

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Ciências Atmosféricas

Lucas Fernando Carvalho da Conceição

Variabilidade de fluxos superfície-atmosfera de
calor, água e CO₂ em área de Mata Atlântica e
Cerrado no estado de São Paulo, Brasil

São Paulo

2024

Lucas Fernando Carvalho da Conceição

Variabilidade de fluxos superfície-atmosfera de
calor, água e CO₂ em área de Mata Atlântica e
Cerrado no estado de São Paulo, Brasil

Tese apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia
Orientador: Prof. Dr. Humberto Ribeiro da Rocha

Versão corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade

São Paulo

2024

Aos possíveis leitores deste trabalho.

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos à minha mãe Rosana Maria Carvalho por todo amor, apoio, incentivo e inspiração. Exemplo de dedicação que sempre me espelhei. Espero te deixar orgulhosa concluindo essa etapa da minha carreira profissional, que começou pela sua sugestão no ensino técnico. Se estou aqui, é por você.

Agradeço à minha eterna namorada Mikaela Peglow Pinz, por estar ao meu lado durante a jornada da vida. Aprendo mais sobre mim te ajudando a aprender sobre você, e assim nos completamos a uma década. Do sul ao norte, de leste a oeste, na terra e na água, dentro do coração. Sempre juntos.

A todos meus familiares que sempre foram minha base, minha madrinha, meus tios e tias, primos, pai e amigos. Em especial aos que já não estão mais aqui. Meu avô Antônio, obrigado por me esperar voltar para casa, sinto muitas saudades. Avô Ernaldo, que ganhei ao longo da vida, obrigado por me acolher. Léo, te sinto presente toda vez que ouço aquela música, ela é a trilha sonora de todas minhas conquistas importantes. A fé na vitória tem que ser inabalável. Amo vocês

Agradeço ao meu orientador Humberto Ribeiro da Rocha, pelos ensinamentos e por me auxiliar em todos momentos do doutorado, sempre com muito interesse e disponibilidade. Profissional exemplar.

Agradeço também à USP/IAG, lugar que sempre imaginei como de excelência e felizmente pude fazer parte. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) pelo financiamento de parte desse estudo.

Aqueles que passam por nós não vão sós.
Deixam um pouco de si, leva um pouco de nós.
Antoine de Saint-Exupéry

Resumo

Da Conceição, L.F.C, 2024. **Variabilidade de fluxos superfície-atmosfera de calor, água e CO₂ em área de Mata Atlântica e Cerrado no estado de São Paulo, Brasil.** 106. Tese (Doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Este estudo investigou os fluxos superfície-atmosfera de calor, água e CO₂ em áreas de floresta nebulosa de Mata Atlântica (SVG, Núcleo Santa Virgínia, Pq Est. Serra do Mar) e Cerrado denso (PEG, Gleba Pé de gigante, SRitaPQuatro) no estado de SP, utilizando um conjunto de medições automáticas de campo no longo prazo, e modelos de processos biofísicos para preenchimento de falhas, e analisou a variabilidade diurna, sazonal e interanual dos padrões microclimáticos, da partição de energia e do balanço de CO₂. A média de temperatura do ar e precipitação nos sítios é de 22,5 °C e 1300 mm/a no PEG e 16,0 °C e 2200 mm/a no SVG, portanto áreas diferencialmente úmidas e frias, distantes de ≈ 300 km. As diferenças do balanço de energia entre as áreas foram definidas pela energia radiativa disponível e pela sazonalidade do clima e da vegetação. O saldo de radiação R_n foi 142 W/m² no PEG, superior a 107 W/m² na SVG, e proporcionalmente na evapotranspiração ET e fluxo de calor sensível H, de 3.4 mm/d e 52 W/m², comparadas com 2.9 mm/d e 29 W/m², respectivamente. Apesar da ET superior no PEG, a fração evaporativa FE = LE/(LE+H) foi maior no SVG de 0.74, e 0.65 no PEG. Coerentemente, a média da razão de Bowen ($\beta = H/LE$) foi maior no PEG de 0.53 e no SVG de 0.34. Este padrão resultou da dependência de R_n e das características fenológicas do Cerrado, que reduzem a capacidade fotossintética e transpirativa na estação seca, com senescência das árvores e dormência de gramíneas, em oposição à Mata Atlântica de característica perenifólia. A diferença de ET entre as áreas deu-se devido à estação úmida, com 2.3 / 3.4 mm/d no SVG e de 2.3 / 4.4 mm/d no Cerrado para estação seca/úmida respectivamente. A umidade do solo foi marcada por uma pronunciada anomalia negativa em 2014 no PEG, que provocou um aumento da razão de Bowen, e que prolongou-se até o ano seguinte durante a estação seca, apesar da seca meteorológica já finalizada, o que foi corroborado por dois sistemas independentes de medição. Para a Mata Atlântica/SVG, a produtividade primária bruta PPB foi marcadamente sazonal, com máximos no verão e mínimos no inverno, estimada na média anual 6 gC/m²d, supondo-se a condição de clímax, e que superestimou as médias de inventários globais de parcelas de campo em floresta tropical úmida. Os achados deste estudo promovem mais entendimento dos padrões de funcionalidade hídrica, energética e de produtividade das florestas no Brasil, para ecossistemas no Cerrado e Mata Atlântica, com implicações para definir estratégias de conservação e gestão sustentável da biodiversidade, e de quantificação e valoração dos serviços ecossistêmicos.

Palavras-chave: Mata Atlântica, Cerrado, Balanço de energia, Balanço de CO₂, Evapotranspiração, SiB2.

