

XIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia

Estimativa das trocas de CO₂ no bioma pampa: obtenção de parâmetros experimentais para uso em modelagem

Estimation of CO₂ exchange in the pampa biome: obtaining experimental parameters for use in modeling

Alecsander Mergen¹ , Richard Reno da Costa Lobato¹ , Vanessa de Souza Arruda¹ ,
Maria Eduarda Oliveira Pinheiro¹ , Cristiano Maboni¹ , Tiago Bremm¹ ,
Mateus da Silva Rebelo¹ , Willian da Silva Chaves^{II} , Joao Antonio Voltz da Silva¹ ,
Michel Baptistella Stefanello¹ , Debora Regina Roberti¹ 

^I Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

^{II} Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, RS, Brasil

ABSTRACT

Devido a necessidade de reduzir as emissões de gases do efeito estufa em sistemas agropecuários, estudos estão sendo realizados nos campos do bioma Pampa afim de conhecer a dinâmica das trocas de carbono para propor formas de mitigação. Neste estudo, calibramos um modelo para a estimativa da troca líquida de CO₂ (NEE) nos campos nativos do bioma pampa utilizados para pecuária, com base nas equações clássicas de respiração do ecossistema e assimilação de carbono pela fotossíntese. Para tanto, serão utilizados dados de NEE obtidos através da técnica Eddy Covariance (EC) num campo nativo no sítio de Santa Maria nos anos de 2015 e 2016 para obter os parâmetros utilizados no modelo. Os parâmetros foram obtidos para cada estação do ano e o modelo foi avaliado para os anos de 2019 e 2020 tanto para o sítio de Santa Maria, quanto para o sítio de Aceguá, distante cerca de 300km de Santa Maria. Os resultados mostraram que o modelo foi capaz de estimar o NEE para o sítio de Santa Maria com *média de* R² = 0,80 e RMSE 0,08 g C m⁻² 30 min⁻¹, e para o sítio de Aceguá com R² = 0,75 e RMSE 0,10 g C m⁻² 30 min⁻¹. No entanto, o modelo teve maior R² e maior RMSE nos períodos de verão e primavera e menor no inverno e outono em ambos os sítios. Este modelo pode ser usado para estimativas do NEE CO₂ nos campos nativos do bioma Pampa como base para previsão de absorção/emissão de CO₂ nas diferentes estações do ano.

Palavras-chave: Respiração do ecossistema; Fotossíntese; Carbono; Pastagem nativa

RESUMO

Due to the urge to reduce greenhouse gas emissions in agricultural systems, studies are being conducted in the fields of the Pampa biome to understand the dynamics of carbon exchanges and

propose mitigation measures. In this study, a model was calibrated to estimate the net ecosystem exchange (NEE) of CO₂ in the native fields of the Pampa biome used for livestock, based on classical equations of ecosystem respiration and carbon assimilation through photosynthesis. For this purpose, NEE data obtained using the Eddy Covariance (EC) technique from a native field at the Santa Maria site in the years 2015 and 2016 were used to obtain the parameters utilized in the model. The parameters were obtained for each season, and the model was evaluated for the years 2019 and 2020 for both the Santa Maria site and the Aceguá site, located about 300 km from Santa Maria. The results showed that the model was able to estimate the NEE for the Santa Maria site with an average $R^2 = 0.80$ and RMSE $0.08 \text{ g C m}^{-2} 30 \text{ min}^{-1}$, and for the Aceguá site with $R^2 = 0.75$ and RMSE $0.10 \text{ g C m}^{-2} 30 \text{ min}^{-1}$. However, the model showed higher R^2 and higher RMSE during the summer and spring periods and lower values in winter and autumn at both sites. This model can be used to estimate the NEE of CO₂ in the native fields of the Pampa biome as a basis for predicting CO₂ absorption/emission across different seasons.

Keywords: Ecosystem respiration; Photosynthesis; Carbon; Native pasture

1 INTRODUÇÃO

A agropecuária é uma das principais fontes de emissões de gases do efeito estufa (GEE) em muitas regiões do mundo (FAO, 2013, IPCC, 2014). A mudança da cobertura e uso do solo é um fator em comum em grande parte da agricultura mundial, onde ecossistemas naturais têm sido desmatados e convertidos em pastagens para a criação de bovinos de corte (Priante-Filho *et al.*, 2004; Wolf *et al.*, 2011). Neste sentido, as emissões de GEE nestas áreas tem maior relação com a conversão do ecossistema natural, devido a queimadas, alteração da vegetação nativa e propriedades do solo, associadas assim as práticas de manejo inadequadas (Mohamad *et al.*, 2014; Florindo *et al.*, 2017; Tiscornia *et al.*, 2019).

