Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
LEGD Editora

O BALANÇO DE SUMIDOURO DE CARBONO E CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

The carbon sink balance and weather conditions in Rio de Janeiro city

El balance de sumidero de carbono y condiciones meteorológicas en la ciudad de Río de Janeiro

Juliana Rodrigues Paim
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
juliana789almeida@gmail.com

Max Anjos
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
maxanjos@campus.ul.pt

Andrews José de Lucena
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
lucenageo@gmail.com

Resumo: O presente trabalho foca no balanço de carbono e o papel da vegetação nos fluxos de CO_2 na cidade. O objetivo é avaliar a variabilidade espaço-temporal da troca líquida de CO_2 no ecossistema ou *Net Ecosystem Exchange (NEE)* e sua relação com as condições meteorológicas na cidade do Rio de Janeiro, no período de 2016 a 2020. O trabalho foi desenvolvido a partir de um modelo empírico-biogênico que estima os fluxos horários de NEE em uma resolução de 300 metros, usando dados de sensoriamento remoto, variáveis meteorológicas e coeficientes derivados empiricamente. Os resultados mostram que a maior absorção de CO_2 ocorreu nas áreas com elevada fração de vegetação (80 - 100%) com um máximo de -1.6 gCO_2 m^2 $hora^{-1}$ e mínimo -0.6 gCO_2 m^2 $hora^{-1}$ nas áreas urbanizadas. Os valores totais de NEE variaram diariamente e sazonalmente devido à variação da temperatura do ar e da precipitação acumulada. Durante a noite, a respiração das plantas e solos emitiram CO_2 com uma média de 1.8 tCO_2 $hora^{-1}$ e, durante o dia, a fotossíntese estocou CO_2, chegando a -6 tCO_2 $hora^{-1}$. Os maiores valores de NEE (-1.800 tCO_2) foram registrados no verão e os mínimos (200 tCO_2) no inverno. Os resultados deste estudo contribuem para a formulação de estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas na cidade, que levam em conta o papel das áreas verdes no balanço de carbono.

P alavras-chave: Troca Líquida de CO_2 no Ecossistema. Pegada de Carbono. Clima Urbano. Mudanças Climáticas.

Abstract: This study focuses on carbon balance and the role of vegetation and soils on urban fluxes of CO_2. The goal is to evaluate the spatio-temporal variability of the Net Ecosystem Exchange (NEE) and its link with weather conditions in Rio de Janeiro from 2016 to 2020. The empiric-biogenic model was used to estimate the hourly flux of NEE at a 300 meter resolution, using remote sensing data, meteorological variables, and a set of coefficients. The results revealed that there is greater absorption of CO_2 in elevated vegetation fractions (80-100%) with a maximum NEE of -1.6 gCO_2 m^2 $hour^{-1}$, and lower absorption in urbanized areas with a minimum NEE of -0.6 gCO_2 m^2 $hour^{-1}$. The NEE value totals varied daily and seasonally as a function of variation in air temperature and rainfall. By nighttime, the respiration of plants and soils emitted CO_2 with a mean of 1.8 tCO_2 $hour^{-1,}$ and by daytime, the photosynthesis captured up to -6 tCO_2 $hour^{-1}$. The larger NEE values (-1.800 tCO_2) were recorded in summer and the lower NEE (200 tCO_2) in winter. The findings of this study contribute to promotion of adaptation and mitigation strategies related to the climate change in the city, taking into account the role of green areas on carbon balance.

Keywords: Net Ecosystem Exchange. Carbon Footprint. Urban Climate. Climate Change.

Resumen: El presente trabajo se centra en el balance de carbono y el papel de la vegetación y los suelos en los flujos de CO_2 en la ciudad. El objetivo es evaluar la variabilidad espacio-temporal del intercambio neto de CO_2 en el ecosistema o Net Ecosystem Exchange (NEE) y su relación con las condiciones meteorológicas en el período de 2016 a 2020, en la ciudad de Río de Janeiro. El trabajo se desarrolló a partir de un modelo empírico-biogénico que estima los flujos horarios de NEE en una resolución de 300 metros, utilizando datos de teledetección, variables meteorológicas y coeficientes derivados empíricamente. Los resultados revelan que la mayor absorción de CO_2 ocurrió en las áreas con una elevada fracción de vegetación (80 - 100%) con un máximo de -1,6 gCO_2 m^2 $hora^{-1}$ y un mínimo de -0,6 gCO_2 m^2 $hora^{-1}$ en las áreas urbanizadas. Los valores totales de NEE variaron diariamente y estacionalmente debido a la variación de la temperatura del aire y la precipitación acumulada. Durante la noche, la respiración de las plantas y los suelos emitieron CO_2 con un promedio de 1,8 tCO_2 $hora^{-1}$ y, durante el día, la fotosíntesis capturó CO_2, llegando a -6 tCO_2 $hora^{-1}$. Los mayores valores de NEE (-1.800 tCO_2) se registraron en verano y los mínimos (200 tCO_2) en invierno. Los resultados de este estudio contribuyen a la formulación de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático en la ciudad, que tienen en cuenta el papel de las áreas verdes en el balance de carbono.

Palabras clave: Intercambio Neto de CO_2 en el Ecosistema. Huella de Carbono. Clima Urbano. Cambio Climático.

Submetido em: 22/03/2024
Aceito para publicação em: 11/08/2024
Publicado em: 08/09/2024

1. INTRODUÇÃO

Embora as áreas urbanas ocupem menos de 2,4% da massa terrestre do planeta, aproximadamente 650.000 km², elas abrigam mais de 50% da população mundial e espera-se que esse número chegue a 70-75% em 2050 (ONU, 2019). Além disso, a urbanização é responsável por 70% das emissões antropogênicas relacionadas ao consumo de energia (IPCC, 2014).

As cidades são ecossistemas complexos, constantemente modificados pelas condições naturais e atividades humanas. Cada ecossistema tem seu próprio ciclo de carbono e padrão de troca de fluxos de CO_2 com a atmosfera (Kutsch *et al*., 2022). Por exemplo, durante o dia, as florestas absorvem CO_2 da atmosfera e o armazenam em suas estruturas e estômatos por meio da fotossíntese; durante a noite, elas emitem CO_2 para a atmosfera por meio da respiração das plantas. Quando a absorção de CO_2 é maior do que a quantidade de CO_2 liberada, o ecossistema é considerado um sumidouro de carbono (*uptake* em inglês); caso contrário, o ecossistema é uma fonte, emitindo CO_2 para a atmosfera.