Abstract

Da Conceição, L.F.C., 2024. **Surface-atmosphere flux variability of heat, water, and CO₂ in Atlantic Forest and Cerrado areas in the state of São Paulo, Brazil.** 106 pages. Thesis (Doctorate) – Institute of Astronomy, Geophysics, and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo.

This study investigated the surface-atmosphere fluxes of heat, water, and CO₂ in areas of Atlantic Forest cloud forest (SVG, Núcleo Santa Virginia, Pq Est. Serra do Mar) and dense Cerrado (PEG, Gleba Pé de gigante, SRitaPQuatro) in the state of São Paulo, using a set of long-term automatic field measurements and biophysical process models to fill gaps, and analyzed the diurnal, seasonal, and interannual variability of microclimatic patterns, energy partitioning, and CO₂ balance. The mean air temperature and precipitation at the sites are 22.5 °C and 1300 mm/yr in PEG and 16.0 °C and 2200 mm/yr in SVG, hence differentially humid and cool areas, approximately 300 km apart. Energy balance differences between the areas were defined by available radiative energy and climate and vegetation seasonality. The net radiation R_n was 142 W/m² in PEG, higher than 107 W/m² in SVG, and proportionally in evapotranspiration ET and sensible heat flux H, at 3.4 mm/day and 52 W/m² compared to 2.9 mm/day and 29 W/m², respectively. Despite higher ET in PEG, the evaporative fraction $EF = LE/(LE+H)$ was higher in SVG at 0.74, and 0.65 in PEG. Consistently, the Bowen ratio ($\beta=H/LE$) was higher in PEG at 0.53 and in SVG at 0.34. This pattern resulted from R_n dependency and phenological characteristics of Cerrado, which reduce photosynthetic and transpirational capacity in the dry season, with tree senescence and grass dormancy, in contrast to the perennial characteristics of Atlantic Forest. The difference in ET between the areas was due to the wet season, with 2.3 / 3.4 mm/day in SVG and 2.3 / 4.4 mm/day in Cerrado for dry/wet seasons respectively. Soil moisture was marked by a pronounced negative anomaly in 2014 in PEG, which caused an increase in the Bowen ratio and persisted into the following year during the dry season, despite the meteorological drought having ended, corroborated by two independent measurement systems. For the Atlantic Forest/SVG, gross primary productivity GPP was markedly seasonal, with peaks in summer and lows in winter, estimated at an annual average of 6 gC/m²d, assuming climax conditions, which overestimated the averages of global field plot inventories in humid tropical forests. The findings of this study contribute to a better understanding of the hydrological, energetic, and productivity functionality patterns of forests in Brazil, for ecosystems in Cerrado and Atlantic Forest, with implications for defining strategies for biodiversity conservation and sustainable management, and for quantifying and valuing ecosystem services.

Keywords: Atlantic Forest, Cerrado, Energy Balance, CO₂ Balance, Evapotranspiration, SiB2

Lista de Figuras

Figura 1. a) Imagem de satélite (data 03/2018) do núcleo Santa Virgínia com a presença da torre micrometeorológica; b) Torre micrometeorológica SVG (adaptado FREITAS et al. 2012); c) Mapa do estado de São Paulo com a representação da mata atlântica em verde e localização da torre, na área demarcada do núcleo Santa Virgínia; d) Mapa do Brasil e com box de localização do núcleo SVG, no Estado de São Paulo.....	30
Figura 2. A) Vista do topo da torre micrometeorológica do PEG site, na direção sudeste, com anemômetro convencional a direita; B) Mapa do Brasil e estado de SP com box de localização do site na cidade de Santa Rita do Passa Quatro; C) Imagem de satélite (data 07/2018) da região com o site PEG (polígono azul); D) Fisionomia vegetal no PEG (adaptado de H.N. Mesquita-Júnior, in Pivello et al. 1999).	32
Figura 3. Campo espaciais médios de NDVI do Landsat-8, entre 2013 e 2020, para os meses de fevereiro (figura 3a) e setembro (figura 3b), na região do sítio experimental SVG.....	39
Figura 4. Campo espaciais médios de LAI (m^2m^{-2}) do Landsat-8, entre 2013 e 2020, para os meses de fevereiro (figura 5a) e setembro (figura 5b), na região do sítio experimental SVG.	40
Figura 5. Campo espaciais médios de FPAR do Landsat-8, entre 2013 e 2020, para os meses de fevereiro (figura 6a) e setembro (figura 6b), na região do sítio experimental SVG.....	40
Figura 6. Média mensal de NDVI (preto), LAI (m^2m^{-2}) (cinza claro) e FPAR (cinza escuro), para o pixel da torre de fluxos SVG (linha preta).	41
Figura 7. Campo espaciais médios de NDVI, para o sítio experimental PEG, provenientes do Landsat-8, entre 2013 e 2020, com localização da torre no alfinete preto, para os meses de janeiro (figura 7a) e agosto (figura 7b).....	42
Figura 8. Campos espaciais médios (2013 a 2020) de LAI (m^2m^{-2}), para o sítio experimental PEG representando os meses de janeiro (figura 8a) e agosto (figura 8b).....	43
Figura 9. Campos espaciais médios (2013 a 2020) de FPAR, para o sítio experimental PEG representando os meses de janeiro (figura 9a) e agosto (figura 9b).	43
Figura 10. Média mensal de NDVI (preto), LAI (m^2m^{-2}) (cinza claro) e FPAR (cinza escuro), para o pixel da torre de fluxos PEG.....	44
Figura 11. Perfil vertical St ($\mu mol/m^2s$) para todo intervalo temporal avaliado no sítio experimental SVG, onde as cores indicam os horários no período do amanhecer, crepúsculo, diurno e noturno.....	46
Figura 12. Boxplot do fator de correção de espessura efetiva (dhe), no passo de tempo horário, filtrado utilizando IQR.	47
Figura 13. Dispersão entre as classes incrementais de $1^\circ C$ da temperatura do ar observada no eixo x, e o valor médio de FLE ($\mu mol/m^2s$) (no eixo y, juntamente com o desvio padrão.	48
Figura 14. Comparação entre os dados R_n (W/m^2) observados (eixo das abscissas) e simulados pelo modelo SiB2 (eixo das ordenadas), onde a esquerda da figura representa a simulação com os valores defaults dos parâmetros e a direita os parâmetros otimizados. O processo de otimização foi baseado nos dados de R_n entre os anos de 2009 e 2013 observados para SVG. A estimativa da raiz quadrada do erro médio (RMSE) variou no caso inicial e calculado de 24.6 para 23.4.	51
Figura 15. a) Estimativa da raiz quadrada do erro médio (RMSE) e ponto de ótimo para cada uma das calibrações individuais referente as variáveis do módulo de carbono (gmudmu, M, N e v _{max}); b) Comparação entre os dados WUE (à direita) e LE observados (à esquerda) no eixo das abscissas e simulados pelo modelo SiB2 (eixo das ordenadas).....	52
Figura 16. Comparação entre os dados R_n (W/m^2) observados (eixo das abscissas) e simulados pelo modelo SiB2 (eixo das ordenadas), onde a esquerda da figura representa a	