Pastagens naturais utilizadas para a criação de bovinos de corte, combinadas com a adoção de práticas adequadas do manejo do sistema de pastejo, podem resultar no sequestro de carbono e na mitigação das emissões de GEE (Lal, 2004; Soussana *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2021). Um exemplo são as pastagens naturais no bioma Pampa no sul do Brasil. Maboni (2021) e Roberti *et al.* (2024) mostram que a pecuária praticada em sistema conservativo, com manejo rotativo no campo nativo do Bioma Pampa brasileiro pode ser um importante sumidouro de gases do efeito estufa da atmosfera, pois, embora ocorra a emissão CO₂-eq (CO₂ equivalente, que é a

unidade padrão para a comparação dos diferentes gases do efeito estufa) na forma de CH_4 , estas foram compensadas pela absorção de CO_2 pela fotossíntese, o que resultou numa absorção CO_2 -eq da atmosfera. Isso mostra que o bioma Pampa pode ser um importante sumidouro de CO_2 atmosférico, enquanto produz proteína animal de qualidade e preserva a fauna e flora local.

A paisagem natural do bioma Pampa brasileiro é caracterizada por um relevo formado por planícies, coxilhas e uma vegetação predominante de gramíneas de crescimento estival (Jaurena *et al.*, 2021). Esta região tem sido utilizada para a produção de pecuária desde o final do século XVII (Baggio *et al.*, 2021; Ribeiro e Quadros, 2015), formando áreas consolidadas de pastagens naturais. Atualmente, essas pastagens naturais fornecem forragem para cerca de 14 milhões de bovinos e ovinos na região sul do Brasil (IBGE, 2020). Todavia, ao longo das últimas duas décadas, o bioma Pampa brasileiro registrou uma significativa redução de quase 30% em sua área de campos naturais, principalmente devido à expansão das atividades agrícolas e silvicultura (Baeza *et al.* (2022), Andrade *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2017; Torchelsen *et al.*, 2019). O efeito da mudança da cobertura e uso da terra provoca alterações no balanço de carbono, mudando completamente a dinâmica das trocas de carbono entre a superfície-atmosfera (Abraha *et al.*, 2018).

Nesse sentido, modelos que podem prever as emissões e absorções de CO_2 nestes sistemas de produção fornecem importantes informações sobre como cada manejo pode alterar o balanço de carbono. O objetivo deste trabalho é calibrar um modelo para a estimativa da troca líquida de CO_2 (NEE) nas pastagens nativas do bioma pampa, baseando-se nas equações clássicas de respiração do ecossistema e assimilação de CO_2 pela fotossíntese. Como as pastagens naturais do Bioma Pampa apresentam uma forte sazonalidade no NEE ao longo do ano, representando emissão nos meses de outono e inverno e absorção nos meses de primavera e verão, são obtidos parâmetros em cada estação do ano. Desta forma, espera-se obter um modelo que possa representar as pastagens nativas de toda a região do Pampa no sul do Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Descrição dos sítios

