa balança de precisão (0,001g), obtendo-se o valor de massa vegetal húmida. Seguidamente as amostras foram secas em estufa a 70 °C, por um período de 48 horas até peso constante, para depois ser novamente pesadas para obtenção do peso seco (biomassa).



Figura 20 – Métodos secagem e pesagem da biomassa fresca e seca.

O fitovolume juntamente com a biomassa são variáveis que permitem contabilizar a produção da vegetação herbácea do relvado nos períodos de tempo

considerados. A produção herbácea obtida depende das condições edafoclimáticas e do processo fotossintético, constituindo um dos principais parâmetros relativos à vegetação que influencia o processo das trocas gasosas entre o solo e atmosfera. Todavia, como a área de medição dos fluxos não se mostrou totalmente representativa em termos de biomassa, optou-se por analisar o comportamento do fitovolume, em virtude deste evoluir de forma semelhante no interior e exterior do colar. A partir dos dados de fitovolume obtidos foi possível transformar uma variável discreta em variável contínua para análise posterior da correlação com os restantes parâmetros. Para isso calculou-se uma taxa de crescimento para períodos idênticos aos de observação da estação meteorológica. Esta taxa linear de crescimento em altura da relva foi adicionada cumulativamente ao valor inicial do respetivo período para estimar o crescimento da relva e o respetivo fitovolume. Este método baseia-se no facto da taxa de crescimento da relva ser considerada linear durante a fase de alongamento foliar (Voorend et al., 2014; Henri W. Groeneveld, 1998).

A humidade da relva (H_{relva} ; %) foi calculada através da diferença da biomassa fresca (BM_{fresca} ; g) e seca (BM_{seca} ; g) dividida pela própria biomassa fresca, obtendo-se a fração de humidade da biomassa (Eq. 19)

$$H_{relva} = \frac{BM_{fresca} \times BM_{seca}}{BM_{fresca}} \quad (\text{Eq. 19})$$

Estimou-se a massa de carbono (M_{carb} ; g C) na biomassa por meio da taxa recomendada pelo IPCC Guidelines de cerca de 50% da biomassa seca (Singh et al., 2014; Land, 1996).

A produção de biomassa herbácea (P_{he} ; g m⁻² d⁻¹) foi estimada a partir da biomassa seca coletada, como descrito anteriormente, em aproximadamente 15 dias. Dividindo a massa de carbono contida no colar (g) pela área do colar ($A_{colar} = 0,03464$ m²) e por 15 dias (Eq. 20).

$$P_{he} = \frac{BM_{seca}}{15 \times A_{colar}} \quad (\text{Eq. 20})$$

3.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados fornecidos pelo sistema de medição de fluxos foram recolhidos periodicamente da memória interna do aparelho, com ajuda do software Soil Flux Pro™, e posteriormente organizados e processados no formato de tabela dinâmica do software EXCEL 2016™. Este software foi usado também para o tratamento dos dados,

nomeadamente análises de estatística descritiva (média, mediana, erro padrão) e como principal ferramenta de elaboração de gráficos. Utilizou-se o software OriginPro 2021, para as análises estatísticas mais robustas como teste de normalidade, ANOVA com teste Tukey, ANOVA Kruskal-Wallis com teste Dunn. Foi utilizado o Teste de Tukey para avaliar a significância da diferença entre as médias e o teste de Dunn para as medianas, pelo facto de os dados não passarem no teste de normalidade e esses testes utilizarem os respectivos parâmetros para a hipótese nula, Gráficos do tipo Boxplot, coeficiente de correlação de Spearman e Multi-regressão linear.

Sempre que os pressupostos da normalidade não foram satisfeitos a análise estatística foi efetuada com recurso à estatística não paramétrica. A ANOVA com teste Tukey realizada foi fundamentada sob o teorema central do limite, um teorema de probabilidade que afirma que quanto maior for o tamanho da amostragem, maior a probabilidade desta tender para a normalidade (Fischer, 2011).

Alguns valores pontuais mostraram-se muito fora da curva esperada (*Outliers*) tendo sido eliminados com base na diferença dos valores entre os métodos, durante a mesma medição, e a tendência esperada entre os valores anteriores e posteriores.

Para as análises mensais, utilizou como referência as datas do equinócio de primavera (21 de março) e solstício de verão (21 de junho). Assim, o primeiro mês representa o último mês característico do inverno, enquanto os meses subsequentes representam toda a estação da primavera.

Para realização dos testes de Coeficiente de Correlação de Spearman foi necessário ordenar todos os parâmetros numa linha temporal com o mesmo número de observações de dados. Assim, consideraram-se as médias para cada meia hora da série temporal, com exceção para os dados de precipitação, para a qual se procedeu ao somatório para o mesmo período.

O balanço líquido de carbono foi calculado utilizando médias para cada meia hora, e estimando a massa de carbono transferida entre a interface superfície/atmosfera. Assim, somou-se a parcela de fluxos de emissão, de absorção e o balanço líquido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os principais resultados obtidos neste estudo, em particular as características meteorológicas e de cobertura vegetal ao longo do período de avaliação, a evolução temporal da transferência líquida vertical de dióxido de carbono, uma estimativa da contribuição isolada do solo e da cobertura vegetal para essa transferência, a avaliação do comportamento global da superfície ao longo do período de observação e, ainda, são explorados os vários parâmetros que influenciam a transferência de CO₂, através de uma abordagem de modelação assente em modelos de multirregressão.

4.1 PARÂMETROS EDAFOCLIMÁTICOS

Na Figura 21 apresenta-se a evolução temporal de algumas variáveis edafoclimáticas como o conteúdo de água do solo (Hsolo), a temperatura do Solo (Tsolo), temperatura e humidade relativa do ar ambiente (Tamb e Hamb), humidade relativa do ar da caixa (Hcaixa), radiação solar (RS), radiação fotossinteticamente ativa (PAR), precipitação (Prp), velocidade e direção dos ventos (VelVnt e DirVnt), as quais permitiram avaliar o comportamento edafoclimático ao longo do período de análise. Fez-se também o perfil médio diário para observar o ciclo comportamental intradiário dos parâmetros, com exceção da direção e velocidade dos ventos e da precipitação.

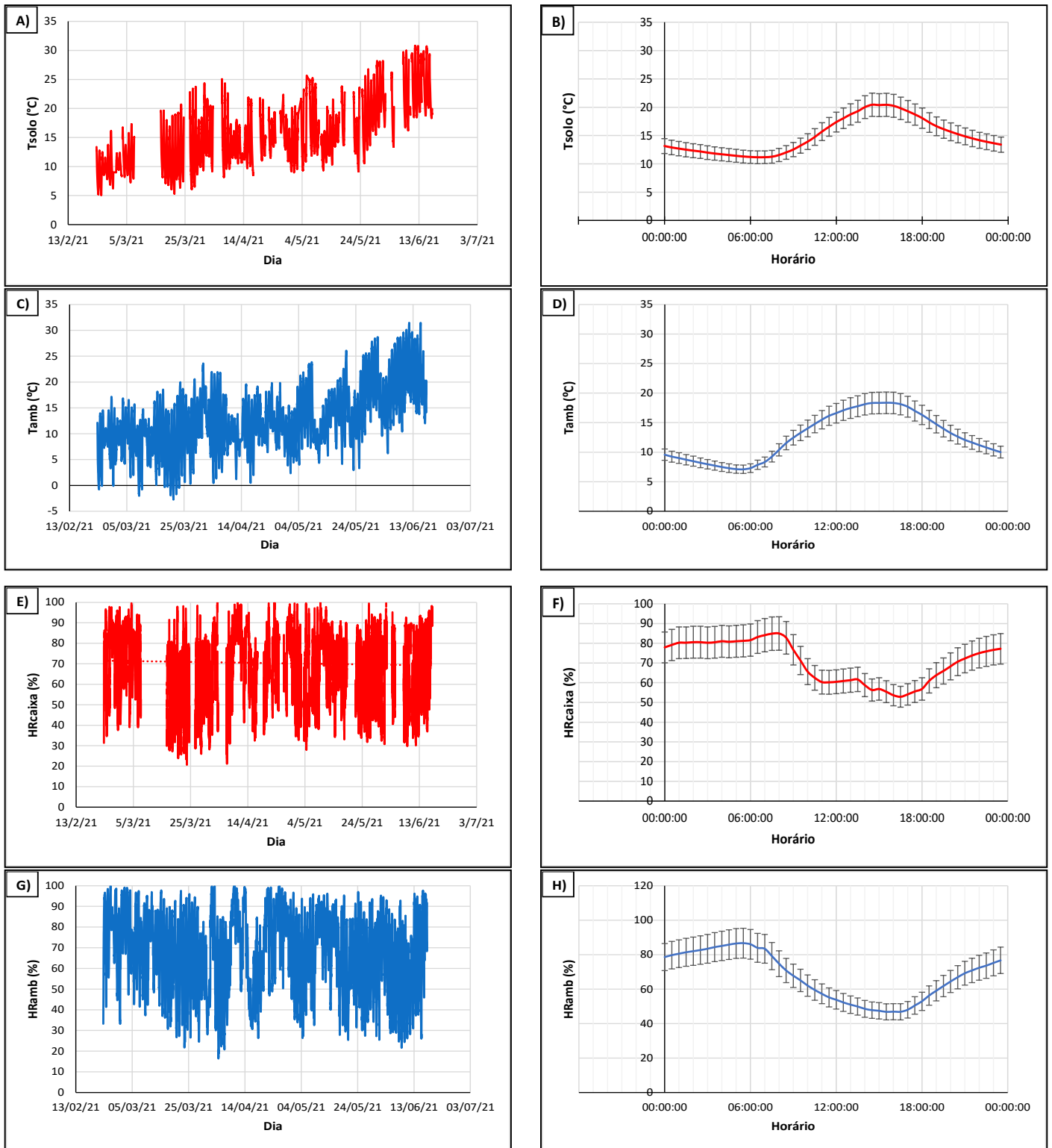


Figura 21 – Parâmetros Edafoclimáticos: **A)** Evolução temporal da temperatura do solo (°C); **B)** Perfil médio diário da temperatura do solo (°C); **C)** Evolução temporal da temperatura ambiente (°C); **D)** Perfil médio diário da temperatura ambiente (°C); **E)** Evolução temporal da umidade relativa do ar no interior da caixa (%); **F)** Perfil médio diário da umidade relativa do ar no interior da caixa (%); **G)** Evolução temporal da umidade relativa do ar ambiente (%); **H)** Perfil médio diário da umidade relativa do ar ambiente (%).

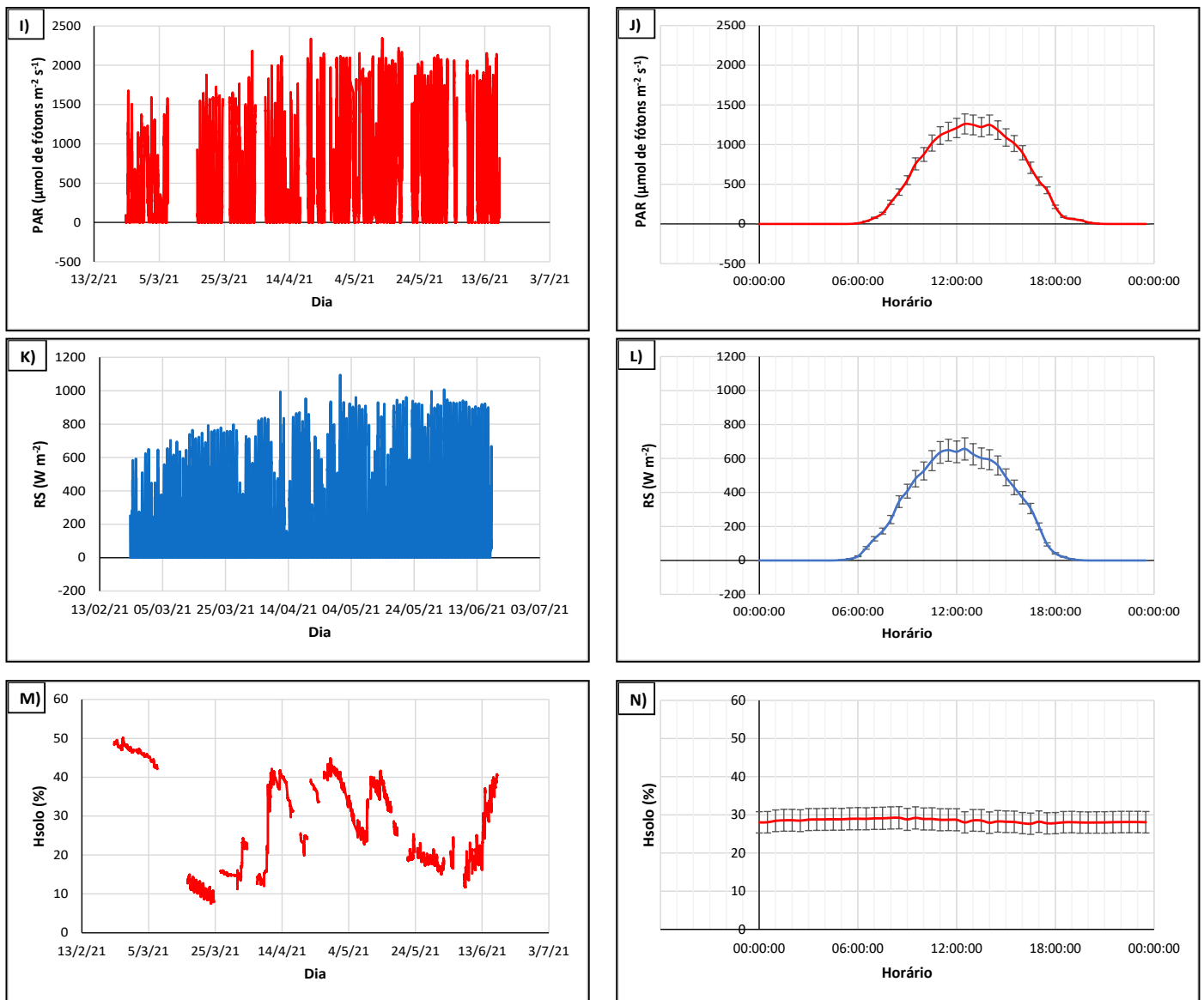


Figura 21 (cont.) – Par\u00e2metros Edafoclim\u00e1ticos: **I)** Evolu\u00e7\u00e3o temporal da radia\u00e7\u00e3o fotossinteticamente ativa ($\mu\text{mol de f\u00f3tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); **J)** Perfil m\u00e9dio di\u00e1rio da radia\u00e7\u00e3o fotossinteticamente ativa ($\mu\text{mol de f\u00f3tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); **K)** Evolu\u00e7\u00e3o temporal da radia\u00e7\u00e3o solar (W m^{-2}); **L)** Perfil m\u00e9dio di\u00e1rio da radia\u00e7\u00e3o solar (W m^{-2}); **M)** Evolu\u00e7\u00e3o temporal do conte\u00fado de \u00e1gua no solo (%); **N)** perfil m\u00e9dio di\u00e1rio do conte\u00fado de \u00e1gua no solo (%).

Como expect\u00e1vel, a temperatura do solo e do ambiente apresentaram uma evolu\u00e7\u00e3o temporal muito semelhante. Esta semelhan\u00e7a \u00e9 bem vis\u00edvel ao longo do per\u00edodo de avalia\u00e7\u00e3o na s\u00e9rie temporal (Figura 21 A & C), enquanto que ao longo do dia o comportamento similar \u00e9 ilustrado pelas curvas que descrevem o perfil m\u00e9dio di\u00e1rio (Figura 21 B & D). Estatisticamente, estas duas vari\u00e1veis n\u00e3o diferiram entre si em termos m\u00e9dios (Tukey $p < 0,05$), por\u00e9m apresentaram diferen\u00e7as a n\u00edvel das medianas (Dunn $p < 0,05$) o que demonstra a diferen\u00e7a de escala dos valores obtidos. Ambas apontaram uma tend\u00eancia crescente ao longo da primavera. As temperaturas da superf\u00edcie do solo e

do ar ambiente apresentaram, respectivamente, valores mínimos (instantâneos) noturnos de 5,06 e -2,82 °C e máximos diurnos entre 30 e 32 °C.