A diferença entre a produção primária bruta (*Gross Primary Production* – GPP, em inglês) e a respiração do ecossistema (*Ecosystem Respiration* – Reco) é denominada troca líquida de CO_2 no ecossistema (*Net Ecosystem Exchange* – NEE, em inglês) (Reichstein *et al*., 2005). O termo NEE é fortemente influenciado pelas condições meteorológicas e alterações no uso e cobertura do solo induzidas pelas atividades humanas (Kutsch *et al*., 2022). O NEE é frequentemente utilizado como um parâmetro para estudar o balanço de carbono nos ecossistemas naturais e urbanizados (Baldocchi, 2003).

Vários modelos biogênicos, tais com o empírico-biogênico (Bellucco *et al.*, 2017), o *Urban Vegetation Photosynthesis and Respiration Model* (VPRM) (Hardiman *et al*., 2017) e o *Solar- Induced Fluorescence* (SIF) for *Modeling Urban biogenic Fluxes* (SMUrF) (Wu; Lin, 2021), usam variáveis ambientais, dados de sensoriamento remoto e uma série de coeficientes derivados empiricamente para estimar o NEE em diferentes resoluções espaciais e temporais, indo de quilômetros a centenas de metros e de frequências horárias. Esses dados detalhados de NEE são cruciais para entender o papel dos espaços verdes no ciclo do carbono e para orientar ações de mitigação e adaptação às mudanças climáticas locais.

Por exemplo, os inventários de gases de efeito estufa agregam as emissões antropogênicas e biogênicas de CO_2 para avaliar a pegada de carbono das cidades. No entanto, esses inventários geralmente consideram apenas as emissões e fluxos anuais de CO_2, sem levar em conta as variações intra-urbanas, especialmente as relacionadas à vegetação e aos solos (Chen *et al*., 2020). Além disso, embora tenham ocorrido avanços promissores na medição e modelagem dos fluxos de NEE em escala global, ainda falta compreender claramente sua variabilidade intra-anual e diária nas cidades brasileiras. Portanto, é necessário quantificar a troca de carbono entre a vegetação e a atmosfera nessas áreas, a fim de compreender melhor o papel da vegetação no ciclo do carbono em ambientes urbanos tropicais.

Assim, o objetivo do presente estudo é determinar a variabilidade espaço-temporal dos fluxos NEE em célula de grade de 300 metros quadrados, em frequência horária, no município do Rio de Janeiro no período entre 2016 e 2020, usando um modelo biogênico. Este estudo mapeia os fluxos horários, sazonais e anuais de NEE, incluindo os fluxos GPP e Reco, e também analisa as condições meteorológicas que influenciam a variabilidade sazonal do NEE.

2. METODOLOGIA

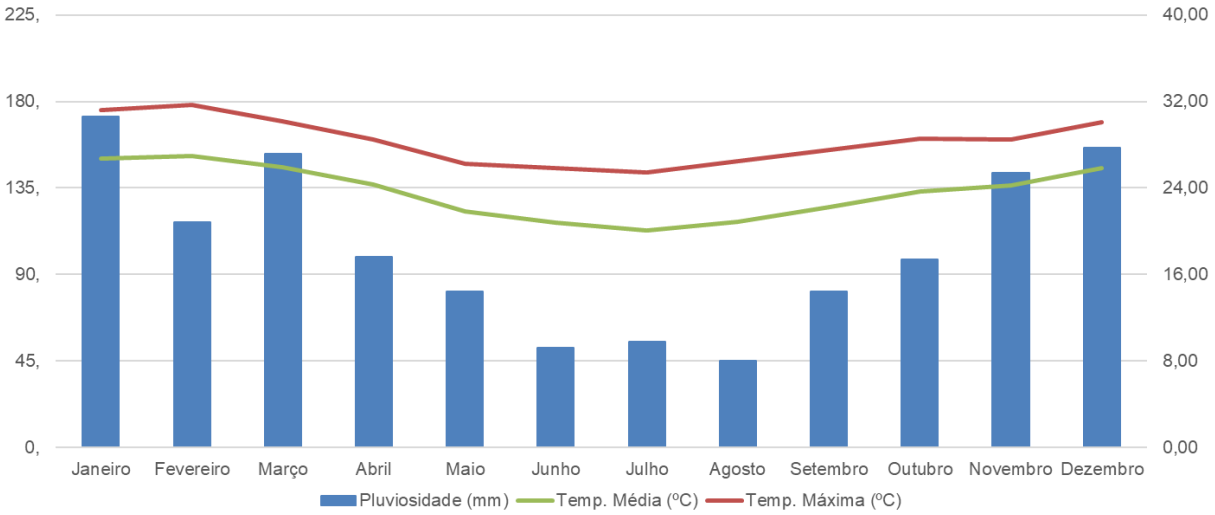
2.1. Área de estudo

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), com quase 13 milhões de habitantes (IBGE, 2021), é a segunda maior e mais importante do país. O município do Rio de Janeiro conta com quase 7 milhões de habitantes e representa o espaço mais importante da área metropolitana que se deve a sua influência social, cultural e econômica diante dos demais municípios que a compõem. A cidade possui uma área com cerca de 1.200,33 km² (IBGE, 2021) e o bioma presente nessa região é a Mata Atlântica, um dos biomas mais biodiversos do mundo que passou por um longo processo de desmatamento no decorrer dos anos tendo parte de sua vegetação removida pelo processo de urbanização. No entanto, ainda existe uma boa parte dessa vegetação preservada e que ainda não sofreu alterações, principalmente nos maciços como Tijuca, Pedra Branca e Mendanha e nas Unidades de Conservação encontradas na cidade, que se mostram muito importantes no estoque de CO_2 juntamente com os solos.

Considerar também o papel dos solos na captura de carbono é fundamental para o planejamento urbano e as estratégias de mitigação às mudanças climáticas em áreas urbanas.

O clima da cidade do Rio de Janeiro enquadra-se como Tropical Úmido (Peel *et al*., 2007) caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos de temperaturas amenas e seco. O período de baixa pluviosidade vai de maio até setembro, enquanto os meses de alta pluviosidade estendem-se de outubro a abril com uma média pluviométrica variando entre esses meses de 100 à 172 mm, já nos meses de inverno a pluviosidade fica em torno de 81 a 45 mm (Figura 1). O padrão do clima nessa região é um fator muito importante para a composição tanto da vegetação como dos solos. Afinal, se trata de um clima úmido que apesar de conter um período seco, ainda sim, apresenta um certo nível de pluviosidade por seus fatores geográficos e os diversos sistemas que atuam nessa localidade durante o ano inteiro. Além disso, as temperaturas do município são altas durante quase todo o ano, apenas caindo nos meses correspondentes ao inverno, conforme a Figura 1, durante o verão as temperaturas máximas variam de 28 a 32 °C e as temperaturas médias de 24 à 28 °C e ao longo do inverno variam 26 à 28 ºC as máximas e as médias de 22 à 23 °C, o que nos mostra uma boa disponibilidade solar para o processo de fotossíntese das plantas na região.