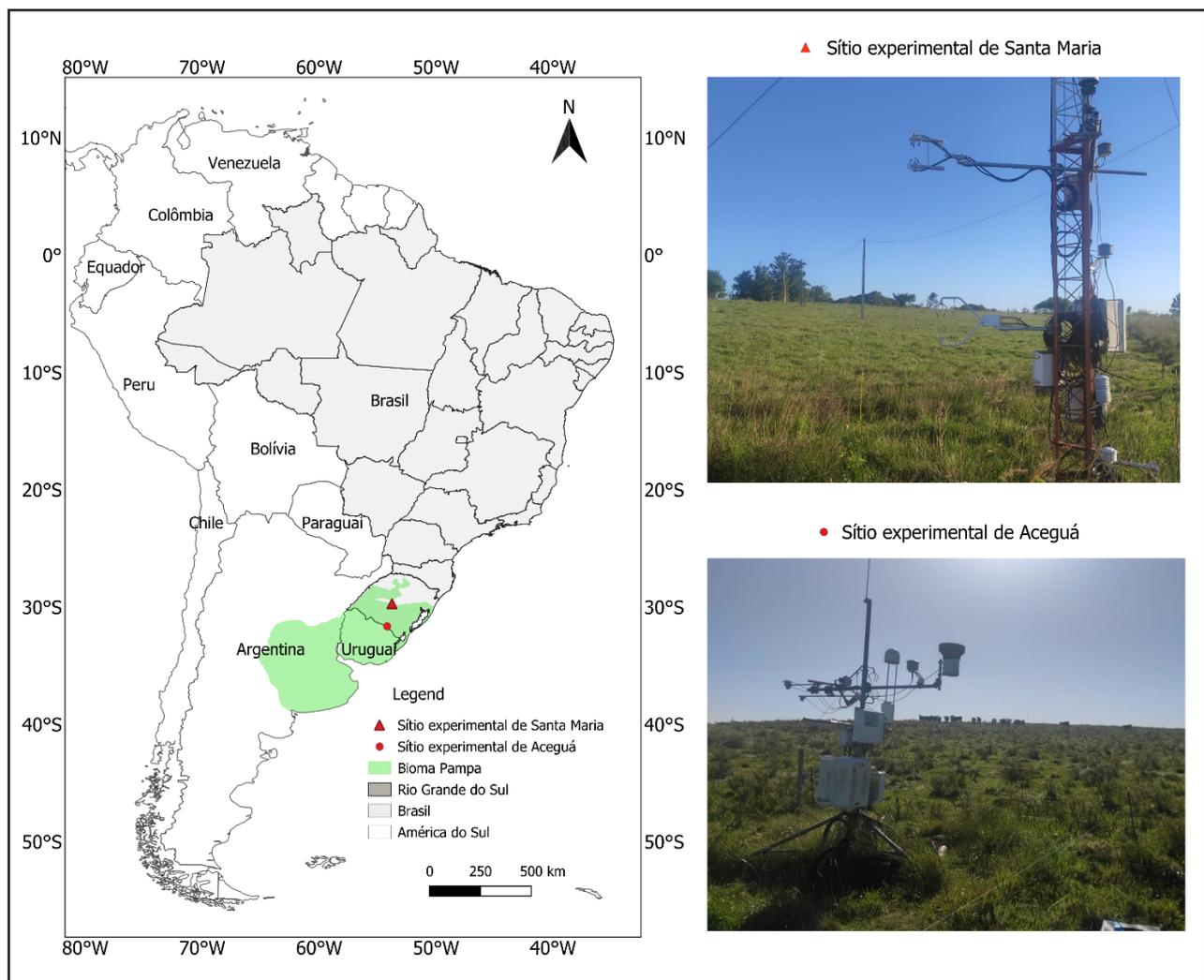
O sítio experimental de Santa Maria - RS (SMA) possui uma área de 40 hectares de pastagem nativa do bioma Pampa, localizada dentro da Universidade Federal de Santa Maria, município de Santa Maria – Rio Grande do Sul, Brasil. Na área experimental foi conduzido um sistema de manejo rotacionado de pastejo, em piquetes de 0,5 hectares, com descanso de 750 graus dia entre os piquetes. Uma completa descrição da condução do manejo rotativo nesta área é encontrada em (Barbieri *et al.*, 2015). A classificação do solo é franco-argilosa com 41% de areia, 23% de argila e 35% de silte. Detalhes sobre o tipo de vegetação e solo do sítio estão descritos em (Barbieri *et al.*, 2015; Kuinchtner *et al.*, 2018).

O sítio de Aceguá-RS (ACE) faz parte da rede PELD (Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração) e está localizado em uma propriedade particular no município de Aceguá - RS. A área tem 18 ha subdivididos em piquetes de 2 ha, utilizados para pastejo do gado com descanso de 550 graus dia entre os piquetes. Uma descrição completa do experimento pode ser encontrada em (Maboni, 2021). Detalhes sobre a vegetação da pastagem natural do sítio foram descritos por (Baggio, 2017). O solo da área de estudo é caracterizado como franco-arenoso com 59,30% de areia; 0,81% argila; 39,89% silte.

Em ambos os sítios, foi instalada uma torre de fluxo composta de anemômetro sônicos e analisador de gases (CO₂/H₂O) para coleta de dados em alta frequência (10Hz) e sensores atmosféricos padrão para medidas da radiação global (Rg) e temperatura do ar (Tar). A descrição completa das configurações das torres de fluxos e dos sensores instalados nos sítios SMA e ACE pode ser encontrada nos trabalhos de Roberti (2024) e Maboni (2021), respectivamente. Os sítios experimentais encontram-se a cerca de 300 km distantes um do outro e o clima predominante em ambos é subtropical úmido do tipo “Cfa” de acordo com a classificação de Köppen (Kottek *et al.*,

2006), caracterizado por ter as estações bem definidas, atingindo altas temperaturas no verão (acima de 35°C) e invernos amenos sujeitos a ocorrência de fenômenos de geadas, com pluviosidade regular durante o ano.

Figura 1 – Localização das áreas experimentais



Fonte: Autores (2024)

2.2 Processamentos dos dados

O processamento dos dados de alta frequência foi realizado usando a técnica Eddy Covariance (EC) através do software EddyPro®, v7.0.6 (LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, EUA) estimando os fluxos superficiais de CO₂ (troca líquida de CO₂ do ecossistema, NEE). Para o cálculo dos fluxos foi adotada a média em bloco

de 30 minutos e aplicadas as seguintes correções: rotação dupla (Wilczak; Oncley; Stage, 2001); correções para efeitos de densidade (Webb; Pearman; Leuning, 1980); atenuação de fluxo devido à configuração instrumental (Gash; Culf, 1996); correções devido a filtros de passa alta (Moncrieff *et al.*, 1997) e passa baixa (Moncrieff *et al.*, 2004); filtragem de dados de alta frequência (Vickers; Mahrt, 1997).