A humidade relativa do ar analisado no interior da câmara durante o período de medição (HRcaixa) e a humidade relativa do ar ambiente analisado pela estação meteorológica (HRamb) também apresentaram algumas semelhanças em termos de comportamento temporal, com valores de curto termo compreendidos entre os 20% e os 100%, sendo que os valores máximos ocorreram sistematicamente nos períodos crepusculares.

A radiação solar (RS) e a fotossinteticamente ativa (PAR) foram outros parâmetros com evolução temporal semelhante, apresentando máximas de 1.133,32 W m⁻² e 2.343,16 μmol de fótons m⁻² s⁻¹, respectivamente, entre as 11h00 e as 14h30. A radiação PAR corresponde a uma fração da radiação solar, mais especificamente a faixa de 400 a 700 nm do espectro solar, podendo variar entre uma taxa de 0,44 a 0,69 em relação a RS (Assunção, 1994; Neto et al., 1989).

No que concerne ao conteúdo de água no solo foi possível avaliar os fluxos em diferentes condições de humidade da superfície, próximas da saturação (50%) e com baixo teor de humidade (3 %), mas ao longo do dia a superfície manteve-se com um nível de humidade muito satisfatório (em torno dos 28%). Esta situação deve-se ao sistema de rega com controlo automático que permite repor os níveis de humidade da superfície. A Figura 22 ilustra esta situação, sendo possível visualizar a elevada contribuição da rega na manutenção da humidade do solo, em particular em maio e junho.

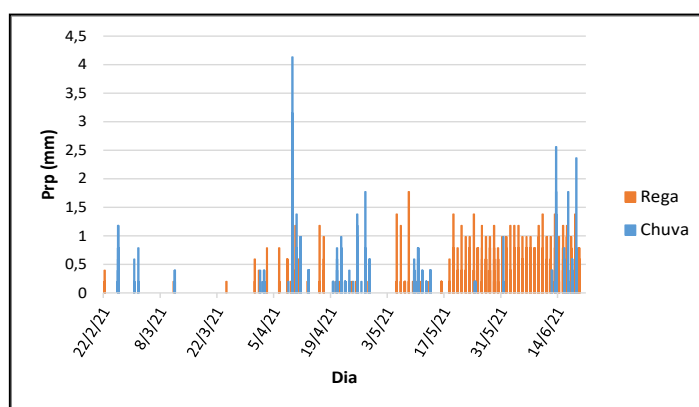


Figura 22 – Evolução temporal da precipitação (mm). Sendo as barras laranjas a precipitação advinda das regas realizadas pelo zelador e as barras azuis advindo das chuvas.

Outra variável com influência na transferência vertical de CO₂, a velocidade do vento, encontra-se representada na Figura 23 sob a forma de rosa dos ventos para todo o

período de observação. De um modo geral os ventos variaram entre fracos a moderados e sopraram predominantemente de sudoeste.

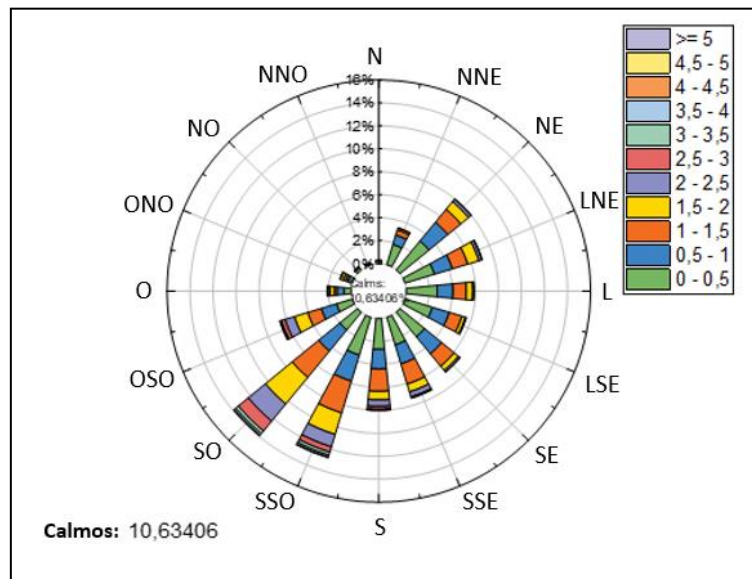


Figura 23 – Rosa dos Ventos acoplada à velocidade dos ventos (m s^{-1}).

Tabela 1 - Parâmetros estatísticos descritivos relativos aos parâmetros edafoclimáticos e meteorológicos.

	RS (W m⁻²)	PAR (μmol de fótons m⁻² s⁻¹)	RHcaixa (%)	HRamb (%)	Tsolo (°C)	Tamb (°C)	HRsolo (%)	VelVento (m s⁻¹)
Média	205,16 ^c	379,20 ^d	70,34 ^b	67,65 ^b	14,96 ^a	12,62 ^a	28,44	0,87
Mediana	22,60 ^d	39,76 ^e	75,37 ^c	70,76 ^c	13,98 ^a	12,02 ^b	26,10	0,73
Desvio Padrão	286,55	569,78	16,32	20,34	5,16	6,19	12,17	0,83
Erro Padrão	2,21	3,82	0,11	0,16	0,03	0,05	0,08	0,01
Máximo	1133,23	2343,16	99,98	100,00	30,82	31,72	50,20	5,17
Dia Max	30/04/2021 11:50:00	12/05/2021 12:12:16	23/04/2021 09:10:13	25/02/2021 06:20:00	11/06/2021 16:11:15	15/06/2021 16:10:00	25/02/2021 08:22:13	13/05/2021 15:10:00
Mínimo	0,00	0,68	20,66	15,64	5,06	-2,82	7,60	0,00
Dia Min	22/02/2021 18:50:00	30/05/2021 21:43:13	23/03/2021 16:51:15	04/04/2021 14:20:00	24/02/2021 08:19:14	21/03/2021 07:00:00	23/03/2021 16:30:13	22/02/2021 18:40:00

Nota: letras diferentes (a, b, c, d, e) por linha indicam diferenças significativa pelo teste Tukey (p<0,05) para as médias e teste Dunn (p<0,05) para as medianas. **RHar**: humidade relativa do ar; **PAR**: Radiação Fotossinteticamente Ativa; **Tsolo**: temperatura do solo; **HRsolo**: teor de humidade do solo; **HRamb**: humidade relativa do ambiente; **RS**: radiação solar; **Tamb**: temperatura do ambiente; **VelVento**: velocidade dos ventos.

4.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS VEGETATIVOS

4.2.1 Análise do coberto herbáceo da superfície

Na Figura 24 apresenta-se uma sequência de fotografias ao longo do tempo que demonstram a evolução do estado da relva e da percentagem de coberto da mesma no ponto usado para análise dos fluxos.

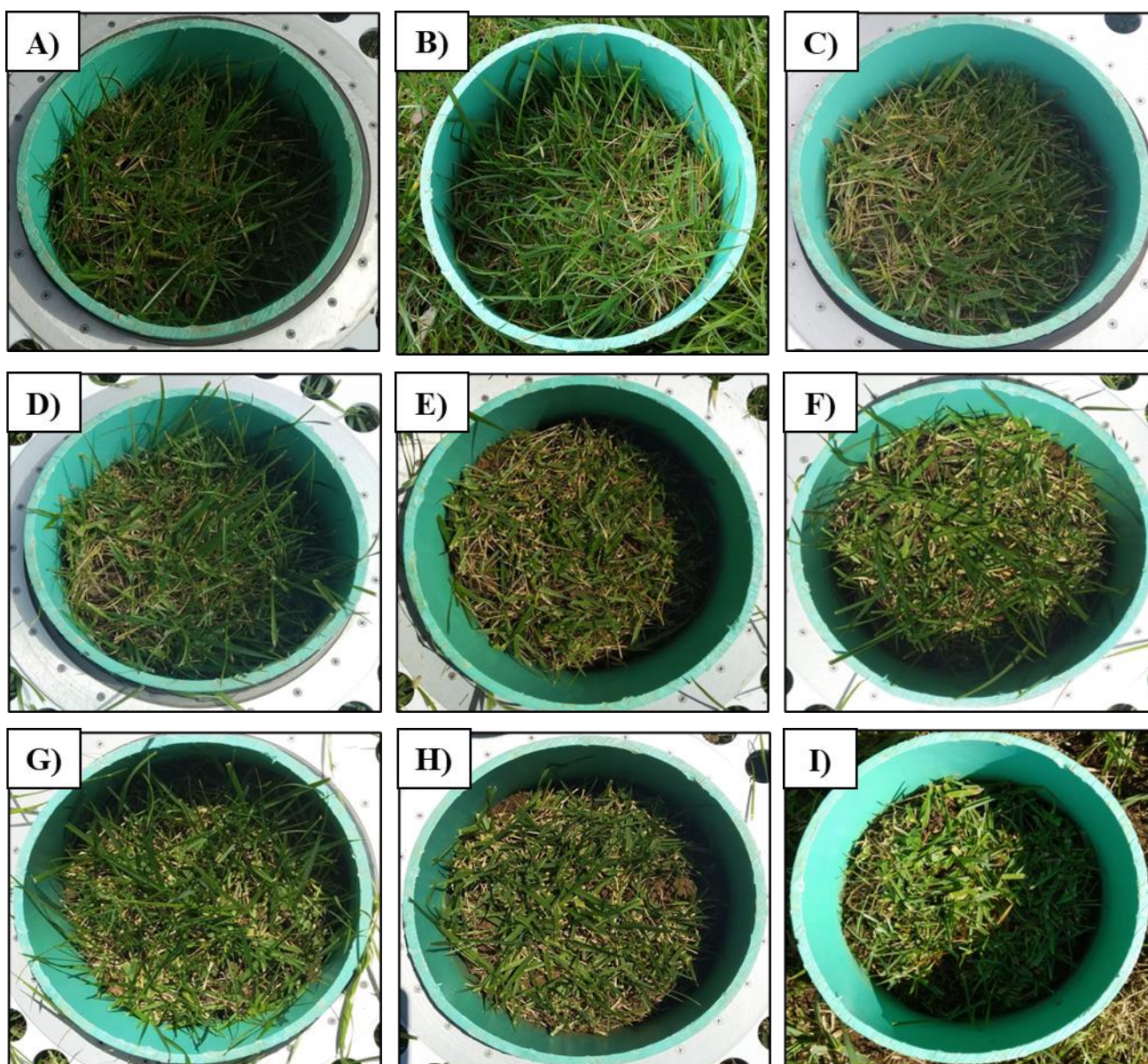


Figura 24 – Evolução temporal do estado vegetativo do solo relvado com base na análise fotográfica dos dias: **A)** 22 de fevereiro; **B)** 10 de março; **C)** 24 de março; **D)** 07 de abril; **E)** 28 de abril; **F)** 12 de maio; **G)** 18 de maio; **H)** 10 de junho; **I)** 19 de junho.

Aferiu-se a percentagem remanescente do coberto vegetal do relvado na área delimitada pelo anel, de acordo com a metodologia descrita, ao longo dos 4 meses de análise (Figura 25). No período de 22 de fevereiro a 19 de julho o coberto vegetal no interior do colar teve uma redução estimada em cerca de 5%. Aplicando uma linha de tendência polinomial aos valores da estimativa da percentagem de coberto registrada nos diferentes períodos analisados ($R^2 = 0,9795$), observou-se um decréscimo da percentagem de coberto herbáceo no primeiro mês de aproximadamente 1,7%, uma redução de apenas 0,5% no segundo mês relativamente ao anterior, e uma redução inferior a 2,9% nos meses seguintes, totalizando apenas 5% aproximadamente. A redução da percentagem de coberto no período em estudo foi relativamente reduzida, devido à rega que permitiu manter o relvado relativamente homogêneo no que se refere a esta variável.

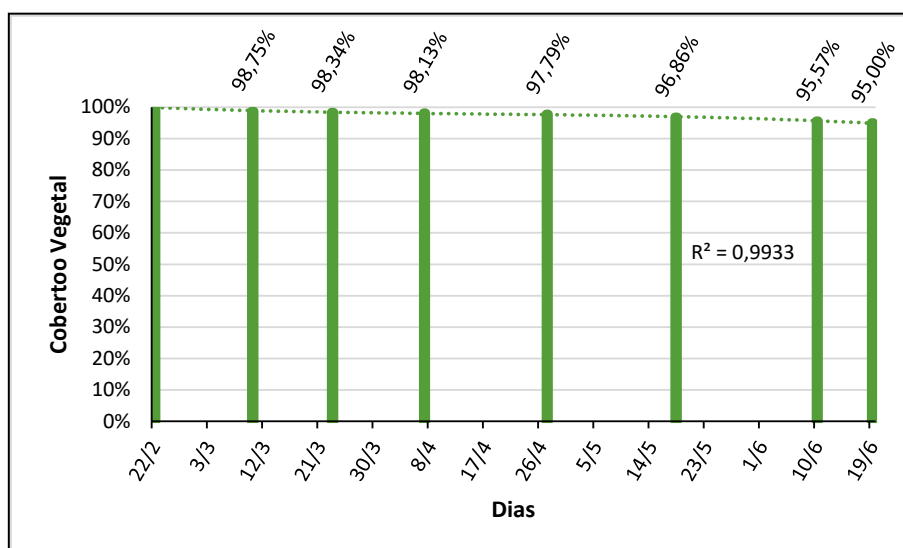


Figura 25 – Evolução temporal da percentagem de coberto vegetal.

4.2.2 Avaliação da biomassa

Na Figura 26 apresenta-se a biomassa recolhida por m^2 nos pontos de amostragem e na área de medição em distintas fases do período de avaliação. Observou-se uma ligeira discrepância em termos de biomassa produzida entre o relvado interno e externo ao colar. Constatou-se que a partir do segundo corte, a biomassa produzida no interior do colar apresentou uma redução comparativamente ao relvado externo. Dado também constatado no teste Tukey ($p < 0,05$).

Os locais de amostragem de biomassa obtiveram uma média de $70,76 \text{ g m}^{-2}$ coletados num período de 15 dias, que convertido chega a um valor de $4,92 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, enquanto que, na área de medição do fluxo a média foi de $45,84 \text{ g m}^{-2}$ a cada 15 dias, equivalente a $3,04 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Este facto evidencia que a biomassa foi bastante afetada pela presença do colar, devido ao seu efeito no desenvolvimento das gramíneas junto à parede interna do colar.

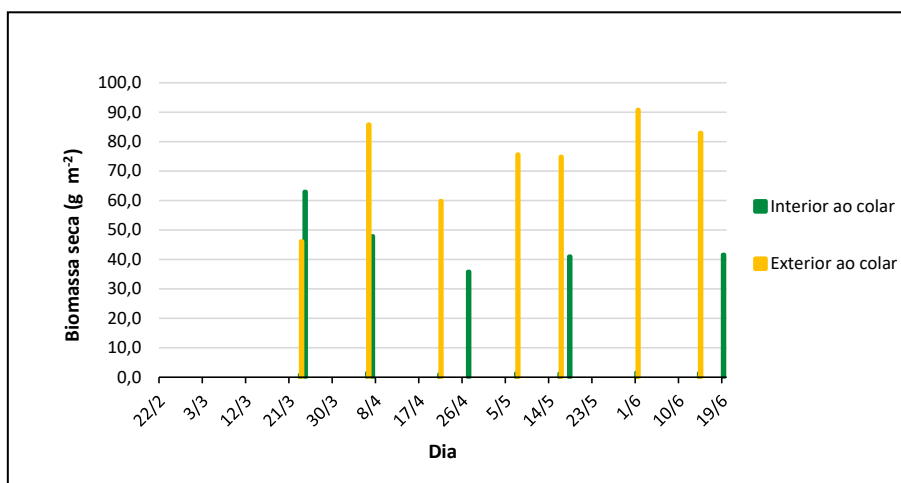


Figura 26 – Evolução temporal da biomassa de carbono produzida, em g/m^2 no interior e no exterior do colar de medição no período em análise.