Figura 1- Temperatura média, máxima e precipitação acumulada para o município do Rio de Janeiro.

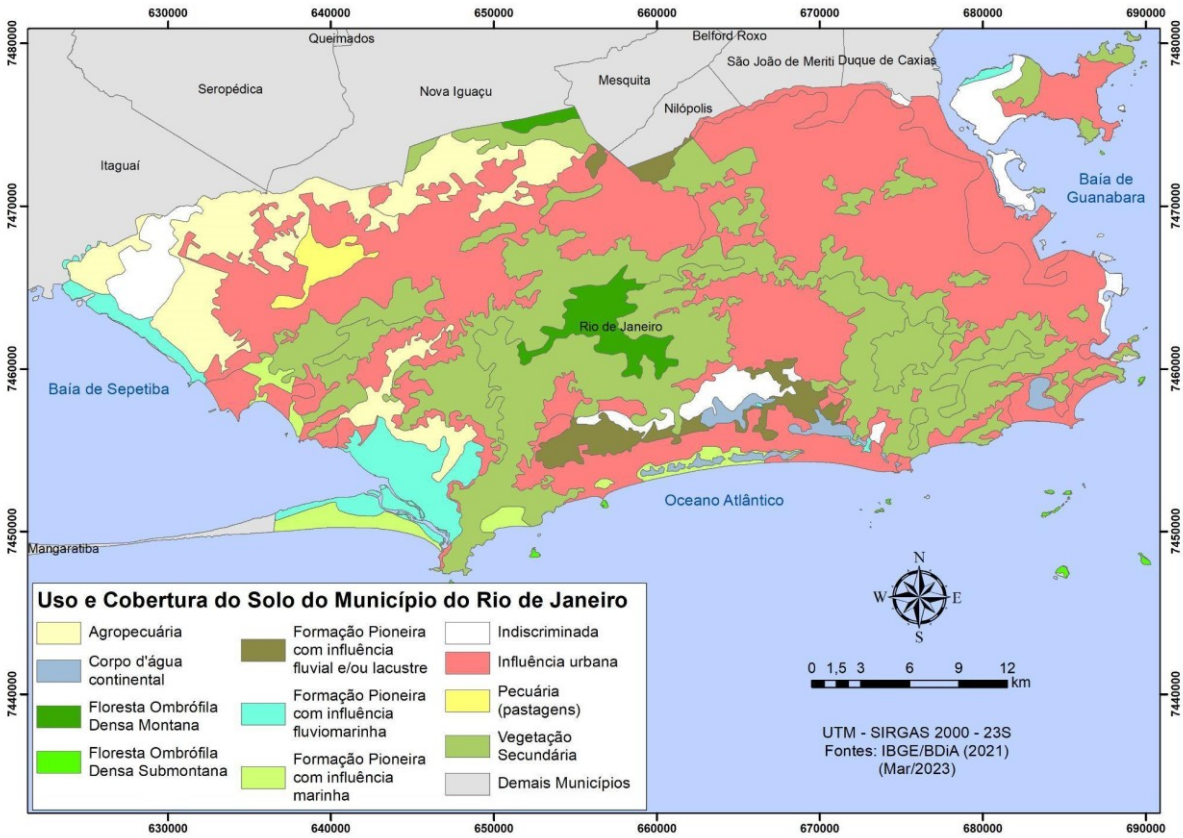


Fonte: INMET (1981 - 2010).

A cobertura vegetal nativa encontrada do Rio de Janeiro corresponde às vegetações denominadas como Florestas Ombrófilas Densas, Restingas, Manguezais e Brejos, segundo o Inventário Florestal disponibilizado pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro (SMAC, 2015).

A Floresta Ombrófila Densa é caracterizada por uma vegetação densa e perenifólia, na qual, mantém suas folhas durante todas as estações; esse tipo de vegetação está presente, principalmente, nos maciços da Tijuca, Pedra Branca e Gericinó/Mendanha, já mencionados anteriormente. As restingas, manguezais e brejos são encontrados em menor quantidade na cidade, mas se mostram ecossistemas muito ricos, possuindo espécies menores e muito diversas, como exemplo, as microalgas que realizam processo de fotossíntese e estão distribuídas em grandes quantidades em pequenos espaços. Além da vegetação nativa, também temos as áreas de reflorestamento e arborização urbana, mostrando o grande potencial vegetativo presente no município, de acordo com a Figura 2. Outro fator primordial para a captura de carbono são os solos, na cidade estão distribuídos em sua maioria solos dos tipos Latossolos e Argissolos, comumente encontrados em regiões tropicais e subtropicais, incluindo áreas urbanas, e que se caracterizam como solos férteis que contribuem para sustentação e nutrição das plantas, como também para a retenção do CO_2 (EMBRAPA, 2017).

Figura 2 -Mapa de uso e cobertura do solo com a diferenciação da vegetação no município do Rio de Janeiro.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

2.2. Cálculo do NEE

Para estimar o balanço de CO_2 (NEE), foi utilizado o modelo empírico-biogênico proposto por Bellucco *et al.* (2017), que é derivado de dados de CO_2 medidos pela técnica covariância turbulenta (*eddy-covariance*) em seis países com diferentes climas e padrões de uso do solo. A equação usada no modelo é:

(1)

$$F_{CO_2}(\lambda v, Rg) = \gamma(\lambda v) - \frac{1}{2 \cdot \theta(\lambda v)} \cdot \{\alpha(\lambda v) \cdot (0.46 \cdot Rg) + \beta(\lambda v) - [(\alpha(\lambda v) \cdot (0.46 \cdot Rg + \beta(\lambda v))^2 - 4 \cdot \alpha(\lambda v) \cdot \beta(\lambda v) \cdot \theta(\lambda v) \cdot (0.46 \cdot Rg)]^{0.5}\}$$

na qual inclui a fração de área ocupada por vegetação (λ_V), a radiação global in W m^2 (Rg) e os parâmetros: α (média do rendimento quântico aparente do ecossistema), β (fotossíntese bruta saturada pela luz, o parâmetro do platô), γ (respiração do ecossistema) e θ (parâmetro de flexão adimensional) (Reichstein *et al*., 2004, Bellucco *et al*., 2017).

As características espaço-temporais da vegetação foram extraídas das imagens de satélite fornecidas pelo *Copernicus Global Land Service*, que disponibiliza grátis raster de λ_V a cada 10 dias e pixel com resolução de 300 metros em todo mundo (Fuster *et al*., 2020). As características das imagens a serem usadas nesta pesquisa podem ser consultadas neste link: https://land.copernicus.eu/global/products/fcover. Neste estudo, as imagens de satélite foram recortadas para área de estudo no período entre 2016 e 2020.