Neste estudo, utilizamos a metodologia de FOKEN *et al.* (2004) para remover os fluxos de baixa qualidade. Os fluxos foram descartados em eventos de precipitação e na meia hora posterior (para secagem do instrumento). Foi utilizado um controle estatístico seguindo Béziat, Ceschia e Dedieu, (2009), ou seja, dados fora de uma faixa de desvio padrão de $\pm 2,5$ da janela móvel de 200 pontos de dados (separadamente para dados diurnos e noturnos) foram identificados como espúrios e removidos. O NEE foi filtrado para remover observações feitas sob condições de baixa turbulência com base no critério u^* -threshold (Papale *et al.*, 2006). As lacunas nos dados de fluxo de NEE foram preenchidas através do pacote Reddyproc (Max Planck Institute for Biogeochemistry, Germany) usando o método descrito por Wutzler *et al.* (2018).

2.3 Modelo de NEE

O NEE representa a diferença entre o CO₂ que é capturado pelo ecossistema através da fotossíntese (GPP) e o CO₂ que é liberado de volta para a atmosfera por meio da respiração de plantas e microrganismos, bem como de outros processos de decomposição (Reco). Assim, o NEE pode ser escrito como:

$$NEE = - GPP + Reco \quad (1)$$

OU

$$NEE = - \frac{\alpha \beta Rg}{\alpha Rg + \beta} + R_{ref} e^{E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_{ar} - T_0} \right)} \quad (2)$$

em que α é a eficiência com que a luz é utilizada pelo dossel ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ J}^{-1}$), β representa a inclinação inicial da curva de resposta à luz, sendo a taxa máxima de CO₂ absorvida

pelo dossel na saturação da luz ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), R_g é a radiação solar global (W m^{-2}), T_{ref} é a respiração na temperatura de referência ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), T_0 é a temperatura de referência (15°C), E_0 é o ajuste da sensibilidade da respiração à temperatura ($^\circ\text{C}$), T_0 a $-46,02^\circ\text{C}$ obtidos de Lloyd e Taylor (1994) e T_{ar} é a temperatura do ar. O primeiro termo do lado direito da eq. (2) é a equação de Michaelis-Menten, adaptada para modelar a GPP em função da disponibilidade de luz e o segundo termo do lado direito da eq. (2) é a equação que descreve a respiração do ecossistema, baseada em Lloyd and Taylor (1994).

O sinal do NEE pode ser positivo ou negativo. O sinal negativo indica que o ecossistema está agindo como um sumidouro de CO_2 , ou seja, está capturando mais CO_2 da atmosfera do que está liberando. O sinal positivo indica que o ecossistema está agindo como uma fonte de carbono, liberando mais CO_2 do que está capturando.

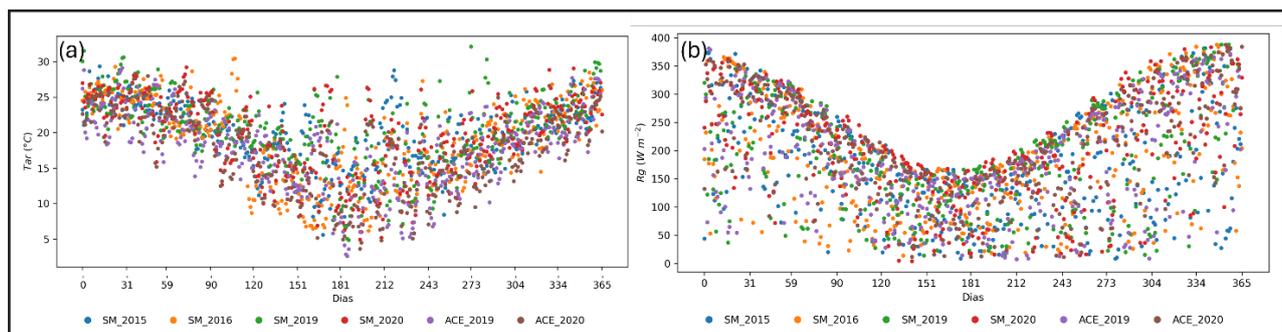
A eq. (2) está implementada no pacote REddyProc (REddyProcWeb online tool) conforme Wrutzel (2018) e é geralmente usada para o fechamento de falhas nos dados de NEE. Os parâmetros α , β , R_{ref} e E_0 são estimados a cada 2 dias, ajustando a eq. (2) aos valores de NEE observados. Neste trabalho, foram utilizados dados de 2015 e 2016 de NEE, R_g e T_{ar} do sítio de Santa Maria para gerar os parâmetros da eq. (2), com dados de entrada na base de meia hora. Estes parâmetros foram agrupados em médias sazonais para cada estação do ano. Com estes parâmetros médios, usamos a eq. (2) para estimar o NEE nos anos de 2019 e 2020 dos sítios de SMA e ACE. Os resultados obtidos através deste modelo foram comparados com o NEE observados através do coeficiente de correlação, R^2 , e do erro quadrático médio, RMSE para as estimativas em 30 min.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As condições climáticas são similares nos sítios de SMA e ACE, conforme apresentado na Figura (1) e também analisado por Mergen *et al.* (2023), tendo SMA temperatura do ar em geral quase 2°C maior que ACE. O tipo de solo nos dois sítios