Analisou-se também a percentagens de humidade presente na biomassa como se ilustra na Figura 27. De um modo geral observaram-se semelhanças entre os valores da humidade da biomassa do relvado do interior e exterior ao colar de medição, tendo-se registado valores médios de 71,97% e 75,63%, respectivamente. Assim, constata-se que o colar não afetou a humidade da biomassa do relvado localizado no seu interior.

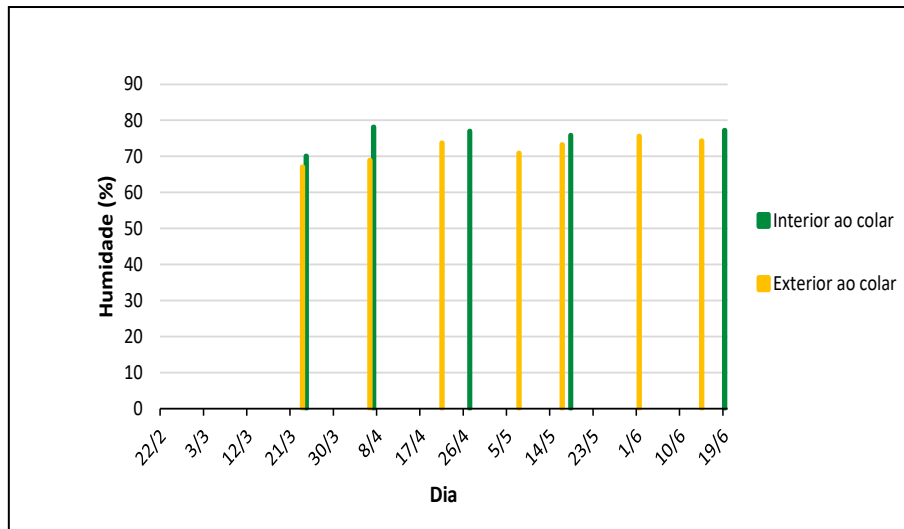


Figura 27 – Evolução temporal da percentagem de humidade da biomassa do interior e do exterior do colar de medição ao longo do tempo de análise.

4.2.3 Avaliação do fitovolume

Na Figura 28 apresenta-se o fitovolume dos pontos amostrados ao longo do tempo convertido em metro cúbico por hectare ($m^3 ha^{-1}$). Representa-se com barras de coloração verde clara os valores do fitovolume após o corte do relvado no interior do colar de medição, sempre que o zelador procedia ao corte da relva, e a verde escuro o fitovolume do mesmo antes do corte. A barra de coloração amarela corresponde ao fitovolume avaliado no relvado exterior ao colar.

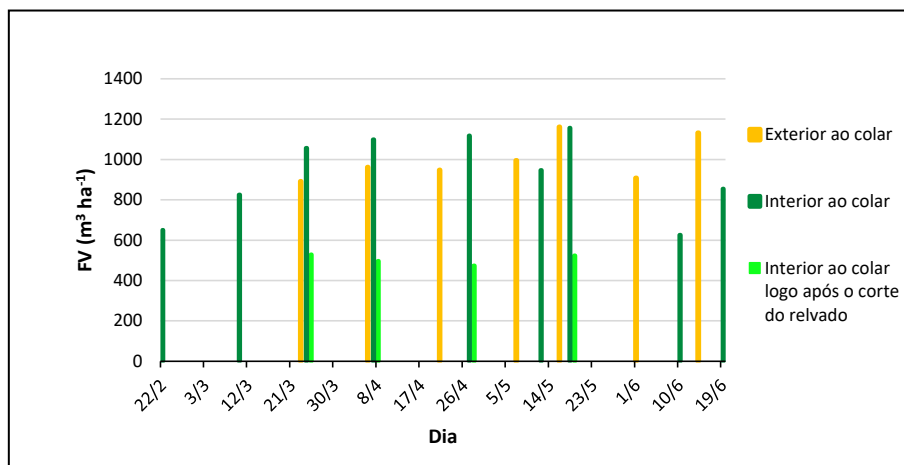


Figura 28 – Evolução temporal do fitovolume no interior (verde escuro) e no exterior do colar de medição (amarelo) ao longo do tempo de análise. A coloração verde clara representa as medições feitas após o corte do relvado.

Observou-se que o relvado inserido no colar de medição apresentou um comportamento de fitovolume semelhante ao do relvado externo segundo o teste Tukey

($p < 0,05$). Assim, o relvado interno não sofreu perturbações neste parâmetro com a presença do colar. Foram registados picos máximos de aproximadamente $1160 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e valores de pós corte de $500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

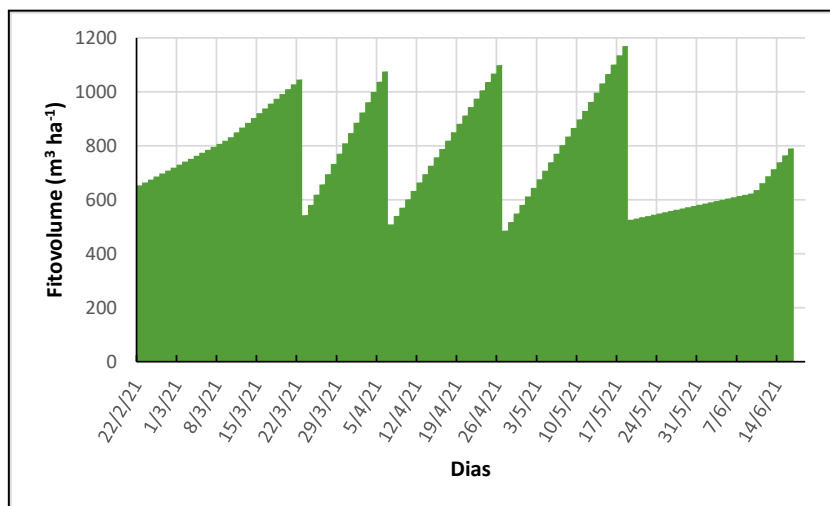


Figura 29 – Evolução temporal do fitovolume do relvado na área de medição dos fluxos, com o crescimento entre intervalos estimado linearmente.

A análise do fitovolume foi também efetuada mensalmente (Figura 30). Assim, pode observar-se que os meses com maior taxa de crescimento foram os meses 2 e 3 (final de março a maio), e os meses com menores taxas de crescimento foram o 1 e 4 (final de fevereiro a março e final de maio a junho, respectivamente). Esta diferença pode ser explicada, como mencionado no tópico 2.7, pela temperatura de cada período e por possíveis cortes inadequados da altura do relvado, comprometendo a rebentação do mesmo.

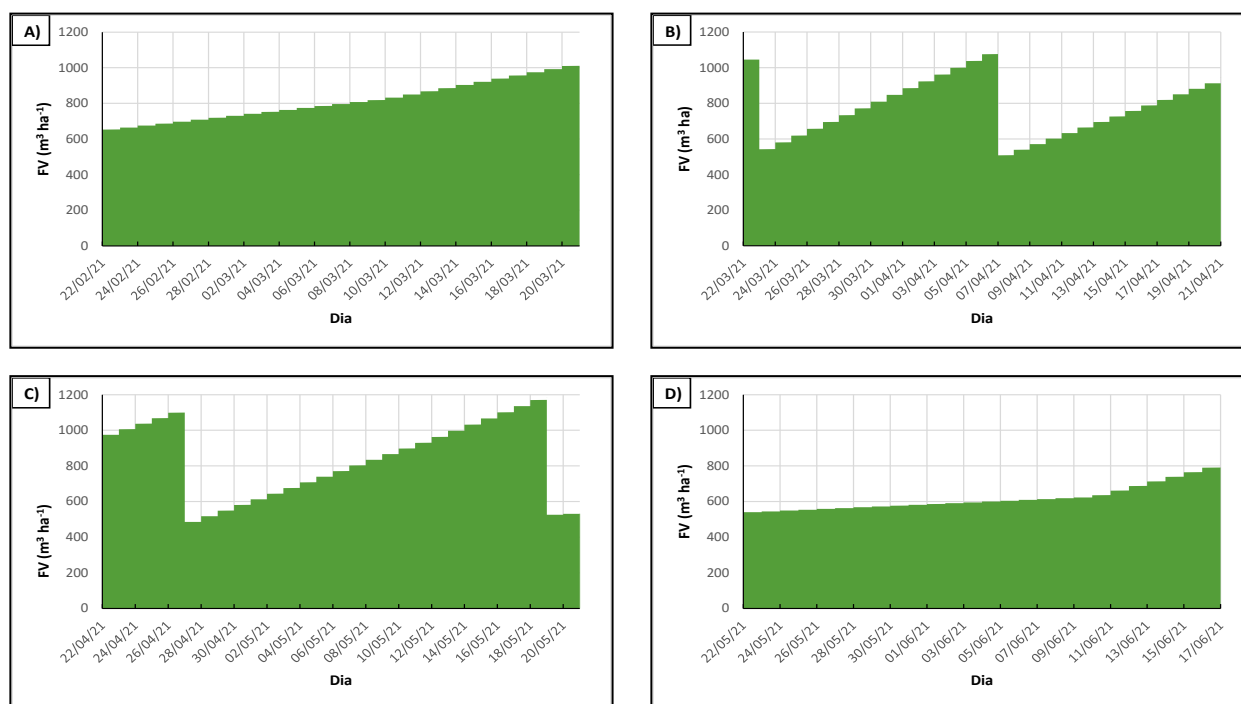


Figura 30 – Evolução temporal do fitovolume da área de medição dos fluxos para cada mês de análise: **A)** fevereiro e março; **B)** março e abril; **C)** abril e maio e **D)** maio e junho.

No primeiro mês de análise, a umidade do ar teve uma variação de 60% e uma leve tendência de decréscimo com o passar dos dias. A umidade do solo apresentou valores próximos dos 50% no início do período e uma diminuição de 15% no final do período. Além disso, foi no primeiro mês que se observaram os menores valores de temperaturas tanto do solo como do ambiente tendo estas se mantido predominantemente abaixo dos 15 °C. Estes fatores justificam o menor crescimento uma vez que não se verificaram as condições de temperatura ótima observados na Figura 8, ponto 2.7, encontrando-se nas menores faixas de produção vegetal para gramíneas de clima temperado.

No 2º mês (período março-abril) a umidade do ar apresentou variações de até 60%. A umidade do solo, que no início estava entre os valores de 10 e 15%, apresentou um aumento considerável a partir do dia 10 de abril, data que marca o início de uma precipitação intensa e presença de algumas regas feita pelo zelador. A temperatura deste mês manteve-se predominantemente entre a faixa de 10 a 20 °C, inserindo-os na faixa de temperatura ótima das gramíneas de clima temperados (Figura 8). Estas características mantiveram-se durante o 3º mês (período abril-maio).

O 4º mês (período maio-junho) apresentou uma taxa de crescimento bastante distinto dos demais meses. A umidade relativa do ar teve amplitudes de 60%, e a

humidade do solo manteve-se predominantemente na faixa de 15 a 25% apresentando um grande aumento a partir do dia 12 de junho, data que marcou o início de uma temporada chuvosa na região. As temperaturas, tanto do solo quanto do ambiente, encontravam-se na faixa entre 15 a 30 °C, consideradas ideais para o crescimento das gramíneas. Este mês tornou-se atípico, não só pelas mudanças edafoclimáticas, mas também por ter mais influência na gestão e manutenção do relvado. Foi o mês em que se aplicou adubo e pesticidas, além de se padronizar o cronograma de rega para ocorrer todos os dias das 5h às 7h da manhã. Apesar disso, verificou-se que a rega não apresentou muita influência na humidade do solo. Por fim, além da presença de outros fatores não apresentados nos meses anteriores, nomeadamente mais rega e fertilização, ressalta-se a mudança no método de corte da relva durante a última sessão de corte, podendo isso justificar a mudança da taxa de crescimento que assim como referido no capítulo 2.7, o relvado possivelmente encontrava-se no estágio reprodutivo, e com isso, aumentou a vulnerabilidade do relvado ao corte.

A vegetação é um parâmetro de grande influência na transferência líquida do CO₂ na interface solo/atmosfera, por ser a principal via de incorporação do carbono no solo. Todavia, os seus efeitos tem graus de intensidade e comportamento diferentes para cada tipologia de uso do solo, cobertura vegetal, biomassa de raízes, propriedades físico-químicas e microbiota do solo (El-Madany et al., 2020; Fang et al., 2020). Teemusk et al. (2019), no seu estudo sobre telhados verdes, observaram que o estágio vegetativo das gramíneas mais propício para a absorção do CO₂ está na fase de crescimento da planta. Além disso, referem que durante os meses de verão estas espécies podem desaparecer, devido à intensa radiação solar e escassez de água. Nestas condições, a transferência líquida de CO₂ tende a ser mais positiva nos períodos de verão seco. Contudo, nas nossas condições não se prevê esse efeito muito pronunciado desde que a rega seja mantida com regularidade.

Tabela 2 – Dados amostrais dos parâmetros vegetativos.

	Dia	Porcentagem de coberto (%)	Altura (cm)	Fitovolume (m³ ha⁻¹)	Biomassa humida (g m⁻²)	Biomassa seca (g m⁻²)	Massa de C (g C m⁻²)	Produção herbácea (g m⁻² dia⁻¹)	Humidade (g/g)
Amostragem do relvado externo ao colar	24 mar	100,00	10,33	1.033,04	143,48	46,19	23,09	3,08	0,6707
	07 abr	100,00	9,63	962,06	269,34	85,74	43,01	5,72	0,6891
	21 abr	100,00	9,45	948,06	230,08	59,76	30,02	4,00	0,7377
	03 mai	100,00	9,95	994,71	260,97	75,64	37,82	5,02	0,7093
	18 mai	100,00	11,63	1.161,33	284,35	74,77	37,53	5,02	0,7326
	01 jun	100,00	9,09	908,40	367,21	90,94	45,32	5,80	0,7559
	14 jun	100,00	11,32	1.131,67	325,64	82,85	41,57	5,80	0,7428
Média		100,00	10,00 ^a	999,78 ^a	268,76 ^a	73,61 ^a	36,95 ^a	4,92 ^a	0,7109 ^a
Amostragem do relvado no ponto de medição dos fluxos (interior ao colar)	22 fev	100,00	6,50	650,00	-	-	-	-	-
	10 mar	98,75	8,50	824,64	-	-	-	-	-
	24 mar	98,34	11,00	1.056,39	210,16	62,93	31,47	4,20	0,7005
	07 abr	98,13	11,00	528,19	210,16	62,93	31,47	4,20	0,7005
			11,50	1.098,53	218,82	47,92	23,96	3,20	0,7810
	27 abr	97,79	11,80	1.117,62	155,31	35,80	17,90	2,38	0,7695
			5,00	473,57	155,31	35,80	17,90	2,38	0,7695
	12 mai	-	10,00	947,14	-	-	-	-	-
	18 mai	96,86	12,50	1.156,39	169,75	40,99	20,50	2,74	0,7585
10 jun	95,57	7,00	625,99	-	-	-	-	-	
		5,23*	523,33*	169,75	40,99	20,50	2,74	0,7585	
19 jun	95,01	9,70	854,23	182,45	41,57	20,79	2,78	0,7722	
Média		97,55	8,35 ^a	796,37 ^a	187,36 ^b	45,90 ^b	22,81 ^b	3,04 ^b	0,7563 ^a

Nota: A_{colar}=0,0346 m². Letras diferentes (a e b) por coluna indicam diferenças significativa pelo teste Tukey (p<0,05) * dados estimados - não analisado

4.3 TRANSFERÊNCIA LÍQUIDA DE CO₂ NA INTERFACE ATMOSFERA/SUPERFÍCIE

4.3.1 Fluxos de CO₂ em superfície sem cobertura vegetal

Conforme referido na metodologia foram avaliados em alguns dias isolados os fluxos líquidos de CO₂ em solo exposto, de modo a poder avaliar-se o contributo dos processos do solo na transferência de carbono. Os principais resultados apresentam-se na Figura 31 identificando-se em separado os fluxos obtidos pelo ajustamento linear e exponencial.