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA), em µmol m^2 s^{-1}, foi calculada multiplicando a Rg por 0.46, considerando valores acima de 5 W m^2 (Bellucco *et al*., 2017). As médias horárias de Rg foram obtidas a partir do *Photovotical Geographic Information System - PVGIS*, disponivel no link https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#HR. O procedimento completo para aquisição de dados na PVGIS pode ser encontrado no link: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual_en.

2.3. Caracterização das condições meteorológicas

Os dados meteorológicos, incluindo temperatura do ar e precipitação acumulada em 6 (seis) horas, foram obtidos automaticamente pelo pacote R *worldmet*, que fornece acesso a

um banco de dados do *NOAA Integrated Surface Database* em mais de 35.000 locais globalmente (Carslaw, 2023). A NOAA Integrated Surface Database (ISD) é um conjunto de dados meteorológicos globalmente abrangente mantido pela Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA) dos Estados Unidos. Ela inclui observações meteorológicas históricas de estações terrestres em todo o mundo, fornecendo informações como temperatura, umidade, pressão atmosférica, direção e velocidade do vento, além de dados sobre eventos meteorológicos extremos. É uma das fontes mais confiáveis e abrangentes de dados meteorológicos históricos, utilizada por cientistas, pesquisadores, climatologistas e meteorologistas. A estação meteorológica automática Galeão Antônio Carlos Jobim, latitude -22,8089 e longitude -43,24365, foi selecionada como a estação de referência.

2.4. Análise dos dados

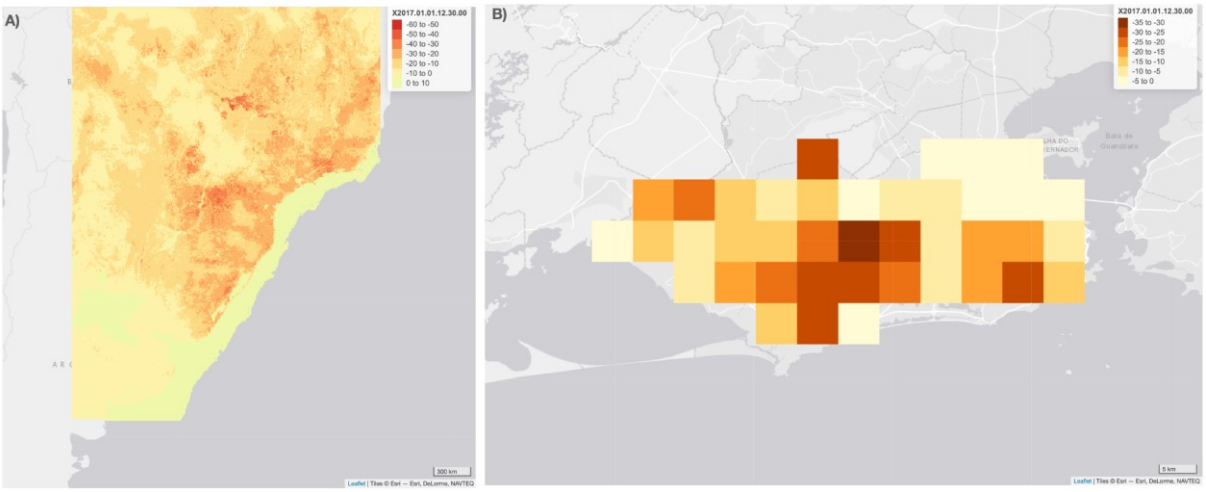
O software R (*R Core Team*, 2023) foi utilizado para integrar o modelo biogênico e ao banco de dados georreferenciados e meteorológicos. Os valores negativos de NEE indicam a estocagem e o armazenamento dos fluxos de CO_2, enquanto os valores positivos indicam os fluxos emitidos pela respiração (Baldocchi, 2003). Os valores de NEE são expressos em diferentes unidades, dependendo da escala espacial e temporal analisada. A distribuição espacial de NEE foi apresentada em gCO_2 m^2 por hora para um dia e hora específicos, enquanto o ciclo diário médio sazonal de NEE e a variação diária de NEE (GPP e Reco) ao longo do ano estão em toneladas à escala de toda a cidade. A média diária de temperatura e o acumulado de precipitação em 24 horas foram calculados para caracterizar as condições meteorológicas que influenciam a variabilidade diária e sazonal do NEE.

2.5. Avaliação das estimativas de NEE

Para uma avaliação inicial do modelo biogênico aplicado ao município do Rio de Janeiro, foram comparadas as estimativas de NEE com as do modelo SMUrF, cujo banco de dados está disponível na página https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1899. Os dados consistem de valores médios horários de NEE em formato de raster com resolução de 500 m, na unidade de $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$, abrangendo globalmente toda a superfície terrestre (Wu; Lin, 2021). Os mapas horários referentes aos NEE da América do Sul de 2017 foram baixados

e recortados para o *shapefile* da área de estudo (Figura 3AB) e, em seguida, foram reescalonados para resolução de 300 m. Os valores médios horários de NEE de ambas as abordagens foram agregados à escala de toda a cidade, focando no ciclo diurno médio de verão, no mês de janeiro, quando o potencial de NEE é mais evidente.

Figura 3 - Mapas de NEE originários do modelo SMUrF para regiões da (a) América do Sul e (b) para limites administrativos do município do Rio de Janeiro. Os valores de NEE correspondem a 01.01.2017 às 12:30.



Fonte: Wu; Lin, (2021), https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1899, acesso em 22.03.2024.