difere principalmente na composição de argila, sendo SMA mais argiloso. Hasenack *et al.* (2023), dividiu o bioma Pampa brasileiro em diferentes regiões de acordo com os tipos de solos, relevos e vegetações, sendo que o sítio de SMA pertence a classificação “inland sub-montane grassland” e ACE como “Shortgrass grassland”. Essas diferenças podem ser refletidas na forma com que o ecossistema troca carbono com a atmosfera. Mergen *et al.* (2023), analisando o NEE medidos nos sítios de ACE e SMA, mostra que embora ambos os sistemas absorvem CO₂, SMA absorve cerca de 3 vezes mais CO₂ que ACE.

Figura 3 – Média diária da temperatura do ar (a) e da radiação global (b) para os sítios de SMA e ACE para todos os anos utilizados neste estudo



Fonte: Autores (2024)

Neste trabalho, foram estimados os parâmetros da eq. (2) para cada estação do ano no sítio de SMA entre os anos 2015 e 2016, conforme apresentado na Tabela (1). Nota-se que os parâmetros relacionados ao GPP (α e β) são maiores no verão e primavera que no outono e inverno, pois é nesta época que a incidência de luz é maior e a fotossíntese se intensifica causando maior crescimento das plantas. A respiração do ecossistema também é maior no verão, o que se reflete no maior R_{ref} .

O modelo de NEE, utilizando a eq. (2) e os parâmetros da Tabela 1 (NEE_mod), foi utilizado para a estimativa do NEE em SMA e ACE para os anos de 2019 e 2020. Para os dois anos avaliados, nos dois sítios experimentais, o NEE acumulado nas diferentes estações do ano tiveram um comportamento sazonal semelhante, sendo de

absorção na primavera e verão e de emissão no outono e inverno. A magnitude dessas emissões e absorções foi diferente entre os sítios e os anos. O ano de 2020 apresentou uma absorção de cerca de 3 vezes maior que 2019 tanto em SMA quanto em ACE, conforme já reportado por Mergen *et al.* (2023). O modelo conseguiu representar esse comportamento anual, com um coeficiente de correlação bom ($R^2 > 0,75$) e com um RMSE entre 0,08 e 0,10 g C m⁻² 30 min⁻¹.

Tabela 1 – Parâmetros da eq. (2) para pastagem nativa do bioma Pampa, obtidos com dados observados no sítio de Santa Maria para as diferentes estações do ano entre 2015 e 2016

Estação do ano	($\mu\text{mol CO}_2 \text{ J}^{-1}$)	($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	(°C)
Verão	0,10	56,16	6,78	181,22
Outono	0,06	44,46	4,51	181,21
Inverno	0,05	32,22	3,94	200,89
Primavera	0,05	50,30	4,76	223,91

Fonte: Autores (2024)

Nas estações da primavera e verão o modelo consegue acertar o sinal do NEE, com $R^2 > 0,79$ em ambos os sítios e anos avaliados. No entanto, no inverno, apenas em SMA o modelo acerta o sinal do NEE em ambos os anos, embora o R^2 fica menor que 0,71. Em ACE o modelo previu todos os outonos e invernos como absorvedores de CO₂, o que acarretou também em uma grande superestimativa do NEE anual. O RMSE ficou maior no verão e menor no inverno, o que também pode ser explicado pela magnitude do NEE ser maior no verão que no inverno.

