

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CORREÇÕES NOS FLUXOS DE CO₂ EM UM SÍTIO EXPERIMENTAL NO BIOMA CAATINGA

¹Arthur Vinicius Souza da Costa, ²Gustavo Silva Xavier, ³Pablo Eli Soares de
Oliveira; ⁴Yuri Patrick Pessoa da Silva

¹UFRN, e-mail: arthur702vsc@gmail.com; ²UFRN, e-mail: gustavo701x@gmail.com;

³UFRN, e-mail: pablo.oliveira@ufrn.br; ⁴UFRN, e-mail: yur08621@gmail.com

*Biodiversidade e Preservação
Regulação climática*

Resumo

A técnica de *eddy covariance* é fundamental para monitorar a regulação climática em ecossistemas tropicais, contudo, a precisão das estimativas de CO₂ na Caatinga é desafiadora. Este estudo objetivou avaliar a influência de correções matemáticas no processamento de fluxos de CO₂ em uma torre micrometeorológica na FLONA Açu (RN), entre janeiro e maio de 2025. Utilizou-se o software EddyPro para realizar um processamento iterativo, comparando cenários com e sem correções de densidade (WPL), rotação de eixos e compensações espectrais. Os resultados evidenciam que a omissão da correção de densidade (WPL) é a principal fonte de erro, resultando em uma superestimativa de 111,33% no sequestro de carbono acumulado durante o período analisado. A análise estatística confirmou que a expansão térmica do ar, característica do ambiente semiárido, distorce as leituras diurnas, mascarando o real estado de resiliência do bioma. Conclui-se que a aplicação rigorosa das correções micrometeorológicas é indispensável para evitar diagnósticos ambientais equivocados, sendo o ajuste térmico o fator crítico para a integridade dos dados de balanço de carbono em ecossistemas sazonalmente secos.

Palavras-chave: Caatinga; Correção WPL; Eddy covariance; Micrometeorologia.

Introdução

A regulação climática é vital para mitigar o "colapso silencioso do planeta", exigindo a compreensão detalhada das trocas superficiais de energia e massa (SILVA et al., 2017). Na Caatinga, ecossistema semiárido marcado por forte sazonalidade e estresse hídrico, a

dinâmica de carbono altera-se abruptamente ao longo do ano. Monitorar a magnitude dessas trocas com precisão é essencial para diagnosticar o grau de resiliência do bioma e o seu real papel como sumidouro ou fonte de CO₂ (MUTTI et al., 2020; MENDES et al., 2024).

Embora a técnica de covariância de vórtices (*eddy covariance*) seja amplamente utilizada para mensurar esses fluxos (MAUDER et al., 2021), sua aplicação no semiárido impõe severos desafios metodológicos. As altas temperaturas locais geram intensos fluxos de calor sensível, causando a expansão térmica do ar. Essa flutuação exige a aplicação da correção de densidade de Webb, Pearman e Leuning (WPL) para evitar distorções graves nas leituras (WEBB; PEARMAN; LEUNING, 1980). Conjuntamente a ajustes como a rotação de coordenadas para compensar irregularidades topográficas (FOKEN et al., 2012), essas correções matemáticas são vitais, pois ignorá-las pode mascarar a verdadeira taxa de sequestro de carbono.

Diante deste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a influência dessas diferentes metodologias de correção nos fluxos de CO₂ na Caatinga. Compreendendo o período de transição sazonal de janeiro a maio de 2025, o estudo quantifica as incertezas metodológicas do processamento de dados, buscando aprimorar a padronização e a precisão do balanço de carbono em florestas tropicais sazonalmente secas.

Metodologia

O estudo foi conduzido utilizando dados de uma torre micrometeorológica instalada na Floresta Nacional de Açu (Flona Açu), uma área de preservação ambiental no Rio Grande do Norte (RN). A região, inserida no bioma Caatinga, caracteriza-se pelo clima semiárido com elevada sazonalidade na precipitação e forte estresse hídrico. Para capturar a transição sazonal do ecossistema e os impactos nas trocas gasosas, o período de análise compreendeu os meses de janeiro a maio de 2025. As medidas foram obtidas a partir de um sistema de covariância de vórtices turbulentos (*eddy covariance*), composto por um anemômetro sônico tridimensional Windmaster Pro (Gill Instruments, Lymington, UK) e um analisador de gás por infravermelho (IRGA, modelo LI-7500 DS, Li-Cor), registrando variáveis a 10 Hz.