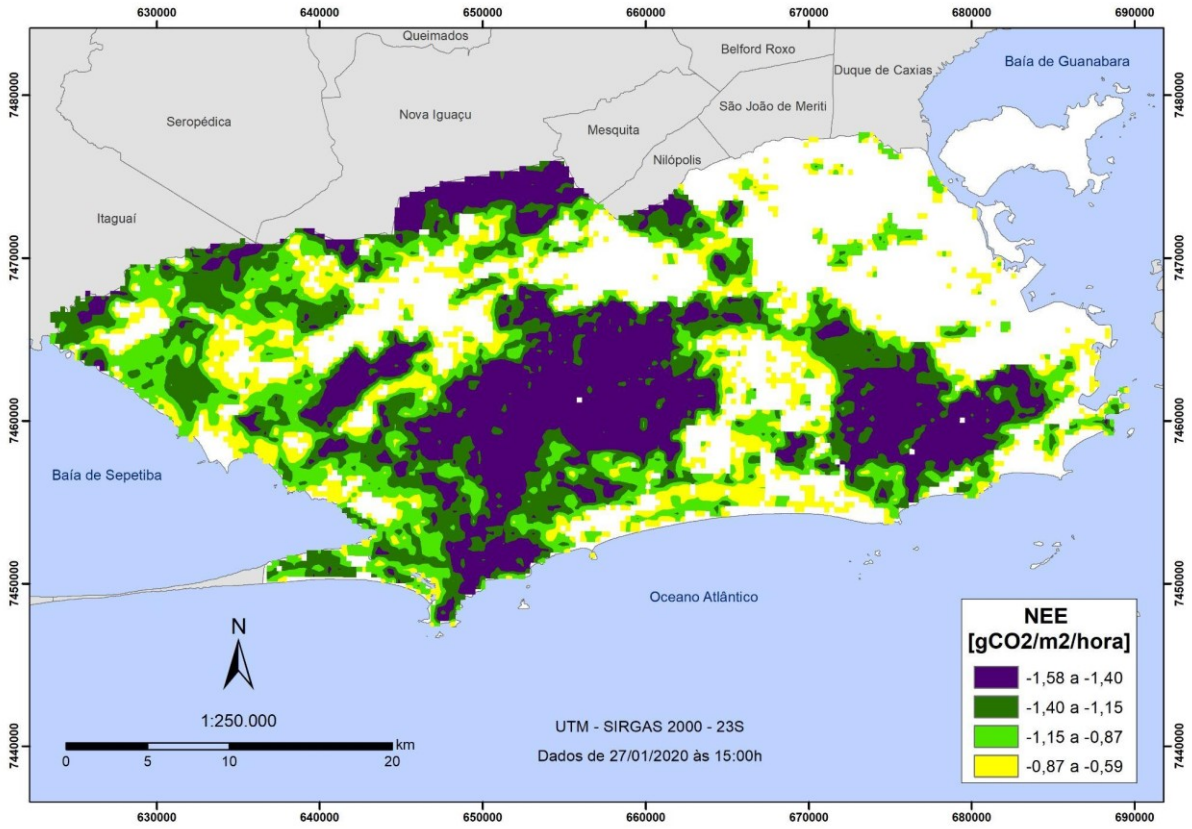
3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Distribuição espacial do NEE

A Figura 4 apresenta o mapa da distribuição espacial dos valores de NEE no município do Rio de Janeiro. O modelo foi executado para estimar o NEE no dia e hora de verão e, como esperado, os maiores valores de NEE estão concentrados nas áreas com elevada fração de vegetação (80%-100%), com um máximo de -1.6 gCO_2 m^2 $hora^{-1}$ e mínimo -0.6 gCO_2 m^2 $hora^{-1}$ ou zero de NEE nas áreas urbanizadas (em branco no mapa). Este resultado realça o papel das áreas verdes, a saber os maciços da Tijuca, Pedra Branca e Gericinó-Mendanha, na estocagem e armazenamento dos fluxos de CO_2 na cidade, que está em concordância com os estudos anteriores sobre o grande potencial das florestas tropicais como sumidouros de CO_2, levando a compreensão de que espécies nativas possuem um maior potencial na estocagem de carbono (Azevedo *et al.*, 2018). Como mostrado na Figura 4, as áreas com maior potencial

de retirada de CO_2 da atmosfera são as que possuem vegetação nativa ou que já passaram por estágios sucessionais. Assim, a distribuição altamente variável no mapa sugere que fatores como a densidade de vegetação e a atividade humana influenciam na variabilidade espacial do NEE. Revelando, assim, áreas próximas a adensamentos urbanos com os menores valores de retirada de CO_2, o que pode ser observado na Zona Norte e alguns pontos da Zona Oeste do município do Rio de Janeiro se destacando os bairros de Bangu e Campo Grande.

Figura 4 -Mapa da distribuição espacial dos valores de NEE no dia 27/01/2020 às 15:00h na cidade do Rio de Janeiro.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

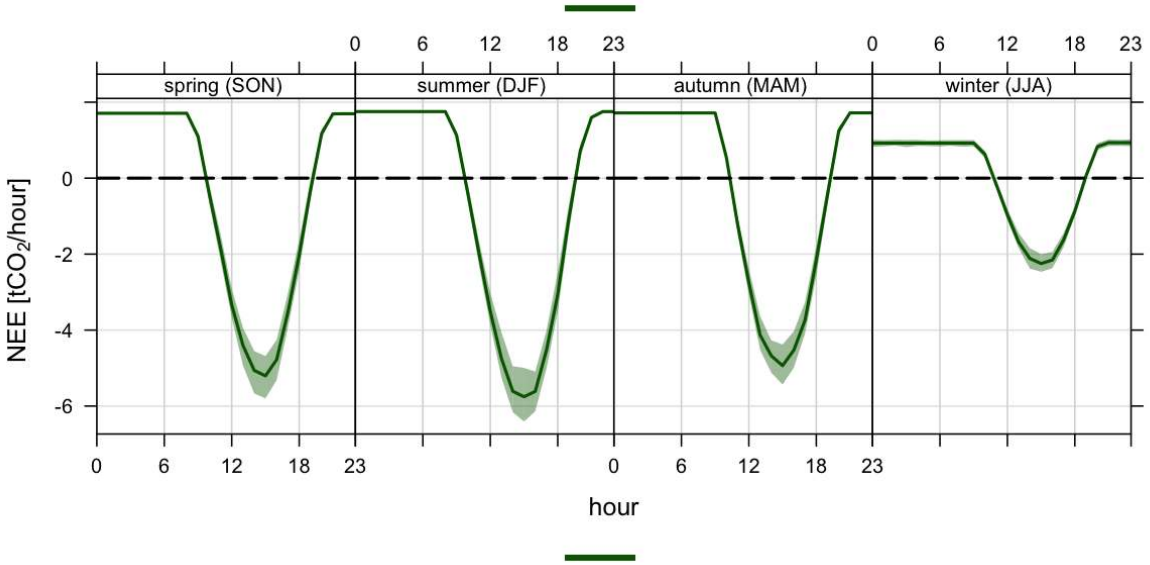
3.2. Variação temporal do NEE

3.2.1. Ciclo diurno e sazonal de NEE

A Figura 5 ilustra o ciclo diurno sazonal de NEE no município do Rio de Janeiro. O total de NEE foi computado somando todos os valores horários (*pixels*) entre 2016 e 2020 dentro dos limites administrativos da cidade. Durante a noite, a respiração das plantas e solos contribuem para a emissão dos fluxos de CO_2 com uma média de 1.8 tCO_2 $hora^{-1}$ até às 08:00.