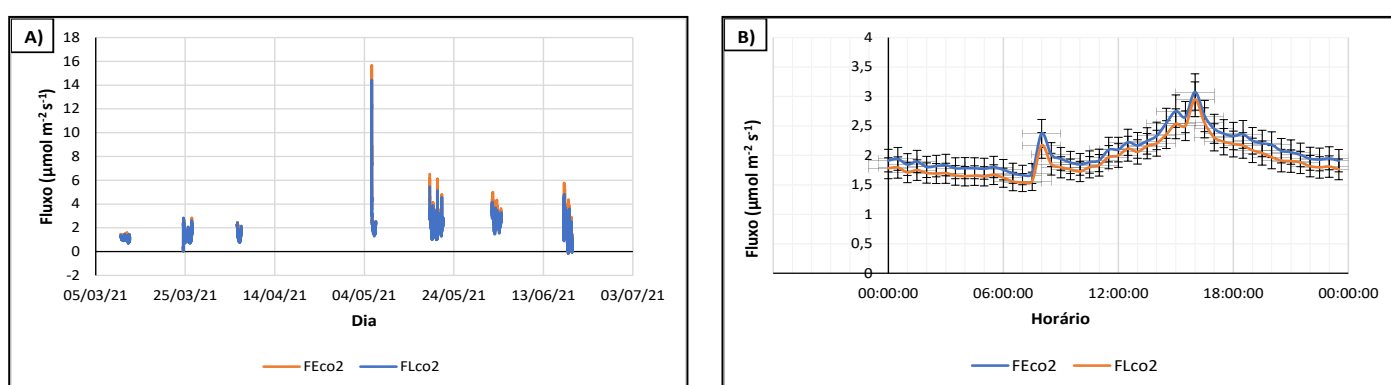


Figura 31 – A) Evolução temporal dos fluxos de CO₂ no solo exposto para o período de avaliação, obtidos pelo método de regressão exponencial e linear; B) Perfil médio diário dos fluxos de CO₂ para o período de avaliação, obtidos pelo método de regressão linear e exponencial.

Nota: **FEco2**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão exponencial ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); **FLco2**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão linear ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Pela análise da Figura 31 podemos observar que de acordo com o descrito no capítulo 2.3, o solo exposto se comporta como fonte de CO₂. Outro facto ilustrado é o aumento crescente dos fluxos ao longo do período de observação, embora com o aproximar do fim da primavera seja evidente o aparecimento de um comportamento variável do solo enquanto emissor.

Observou-se também uma medição discrepante realizada no dia 05 de maio, às 16h15m, apresentando 15,68 e 14,43 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para os métodos de regressão exponencial e linear, respectivamente. Este pico pode ter sido ocasionado por vários factores incluindo erro de leitura do próprio equipamento.

A figura anterior mostra ainda que existe diferença nas estimativas dos fluxos de CO₂ obtidas com os dois métodos (linear e exponencial). Estatisticamente os valores de médias e medianas apresentaram diferenças significativas (Tukey e Dunn $p < 0,05$). A

Figura 32, que representa os boxplots do fluxo de CO₂ obtidos pelos dois métodos de cálculo, e a análise estatística apresentada na Tabela 3, reforçam essa ideia.

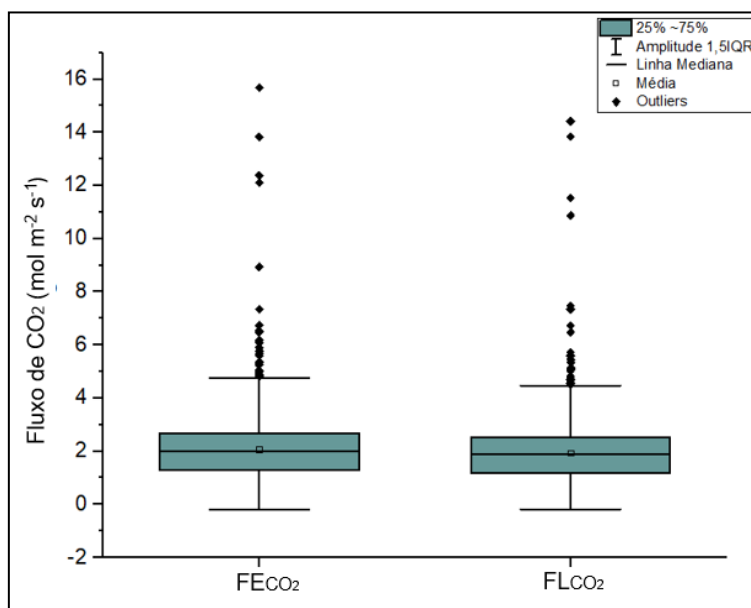


Figura 32 - Boxplot do fluxo no solo exposto pelos métodos de regressão exponencial e linear.

Nota: **FEco₂**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão exponencial; **FLco₂**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão linear.

Tabela 3 - Parâmetros estatísticos descritivos do fluxo de CO₂ do solo exposto por regressão exponencial e linear.

	FEco₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	FLco₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Média	2,08 ^a	1,94 ^b
Mediana	2,00 ^c	1,88 ^d
Desvio Padrão	0,96	0,90
Erro Padrão	0,02	0,02
Máximo	15,68	14,42
Dia Max	05/05/2021 16:12:15	05/05/2021 16:12:15
Mínimo	-0,18	-0,18
Dia Min	18/06/2021 13:38:13	18/06/2021 13:38:13

Nota: letras diferentes (a e b) por linhas indicam diferenças significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$) para as médias e (c e d) teste Dunn ($p < 0,05$) para as medianas. **FEco₂**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão exponencial; **FLco₂**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão linear.

4.3.2 Fluxos de CO₂ em superfície com coberto vegetal

A evolução temporal da transferência líquida de CO₂ na interface atmosfera/superfície vegetada, obtida pelos métodos de cálculo de ajustamento linear e exponencial, é apresentada na Figura 33.

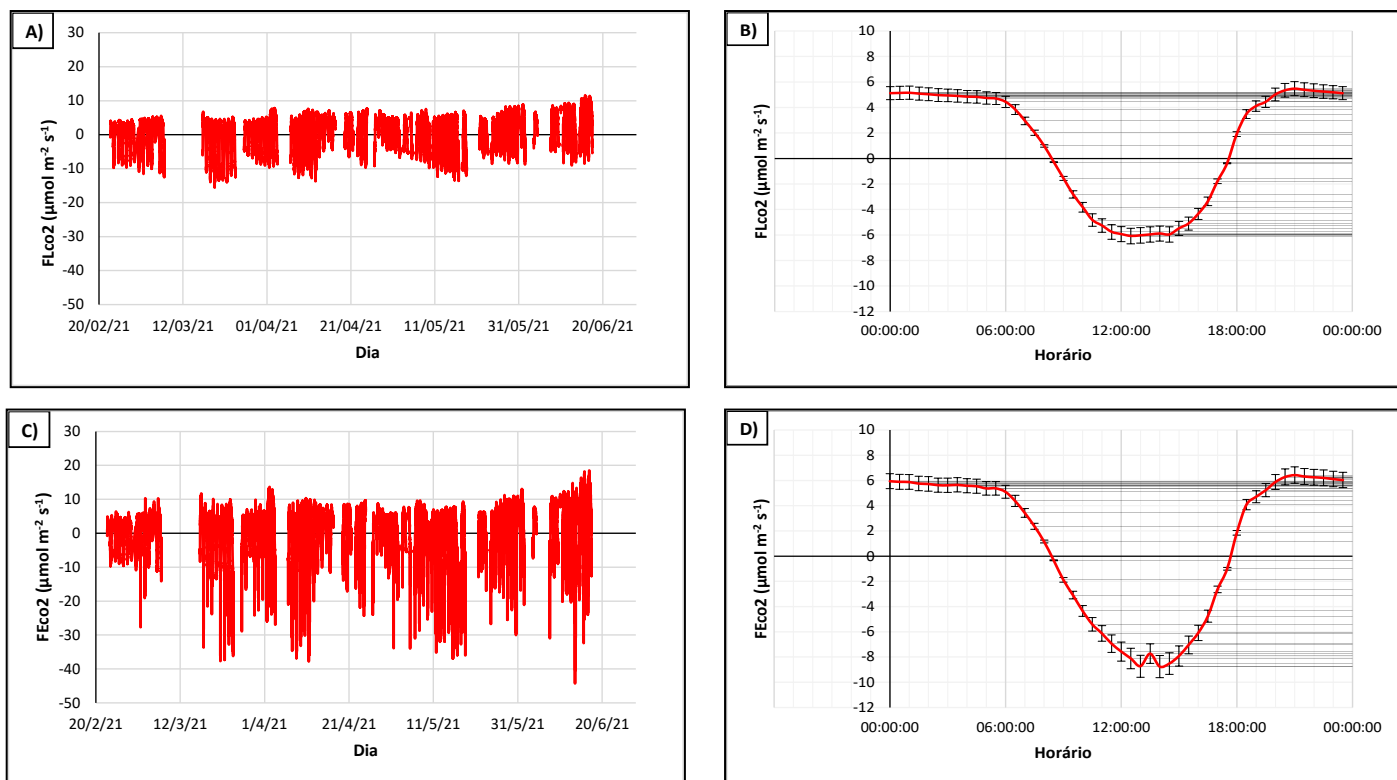


Figura 33 – **A)** Evolução temporal dos fluxos de CO₂ ao longo do período de avaliação, obtidos pelo método de regressão linear; **B)** Perfil médio diário dos fluxos de CO₂ para o período de avaliação, obtidos pelo método de regressão linear; **C)** Evolução temporal dos fluxos de CO₂ ao longo do período de avaliação, obtidos pelo método de regressão exponencial; **D)** Perfil médio diário dos fluxos de CO₂ para o período de avaliação, obtidos pelo método de regressão exponencial.

Nota: **FEco₂**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão exponencial ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); **FLco₂**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão linear ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Na observação da Figura 33 é notória a existência de um padrão intraestacional, neste caso ao longo da primavera, caracterizado por uma tendência crescente das emissões de CO₂ e por um aumento da absorção de CO₂ na transição do inverno para a primavera, iniciando-se um declínio no terceiro terço da estação. Em termos intradiários, o padrão de variação é muito mais evidente. Observa-se, como esperado, um contraste claro entre o período noturno e diurno. O período noturno é dominado pela emissão quase invariável de CO₂ e o período diurno caracteriza-se pela dominância da absorção do CO₂ pela superfície, principalmente em resultado do processo da fotossíntese. Em termos gerais, a absorção de CO₂ pelos estomas da vegetação apresenta máximos entre as 13h00 e as 14h30, momento do dia em que se observa uma maior intensidade da radiação fotossinteticamente ativa e, por consequência, maior atividade fotossintética. Ambas as tendências temporais têm sido encontradas noutros estudos (Lou et al., 2003; Teemusk et al., 2019). Estes autores registaram igualmente para o período de primavera uma tendência crescente de emissão relacionada com vários parâmetros vegetativos e

climáticos. Do mesmo modo, o estudo de Fang et al. (2020) é um de muitos que demonstra a predominância dos fluxos negativos do CO₂ durante as horas do dia.

Ao contrário do que foi reportado para os fluxos registados na superfície sem vegetação, as estimativas dos fluxos de CO₂ pelos dois métodos de cálculo (ajustamento linear e exponencial) na superfície vegetada apresenta diferenças bem mais visíveis, sendo essas diferenças confirmadas pelos boxplots da Figura 34 e pelas estatísticas apresentadas na Tabela 4. A aplicação do teste de Tukey ($p < 0,05$) e de Dunn ($p < 0,05$) demonstram que as diferenças são estatisticamente significativas, podendo conduzir a leituras diferentes em termos quantitativos. Apesar de ambos os métodos de cálculo evidenciarem uma dinâmica similar do fenómeno, o ajustamento por regressão exponencial conduz a estimativas superiores, em particular nos períodos em que a absorção estomática de CO₂ prevalece.

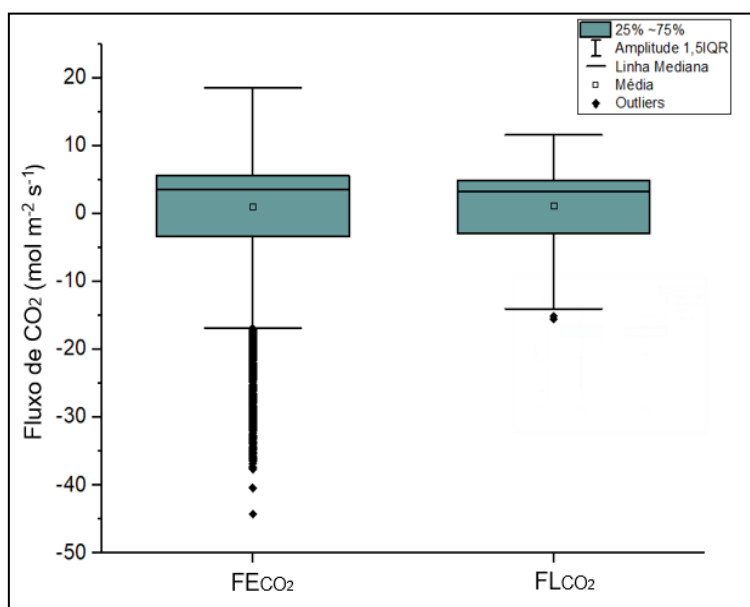


Figura 34 - Boxplot do fluxo no solo relvado pelos métodos de regressão exponencial e linear.

Nota: **FEco₂**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão exponencial; **FLco₂**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão linear

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos descritivos do fluxo de CO₂ do solo relvado por regressão exponencial e linear.

	F _E CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)	F _L CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)
Média	1,06 ^a	1,21 ^b
Mediana	3,56 ^c	3,22 ^d
Desvio Padrão	6,81	5,13
Erro Padrão	0,05	0,03
Máximo	18,50	11,61
Dia Max	16/06/2021 22:44:15	15/06/2021 19:38:13
Mínimo	-44,27	-15,58
Dia Min	13/06/2021 13:50:13	19/03/2021 13:04:14

Nota: letras diferentes (a e b) por linhas indicam diferenças significativa pelo teste Tukey (p<0,05) para as médias e (c e d) teste Dunn (p<0,05) para as medianas. **F_ECO₂**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão exponencial; **F_LCO₂**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão linear.

O desvio padrão dos métodos mostraram-se relativamente semelhantes indicando que a mediana pode representar melhor o comportamento médio do fenómeno, uma vez que é viável e representativa para qualquer distribuição amostral, não importando a sua forma e não sofrendo influência de valores extremos (*Outliers*) (Feijoo, 2010).

Numa tentativa de melhor compreender a dinâmica dos fluxos de CO₂ ao longo do período de avaliação construíram-se os boxplots apresentados nas Figuras 35 e 36. Cada uma das figuras mostra um boxplot para 4 períodos mensais consecutivos do período de avaliação: Mês 1 - 22 de fevereiro a 21 de março; Mês 2 - 22 março (início da primavera) a 21 de abril; Mês 3 - 22 de abril a 21 de maio; e Mês 4 - 22 de maio a 21 de junho (fim da primavera).