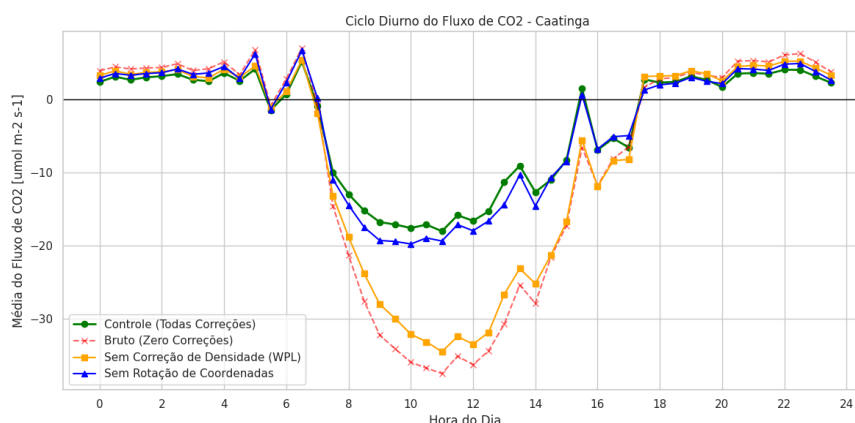


Para avaliar a influência das correções matemáticas sobre o fluxo de CO₂, os dados brutos foram submetidos a processamento iterativo no software EddyPro. Foram estruturados quatro cenários: o Controle, com todas as correções avançadas (WPL, rotação e espectrais); o cenário Bruto, sem qualquer correção; o cenário Sem WPL, com supressão exclusiva do termo de Webb, Pearman e Leuning (1980); e o cenário Sem Rotação, mantendo os eixos sem alinhamento com o fluxo natural. As planilhas *full output* foram analisadas via Python (Pandas), aplicando-se o controle de qualidade (QC) do EddyPro (MAUDER et al., 2021) para descartar dados com *flag* 2. A análise focou no ciclo diurno médio, no erro pontual (Bias e RMSE) e no impacto percentual acumulado no balanço de carbono do período.

Resultados e Discussão

O processamento iterativo revelou que a aplicação das correções micrometeorológicas altera drasticamente a magnitude dos fluxos de carbono na Caatinga, não de forma aleatória, mas em resposta direta às forçantes climáticas. A análise do ciclo diurno médio (Figura 1) demonstrou que, embora as médias noturnas (18h-06h) sejam pouco sensíveis, a divergência entre os cenários é extrema durante o pico do calor diurno. Enquanto o cenário Bruto indicou taxas próximas a $-40\mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$, o Controle apresentou valores em torno de $-18\mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$. O cenário "Sem WPL" replicou o erro do dado bruto, confirmando que a expansão térmica do ar, ao dilatar o volume amostrado, é interpretada pelo sensor como uma falsa absorção fotossintética, conforme a premissa de Webb, Pearman e Leuning (1980) e Mutti et al. (2020).

Figura 1: Gráfico do Ciclo Diurno



Fonte: Autor(2026)



A Tabela 1 isola o viés estatístico: o cenário Sem WPL foi responsável por mais de 86% do viés total (Bias de -5,050), enquanto a ausência de rotação teve impacto marginal (-0,338), indicando que, na FLONA Açu, a topografia e o dossel mitigam erros de inclinação, mas não as distorções térmicas.

Tabela 1: Estatísticas de erro e viés dos cenários de teste em relação ao processamento Controle.