Tabela 2 – Desempenho do modelo de NEE para os sítios de SMA e ACE nos anos de 2019 e 2020. NEE em g C m⁻²; RMSE em g C m⁻² 30 min⁻¹

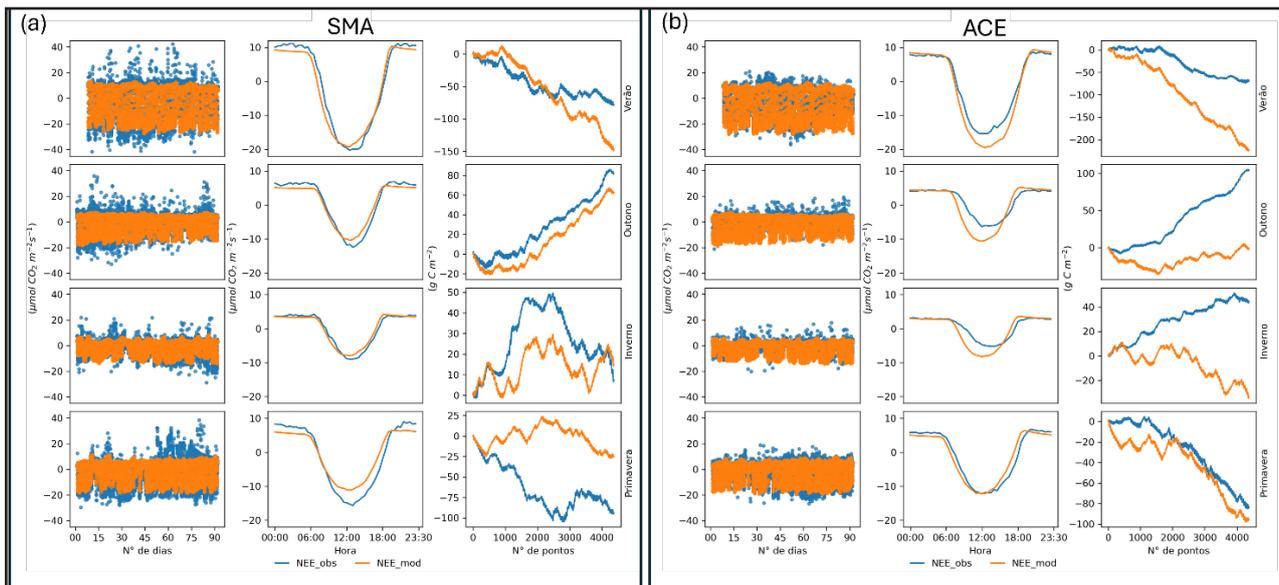
		NEE Mod	NEE Obs	R ²	RMSE	NEE Mod	NEE Obs	R ²	RMSE
		2019				2020			
	Verão	-222,84	-68,06	0,83	0,11	-334,28	-61,71	0,81	0,13
	Outono	-1,15	104,57	0,66	0,08	-54,92	66,73	0,72	0,08
ACE	Inverno	-33,63	44,26	0,58	0,07	-32,33	30,36	0,70	0,06
	Primavera	-95,20	-83,51	0,77	0,08	-160,17	-100,03	0,80	0,08
	Anual	-352,83	-2,74	0,76	0,09	-581,71	-64,66	0,75	0,10
	Verão	-146,65	-77,72	0,83	0,11	-281,22	-212,83	0,87	0,10
	Outono	62,61	82,28	0,78	0,07	-32,10	45,80	0,72	0,08
SMA	Inverno	14,95	7,48	0,71	0,06	19,42	87,60	0,63	0,07
	Primavera	-24,50	-94,06	0,79	0,08	-75,01	-175,30	0,86	0,07
	Anual	-93,59	-82,01	0,79	0,08	-368,92	-254,73	0,81	0,08

Fonte: Autores (2024)

Como o NEE é estimado a cada meia hora, mostramos estas estimativas, além do ciclo médio diário e do acumulado diário ao longo da estação avaliada para o sítio de SMA e ACE para o ano de 2019 na Figura (3). Os valores de NEE ao longo das estações é bem representado pelo modelo, como pode ser notado tanto pelo R² como RMSE na Tabela (1) e os painéis da esquerda na Figura (3). Nota-se que para as estações em que os resultados acumulados sazonais são similares, o ciclo diurno ficou muito parecido, principalmente quanto aos máximos de absorção que ocorrem ao meio do dia (SMA: verão, outono e inverno e ACE: primavera). O modelo subestimou os dados noturnos em SMA e ficou muito similar em ACE, mas em geral subestimou as máximas absorções no meio do dia em SMA (considerando o NEE em módulo) e superestimou bastante em ACE, isso se refletiu nas maiores diferenças entre o NEE integrado nas estações em ACE. Embora os valores de NEE no outono e inverno foram próximos

de zero, o modelo mostrou uma absorção ($NEE < 0$) enquanto a observação mostrou ($NEE > 0$).

Figura 3 – NEE observado e modelado para (a) SMA e (b) ACE em 2019. NEE a cada meia hora (painéis da esquerda), ciclo diurno médio (painéis centrais) e acumulado diário nas estações do ano (painéis da direita)



Fonte: Autores (2024)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho estimamos parâmetros médios sazonais que modelam a absorção de CO_2 pela fotossíntese e a emissão de CO_2 através da respiração do ecossistema em pastagem nativa do bioma Pampa do RS. O modelo foi testado para diferentes anos e regiões do bioma pampa e mostrou que consegue reproduzir as trocas de CO_2 de forma eficiente o padrão de emissão e absorção nas diferentes estações do ano.