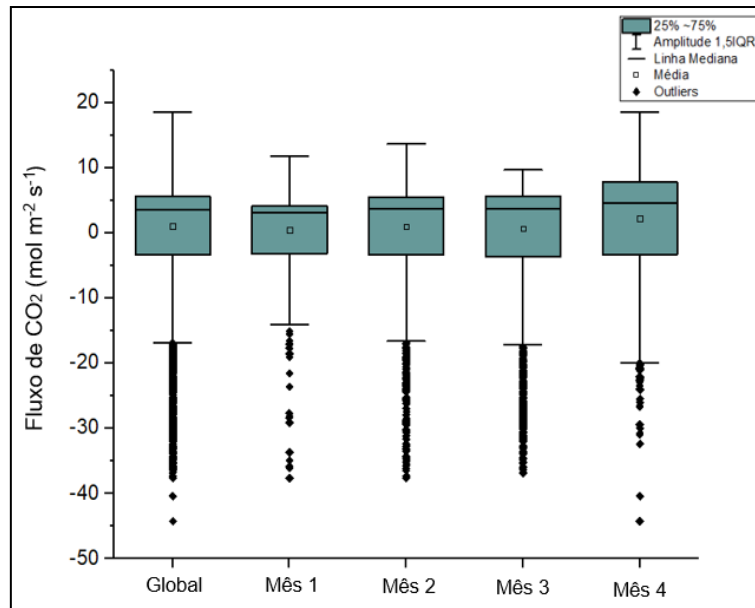


Figura 35 – Boxplot do fluxo no solo relvado pelo método de regressão exponencial em diferentes períodos.

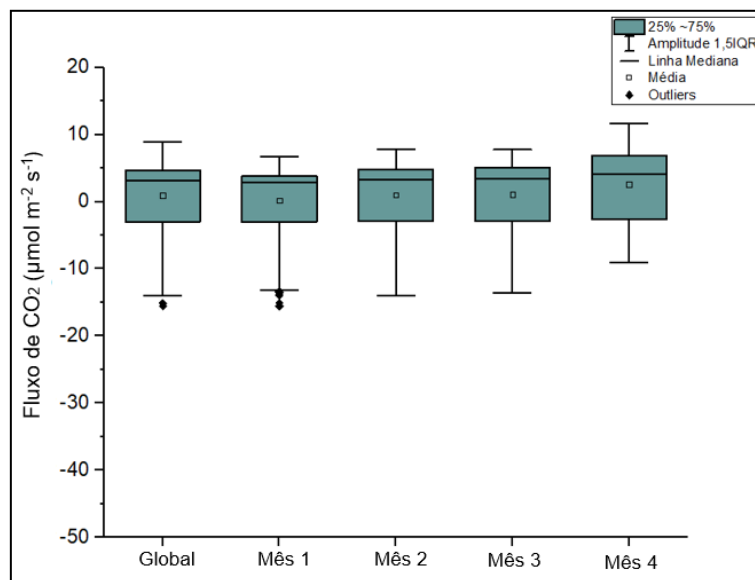


Figura 36 – Boxplot do fluxo no solo relvado pelo método de regressão linear em diferentes períodos.

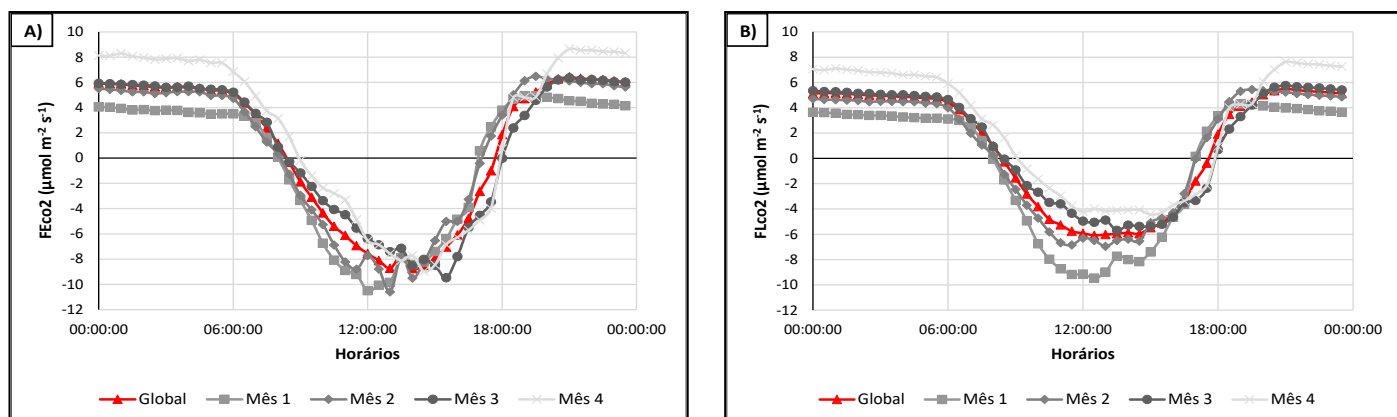


Figura 37 – **A)** Comparação dos Perfis médios diários de cada mês de análise pelo método de regressão exponencial; **B)** Comparação dos Perfis médios diários de cada mês de análise pelo método de regressão linear.

Além da análise anterior, também se representaram os perfis médios diários para cada um dos quatro períodos identificados anteriormente (Figura 37). Observou-se que a fração absorvida de CO₂ foi diminuindo ao longo do tempo, ao mesmo tempo que a fração emitida exibiu um aumento gradual. Os valores de pico médios diários de absorção dos meses do mês 1 ao mês 4, pelo ajustamento exponencial foram respectivamente: - 10,51; - 10,60; - 9,50; - 8,96 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e pelo ajustamento linear foram respectivamente - 9,47; - 6,95; - 5,69; - 4,44 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Todos ocorridos entre 12:00h e 15:00h. Os picos médios diários de emissão para os mesmos 4 meses, pelo ajustamento exponencial, foram 4,93; 6,49; 6,36; 8,66 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e os obtidos pelo método de ajustamento linear de 4,30; 5,43; 5,76; 7,63 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, registados nos períodos entre 19:30 e 21:00.

Tabela 5 - Parâmetros estatísticos descritivos do fluxo de CO₂ do solo relvado por regressão exponencial e linear de acordo com os meses de análise.

	Média		Mediana		Desvio Padrão		Erro Padrão	
	FEco2	FLco2	FEco2	FLco2	FEco2	FLco2	FEco2	FLco2
Mês 1	0,42 ^a	0,20 ^a	3,13 ^a	2,92 ^a	5,59	5,11	0,08	0,08
Mês 2	0,99 ^{bc}	0,99 ^b	3,70 ^b	3,33 ^b	6,67	5,10	0,10	0,07
Mês 3	0,66 ^{ab}	1,10 ^b	3,65 ^b	3,41 ^c	7,08	4,95	0,10	0,07
Mês 4	2,28 ^d	2,55 ^c	4,58 ^c	4,14 ^d	7,26	5,05	0,11	0,07
Global	1,06 ^c	1,21 ^b	3,56 ^b	3,22 ^b	6,81	5,13	0,10	0,08

Nota: letras diferentes (a, b, c, d) por colunas indicam diferenças significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$) para as médias e teste Dunn ($p < 0,05$) para as medianas. **FEco2**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão exponencial ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); **FLco2**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão linear ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

No conjunto de médias, pelo teste de ANOVA Tukey ($p < 0,05$), observou-se que o Mês 4 (Mai e Jun) foi o período menos representativo do conjunto, não apresentando

similaridades com nenhum outro período. O Mês 2 (Mar e Abr) mostrou-se o mais representativo, por apresentar similaridades com a série temporal completa (Global) e o Mês 3 (Abr e Mai). Além disso, o Mês 1 apresenta uma diferença significativa com a série temporal.

Nas análises não paramétrica de ANOVA Kruskal-Wallis, Teste Dunn ($p < 0,05$), o método de regressão exponencial apresentou as mesmas relações atribuídas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Já para o método de regressão linear, a análise não paramétrica apenas identificou semelhanças entre o Mês 2 e a série temporal de dados, conclusões que também podem ser percebidas nos boxplot das Figura 35 e Figura 36.

Com os dados dispostos na Tabela 6, observou-se que os resultados encontrados neste estudo apresentam grande desvio padrão da média em comparação com os outros estudos. Todavia, o valor da média encontrado neste estudo encontra-se dentro do intervalo encontrado nos estudos de Fang et al. (2020) e Willems et al. (2011) ($1,07 \sim 4,20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), sendo este último referente ao período da primavera numa região de pastagem da Irlanda.

Tabela 6 – Comparação de fluxos de CO₂ observados em diferentes estudos.

Local	Método	Vegetação	Média ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Mediana ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Período de Observação	Ano	Fonte
Shaanxi China	RL	Milho-Maize (fase de crescimento)	1,07 ~ 4,20		Anual	2011	(Fang et al., 2020)
Co. Wexford Irlanda	RL	Pastagem (gramíneas)	1,8 ~ 4,1		Primavera	2009	(Willems et al., 2011)
Tartu Estonia	RL	Telhado verde (LECA - argila levemente expandida)	0,15	-0,04	Abr ~ Nov	2015	(Teemusk et al., 2019)
	RL	Telhado verde (GR - argila levemente expandida a base de grama)	0,27	-0,11	Abr ~ Nov	2015	(Teemusk et al., 2019)
Tallim Estonia	RL	Telhado verde (SR - camada de grama)	0,44	-0,85	Abr ~ Nov	2015	(Teemusk et al., 2019)
	RL	Telhado verde (NC - Controle Natural gramado)	0,49	-0,52	Abr ~ Nov	2015	(Teemusk et al., 2019)
Majadas de Tiétar Espanha	RL	Pastagem (gramíneas)	-1,4 ~ -1,12		Início Primavera	2018	(El-Madany et al., 2020)
	RL		0,71 ~ 0,41		Final Primavera	2018	(El-Madany et al., 2020)
Bragança Portugal	RL	Gramíneas	-5,75 ~ 7,87	3,56	Primavera	2021	Este Estudo
	RE		-3,92 ~ 6,34	3,22	Primavera	2021	Este Estudo
	RL	Solo Exposto	1,12 ~ 3,04	2,00	Primavera	2021	Este Estudo
	RE		1,04 ~ 2,84	1,88	Primavera	2021	Este Estudo

Nota: RL – Regressão Linear; RE – Regressão Exponencial.

No entanto, no estudo realizado por El-Madany et al. (2020) também realizado na primavera numa região de pastagem, na Espanha, os valores de fluxo foram inferiores aos encontrados por Willems et al. (2011). Em contrapartida, neste estudo observou-se também uma emissão de CO₂ crescente no decorrer da estação de primavera, padrão também observado no nosso estudo.

O estudo realizado por Teemusk et al. (2019) apresenta os valores de mediana bastante divergentes aos encontrados no nosso estudo. Além disso, os resultados encontrados por este autor mostraram-se bastante divergentes com os demais estudos, mostrando maior prevalência do papel de sumidouro. Isso pode ser devido à tipologia de solo analisado (telhado verde) composto por solos com pouca profundidade e por não apresentar medições contínuas do fluxo. Além disso, referem que as tipologias que mais se assemelham com os ambientes naturais respondem melhor como sumidouro

relativamente às tipologias mais artificiais. Os dados encontrados para tipologia de solo exposto também se encontram dentro do intervalo observado por Fang et al. (2020).

4.3.3 Balanço líquido do fluxo CO₂ ao longo do período de avaliação.

Para a análise do balanço líquido do fluxo de carbono durante a série temporal elaboraram-se as Figura 38 e 39.

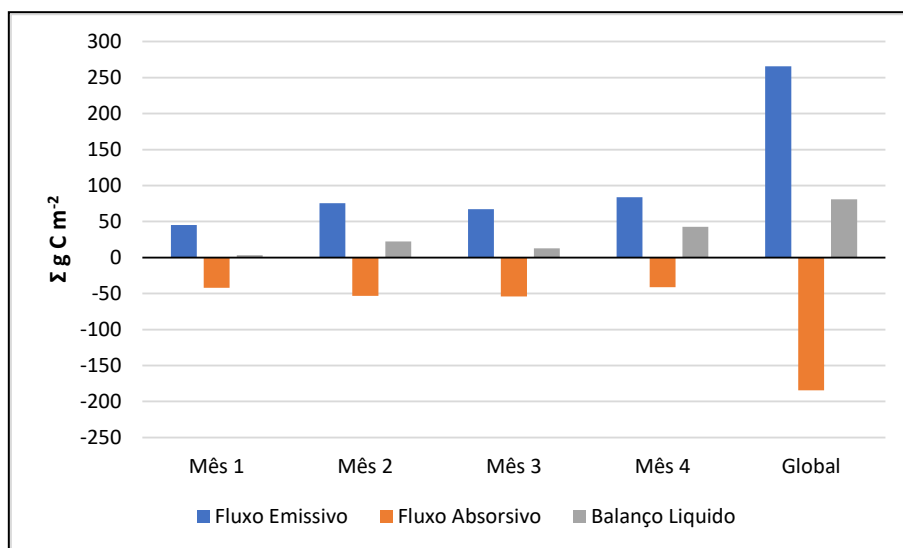


Figura 38 – Balanço líquido dos somatórios das frações de fluxo mássico no decorrer do tempo de análise pelo método de regressão exponencial.

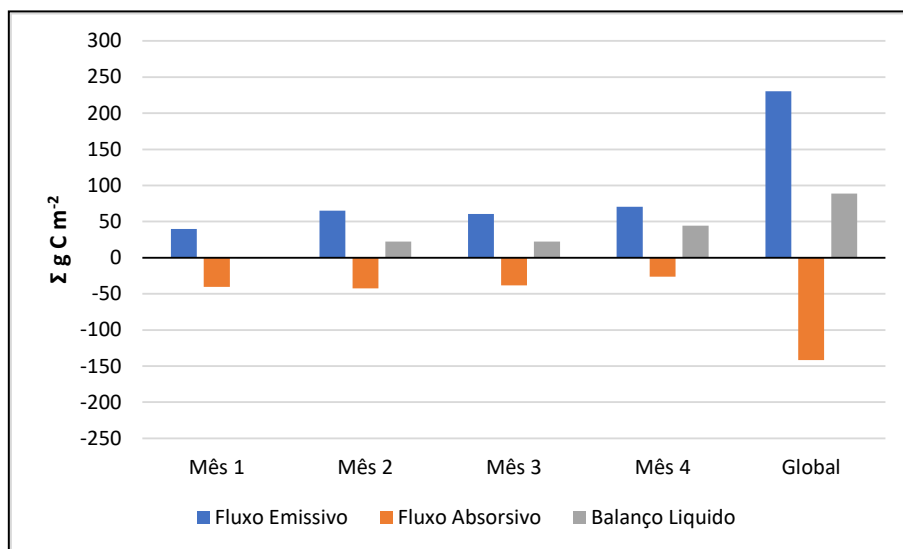


Figura 39 – Balanço líquido do somatório das frações de fluxo mássico no decorrer do tempo de análise pelo método de regressão linear.

De um modo geral, observa-se que a superfície relvada emitiu mais CO₂ do que absorveu, ou seja, atuou como uma fonte deste gás de efeito de estufa, apresentando em média uma emissão diária de 0,67 g C m⁻² d⁻¹, com base no método de cálculo de

ajustamento por regressão exponencial, e de $0,74 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, pelo método de cálculo assente no ajustamento por regressão linear. No período de observação correspondeu a uma emissão líquida de aproximadamente 81 g C m^{-2} pelo ajustamento exponencial e $88,86 \text{ g C m}^{-2}$ pelo ajustamento linear. Estes valores demonstram que o relvado urbano, nas condições estudadas, não apresenta fortes características como sumidouro de CO_2 . O mês 1 mostrou ser o mês com maior equilíbrio entre a fração que é emitida e absorvida (somatório líquido de $3,22 \text{ g C m}^{-2}$ pela regressão exponencial e $-0,64 \text{ g C m}^{-2}$), enquanto que nos meses subsequentes a fração de emissão mostrou-se superior.

Da análise podemos inferir que a fração da emissão, correspondente à respiração e aos processos físico-químicos do solo, se mostrou favorecida com o passar do tempo. Este facto pode ser explicado pelo aumento da temperatura, pela variação do conteúdo de água do solo e pelos parâmetros vegetativos. Além disso, pode-se inferir a influência antrópica, como a periodicidade de cortes mais intensos no decorrer do tempo, a influência da rega e aplicação de fertilizantes.