Cenário Analisado	Viés Médio (Bias)	RMSE
Bruto (0 Correções)	-5,84	12,034
Sem WPL (Densidade)	-5,05	9,117
Sem Rotação	-0,34	5,257

Fonte: Autor(2026)

A Tabela 2 traduz esse erro para o balanço acumulado: a falta de correção WPL gerou uma superestimativa de 111,33% no sequestro de carbono. Tais resultados provam que a inconsistência metodológica pode comprometer diagnósticos ambientais e políticas de conservação, mascarando o real grau de estresse hídrico do bioma.

Tabela 2: Impacto numérico das correções na soma total do fluxo (Acumulado) para o período analisado.

Cenário	Soma do Fluxo Acumulado	Erro Acumulado (%)
Controle (O Real)	-16.506,86	0,0 % (Ref)
Bruto (0 Correções)	-37.771,03	-128,82 %
Sem WPL (Densidade)	-34.883,27	-111,33 %
Sem Rotação	-17.735,94	-7,45 %

Fonte: Autor(2026)

Conclusão

A precisão das estimativas de troca de carbono em florestas tropicais sazonalmente secas depende crucialmente do rigor no processamento de dados. Os resultados na FLONA Açu revelam a dominância do efeito térmico: a ausência da compensação de densidade (WPL) causou uma superestimativa de 111,33% no sequestro de carbono, mascarando a real resiliência do ecossistema frente aos extremos climáticos. Em contrapartida, a falta de rotação de eixos teve um impacto local marginal. Essa magnitude de erro evidencia que ignorar as especificidades térmicas do bioma compromete o diagnóstico ambiental, o cálculo de créditos de carbono e a formulação de políticas de conservação. Portanto, a aplicação das correções de Webb, Pearman e Leuning (1980) e de rotinas de qualidade (MAUDER et al., 2021) é um requisito indispensável para um monitoramento íntegro na Caatinga. Sugere-se, ainda, a futura integração de métodos complementares, como o *surface-renewal* (CASTELLVÍ et al., 2020), para suprir as incertezas da técnica de *eddy covariance* em noites de turbulência intermitente.

Referências

ACEVEDO, O. C. et al. Intermittency and the exchange of scalars in the nocturnal surface layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 119, p. 41-55, 2006.

ACEVEDO, O. C.; MAHRT, L. Systematic vertical variation of mesoscale fluxes in the nocturnal boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 135, n. 1, p. 19-30, 2010.

AUBINET, M. Eddy covariance CO₂ flux measurements in nocturnal conditions: an analysis of the problem. **Ecological Applications**, v. 18, n. 6, p. 1368-1378, 2008.

CASTELLVÍ, F. et al. Friction-velocity estimates using the trace of a scalar and the mean wind speed. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 177, p. 277-299, 2020.

COULTER, R. L.; DORAN, J. C. Spatial and temporal occurrences of intermittent turbulence during CASES-99. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 105, p. 329-349, 2002.

FINNIGAN, J. An introduction to flux measurements in difficult conditions. **Ecological Applications**, v. 18, n. 6, p. 1340-1350, 2008.

FOKEN, T. et al. Standard corrections for Eddy Covariance. In: AUBINET, M.; VESALA, T.; PAPALE, D. (Eds.). **Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis**. Dordrecht: Springer, 2012. p. 85-131.



GOULDEN, M. L. et al. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. **Global Change Biology**, v. 2, p. 169-182, 1996.

MAUDER, M. et al. Eddy covariance measurements: capturing the exchange of CO₂, water vapor, and energy. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, p. 730691, 2021.

MENDES, K. R. et al. Seasonally Dry Tropical Forests as carbon sinks. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 344, p. 109813, 2024.

MUTTI, P. R. et al. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 287, p. 107957, 2020.

PAPALE, D. et al. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. **Biogeosciences Discussions**, v. 3, n. 4, p. 571-607, 2006.

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, p. 1424-1439, 2005.

SILVA, C. M. S. E. et al. Energy and carbon balances in the Caatinga Biome. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 239, p. 119-131, 2017.

SUN, J. et al. Turbulence regimes and turbulence intermittency in the stable boundary layer during CASES-99. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 69, n. 1, p. 338-351, 2012.

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**, v. 106, n. 447, p. 85-100, 1980.