simulação com os valores defaults dos parâmetros e a direita os parâmetros otimizados. O processo de otimização foi baseado em todos os dados de Rn entre os anos de 2010 e 2017 observados no PEG. A estimativa da raiz quadrada do erro médio (RMSE) variou no caso inicial e calculado de 34.5 para 30.5, e o coeficiente de Nash-Sutcliffeefficiency (NSE) de 0.97 para 0.98.....	55
Figura 17. Comparação entre os dados LE (W/m^2) observados (eixo das abscissas) e simulados pelo modelo SiB2 (eixo das ordenadas), onde a esquerda da figura representa a simulação com os valores defaults dos parâmetros e a direita os parâmetros otimizados. O processo de otimização foi baseado em todos os dados de LE, referentes ao ano de 2011, observados no PEG e preenchidos pelo método TWI. A estimativa da raiz quadrada do erro médio (RMSE) variou no caso inicial e calculado de 72.8 para 66.7, e o coeficiente de Nash-Sutcliffeefficiency (NSE) de 0.72 para 0.76.	55
Figura 18. Umidade volumétrica (θ) média diária medida pelo sensor CRNS versus medida do sensor FDR na profundidade de (esquerda) 10 cm e (direita) 20 cm na área de Cerrado sensu stricto (savana florestal) PEG site.....	58
Figura 19 Média mensal das variáveis meteorológicas medidas na torre de fluxo do sítio experimental SVG para os anos de 2009 a 2019: a) irradiância de onda curta incidente (K_i) (W/m^2); b) temperatura do ar ($^{\circ}C$); c) pressão de vapor d'água (hPa); d) velocidade horizontal do vento (m/s) e e) precipitação horária (mm/h).	60
Figura 20. Boxplot do ciclo diurno de: a) irradiância de onda curta incidente (W/m^2), b) pressão de vapor d'água (hPa), c) temperatura do ar ($^{\circ}C$), d) velocidade horizontal do vento (m/s) e e) umidade relativa do ar (%), referentes ao sítio experimental SVG para os anos de 2009 a 2019.....	61
Figura 21. Média anual da temperatura do ar em tracejado ($^{\circ}C$) e precipitação (mm), referentes ao sítio experimental SVG para os anos de 2009 a 2017.	63
Figura 22. Ciclo médio anual (a), mensal (b) e ciclo diurno médio da evapotranspiração (ET), E_t (transpiração), E_s (evaporação do solo), E_i (perda por interceptação da chuva), w_1 (grau de saturação da umidade do solo na camada superficial) e w_z (grau de saturação da umidade do solo médio de todas camadas em profundidade) calculado pelo modelo SIB2 para o SVG, referente aos anos de 2009 a 2018.....	64
Figura 23. Boxplot da série temporal diária dos fluxos R_n (W/m^2), LE (W/m^2) e H (W/m^2) para SVG, no intervalo de 2009 a 2018 JFM.....	66
Figura 24. Média mensal de radiação disponível (W/m^2) em preto, fluxo de calor latente (W/m^2) (LE) em azul, sensível (W/m^2) (H) em vermelho, e precipitação mensal (barras) referente ao sítio experimental SVG para os anos de 2009 a 2018 (primeiro trimestre).	67
Figura 25. A) Série temporal de R_e , PPB, FLE e precipitação (média mensal) para SVG; b) Ciclo diurno médio FLE, St, FC, R_e e PPB para SVG.	71
Figura 26. a) Ciclo diurno médio (à esquerda) e ciclo sazonal (à direita) das séries FLE, PPB e PPL calculadas pelo modelo SiB2, R_e (modelo exponencial) para SVG no intervalo de 2009 a 2018 JFM; b) Série temporal da média mensal FLE, PPB, PPL (calculadas pelo modelo SiB2), R_e (modelo exponencial), Precipitação e irradiância de onda curta incidente (K_i) (dado observado) para o PEG no intervalo de 2009 a 2018 JFM.	72
Figura 27. Média mensal das variáveis meteorológicas medidas na torre do Cerrado PEG para os anos de 2001 a 2019: a) irradiância de onda curta incidente (W/m^2); b) temperatura do ar ($^{\circ}C$); pressão de vapor d'água (hPa); c) velocidade horizontal do vento (m/s) e e) precipitação (mm).	74
Figura 28. Média anual da temperatura do ar em tracejado ($^{\circ}C$) e precipitação (mm – barras), referentes ao sítio experimental PEG para os anos de 2001 a 2019, contendo a média da temperatura em vermelho ($^{\circ}C$) (linha vermelha) e a normal climatológica de precipitação (linha azul).....	75