Todavia, para fins de comparação, estimou-se a quantidade mássica de carbono emitido pelo solo exposto com base nos valores médios apresentados na Tabela 3. Assim, a quantidade estimada de carbono emitido pelo solo exposto durante o período de análise foi de $258,5 \text{ g C m}^{-2}$ para o ajuste exponencial e $241,4 \text{ g C m}^{-2}$ para o ajuste linear, inferindo-se a atuação do relvado como um mitigador da emissão natural advinda da respiração do solo.

4.4 AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE FLUXOS DE CO_2 E OS PARÂMETROS EDAFOCLIMÁTICOS E VEGETATIVOS

Nas análises gráficas das Figura 21, 22, 23, 29 e 33, observa-se que o comportamento da transferência líquida de CO_2 na interface atmosfera/solo apresenta paralelismo com os fatores edafoclimáticos e vegetativos.

As temperaturas, tanto do solo como do ambiente, apresentaram a mesma tendência crescente observada na fração emissiva de CO_2 . Este resultado está em concordância com os resultados obtidos por outros estudos (Fang et al., 2020; Dias, 2006; Lou et al., 2003), uma vez que a temperatura influencia tanto a atividade microbiana como a respiração das raízes e, conseqüentemente, a libertação de maior quantidade de CO_2 .

A Radiação Solar e a Fotossinteticamente Ativa (PAR) em termos intradiários, apresentaram uma simetria semelhante à transferência líquida de CO_2 . verificando-se que quanto maior a radiação solar maior é absorção de CO_2 .

Não foi observado uma relação gráfica evidente entre a umidade do ar e os fluxos de CO₂. Porém, no conteúdo de água do solo na série temporal dos dados (Figura 21 (M)) percebe-se um paralelo desta variável com o fluxo. Quanto maior é o conteúdo de água no solo maior é a liberação de CO₂, devido também ao favorecimento das atividades microbianas e ocupação dos espaços porosos do solo. Estas observações estão em concordância com outros estudos (El-Madany et al., 2020; Teemusk et al., 2019; Willems et al., 2011).

Com o aumento da frequência de precipitação verificou-se um aumento das emissões de CO₂. É provável que, assim como mencionado, a infiltração da água nos espaços porosos liberte o CO₂ contido no solo (El-Madany et al., 2020; Teemusk et al., 2019; Deng et al., 2017; Jeong et al., 2017; Feliciano, 2001).

Na Figura 29 observa-se graficamente a influência do fitovolume no fluxo negativo de CO₂ (Figura 33 (A) e (C)). Nos períodos de corte do relvado a absorção de CO₂ foi drasticamente reduzida. Todavia, mesmo havendo um pico no fitovolume entre os dias 12 a 26 de abril, observou-se que o solo apresentou uma diminuição na absorção de CO₂ devido à ocorrência de chuva nesse período (Figura 22) e, conseqüentemente, aos menores níveis de radiação fotossinteticamente ativa observados.

De modo a avaliar as relações referidas construiu-se a matriz de correlação de Spearman (Tabela 7), uma vez que os dados ordenados de forma não paramétrica e a existência de variáveis discretas (precipitação) não serem os mais indicados para aplicação da correlação de Pearson por fazer uma relação linear dos valores entre as variáveis (Bauer, 2007). Além disso, os dois métodos de estimativa do fluxo de CO₂ (Regressão Exponencial e Linear) obtiveram valores de coeficiente de correlação muito similares, possibilitando fazer uma análise geral das correlações e validando ambos os métodos para esta análise.

Os parâmetros que mais se destacaram na correlação com o fluxo de CO₂ foram a Radiação Solar (RS) e a Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR), tendo um coeficiente de $-0,79$ e $-0,88$, respectivamente. Estes parâmetros interferem na absorção do CO₂ evidenciando a forte ligação e influência da luz solar no fluxo, uma vez que a fotossíntese é o principal caminho de transporte do CO₂ para o meio terrestre. A velocidade dos ventos (VelVnt) também apresentou uma correlação significativa no fluxo negativo do CO₂ ($-0,57$), por facilitar as trocas gasosas da planta com a atmosfera e ser um grande agente dispersor de poluentes gasosos. Isto se dá pelo perfil ascendente da

velocidade dos ventos sobre uma superfície vegetativa, princípio que se baseia no método do Eddy Covariância (Item 2.8.1.1) (Pereira, 2013).

Os próximos parâmetros que se destacaram na análise foram a umidade relativa do ar e do ambiente (HRcaixa e HRamb). Obteve-se um coeficiente de 0,44 favorecendo a emissão de CO₂. Isto se dá pelo facto da evapotranspiração das plantas ser bastante influenciada pelo gradiente de pressão de vapor entre a folha e o ar atmosférico pelo que quanto maior for esse gradiente maior será a transpiração vegetal influenciando assim a transferência líquida de CO₂ (Silva et al., 2003).

A precipitação está correlacionada positivamente com o fluxo de CO₂ (+0,46) assim como a HRamb (+ 0,44) influenciando positivamente na emissão do CO₂. Este fenómeno foi também observado por muitos autores os quais observaram que após eventos de precipitação havia um aumento momentâneo significativo da emissão de carbono para a atmosfera (Deng et al., 2017; Feliciano, 2001; Jeong et al., 2017). El-Madany et al. (2020) estudou a influência da precipitação no fluxo de CO₂ inferindo que a resposta da precipitação pode ser bastante aleatória para cada tipologia de solo e vegetação, mas ainda assim ressalta a importante influência que a precipitação tem nos fluxos de CO₂. Além disso, a precipitação correlacionada com as demais variáveis ambientais e vegetais apresentou coeficientes da ordem de 0,44.

A temperatura ambiente (Tamb) favoreceu a absorção do carbono no solo apresentando um coeficiente de - 0,27 pelo que podemos inferir que à medida que a temperatura ambiente aumenta existe uma probabilidade de 27% de aumentar a absorção do CO₂ pela vegetação. Porém, vale ressaltar que essa probabilidade só serve para o período analisado (primavera), e pode não representar os picos típicos de temperaturas atmosféricas da região que ultrapassam o intervalo fisiológico ideal do relvado. A temperatura do solo (Tsolo) tem menor influência no fluxo de CO₂ relativamente à Tamb, uma vez que apresentou um coeficiente de correlação 40% menor (coef -0,16), ainda que significativo. Além disso, entre elas, obtiveram um coeficiente de 0,91, contudo a correlação não se mostrou significativa.

O coeficiente de correlação entre o conteúdo de água do solo com a transferência líquida de CO₂ pode apresentar vários valores dependendo das variáveis que são consideradas na matriz não havendo consenso científico quanto o seu grau de influência nos fluxos de CO₂ (Willems et al., 2011). A correlação deste parâmetro com a transferência líquida de CO₂ no nosso estudo não se mostrou significativa.

Vale ressaltar-se que mesmo o fitovolume correlacionado com o fluxo de CO₂ apresente um baixo valor de coeficiente de Spearman, graficamente é visível sua influência no processo de absorção.

Tabela 7 - Matriz de correlação de Spearman para as variáveis de fluxo de CO₂ e climáticas na área relvada.

	FEco₂	FLco₂	HRcaixa	PAR	Tsolo	HRsolo	Tamb	HRamb	RS	Prp	VelVnt	DirVnt	FV
FEco₂ (p-valor)	1,00 (0,000000)	0,98 (0,000000)	0,44 (0,000000)	-0,88 (0,000000)	-0,16 (0,000000)	0,00 (0,808425)	-0,27 (0,000000)	0,46 (0,000000)	-0,79 (0,000000)	0,44 (0,000000)	-0,57 (0,000000)	-0,13 (0,000000)	-0,09 (0,000000)
FLco₂ (p-valor)		1,00 (0,000000)	0,43 (0,000000)	-0,87 (-)	-0,14 (0,000000)	0,03 (0,079183)	-0,26 (0,000000)	0,45 (0,000000)	-0,79 (-)	0,44 (0,000000)	-0,56 (-)	-0,12 (0,000000)	-0,10 (0,000000)
HRcaixa (p-valor)			1,00 (0,000000)	-0,48 (0,000000)	-0,44 (0,000000)	0,39 (0,000000)	-0,50 (0,000000)	0,86 (-)	-0,39 (0,000000)	0,51 (0,000000)	-0,49 (0,000000)	-0,12 (0,000000)	-0,07 (0,000072)
PAR (p-valor)				1,00 (0,000000)	0,38 (0,005607)	-0,05 (0,000000)	0,45 (0,000000)	-0,54 (0,000000)	0,90 (-)	0,41 (0,000000)	0,60 (-)	0,19 (0,000000)	0,01 (0,500504)
Tsolo (p-valor)					1,00 (0,000000)	-0,22 (-)	0,91 (-)	-0,55 (-)	0,42 (0,000000)	0,44 (0,000000)	0,47 (0,000000)	0,26 (0,000000)	-0,14 (0,000000)
HRsolo (p-valor)						1,00 (0,000000)	-0,22 (0,000000)	0,39 (0,000000)	-0,05 (0,001796)	0,44 (0,000000)	-0,05 (0,002281)	0,03 (0,101912)	-0,05 (0,001147)
Tamb (p-valor)							1,00 (-)	-0,67 (-)	0,52 (0,000000)	0,42 (-)	0,48 (-)	0,19 (0,000000)	-0,20 (0,000000)
HRamb (p-valor)								1,00 (-)	-0,53 (-)	0,51 (-)	-0,50 (0,000000)	-0,11 (0,000000)	0,10 (0,000000)
RS (p-valor)									1,00 (0,000000)	0,42 (-)	0,57 (0,000000)	0,12 (0,000000)	-0,04 (0,000879)
Prp (p-valor)										0,99 (0,000000)	0,42 (0,000000)	0,43 (0,000000)	0,41 (0,000000)
VelVnt (p-valor)											1,00 (0,000000)	0,31 (0,000000)	0,11 (0,000000)
DirVnt (p-valor)												1,00 (0,018495)	-0,03 (0,018495)
FV													1,00

Nota: **FEco₂**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão exponencial (mol m⁻² s⁻¹); **FLco₂**: Fluxo de CO₂ estimado por regressão linear (mol m⁻² s⁻¹); **HRar**: humidade relativa do ar (%); **PAR**: Radiação Fotossinteticamente Ativa (μmol de fótons m⁻² s⁻¹); **Tsolo**: temperatura do solo (°C); **HRsolo**: teor de humidade do solo (%); **HRamb**: humidade relativa do ambiente (%); **RS**: radiação solar (W m⁻²); **Tamb**: temperatura do ambiente (°C); **Prp**: precipitação (mm); **VelVnt**: velocidade dos ventos (m s⁻¹); **DirVnt**: direção dos ventos (°); **FV**: Fitovolume (m³/ha); e (-) valores próximos do zero absoluto

4.5 AVALIAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO FOTOSSINTÉTICA

A fim de compreender melhor a influência e a contribuição do processo de fotossíntese na dinâmica dos fluxos de CO₂, uma vez que este é o principal responsável pela absorção do CO₂, a média noturna da emissão foi subtraída aos fluxos de líquidos diurnos desde GEE. Assim, utilizando-se a média noturna diária multiplicada pelo fator de aumento observado no solo exposto, descontando-se os valores médios do fluxo líquido diurno, obtém-se a fração fotossintética. Os períodos diurnos eram considerados os momentos em que o sensor de radiação solar registrava valores acima de 20 W m⁻², valor onde geralmente se iniciam as atividades fotossintéticas do dia.

A Figura 40 apresenta esta estimativa diária da fração fotossintética, nela é utilizado o método de regressão exponencial.

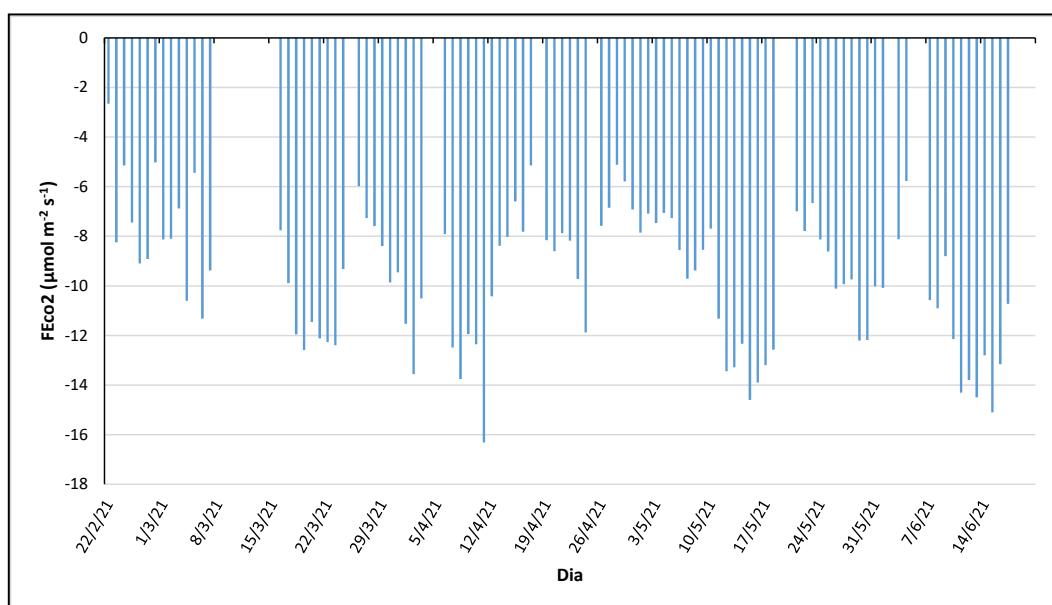


Figura 40 – Evolução temporal da média diária da fração fotossintética pela regressão exponencial – global.

Denota-se que o comportamento fotossintético apresentou uma tendência crescente no decorrer do tempo de análise, não apresentando o declínio observado no terceiro terço da estação no perfil de transferência líquida do GEE (Figura 33). Na Figura 40 também é observado uma diminuição da fração de absorção nos períodos de corte do relvado e entre os dias 12 a 26 de abril.

4.6 MODELAÇÃO MATEMÁTICA DOS FLUXOS DE CO₂

4.6.1 Modelo construído com base na informação meteorológica

Com base na análise de correlação das variáveis apresentada e discutida anteriormente, os dados da estação meteorológica foram usados para estimar o fluxo de CO₂, com vista a avaliar a possibilidade e o rigor de prever o fluxo de CO₂ para o período da primavera para solos relvados da região urbana de estudo, dispensando sensores específicos.

Os parâmetros utilizados para a formulação da equação (Eq. 21) foram então: a radiação solar (RS, em W m²), a velocidade dos ventos (VelVnt, em m s⁻¹), a humidade relativa do ar ambiente (HRamb, em %), a precipitação (Prp, em mm) e a temperatura ambiente (Tamb, em °C). Sendo o fluxo (Fco₂) dado em μmol m⁻² s⁻¹.

$$F_{co_2} = -0,78444 + 0,22321 T_{amb} + 0,00342 HR_{amb} - 0,01261 RS + 0,23465 Prp - 1,609 VelVnt \quad (\text{Eq. 21})$$

A equação obteve um coeficiente de determinação múltipla (R²) de 0,6809. Um valor substancialmente bom, levando em conta que a natureza do fenómeno está dependente de vários fatores, tais como meteorológicos, fisiológicos e antrópicos, tornando bastante complexa a descrição matemática do mesmo.