A partir dessa hora, a fotossíntese começa a estocar os fluxos de CO_2, com um pico máximo de -6 tCO_2 $hora^{-1}$ às 15:00. Note que esse padrão médio do ciclo diurno de NEE muda de acordo com a estação do ano, como evidenciado na Figura 5. No verão, os máximos valores de NEE foram registrados, enquanto os mínimos no inverno, o que corresponde a uma redução média horária relativa de 46% (-4 tCO_2 $hora^{-1}$) para a fotossíntese e 26% (1.3 tCO_2 $hora^{-1}$) para a respiração. Essa variação média do ciclo diurno sazonal do NEE pode ser explicada parcialmente pela influência meteorológica sobre a atividade metabólica das plantas e solos, como mostrado em detalhes na seguinte seção.

Figura 5 - Médias horárias sazonais das estimativas dos fluxos totais de NEE in tCO_2 $hora^{-1}$ no município do Rio de Janeiro 2016-2020.



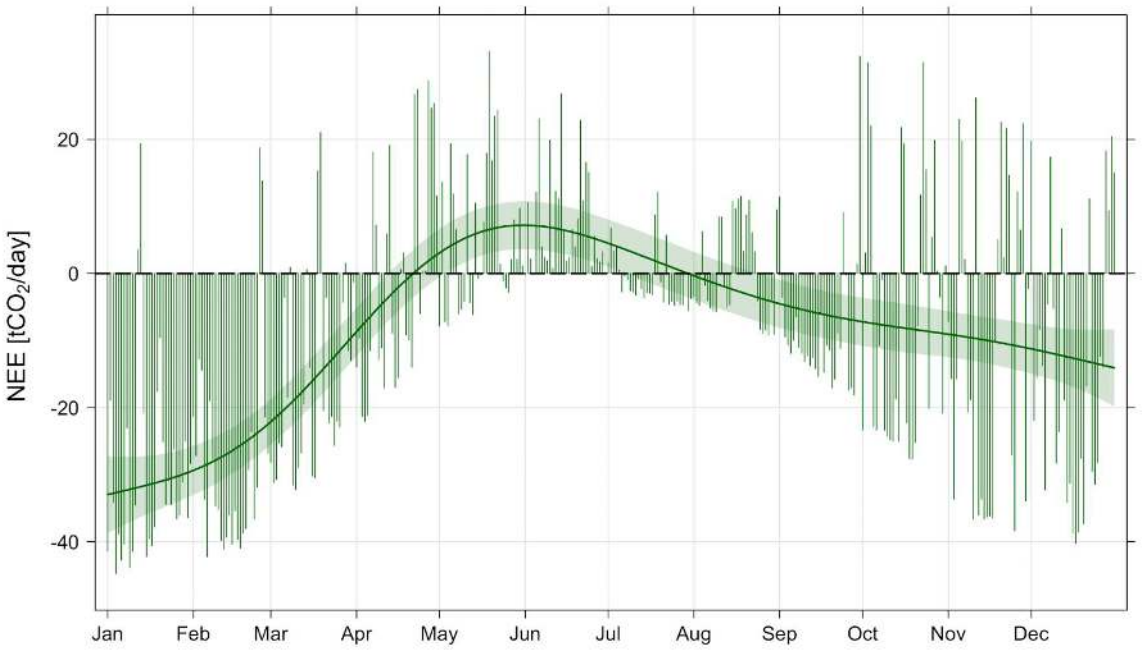
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

3.2.2. Variação diária e sazonal do NEE

A Figura 6 apresenta os valores diários de NEE no Rio de Janeiro ao longo do ano de 2017 a fim de analisar a variação sazonal. Podemos notar que entre janeiro a abril ocorreu uma maior absorção de CO_2, chegando a máximo de -40 tCO_2 dia^{-1} e, que entre maio a outubro, aconteceu o inverso, no qual, observamos uma maior emissão de CO_2, variando de 20 a 30 tCO_2 dia^{-1}, mas que logo volta a inverter-se nos meses de outubro a dezembro. Este resultado sugere que durante os meses quentes e chuvosos ocorre uma maior absorção de CO_2 e nos meses secos e de temperaturas mais amenas ocorre uma maior emissão de CO_2

pela vegetação e solos.

Figura 6 - Acumulado diário de NEE em tCO_2 dia^{-1} no Rio de Janeiro em 2017. A faixa verde sombreada corresponde ao intervalo de confiança de 95%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Em relação aos valores da respiração (Reco) e da captura de CO_2 (GPP), verifica-se que eles mudam conforme a estação do ano. A Tabela 1 mostra as médias sazonais de NEE, Reco e GPP em toda série temporal de 2016 a 2020, onde observa-se, por exemplo, que na primavera os valores de Reco chegaram a 2.200 tCO_2 e GPP -2.700 tCO_2. Essa característica pode estar relacionada à umidade do solo que poderia ter contribuído tanto para a absorção quanto para a emissão de CO_2 devido à atividade microbiana no solo. No entanto, mesmo com esse padrão os valores de NEE estão variando de 200 a -1.800 tCO_2 em todas as estações, o que revela o potencial natural de equilíbrio da vegetação e solos, não afetando a ideia de serem importantes sumidouros naturais de CO_2.

Tabela 1- Média do acumulado anual e sazonal de NEE e componentes (Reco e GPP) em $tCO_2\ ano^{-1}$ no Rio de Janeiro 2016-2017.

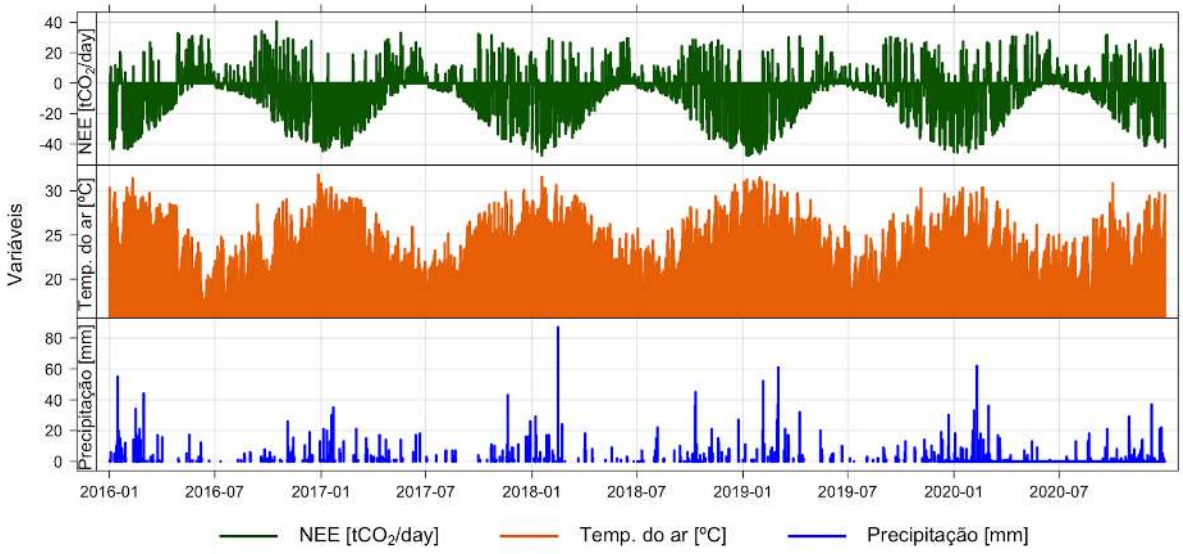
Período	Estação	NEE (em $tCO_2\ ano^{-1}$)	R_{eco} (em $tCO_2\ ano^{-1}$)	GPP (em $tCO_2\ ano^{-1}$)
2016 - 2020	Verão	-1.800	1.900	-3.700
2016 - 2020	Outono	-500	2.300	-2.800
2016 - 2020	Inverno	200	1.300	-1.100
2016 - 2020	Primavera	-500	2.200	-2.700