Figura 29. Boxplot do ciclo diurno de: a) irradiância de onda curta incidente (W/m^2), b) pressão de vapor d'água (hPa), c) temperatura do ar ($^{\circ}C$), d) velocidade horizontal do vento (m/s) e e) umidade relativa do ar (%), referentes ao sítio experimental PEG, para os anos de 2001 a 2019.....	77
Figura 30. Somatório mensal de precipitação (mm), e média mensal do SWI (CRNS e FDR) no sítio experimental PEG, para a camada média 1 (FDR10_100cm) incluindo os níveis de 10, 20, 50, 80, 100 (linha preta), camada média 2 (FDR150_200cm) incluindo os níveis 150 e 200cm (tracejado preto) e 250cm (linha azul claro), CRNS referentes ao período comum de dados.....	78
Figura 31. Precipitação acumulada (barra cinza, em mm a-1) e SWI médio anual com medições no sítio experimental PEG. A camada média 1 inclui os níveis de 10 a 100 cm e a camada média 2 nos níveis de níveis de 150 e 200cm, estimadas para 3 fases do ano, correspondente aos meses JFM (linhas preta sólida e pontilhada), Julho-Agosto-Setembro (JAS - linhas azul sólida e pontilhada) e Outubro-Novembro (ON – linhas vermelha sólida e pontilhada), para (A) medições do FDR e (B) medições do CRNS (só camada 1).....	80
Figura 32. Ciclo mensal médio (a) e diário (b) da evapotranspiração (ET), E_t (transpiração), E_s (evaporação do solo) e E_i (perda por interceptação da chuva), calculado pelo modelo SIB2 para o PEG, referente aos anos de 2011 a 2019.....	82
Figura 33. Boxplot da série temporal diária dos fluxos R_n (W/m^2), LE (W/m^2) e H (W/m^2) para o PEG, no intervalo de 2001 a 2019.	83
Figura 34. Média mensal de SWI FDR100_150 (nível profundo), CRNS (nível raso), saldo de radiação(W/m^2) em preto, fluxo de calor latente (W/m^2) (LE) em azul, sensível (W/m^2) (H) em vermelho, razão de Bowen e FE referente ao sítio experimental PEG para os anos de 2011 a 2018.....	85
Figura 35. Média Mensal para o período úmido e seco, referente ao fluxo de calor sensível (H) (W/m^2), latente (LE) (W/m^2), somatório das componentes E_s (evaporação do solo) e E_i (perda por interceptação da chuva) para o período de 2001 a 2019 no PEG.....	86

Lista de Tabelas

Tabela 1. Variáveis coletadas no Sítio Experimental SVG.....	31
Tabela 2. Variáveis coletadas no Sítio Experimental PEG	33
Tabela 3. A) Lista de parâmetros e valores otimizados no módulo de radiação (referentes ao período entre 2009 e 2013), e para o módulo de carbono no sítio experimental SVG.B) Lista de parâmetros e valores otimizados no módulo de radiação (referentes ao período entre 2010 e 2017), e para o módulo de carbono e água (referentes ao período entre 2011, utilizando a função de otimização LE) no sítio experimental PEG.....	54
Tabela 4. Média de longo prazo de variáveis meteorológicas e fluxos de energia observados (2009 a 2019) e calculadas pelo SiB2 (2009 a 2018 JFM) (transpiração Et, evaporação do solo Es e perda por interceptação Ei), em SVG.	62
Tabela 5. Valores de PPB observada e calculada (SiB2) para SVG, e valores PPB e PPL para regiões de floresta tropical úmida perenifólia.....	73
Tabela 6. Média de longo prazo de variáveis meteorológicas e de fluxos, referente ao período avaliado de 2001 a 2019, para o PEG.	75
Tabela 7. Médias de longo prazo referentes a precipitação e fluxos de energia, anualmente e para as estações seca e chuvosa em SVG e PEG.	88

Sumário

1.	Introdução.....	23
2.	Objetivo	28
3.	Materiais e Métodos	29
3.1.	Área de Estudo e medições micrometeorológicas: Mata Atlântica – Núcleo Santa Virgínia (SVG).....	29
3.2.	Área de estudo e medições micrometeorológicas: Cerrado – Gleba Pé Cerrado – Gleba Pé do Gigante (PEG)	32
3.3.	Fechamento do balanço de energia.....	34
3.4.	Modelagem dos fluxos de superfície e preenchimento das séries observacionais.....	35
3.5.	Estimativa de parâmetros com sensoriamento remoto	36
3.6.	Armazenamento e perfil vertical CO ₂	44
3.7.	Calibração de parâmetros com fluxos de superfície	48
3.8.	Umidade do Solo - Sensor CRNS (PEG).....	56
4.	Resultados e discussão SVG	59
4.1.	Caracterização Climática SVG.....	59
4.2.	Fluxos atmosféricos de calor SVG.....	63
4.3.	Fluxos de CO ₂ SVG.....	67
5.	Resultados e discussão PEG	74
5.1.	Caracterização Climática PEG.....	74
5.2.	Umidade do Solo PEG	77
5.3.	Fluxos atmosféricos de calor e água PEG.....	81
6.	Comparação entre os ecossistemas de Mata Atlântica (SVG) e Cerrado (PEG)	88
7.	Conclusão.....	90
8.	Sugestão para trabalhos futuros.....	93
9.	Referências.....	94

1. Introdução

O Brasil é caracterizado por alta diversidade de biomas, sendo a floresta tropical e o cerrado os maiores em extensão, e conseqüentemente, pela vasta diversidade de fisionomias e espécies representam grande importância ecológica (MYERS et al., 2000). Características da superfície como área foliar e capacidade fotossintética, controlam os balanços à superfície, que por sua vez podem controlar a temperatura e umidade do ar, evapotranspiração e precipitação (PIELKE et al., 1991). Os distintos padrões do balanço de energia na superfície, além de caracterizarem microclimas locais, podem controlar o clima regional e os processos hidrológicos (DA ROCHA et al., 2009). O entendimento do balanço de energia na Mata Atlântica e no Cerrado, e suas respostas a secas meteorológicas, é crucial para avaliá-los em relação a mudanças ambientais.