Na Figura 41 apresentam-se os gráficos dos fluxos gerados pela equação empírica (Eq. 21) no decorrer do tempo de análise das medições, e o perfil médio diário empírico comparado com os perfis intradiários obtidos pelas medições do analisador (Figura 33 B & D)

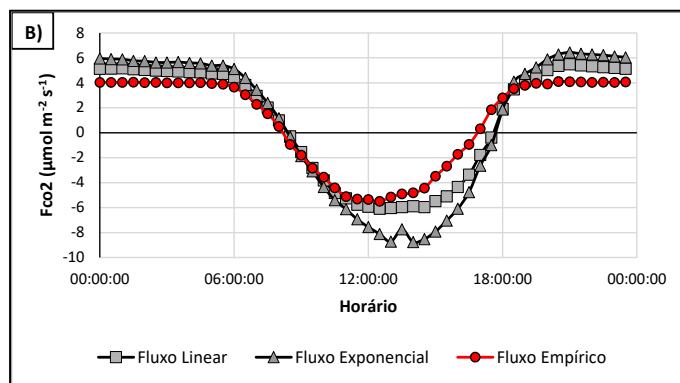
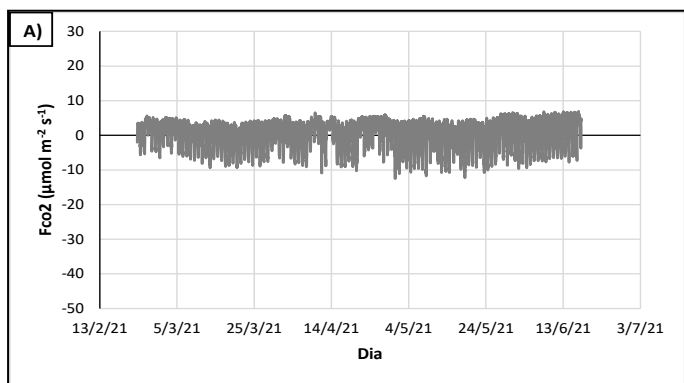


Figura 41 – **A)** Evolução temporal dos transferência líquida de CO₂ estimada pela equação empírica de multiregressão linear (Dados estação meteorológica); **B)** Perfil médio diário dos fluxos estimado pela equação empírica (Dados estação meteorológica) e pelos ajustamentos de regressão linear e exponencial.

Na Figura 41 (A) observa-se, assim como nas Figura 33 (A) e (C), que a tendência da fração emissiva se manteve com uma tendência crescente no decorrer do tempo. A fração de absorção não apresentou os picos típicos, por não considerar os parâmetros vegetativos, e neles, os cortes do relvado e a perda da área de troca gasosa da planta. Na Figura 41 (B) observa-se que o perfil médio diário empírico se assemelhou mais ao ajustamento linear.

4.6.2 Modelo construído com base em parâmetros edafoclimáticos e vegetativos.

Além da modelação empírica efetuada com base nos dados meteorológicos, construiu-se também um modelo de multi-regressão linear, utilizando todos os parâmetros medidos. Todavia, por não haver medições de todos os parâmetros em todos os horários analisados pela estação meteorológica, o período de simulação limitou-se só aos instantes analisados pelos sensores auxiliares do medidor de fluxo. Assim, eliminaram-se todos os resultados em que havia lacuna de dados.

Os parâmetros utilizados para a formulação da equação (Eq. 22) foram: a radiação solar (RS, em W m²), a velocidade dos ventos (VelVnt, em m s⁻¹), a humidade relativa do ar ambiente (HRamb, em %), a precipitação (Prp, em mm), a temperatura ambiente (Tamb, em °C), a radiação fotossinteticamente ativa (PAR, em μmol de fótons m⁻² s⁻¹), a temperatura do solo (Tsolo, em °C), a teor de água do solo (HRsolo, em %) e o fitovolume (FV, em m³ há⁻¹). Sendo o fluxo (Fco₂) dado em μmol m⁻² s⁻¹.

$$F_{co_2} = 1,89052 - 0,06994 T_{amb} + 0,01007 HR_{amb} + 0,003311 RS - 0,05505 Prp - 1,40948 VelVnt - 0,0111 PAR + 0,37435 T_{solo} - 0,00908 HR_{solo} - 0,00151 FV \quad (Eq. 22)$$

O modelo matemático apresentou um coeficiente de determinação múltipla (R²) de 0,76206, valor superior à equação empírica modelada no ponto anterior, mostrando ser mais representativa. Na Figura 42 apresentam-se os gráficos do fluxo estimado pela equação empírica (Eq. 22), sendo (A) o fluxo no decorrer do mesmo tempo de análise das medições, e (B) o perfil médio diário empírico comparado com os perfis intradiários obtidos pelas medições do analisador (Figura 33 B & D).

Na Figura 42 (A) observa-se, como no modelo anterior, que a fração emissiva de CO₂ no decorrer do tempo também apresentou a tendência crescente observada nas

medições. Este modelo apresenta diferenças relativamente ao primeiro modelo matemático, tendo mostrado maiores oscilações dos fluxos absorptivos traduzindo de forma mais realista os típicos picos negativos observados nos dados obtidos *in situ*. O perfil médio diário estimado neste modelo empírico (Figura 42) também demonstrou ser bastante coerente com os dados obtidos pelo equipamento de medição de fluxo.

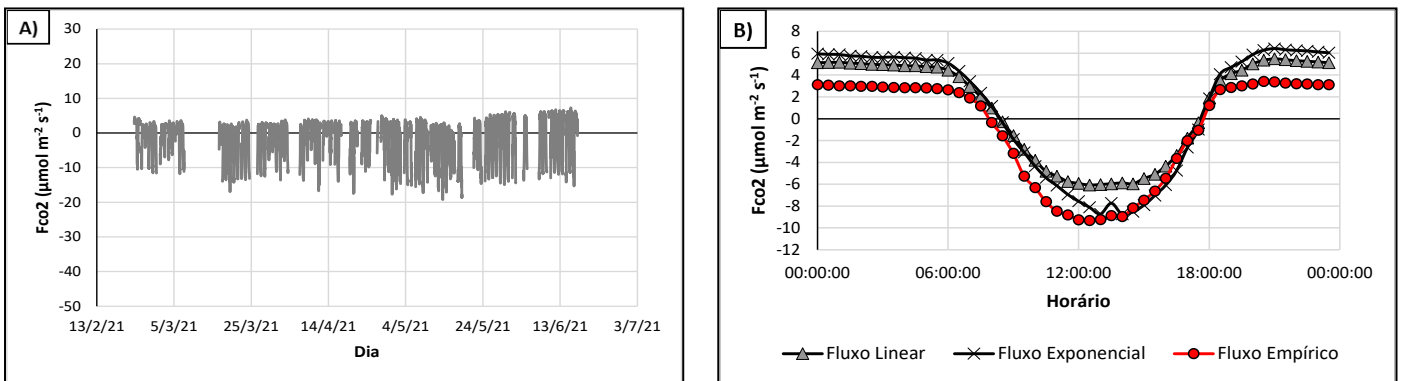


Figura 42 – **A)** Evolução temporal dos fluxos de CO₂ ao longo do período de avaliação, obtidos pela equação empírica de multi-regressão linear (Dados edafoclimáticos e vegetativo); **B)** Perfil médio diário dos fluxos para o período de avaliação pela equação empírica, método de regressão linear e exponencial.

5. CONCLUSÃO

A transferência de CO₂ através da interface atmosfera/superfície relvada foi avaliada num espaço verde da cidade de Bragança para o período da primavera de 2021. Ao contrário do expectável, o relvado comportou-se globalmente como uma fonte de carbono, ou seja, emitiu mais carbono do que sequestrou. Assim, a absorção de CO₂ ocorrida no período diurno, através do processo fotossintético, não foi suficiente para haver um balanço médio negativo em termos de emissões GEE. Contudo, o contributo do relvado como sumidouro de GEE, relativamente à ausência de vegetação no solo, minimizou os fluxos de CO₂ para a atmosfera.

O estudo avaliou dois grupos de parâmetros influentes, os edafoclimáticos e os vegetativos. Os parâmetros edafoclimáticos a nível geral, mostraram ser os mais influentes nos fluxos de CO₂, por atuarem diretamente nos fluxos e na vegetação. No entanto, os parâmetros vegetativos mostraram ser o fator determinante para a compreensão do principal meio de absorção do CO₂. A análise do potencial do relvado como sumidouro nos períodos de corte e crescimento permitirá ajustar a gestão do mesmo para se aumentar o seu potencial como sumidouro no futuro.

Além disso, observaram-se as possíveis influências antrópicas que podem prejudicar as características de sumidouro do relvado, como aplicações de rega e fertilizantes. Outra ação antrópica que desfavorece a absorção de CO₂ pelo relvado é o corte frequente a que é submetido, com a conseqüente redução da capacidade fotossintética, devido à redução de biomassa que compromete o desempenho vegetativo.

Este estudo também possibilitou compreender melhor a ação e influência dos parâmetros edafoclimáticos e vegetativos durante o período analisado. Variáveis como a radiação fotossinteticamente ativa, radiação solar, temperatura do solo, temperatura do ar ambiente, velocidade do vento e fitovolume, segundo análise matemática da matriz de Spearman, mostraram-se determinantes nas taxas dos fluxos de absorção, enquanto que a precipitação, a humidade relativa do ar e humidade do solo surgem como os fatores que mais influenciam os fluxos de emissão do solo. Outro aspeto analisado foi a avaliação dos fluxos de dióxido de carbono obtidos pelos métodos ajustamento das concentrações no interior da câmara por regressão linear e exponencial. Apesar de ambos os métodos convergirem em termos de comportamento do fenómeno, apresentaram diferenças entre si, demonstrando que é necessário ter cuidados acrescidos na hora de realizar medições desta.

O estudo também possibilitou desenvolver dois modelos preditivos da transferência líquida de CO₂ para o período da primavera, sendo, todavia, importante proceder à validação dos mesmos em estudos posteriores.

Uma das lacunas mais relevantes deste estudo está relacionada com o curto período de avaliação. Outra lacuna que poderá ser explorada tem a ver com a avaliação da influência do relvado no microbiota do solo.

Assim, como proposta futura, seria importante o desenvolvimento de um estudo que abrangesse o ciclo anual de crescimento da vegetação tornando-o mais representativo das condições edafoclimáticas e vegetativas, assim como a realização de uma investigação do comportamento da microbiota do solo, nas diferentes tipologias de solo analisado (relvado e solo exposto), quanto à biodiversidade, abundância e fatores influentes.

REFERENCIAS

- Aduan, R. E., Vilela, M. de F., & Júnior, F. B. dos R. (2004). *Os Grandes Ciclos Biogeoquímicos do Planeta* (p. 23). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Cerrados Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Embrapa Cerrados.
- Afonso, N., & Arrobas, M. (2009). Qualidade do Ambiente Urbano: Novos Desafios. In M. Feliciano, A. Gonçalves, & F. M. António Ribeiro (Eds.), *Beyou-Bemore.Com* (Instituto). http://beyou-bemore.com/sites/default/files/2012_Gomes_Vieira_Cap_Norte_Portugal_Galiza.pdf
- Apogee Instruments, I. (n.d.). *Silicon Pyranometer - Owner Manual*. Retrieved March 11, 2021, from https://www.apogeeinstruments.com/content/PYR_webmanual.pdf
- Assunção, H. F. (1994). Relações entre a radiação fotossinteticamente ativa e a radiação global em Piracicaba-SP. In *Dissertação apresentada à Escola superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de concentração: Agrometeorologia*. Universidade de São Paulo.
- Azari, R., & Singery, M. (2013). Sustainable Buildings and their Relationship with Humans and Nature. Lessons from the Past. In *Sustainability, Energy and Architecture: Case Studies in Realizing Green Buildings*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397269-9.00014-1>
- Baldocchi, D. D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems : past , present and future. *Global Change Biology*, 9, 479–492.
- Barbosa, Gl. S. (2016). *Uso de atributos do solo na identificação de limites para preservação de Veredas no Mato Grosso do Sul* [Universidade Estadual Paulista]. https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/143455/barbosa_gs_me_ilha.pdf?sequence=3
- Bauer, L. (2007). *Estimação do coeficiente de correlação de spearman ponderado*.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Bennington, J. B. (2009). *The Carbon Cycle and Climate Change*. Brooks/Cole, a part of Cengage Learning.

Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J. G. L., Barros, M. T. L. d., M., S., Porto, M., Nucci, N., Juliano, N., & Eiger, S. (2002). *Introdução à engenharia ambiental*.

Campbell Scientific, I. (2021a). *ARG100 - Tipping Bucket Raingauge (0.2mm/tip)*. <https://www.campbellsci.eu/arg100>

Campbell Scientific, I. (2021b). *CR200X - Datalogger*. <https://www.campbellsci.com/cr200x>

Campbell Scientific, I. (2021c). *CS215-L - Temperature and Relative Humidity Probe*. <https://www.campbellsci.com.br/cs215-l>

Carvalho, A. M., & Gonçalves, A. (2008). *Espaços Verdes de Bragança* (Câmara Mun). Escola Tipográfica - Bragança.

Carvalho, M. M. (2001). *Clima urbano e vegetação: estudo analítico e prospectivo do Parque das Dunas em Natal*. Universidade do Rio Grande do Norte.

Cavalli, A., Figueiredo, T. de, & Fonseca, F. (2017). *Áreas ardidadas e risco potencial de erosão - Estudo realizado em zonas do NE Portugal*. Novas Edições Acadêmicas is a trademark of International Book Market Service Ltd., member of OmniScriptum Publishing Group.

Chu, X., Han, G., Xing, Q., Xia, J., Sun, B., & Li, X. (2019). Agricultural and Forest Meteorology Changes in plant biomass induced by soil moisture variability drive interannual variation in the net ecosystem CO₂ exchange over a reclaimed coastal wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264(September 2018), 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.013>

Cidreira-Neto, I. R. G., & Rodrigues, G. G. (2017). Relação homem-natureza e os limites para o desenvolvimento sustentável. *Rev. Movimentos Sociais e Dinâmicas Espaciais*, 6(2), 142–156.

Clube Académico de Bragança. (2021). *Instalações Pavilhão Desportivo Complexo Piscinas Complexo Ténis*. http://www.academicobraganca.pt/?page_id=148

- Costa, N. de L., Deschamps, C., & Moraes, A. de. (2012). Estrutura da pastagem, fotossíntese e produtividade de gramíneas forrageiras. *Pubvet*, 6(21). <https://doi.org/10.22256/pubvet.v6n21.1387>
- Costa, N. L., Magalhães, J. A., Townsend, C. R., & Paulino, V. T. (2004). Fisiologia e manejo de plantas forrageiras. *Embrapa Rondônia -Documentos 85, February 2014*, 32.
- De Figueire, B. L., Marques, J., Pereira, G. T., Souza, Z. M., & La Scala Júnior, N. (2009). Soil CO₂ emission of sugarcane fields as affected by topography. *Scientia Agricola*, 66(1), 77–83. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162009000100011>
- Delgado-Baquerizo, M., Karunaratne, S. B., Trivedi, P., & Singh, B. K. (2018). Climate, geography, and soil abiotic properties as modulators of soil carbon storage. In *Soil Carbon Storage: Modulators, Mechanisms and Modeling*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812766-7.00005-6>
- Deng, Q., Hui, D., Chu, G., Han, X., & Zhang, Q. (2017). Rain-induced changes in soil CO₂ flux and microbial community composition in a tropical forest of. *Scientific Reports, December 2016*, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06345-2>
- Dias, J. D. (2006). *Fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo em áreas de floresta nativa da Amazônia*. Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".
- Dincer, I., & Abu-Rayash, A. (2020). Fundamental aspects of energy, environment, and sustainability. In *Energy Sustainability* (Issue 2015, pp. 1–18). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819556-7.00001-2>
- Dyer, A. J., & Hicks, B. B. (1970). Flux-gradient relationships in the constant. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 96(410), 715–721.
- El-Madany, T. S., Carrara, A., Martín, M. P., Moreno, G., Kolle, O., Pacheco-Labrador, J., Weber, U., Wutzler, T., Reichstein, M., & Migliavacca, M. (2020). Drought and heatwave impacts on semi-arid ecosystems' carbon fluxes along a precipitation gradient: Drought and Heatwave Impacts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1810). <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0519>
- Elsgaard, L., Görres, C., Christian, C., Blicher-mathiesen, G., Schelde, K., & Petersen, S.