REFERÊNCIAS

BAGGIO, R. Estratégias de manejo adaptativo para os Campos Sulinos. 2017. 129 p. Tese (Doutorado em Ecologia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BARBIERI, C. W. et al. Beef heifers grazing behavior and herbage intake in natural grassland under rotational grazing. **Ciência Rural**, v. 45, n. 11, p. 2056–2062, nov. 2015.

BÉZIAT, P.; CESCHIA, E.; DEDIEU, G. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 10, p. 1628–1645, mar. 2009.

BOLDRINI, I. IOB. **Bioma pampa: diversidade florística e fisionômica**. Porto Alegre: Pallotti, 2010.

BROADBENT, E. et al. A systematic review of patients' drawing of illness: implications for research using the Common Sense Model. **Health Psychology Review**, v. 13, n. 4, p. 406–426, 2 out. 2019.

CEZIMBRA, I. M. et al. Potential of grazing management to improve beef cattle production and mitigate methane emissions in native grasslands of the Pampa biome. **Science of The Total Environment**, v. 780, p. 146582, ago. 2021.

FAO. (2013). Tackling Climate Change Through Livestock: A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e1afd815-5a76-4b88-beac-fb9bc0e92001/content>. Acesso em: 31 de Maio de 2024.

FOKEN, T et al., 2004. Handbook of Micrometeorology: A Guide for surface flux measurement and analysis: Chapter 9: POST-FIELD DATA QUALITY CONTROL, Handbook of Micrometeorology.

GOMEZ-CASANOVAS, N. et al. Grazing alters net ecosystem C fluxes and the global warming potential of a subtropical pasture. **Ecological Applications**, v. 28, n. 2, p. 557–572, mar. 2018.

HOEPPNER, S. S.; DUKES, J. S. Interactive responses of old-field plant growth and composition to warming and precipitation. **Global Change Biology**, v. 18, n. 5, p. 1754–1768, maio 2012.

HOLECHECK, J. L.; GALT, D. Grazing Intensity Guidelines. **Rangelands**, v. 22, n. 3, 2000.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). Banco de dados. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=rs&tema=pecuaria2012>. Acesso em: 07 de out. de 2022.

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

JAURENA, M. et al. Native Grasslands at the Core: A New Paradigm of Intensification for the Campos of Southern South America to Increase Economic and Environmental Sustainability. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, 5 mar. 2021.

KOTTEK, M. et al. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259–263, 10 jul. 2006.

KUINCHTNER, B. C. et al. Performance and feed intake of beef heifers on rotational grazing of natural grassland receiving protein and energy supplement in cool season. **Ciência Rural**, v. 48, n. 4, 26 abr. 2018.

LEZAMA, F. et al. Variation of grazing-induced vegetation changes across a large-scale productivity gradient. **Journal of Vegetation Science**, v. 25, n. 1, p. 8–21, jan. 2014.

MABONI, C. Fluxo de metano no bioma Pampa: análises em área de arroz e de pecuária. 2021. 89 p. Tese (Doutorado em Física) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

MERGEN, A. Variabilidade interanual dos fluxos de CO₂ em uma pastagem natural no bioma Pampa brasileiro. 2022. 69 p. **Dissertação (Mestrado em Física)** — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022.

Mergen, A.; Veeck, G. P.; Pillar, V. de P.; Baggio, R.; Quadros, F. L. F. de ; Marin, L.; Souza, V. de A.; Stefanello, M. B.; Pinheiro, M. E. O. ; Aimi, D. M.; Roberti, D. R. Trocas de CO₂ em pastagens naturais do bioma Pampa com criação de gado de corte sob manejo rotacionado. **Ciência e Natura**, v. 45, p. e81293, 2023.

MONCRIEFF, J. *et al.* Averaging, detrending, and filtering of eddy covariance time series, in Handbook of micrometeorology. **Handbook of Micrometeorology: A Guide for surface flux measurement and analysis**, 2004.

MONCRIEFF, J. B. *et al.* A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. **Journal of Hydrology**, 1997.

PAPALE, D. *et al.* Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation. **Biogeosciences**, 2006.

PRESCHER, A. K.; GRÜNWARD, T.; BERNHOFER, C. Land use regulates carbon budgets in eastern Germany: From NEE to NBP. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 7–8, p. 1016–1025, 2010.

REICHSTEIN, M. *et al.* On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v. 11, n. 9, p. 1424–1439, set. 2005.

ROYO PALLARES, O.; BERRETTA, E. J.; MARASCHIN, G. E. The South American campos ecosystem. In Suttie, J, Reynolds, SG, Batello, C. Grasslands of the world. Roma: FAO, p. 171-219, 2005.