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

3.3. Variabilidade sazonal de NEE e condições meteorológicas

A Figura 7 mostra que durante os dias mais chuvosos e quentes, com temperaturas em torno dos 30 °C e precipitação acima dos 50 mm, houve uma maior absorção de CO_2 (de cerca -40 $tCO_2\ dia^{-1}$). Já nos dias em que ocorrem temperaturas de 25 °C e dias sem precipitação ou com até 4 mm, o NEE foi positivo chegando a emitir em média 30 $tCO_2\ dia^{-1}$, evidenciando uma maior emissão em relação a absorção de CO_2 pela vegetação. Esse padrão de NEE durante a estação seca pode ser explicado parcialmente pela reação das plantas durante esse período, que devido à escassez de água no solo realizam o fechamento de seus estômatos levando a redução da fotossíntese (Mendes *et al*., 2020). Já nos meses de maior disponibilidade hídrica, o solo fica úmido e a vegetação se mostra mais vigorosa favorecendo a fotossíntese e, assim, a retirada de CO_2 da atmosfera.

Figura 7 - Acumulado diário de NEE em tCO_2 dia^{-1} e médias diárias da temperatura do ar, radiação global e acumulado de precipitação em 24 horas no Rio de Janeiro 2016-2020.

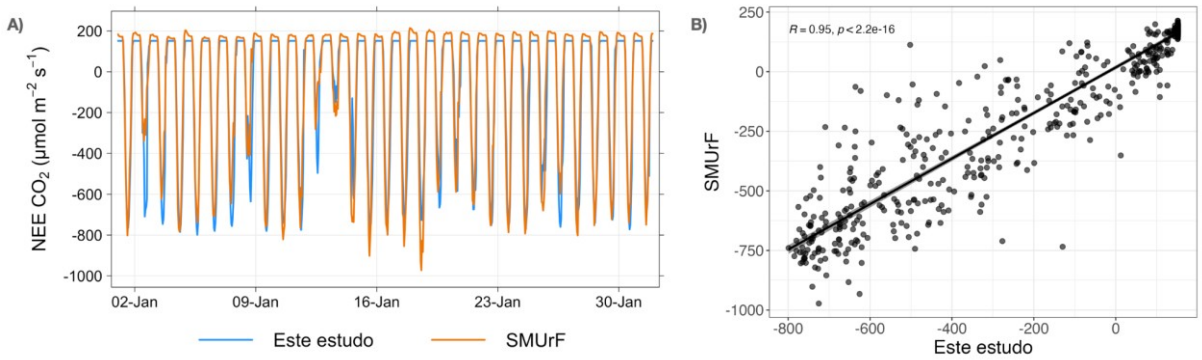


Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

3.4. Avaliação das estimativas de NEE

As estimativas de NEE apresentadas neste estudo foram avaliadas, comparando com as estimativas do modelo SMUrF para janeiro de 2017. A Figura 8 mostra que ambas apresentam uma variação diurna semelhante no balanço de CO_2 para a cidade do Rio de Janeiro. A diferença média entre elas é de -22,79 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} com uma forte correlação de r = 0,95 (Figura 8AB). Vale ressaltar que o modelo biogênico usado neste estudo mostrou uma absorção um pouco menor de GPP e uma liberação menor de Reco em comparação com o modelo SMUrF. Isso pode ser parcialmente explicado pelo método de partição de fluxo de NEE aplicado, o qual separa Reco e GPP em valores noturnos e diurnos, respectivamente. Esses resultados sugerem que estimativas de NEE apresentadas no presente estudo podem ser representativas para a área de estudo.

Figura 8 - Comparação entre os valores acumulados horários de NEE (µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}) do modelo biogênico de Bellucco *et al*. (2017), usado neste estudo, e do modelo SMUrF para o município do Rio de Janeiro em janeiro de 2017. A) Série temporal dos valores horários e B) Correlação de Pearson.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou a dinâmica espacial e temporal dos fluxos de NEE relacionados ao CO_2 e mostrou como as condições meteorológicas, temperatura do ar e precipitação, influenciam na variabilidade sazonal de NEE. A maior absorção de CO_2 ocorreu nas áreas do Rio de Janeiro com maior densidade de vegetação diminuindo os valores de NEE gradativamente com a proximidade das áreas urbanizadas. O clássico ciclo diurno e sazonal de NEE foi modelado e quantificado: durante a noite ocorre a emissão de CO_2, com a respiração, enquanto durante o dia acontece a fotossíntese e absorção, tendo a maior absorção nos meses mais quentes e chuvosos e os maiores valores de emissão durante os meses mais secos e amenos.

Apesar do estudo apresentar importante contribuição científica sobre o balanço líquido de CO_2 nas cidades tropicais, há limitações que precisam ser consideradas. Primeiro, as estimativas de NEE não se diferenciam por tipos de vegetação e como NEE varia de acordo com cada tipo. Segundo, o estudo analisou somente a temperatura do ar e precipitação, o que reduz a influência de outras variáveis no padrão dos fluxos de NEE. Assim, com a inclusão dos tipos de vegetação e solos seria interessante analisar quais são as relações diretas dos diferentes tipos com os fluxos de CO_2. Além da ampliação da área de estudo para toda região metropolitana do Rio de Janeiro e outras cidades a fim de identificar padrões de NEE.

Com o mapeamento e análise da variabilidade espacial e temporal da troca líquida de CO_2 podemos colaborar para a discussão no Brasil e no mundo de formas de mitigação e

adaptação às mudanças climáticas, afinal, a emissão descontrolada de CO_2 contribui para o aquecimento global, gerando diversos problemas ambientais. Além disso, é possível pensar maneiras de planejamento ambiental e urbano para minimização das mudanças climáticas, levando em consideração o papel das florestas urbanas no balanço de carbono. Com a grande variedade de informações em alta resolução espacial e temporal dos fluxos de NEE, tal como apresentados neste estudo, torna-se possível a construção de inventários detalhados sobre os gases do efeito estufa (GEE).