- O. (2012). Agriculture , Ecosystems and Environment Net ecosystem exchange of CO₂ and carbon balance for eight temperate organic soils under agricultural management. *“Agriculture, Ecosystems and Environment,”* 162, 52–67. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.09.001>
- Fang, F., Han, X., Liu, W., & Tang, M. (2020). Carbon dioxide fluxes in a farmland ecosystem of the southern Chinese Loess Plateau measured using a chamber-based method. *PeerJ*, 2020(4), 1–22. <https://doi.org/10.7717/peerj.8994>
- Feijoo, A. M. L. C. de. (2010). *Parte I – Estatística descritiva*. SciELO Books.
- Feliciano, M. J. S. (2001). *Deposição Seca de Poluentes Gasosos em Ecossistemas do Sul da Europa : Medição e Parametrização*. Universidade de Aveiro.
- Fernández, F. J., Alvarez-Vázquez, L. J., García-Chan, N., Martínez, A., & Vázquez-Méndez, M. E. (2014). Optimal location of green zones in metropolitan areas to control the urban heat island. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2014.10.023>
- Ferreira, O. A., Danelichen, V. H. de M., Ferreira, N. F. C., Santos, E. N. dos, Novais, J. W. Z., Camargo, H. H. C., & Filho, B. F. da S. (2021). Tópicos do Método da Razão de Bowen Demonstration of the Bowen Ratio Method. *Uniciências*, 25, 65–68. <https://doi.org/https://doi.org/10.17921/1415-5141.2020v25n1p65-68>
- Figueiredo, R. M. da C. das N. (2014). *Áreas De Influência De Espaços Verdes Urbanos De Proximidade: Uma Abordagem Exploratória Na Freguesia De Arroios Rossano Manuel da Costa das Neves Figueiredo Urbanismo e Ordenamento do Território* [Universidade de Lisboa]. <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090413086/dissertacao.pdf>
- Fischer, H. (2011). *A History of the Central Limit Theorem* (J. Z. Buchwald (ed.); J.L. Bergg). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-87857-7>
- Forbrich, I., Kutzbach, L., Hormann, A., & Wilmking, M. (2010). A comparison of linear and exponential regression for estimating diffusive CH₄ fluxes by closed-chambers in peatlands. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(3), 507–515. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.12.004>
- França, J. A. (2005). *Lisboa: urbanismo e arquitectura* (5th ed.). Lisboa: Livros

Horizonte.

- Gaston, K. J., Ávila-Jiménez, M. L., & Edmondson, J. L. (2013). Managing urban ecosystems for goods and services. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 830–840. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12087>
- Gonçalves, A. J. de J. (2013). *El Valor Funcional De La Estructura Verde Urbana - Aportación desde el estudio de los espacios verdes de la ciudad de Bragança (Portugal)*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.
- González, F. H. D. (2005). *Fotossíntese*. <https://www.ufrgs.br/lacvet/restrito/pdf/fotossintese.pdf>
- Grimmond, C. S. B., Scott, A., & Belding, M. J. (1992). Development and evaluation of continuously weighing mini-lysimeters. *Agricultural and Forest Meteorology*, 62, 205–218.
- Heldt, H.-W., & Piechulla, B. (2005). Photosynthesis is an electron transport process. In *Plant Biochemistry* (Thrid, pp. 65–112). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-384986-1.00003-x>
- Henri W. Groeneveld. (1998). Measuring the RGR of Individual Grass Plants. *Annals of Botany*, 82, 803–808.
- Hulley, M. E. (2012). The urban heat island effect: Causes and potential solutions. *Metropolitan Sustainability: Understanding and Improving the Urban Environment*, 79–98. <https://doi.org/10.1533/9780857096463.1.79>
- IPCC. (2007). Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. In *Weather* (Vol. 59, Issue 8). <https://doi.org/10.1256/wea.58.04>
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas*.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. (Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf
- IPCC. (2018). *Special report on global warming of 1.5 °C*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>

- IPCC. (2021). Climate Change 2021 The Physical Science Basis. In *Climate Change 2021 - The Physical Science Basis*.
- IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I. P. P. (n.d.). *Ficha Climatológica 1971-200 - Brangaça*.
- Ison, R. (2018). Governing The Human – Environment Relationship : Systemic Practice. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 33, 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.05.009>
- Jeong, S., Eom, J., Lee, J., & Lee, J. (2017). *Effect of rainfall events on soil carbon flux in mountain pastures*. 1–8. <https://doi.org/10.1186/s41610-017-0056-x>
- Jorat, M. E., Goddard, M. A., Manning, P., Lau, H. K., Ngeow, S., Sohi, S. P., & Manning, D. A. C. (2020). Passive CO2 removal in urban soils: Evidence from brownfield sites. *Science of the Total Environment*, 703, 135573. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135573>
- Kang, S., Kim, S., Oh, S., & Lee, D. (2000). Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature. *Forest Ecology and Management*, 136(1–3), 173–184. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00290-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00290-X)
- Kato, D. S., Kawasaki, C. S., & Carvalho, L. M. de. (2015). *O Conceito De “Ecossistema” Em Teses E Dissertações Em Educação Ambiental No Brasil: construção de significados e sentidos*. http://epea.tmp.br/epea2015_anais/pdfs/plenary/204.pdf
- L.Monteith, J., & Unsworth, M. H. (2013). *Principles of Environmental Physics Plants , Animals , and the Atmosphere* (4th ed.). Elsevier/Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386910-4.00019-6>
- Lambrecht Meteo, I. (2021a). *ORA Wind direction sensor*. <https://www.lambrecht.net/en/products/wind/wind-direction-sensor-ora>
- Lambrecht Meteo, I. (2021b). *ORA Wind speed sensor*. <https://www.lambrecht.net/en/products/wind/wind-speed-sensor-ora>
- Lefebvre, H. (2008). *O Direito à Cidade* (A. C. Fagá (ed.); Conexão Ed). Centauro Editora.

- LI-COR, I. (n.d.). *LI-8100A Automated Soil Gas Flux System*.
<https://www.licor.com/documents/yya24c0b4nfcg2vqglsq>
- LI-COR, I. (2010). *Using the LI-8100A Soil Gas Flux System & the LI-8150 Multiplexer* (p. 238).
- LI-COR, I. (2021). *LI-190R Sensor Quântico*.
<https://www.licor.com/env/products/light/quantum>
- Livignston, G. P., & Hutchinson, G. L. (1995). Enclosure-based measurement of trace gas exchange: Applications and sources of error. In P. A. MATSON & R. C. HARRISS (Eds.), *Biogenic trace gases: Measuring emissions from soil and water*. Blackwell Science Ltd.
- Loisy, C., Cohen, G., Laveuf, C., Le, O., Delaplace, P., Magnier, C., Rouchon, V., Cerepi, A., & Garcia, B. (2013). International Journal of Greenhouse Gas Control The CO₂-Vadose Project: Dynamics of the natural CO₂ in a carbonate vadose zone. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 14, 97–112.
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.12.017>
- Lou, Y. sheng, Li, Z. pei, & Zhang, T. lin. (2003). Soil CO₂ flux in relation to dissolved organic carbon, soil temperature and moisture in a subtropical arable soil of China. *Journal of Environmental Sciences*, 15(5), 715–720.
- Martins, C. R., Afonso, P., Pereira, D. P., Araújo, W., & Andrade, J. B. De. (2003). Ciclos Globais de Carbono , Nitrogênio e Enxofre : In *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola* (pp. 28–41).
- Martins, N. F. (2011). Uma síntese sobre aspectos da fotossíntese. *Revista de Biologia e Ciências Da Terra*, 11(2), 10–14.
- Martins, R. D., & Ferreira, L. da C. (2011). Uma revisão crítica sobre cidades e mudança climática: vinho velho em garrafa nova ou um novo paradigma de ação para a governança local? *Revista de Administração Pública*, 45(3), 611–641.
<https://doi.org/10.1590/s0034-76122011000300004>
- Meirelles, M. L., Silva, F. A. M. da, Evangelista, B. A., & Guerra, A. F. (1999). *Utilizacão do Método Razão de Bowen balanço de energia na obtenção dos fluxos de vapor de água e CO₂*.

- Metos Pessl Instruments GmbH. (2021). *METER GROUP ECH2O GS 1 VOLUMETRIC WATER CONTENT SENSOR*. <https://metos.at/portfolio/decagon-volumetric-water-content-sensor/>
- Moitinho, M. R. (2017). *Variabilidade Da Emissão De Co 2 Do Solo Sob Diferentes Manejos Em Áreas De Cana-De-Açúcar*. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP CÂMPUS DE JABOTICABAL.
- Molion, L. carlos B. (2008). AQUECIMENTO GLOBAL : UMA VISÃO CRÍTICA. *Revista Brasileira de Climatologia*.
- Moreira, F. M. S., & Siqueira, J. O. (2006). *Microbiologia e Bioquímica do Solo (2º)*. EDITORA UFLA. [http://www.esalq.usp.br/departamentos/lso/arquivos_aula/LSO_400 Livro - Microbiologia e bioquimica do solo.pdf](http://www.esalq.usp.br/departamentos/lso/arquivos_aula/LSO_400_Livro_Microbiologia_e_bioquimica_do_solo.pdf)
- Neto, F., Assis, D. E., & Elene, M. (1989). Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 24(7), 797–800.
- Nicese, F. P., Colangelo, G., Comolli, R., Azzini, L., Lucchetti, S., Marziliano, P. A., & Sanesi, G. (2021). Estimating CO2 balance through the Life Cycle Assessment prism: A case – Study in an urban park. *Urban Forestry and Urban Greening*, 57, 126869. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126869>
- Okedere, O. B., & Oyelami, S. (2021). Emission inventory of greenhouse gases and sustainable energy for mobile telecommunication facilities in Nigeria. *Environmental Challenges*, 4(July), 100203. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100203>
- Pacheco, M. R. P. dos S., & Helene, M. E. M. (1990). Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO2. *Estudos Avançados*, 4(9), 204–220. <https://doi.org/10.1590/s0103-40141990000200010>
- Panakoulia, S. K., Nikolaidis, N. P., Paranychianakis, N. V., Menon, M., Schiefer, J., Lair, G. J., Krám, P., & Banwart, S. A. (2017). Factors Controlling Soil Structure Dynamics and Carbon Sequestration Across Different Climatic and Lithological Conditions. In *Advances in Agronomy* (1st ed., Vol. 142). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.008>

- PBMC. (2016). *Mudanças Climáticas e Cidades: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas* (S. K. Ribeiro & A. S. Santos (eds.)). COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/publicacoes/relatorios-especiais-pbmc/item/relatorio-especial-mudancas-climaticas-e-cidades>
- Pereira, O. A. (2013). *Estimativas do balanço de energia e fluxo de carbono por diferentes métodos em floresta de transição no sudoeste da amazônia*. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO.
- Pereira, O. A., Biudes, M. S., Nogueira, J. de S., Seixas, G. B., & Arruda, P. H. Z. (2013). Determinação do fluxo de CO₂ no norte do pantanal mato-grossense. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(3), 341–351. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300010>
- Ramesh, T., Bolan, N. S., Kirkham, M. B., Wijesekara, H., Kanchikerimath, M., Srinivasa Rao, C., Sandeep, S., Rinklebe, J., Ok, Y. S., Choudhury, B. U., Wang, H., Tang, C., Wang, X., Song, Z., & Freeman, O. W. (2019). Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review. *Advances in Agronomy*, 156, 1–107. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.02.001>
- Reichle., D. E. (2020). The global carbon cycle and the biosphere. In *The Global Carbon Cycle and Climate Change* (pp. 183–208). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820244-9.00010-X>
- Reis, L. B. (2019). *Estudo comparativo dos fluxos de CO₂ na interface solo-atmosfera em sistema agroflorestal com manejo contrastante no nordeste de Portugal*. Instituto Politécnico de Bragança.
- Rochette, P., Gregorich, E. G., & Desjardins, R. L. (1992). Comparison of static and dynamic closed chambers for measurement of soil respiration under field conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, 72, 605–609. <https://doi.org/https://doi.org/10.4141/cjss92-050>
- Rochette, Philippe, & Hutchinson, G. L. (2005). Measurement of Soil Respiration in situ : Chamber Techniques. *Micrometeorology in Agricultural Systems (2005) Agronomy Monograph*, 47, 247–286.
- Sá, J. F. F. De. (2013). *Espaços verdes em meio urbano: uma abordagem metodológica com base em serviços de ecossistema*. Universidade de Lisboa.

- Sadatshojaie, A., & Rahimpour, M. R. (2020). Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes. In *Membranes in Environmental Applications* (pp. 1–30). Elsevier inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816778-6.00001-1>
- Santamouris, M. (2019). Urban Heat Island and Local Climate Change. In *Minimizing Energy Consumption, Energy Poverty and Global and Local Climate Change in the Built Environment: Innovating to Zero*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811417-9.00003-9>
- Shen, M., Huang, W., Chen, M., Song, B., Zeng, G., & Zhang, Y. (2020). (Micro) plastic crisis : Un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120138>
- Silva, E. C. da, Nogueira, R. J. M. C., Neto, A. D. de A., & Santos, V. F. dos. (2003). *Comportamento estomático e potencial da água da folha em três espécies lenhosas cultivadas sob estresse hídrico*. 17(2), 231–246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0102-33062003000200006>
- Silva, G. C. da. (2016). *Avaliação da disponibilidade de espaços verdes públicos no contexto urbano e a sua relação com a percepção dos residentes. Um estudo para a cidade de Bragança* [Intituto Politécnico de Bragança]. https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/13293/1/ADEV_P_GCS.pdf
- Smith, K. A., & Conen, F. (2000). An explanation of linear increases in gas concentration under closed chambers used to measure gas exchange between soil and the atmosphere. *European Journal of Soil Science*, 51(1), 111–117. https://www.researchgate.net/publication/227760395_An_explanation_of_linear_increases_in_gas_concentration_under_closed_chambers_used_to_measure_gas_exchange_between_soil_and_the_atmosphere
- Stewart, N. (2020). Urban green space, social equity and human wellbeing. In *Urban Ecology* (pp. 111–127). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820730-7.00007-0>
- Stolt, M. H., & Lindbo, D. L. (2010). Soil Organic Matter. In *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53156-8.00017-9>

- Tang, J., Bradford, M. A., Carey, J., Crowther, T. W., Machmuller, M. B., Mohank, J. E., & Todd-Brown, K. (2020). Determinants of soil carbon dynamics in urban ecosystems. In *Urban Ecology*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820730-7.00016-1>
- Teemusk, A., Kull, A., Kanal, A., & Mander, Ü. (2019). Science of the Total Environment Environmental factors affecting greenhouse gas fluxes of green roofs in temperate zone. *Science of the Total Environment*, *694*, 133699. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133699>
- Tonello, V. M. marques. (2007). *Principais aspectos do ciclo biogeoquímico do elemento carbono e seu contexto na atualidade*. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz.”
- Toniolo, J. C. (2010). Processos geológicos de fixação de carbono na Terra e aquecimento global. *TERRÆ DIDÁTICA*, *6*(1), 31–56.
- Verma, S. B. (2009). Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. *Remote Sensing Reviews*, *5*(1), 99–115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/02757259009532124>
- Voorend, W., Lootens, P., Nelissen, H., Roldán-ruiz, I., Inzé, D., & Muylle, H. (2014). LEAF-E : a tool to analyze grass leaf growth using function fitting. *Plant Methods*, 1–13.
- Willems, A. B., Augustenborg, C. A., Hepp, S., Lanigan, G., Hochstrasser, T., Kammann, C., & Müller, C. (2011). Carbon dioxide emissions from spring ploughing of grassland in Ireland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *144*(1), 347–351. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.10.001>
- World Health Organization. (2017). Urban green spaces: a brief for action. In *WHO Regional Office for Europe in 2017*.
- Wu, X. G., Hu, D., Ma, S. L., Zhang, X., Guo, Z., & Gaston, K. J. (2016). Elevated soil CO₂ efflux at the boundaries between impervious surfaces and urban greenspaces. *Atmospheric Environment*, *141*, 375–378. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.050>