RUTLEDGE, S. *et al.* The carbon balance of temperate grasslands part I: The impact of increased species diversity. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 239, p. 310–323, fev. 2017.

SOUSSANA, J. F.; TALLEC, T.; BLANFORT, V. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. **Animal**, v. 4, n. 3, p. 334–350, 2010.

VEECK, G. P. *et al.* CO₂ flux in a wheat-soybean succession in subtropical Brazil: A carbon sink. **Journal of Environmental Quality**, 2022.

VEENENDAAL, E. M. *et al.* CO₂ exchange and carbon balance in two grassland sites on eutrophic drained peat soils. **Biogeosciences**, v. 4, n. 6, p. 1027–1040, 21 nov. 2007.

VICKERS, D.; MAHRT, L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, 1997.

WEBB, E. K.; PEARMAN, G. I.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 1980.

WILCZAK, J. M.; ONCLEY, S. P.; STAGE, S. A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. **Boundary-Layer Meteorology**, 2001.

WUTZLER, T. et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REdlyProc. **Biogeosciences**, 2018.

ZIMMER, T. et al. Influence of clearness index and soil moisture in the soil thermal dynamic in natural pasture in the Brazilian Pampa biome. **Geoderma**, v. 378, p. 114582, nov. 2020.

Contribuições de Autoria

1 – Aleksander Mergen

Doutorando em Física pelo programa de pós graduação em Física da UFSM

<https://orcid.org/0000-0001-7126-8694> • aleksandermergen@gmail.com

Contribuição: Conceituação, Metodologia, Software, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Escrita – Primeira Redação, Visualização de Dados

2 – Richard Reno da Costa Lobato

Meteorologista, Doutorando em Meteorologia pela UFSM

<https://orcid.org/0000-0003-3787-6738> • richardlobato7@gmail.com

Contribuição: Visualização de Dados

3 – Vanessa de Arruda Souza

Meteorologista, Doutora em Sensoriamento Remoto pela UFSM

<https://orcid.org/0000-0002-8518-1271> • v.arruda.s@gmail.com

Contribuição: Análise Formal, Escrita – Revisão & Edição

4 – Maria Eduarda Oliveira Pinheiro

Física, Doutora em Física pela UFSM

<https://orcid.org/0000-0001-6428-0839> • mariaeduardafisica@gmail.com

Contribuição: Análise Formal, Escrita – Revisão & Edição

5 – Cristiano Maboni

Físico, Doutor em Física pela UFSM

<https://orcid.org/0000-0002-2825-0840> • cristianomaboni@hotmail.com

Contribuição: Análise Formal, Escrita – Revisão & Edição

6 – Tiago Bremm

Físico, Doutor em Meteorologia pela UFSM

<https://orcid.org/0000-0003-1564-1014> • bremm.tiago@gmail.com

Contribuição: Análise Formal, Escrita – Revisão & Edição

7 – Mateus da Silva Rebello

Meteorologista, Mestrando em Meteorologia pela UFSM
<https://orcid.org/0000-0003-3569-2206> • mateusrebello22@gmail.com
Contribuição: Escrita – Primeira Redação, Visualização de Dados

8 – Willian da Silva Chaves

Física, Mestre em Física pela FURG
<https://orcid.org/0000-0002-8205-9713> • william.chaves.rs@gmail.com
Contribuição: Análise Formal

9 – Joao Antonio Voltz da Silva

Graduando em Meteorologia pela UFSM
<https://orcid.org/0009-0004-9108-3805> • joaovoltz17@gmail.com
Contribuição: Escrita – Primeira Redação, Visualização de Dados

10 – Michel Baptistella Stefanello

Físico, Doutor em Física pela UFSM
<https://orcid.org/0000-0002-6380-3252> • michelstefanello@gmail.com
Contribuição: Análise Formal, Escrita – Revisão & Edição

11 – Débora Regina Roberti

Física, Doutora em Física
<https://orcid.org/0000-0002-3902-0952> • debora@ufsm.br
Contribuição: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Investigação, Recursos, Escrita – Revisão & Edição, Supervisão, Administração do Projeto, Obtenção de Financiamento

Como citar este artigo

MERGEN, A.; LOBATO, R. R. da C.; SOUZA, V. de A.; PINHEIRO, M. E. O.; MABONI, C.; BREMM, T.; REBELO, M. da S.; CHAVES, W. da S.; SILVA, J. A. V. da; STEFANELLO, M. B.; ROBERTI, D. R. Estimativa das trocas de CO₂ no bioma pampa: obtenção de parâmetros experimentais para uso em modelagem. **Ciência e Natura**, v. 46, esp. 2, e87858, 2024. <https://doi.org/10.5902/2179460X87858>.