A Mata Atlântica estende-se por uma vasta área territorial, já tendo sido considerada uma das maiores florestas tropicais da América (TABARELLI et al., 2005), sua distribuição coincide com regiões brasileiras populosas, fato que se estende ao Parque Estadual Serra do Mar (PESM) no Estado de São Paulo, região do nosso estudo. Essa formação florestal é uma das mais ameaçadas do mundo (VIANA & TABANEZ, 1996). Atualmente a Mata Atlântica é composta principalmente por pequenos fragmentos florestais, cercado por pastagens, campos agrícolas e urbanização (RIBEIRO et al., 2009). Sua fisionomia florestal é composta majoritariamente por Ombrófila Densa, Ombrófila Aberta, mista e sazonal, florestas decíduas, semidecíduas e estacionais (JOLY et al., 2014).

O regime de precipitação e de temperatura, exercem forte controle nesse ecossistema (ALVES et al., 2010). O clima da região é o subtropical úmido, com temperaturas médias variando entre 19°C (inverno) e 25°C (verão), e estação seca (junho a agosto) e chuvosa (dezembro a fevereiro) (PLANO DE MANEJO PESM, 2006). A sazonalidade é uma característica distintiva da Mata Atlântica, compreendê-la torna-se essencial para o planejamento eficaz de estratégias de conservação e manejo sustentável.

Sabe-se que a luz e a água são fatores cruciais no controle do crescimento foliar e produtividade (VICO et al., 2017). A evapotranspiração

florestas tropicais traz um entendimento importante no papel da regulação climática global (NOBRE et al., 2016), devido à relevância do estoque de carbono em decorrência de sua extensão e produtividade (MALHI et al., 2000; VIEIRA et al. 2008). Estima-se que as florestas tropicais respondem por aproximadamente 50% de toda fotossíntese terrestre (FIELD et al., 1998), assimilam 34% da produtividade primária bruta (PPB) e tem a maior PPB por unidade de área (BEER et al., 2010).

A estimativa da produtividade vegetal de florestas tropicais nativas é reportada na literatura como médias de longo prazo baseadas em estimativas de parcelas experimentais calibradas com equações alométricas, por ex. segundo AJTAY et al., 1979; CLARK et al., 2001 e mais recentemente avaliada com métodos micrometeorológicos como eddy covariance (EC), como na Amazonia em Santarém, PA (HUTYRA et al., 2008) e na Mata atlântica em Ubatuba, SP (ALBERTON et al., 2023). Esse método representa um avanço tecnológico para compreender a produtividade em escala de comunidades de ecossistema, com fatores atmosféricos e climáticos reguladores envolvidos (BALDOCCHI et al., 2001; SALESKA et al., 2009).

Freitas (2012) reportou medições de fluxos atmosféricos turbulentos de vapor d'água, calor e CO₂ em uma área de mata atlântica na Serra do Mar do estado de SP, mostrando para o fluxo líquido de CO₂ do ecossistema (FLE) a característica de sazonalidade com padrão de ganho de CO₂ (absorção no sistema) no verão e perda de CO₂ (emissão para a atmosfera) no inverno, respectivamente.

O autor reportou a média anual de FLE predominantemente como perdas, dentro do intervalo de -13 (ganho) a + 179 (perda) gC m⁻² ano⁻¹, com uma incerteza devido à utilização de dois métodos distintos de preenchimento de falhas, pela opção de remoção de dados com baixa turbulência atmosférica noturna, por médias estimadas a cada ano durante 3 anos de avaliação, e finalmente pela muito provável existência de transportes ou fluxos laterais de CO₂, que tendem a enviesar a amostragem dos fluxos noturnos geralmente com vazamento de CO₂ acumulado dentro e logo acima do dossel, o que não é incomum em áreas de topografia inclinada como naquele estudo de caso.

Em alternativa as limitações dos métodos de parcelas experimentais calibradas com equações alométricas e EC, como o custo financeiro, apenas

informação pontual e disponibilidade temporal geralmente inferior a uma década (BALDOCCHI, 2020), o sensoriamento remoto também tem sido utilizado para inferir a PPB e processos biofísicos dos ecossistemas baseados na eficiência de uso da luz (MONTEITH, 1972).

Ao longo das últimas décadas, modelos que simulam a produtividade têm sido desenvolvidos baseados em diferentes concepções, o que reflete diretamente em resultados finais distintos, gerando consenso de que existe a necessidade de aprimoramento (ADAMS et al., 2004).

O Cerrado brasileiro é composto por gramíneas e florestas savânicas, e que exerce um papel hidrológico fundamental por comportar áreas de cabeceira de grandes rios que recarregam grandes aquíferos profundos, e de grande variação climática espacial com temperatura média entre 20°C a 26°C e precipitação de 800 a 1800 mm/ano (OLIVEIRA-FILHO e RATTER, 20002). A vegetação do Cerrado é caracterizada por forte sazonalidade, de verão úmido e quente com inverno seco e ameno, que controla pronunciadamente a evapotranspiração e a produtividade primária (TATSCH, 2006; VOURLITIS e DA ROCHA, 2011; ALBERTON et al., 2019).