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Fundação Alexander von Humboldt, Alemanha. Além do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq).

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, A.; CAMARA, R.; FRANCELINO, M. R.; PEREIRA, M. G.; LELES, P. S.S. Estoque de carbono em áreas de restauração florestal na Mata Atlântica. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 48, n. 2, p. 183-194, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.5380/rf.v48i2.54447.

BALDOCCHI, D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v. 9, n. 4, p. 479-492, 2003. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x.

BELLUCCO, V. S.; MARRAS, S.; GRIMMOND, C. S. B.; JÄRVI, L.; SIRCA, C. AND SPANO, D. Modelling the biogenic CO2 exchange in urban and non-urban ecosystems through the assessment of light-response curve parameters**. Agricultural and Forest Meteorology,** v. 236, p. 113-122, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.12.011.

CARSLAW, D. **Worldmet: import surface meteorological data from NOAA Integrated Surface Database (ISD)**. Disponível em: https://davidcarslaw.github.io/worldmet/. Acesso em: 4 mar. 2024.

CHEN, J.; ZHAO, F.; ZENG, N.; ODA, T. Comparing a global high-resolution downscaled fossil fuel CO2 emission dataset to local inventory-based estimates over 14 global cities. **Carbon Balance and Management,** v. 15, n. 9, 2020. DOI: https://doi.org/10.1186/s13021-020-00146-3.

CHURKINA, G. Modeling the Carbon Cycle of Urban Systems. **Ecological Modelling,** v. 216, n. 2, p. 107 - 113, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.03.006.

CHURKINA, G. Carbon cycle of Urban Ecosystems. In: LAL, R.; AUGUSTIN, B. (org.). **Carbon sequestration in urban ecosystems.** Springer, Netherlands, 2012. p. 315-330. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-2366-5_16.

CRAWFORD, B.; CHRISTEN, A. Spatial source attribution of measured urban eddy covariance CO2 fluxes. **Theoretical and Applied Climatology,** v. 119, p. 733-755, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/s00704-014-1124-0.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **GeoInfo - Mapa semidetalhado de solos do município do Rio de Janeiro.** Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Asolos_municipio_rj_75000_2004_lat_long_wgs84_1. Acesso em: 4 mar. 2024.

FUSTER, B.; SÁNCHEZ-ZAPERO, J.; CAMACHO, F.; GARCÍA-SANTOS, V.; VERGER, A.; LACAZE, R.; WEISS, M.; BARET, F.; SMETS, B. Quality Assessment of PROBA-V LAI, fAPAR and fCOVER Collection 300 m Products of Copernicus Global Land Service. **Remote Sens**, v. 12, p. 1017, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12061017.

GRIMMOND, C.; KING, T.; CROPLEY, F.; NOWAK, D.; SOUCH, C. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. **Environmental Pollution.** v. 116**,** p.243–254, 2002. DOI: https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00256-1.

HARDIMAN, B. S.; WANG, J. A.; HUTYRA, L. R.; GATELY, C. K.; GETSON, J. M.; FRIEDL, M. A. Accounting for urban biogenic fluxes in regional carbon budgets. **Science of the Total Environment.** v. 15, p. 366-372, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.028.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama. Acesso em: 4 mar. 2024.

INEA - Instituto Estadual do Ambiente. **Biodiversidade De Áreas Protegidas.** Disponível em: http://www.inea.rj.gov.br/Portal/Agendas/BIODIVERSIDADEEAREASPROTEGIDAS/UnidadesdeConservacao/INEA_INTER_PQES_MENDANHA. Acesso em: 4 mar. 2024.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. Geneva, Switzerland, 2014. p.151.

KUTSCH, W.; CIAIS, P.; BECKER, M.; CANTONI, C.; CRISTOFANELLI, P.; DELMOTTE, M.; DENIER VAN DER GON, H.; DROSTE, A.; GEROSA, G.; GKRITZALIS, T.; GIELEN, B.; HOLST, J.; KUBISTIN, D.; LUCHETTA, A.; RAMONET, M.; REHDER, G.; RUTGERSSON, A.; STEINBACHER, M.; SUPER, I. **Are Carbon Sinks at Risk? FLUXES - The European Greenhouse Gas Bulletin**. ICOS ERIC. v. 1, 2022.

MENDES, Keila R. *et al*. Seasonal variation in net ecosystem CO2 exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Scientific Reports**, v.10, n. 9454, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w.

MORIWAKI, R.; KANDA, M. "Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor, and carbon dioxide over a suburban area". **Journal of Applied Meteorology,** v. 43, p. 1700-1710, 2004.

NORDBO, A.; JÄRVI, L.; HAAPANALA, S.; WOOD, C. R.; VESALA, T. Fraction of natural area as main predictor of net CO2 emissions from cities. **Geophysical Research Letters,** v.39, n. 20, p. 20802, 2012. https://doi.org/10.1029/2012GL053087.

ONU, United Nations. Department of economic and social affairs. Population division. **World Population Prospects 2019**: Data Booket. ST/ESA/SER. A/424, 2019.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p.1633-1644, 2007. DOI: https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007.

R CORE TEAM**. A Language and Environment for Statistical Computing** [Internet]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 4 mar. 2024.

REICHSTEIN, M.; FALGE, E.; BALDOCCHI, D.; PAPALE, D.; AUBINET, M.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; BUCHMANN, N.; GILMANOV, T.; GRANIER, A.; GRÜNWALD, T. 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. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x.

SMAC - Secretaria Municipal de Meio Ambiente da Cidade. **Inventário da Cobertura Arbórea da Cidade do Rio de Janeiro**. 2015. Disponível em: http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/4975980/4158246/InventarioCoberturaArboreadaCidade2015.pdf. Acesso em: 4 mar. 2024.

VELASCO, E.; ROTH, M.; TAN, S. H.; QUA, M.; NABARRO, S. D. A.; NORFORD, L. The role of vegetation in the CO2 flux from a tropical urban neighbourhood. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 13, p. 7267–7310, 2013. DOI: https://doi.org/10.5194/acp-13-10185-2013.

VELASCO, E.; ROTH, M. Cities as net sources of CO2: review of atmospheric CO2 exchange in urban environments measured by eddy covariance technique. **Geography Compass**, v. 4, n. 9, p. 1238–1259, 2010. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00384.x.

WU, D.; LIN, J.C. Urban Biogenic CO2 fluxes: GPP, Reco and NEE estimates from SMUrF, 2010-2019. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2021. DOI: https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1899.