Este controle sazonal de modo geral é notado no padrão do balanço de energia em superfície, em especial na partição dos fluxos atmosféricos turbulentos H e LE , que na América do Sul se distingue muito das florestas úmidas amazônicas (DA ROCHA et al., 2009). A partição da energia disponível, por exemplo se expressa na razão de Bowen ($\beta = H/LE$), mostra valores expressivamente altos na estação seca, e pequenos na estação chuvosa respectivamente (DA ROCHA et al., 2009), que resulta em alto déficit hídrico no solo durante a estação seca (QUESADA et al., 2004).

As fisionomias de vegetação mais ocorrentes no bioma Cerrado são o campo cerrado e o cerrado sensu stricto, compostos estruturalmente por extratos herbáceos e arbóreos que coexistem simultaneamente (GARDNER et al., 2006). Durante a estação seca muitas árvores do Cerrado têm no seu processo de senescência vários mecanismos de adaptação para utilizar a umidade do solo em níveis mais profundos (BUCCI et al., 2008), enquanto as gramíneas submetem-se a processos de dormência. Os eventos de fogo no Cerrado, que fazem parte de seus mecanismos de adaptação em sua história evolutiva,

também influenciam o balanço energético e o status hídrico do solo (SANTOS et al., 2003; QUESADA et al. 2004).

Mais além, em uma escala regional e especialmente na fronteira dos biomas da Amazonia e Cerrado, as áreas desmatadas substituídas por pastagens cultivadas possivelmente promoveram a redução da evapotranspiração (ET), o que pode ter influenciado a redução da precipitação no início da estação chuvosa nas últimas décadas (COSTA e PIRES et al., 2010).

Em geral, em termos de variabilidade da precipitação por causas naturais, o Brasil foi alvo de grandes secas meteorológicas de escala regional nas últimas 2 décadas, como por exemplo no bioma Pantanal em 2020 (MARENGO et al., 2021), no bioma Cerrado da região centro-oeste entre 2016 a 2017 (CUNHA et al., 2018) e na região Sudeste de 2013 a 2014 (OTTO et al., 2016), nesta última com redução da chuva de 44% (COELHO et al., 2016), considerado um índice excepcional que perturbou a condição socioeconômica de aproximadamente 80 milhões de pessoas pela restrição ao consumo de água (NOBRE et al., 2016).

A umidade do solo é uma condição de estado do Cerrado intrinsecamente ligada à sazonalidade da vegetação, da partição de energia na superfície, e possivelmente da variabilidade climática interanual, cuja variação decorre em função da precipitação, evapotranspiração e do armazenamento de água no solo (CABRAL et al., 2015; QUESADA et al., 2004; TANNUS, 2004). A estimativa no campo da umidade do solo pode ser feita com diferentes métodos, como a resistividade de corrente contínua (FURMAN et al., 2003), indução eletromagnética (MCNEILL et al., 1980) e reflectometria no domínio do tempo (FDR) (FERRÉ et al., 1996), que entretanto amostram um pequeno volume de solo na escala pontual (ANNISS, 2021). A sonda de umidade do solo de raios cósmicos (CRNS) mede nêutrons de raios cósmicos que foram termalizados por átomos de hidrogênio presentes no solo (ZREDA et al., 2008), em um *footprint* de 130 m a 240 m de raio ao redor da sonda, estendendo-se a profundidades de 0,15 m a 0,83 m, e que provem razoável ganho de informação espacial e vertical (FRANZ et al., 2012). As medições conjuntas de umidade do solo e de fluxos de energia no Cerrado são informações escassas na literatura, dessa forma, o conhecimento das interações entre umidade do solo e a vegetação podem auxiliar na resposta sobre como os estratos arbóreo e gramíneo são sensíveis

ao déficit hídrico sazonal, e qual o impacto do déficit hídrico do solo no controle da vegetação.

2. Objetivo

Este trabalho teve o objetivo de analisar os fluxos superfície-atmosfera de calor, água e CO₂ em áreas experimentais de Mata Atlântica (2009 a 2019) e Cerrado (2001 a 2019) no estado de SP, utilizando um conjunto de medições micrometeorológicas de campo, e modelos de processos biofísicos para preenchimento de falhas, de forma a viabilizar uma análise da variabilidade sazonal e interanual dos padrões microclimáticos, da partição de energia e do balanço de CO₂.

Com esse propósito, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Promover a consistência da série histórica de medições de campo, com preenchimento de falhas.
- Calibrar e validar o modelo SiB2, para estimar os fluxos de calor e água, umidade do solo e produtividade primária, que representem adequadamente as áreas experimentais.
- Discutir a contribuição das principais variáveis climáticas quanto a caracterização dos fluxos, e analisar o impacto de eventos extremos nos balanços de superfície.

3. Materiais e Métodos

3.1. Área de Estudo e medições micrometeorológicas: Mata Atlântica – Núcleo Santa Virgínia (SVG)

Nossa área de estudo está situada no bioma Mata Atlântica (figura 1), no Núcleo Santa Virginia que se situa entre as cidades de São Luiz do Paraitinga (70%), Cunha (20%) e Ubatuba (10%), estado de São Paulo, Brasil, no Parque Estadual da Serra do Mar com 17.500 hectares (ha) de área (23°17' a 23°24'S, e 45°03' a 45°11'W, 800 a 1200m) marcada por morros e vales. De acordo com a classificação climática de Koeppen, o clima da região é o subtropical úmido (SETZER, 1996) 2152mm/ano, com temperatura média variando entre 14.6°C (estação seca – 785 mm/ano) a 18.3 (estação chuvosa – 2290 mm/ano). A altura média do dossel é de aproximadamente 18 m, composto predominantemente por floresta ombrófila densa e solo Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo e Litólico (RADAMBRASIL, 1983).

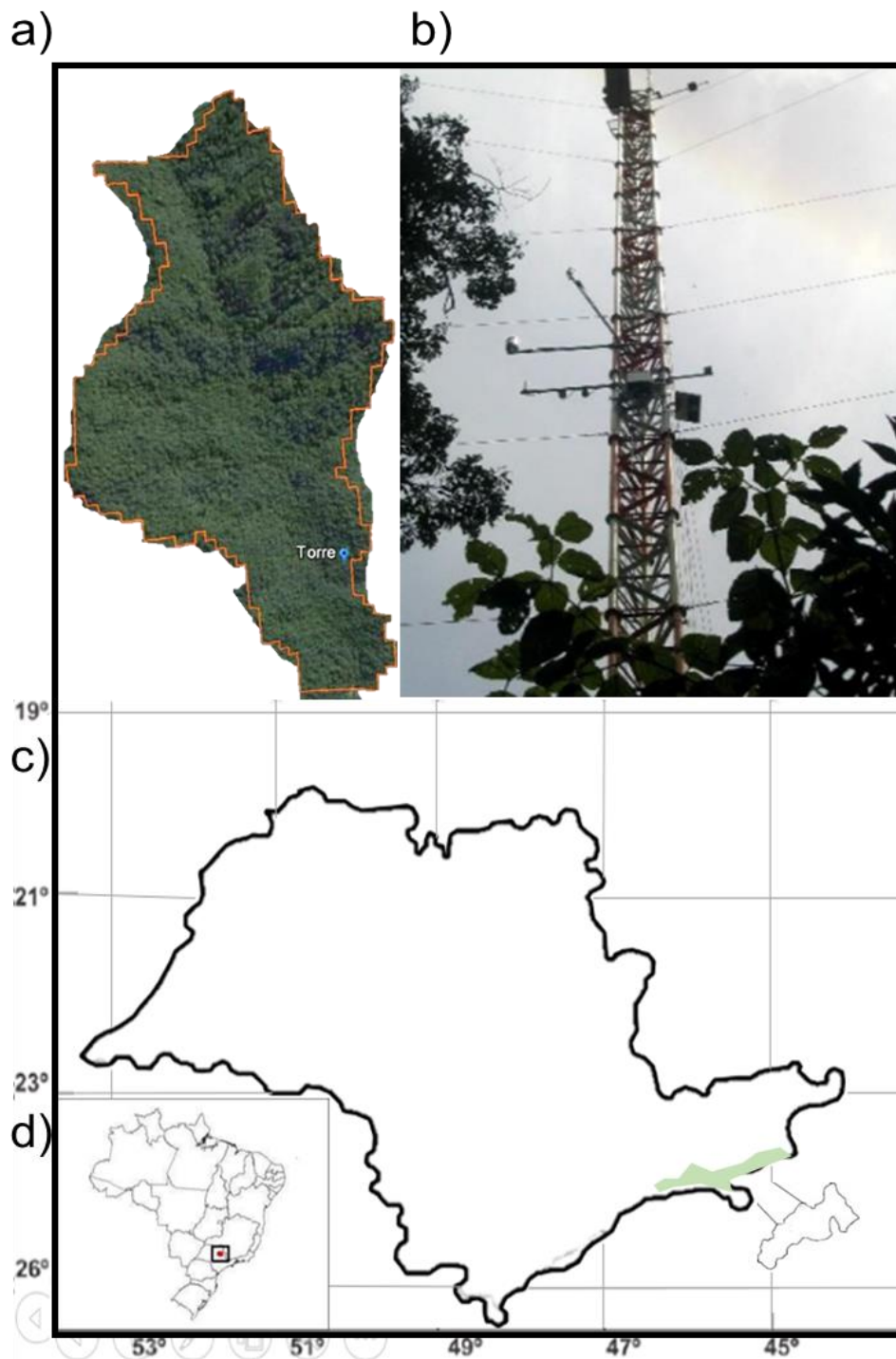


Figura 1. a) Imagem de satélite (data 03/2018) do núcleo Santa Virgínia com a presença da torre micrometeorológica; b) Torre micrometeorológica SVG (adaptado FREITAS et al., 2012); c) Mapa do estado de São Paulo com a representação da mata atlântica em verde e localização da torre, na área demarcada do núcleo Santa Virgínia; d) Mapa do Brasil e com box de localização do núcleo SVG, no Estado de São Paulo.

As medições micrometeorológicas (tabela 1) foram feitas segundo reportado em Freitas (2012), com a implementação de uma torre de fluxos (23o 19' 42.5" S; 45o 05' 35.2 " W) entre 2007 a 2019 a 63m de altura (figura 1b), medição automática do saldo de radiação (R_n , Rebs Q-7.1), fluxos incidentes e refletidos de radiação fotossinteticamente ativa (PAR, LITE, Kipp e Zonen), temperatura e umidade do ar (HMP45C Vaisala, Helsinque, Finlândia), precipitação (TB4, Hydrological Services Pty. Ltd., NSW, Austrália) com disponibilidade até o primeiro trimestre de 2018 pela indisponibilidade de dados no período posterior, velocidade do vento (CSI, CSAT-3), com *datalogger* (Campbell Scientific CR1000) responsável pela aquisição e armazenamento dos dados. Os fluxos turbulentos de calor (LE) e (H) foram medidos utilizando o método de Eddy Covariance (EC), composto por um anemômetro sônico (CSI CSAT-3) e um analisador de gás por caminho aberto (LI-7500 Licor Inc) instalados no topo da torre.

Tabela 1. Variáveis coletadas no Sítio Experimental SVG.

Variável (unidade)	Sensor
Temperatura do ar (°C)	Vaisala HMP 45C
Precipitação (mm)	Hydrological Servs TB4
Velocidade do vento (m/s)	CSI CSAT-3
Saldo de radiação (W/m^2)	REBS Q-7.1L
Fluxo de calor latente e sensível (W/m^2); Concentração e fluxo de CO ₂	Eddy correlation (anemômetro sônico CSAT3 Campbell Sci); Analisador de gás por caminho aberto LI-7500
Umidade relativa do ar (%)	Vaisala HMP 45C

As medidas de concentração de CO₂ (Tabela 1), para estimar o armazenamento vertical e transportes advectivos foram realizadas por um analisador de gás de caminho fechado, descrito em Freitas (2012). Suas amostras foram aspiradas simultaneamente por duas bombas de alta vazão (ligadas por 2 minutos, no intervalo de 30 minutos) e permaneceram armazenadas no tubo até o momento da medida. Em seguida, cada linha de amostragem foi selecionada por uma eletroválvula e, com o auxílio de uma segunda bomba de menor vazão (5 L/m), analisada por 1 minuto. Apenas os 20

segundos centrais foram utilizados para o cálculo da média representativa do CO₂ de cada respectivo ponto. O ciclo foi repetido a cada 30 minutos.

3.2. Área de estudo e medições micrometeorológicas: Cerrado – Gleba Pé Cerrado – Gleba Pé de Gigante (PEG)

A segunda área de estudo está situada na cidade de Santa Rita do Passa Quatro, estado de São Paulo, Brasil, na reserva florestal Gleba Pé de Gigante (PEG) com 1060 hectares (ha) de área, coberta com vegetação de savana florestal (figura 2), com cerrado denso predominantemente de fisionomias Cerradão e Cerrado sensu stricto (VALENTI et al., 2008; LATANSIO-AIDAR et al., 2010), e outras pequenas áreas de campo e floresta decidual, com um entorno de plantação de eucalipto à oeste e norte, e culturas à leste e sul.

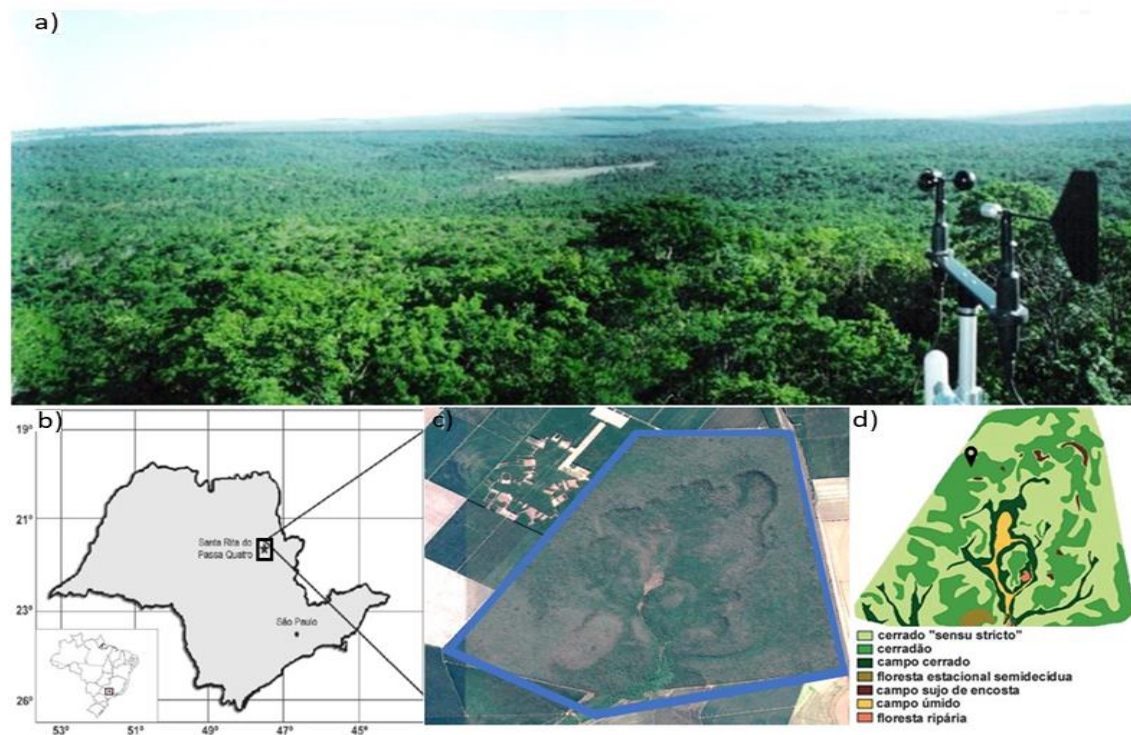


Figura 2. A) Vista do topo da torre micrometeorológica do PEG site, na direção sudeste, com anemômetro convencional a direita; B) Mapa do Brasil e estado de SP com box de localização do site na cidade de Santa Rita do Passa Quatro; C) Imagem de satélite (data 07/2018) da região com o site PEG (polígono azul); D) Fisionomia vegetal no PEG (adaptado de H.N. Mesquita-Júnior, in Pivello et al., 1999).

As normais climatológicas (intervalo 1961-1990) na estação meteorológica de Santa Rita do Passa Quatro (21° 43'09''S; 47° 28'22'' W, 715 m) reportam o clima regional Cwa (classificação de Koeppen), com temperatura média variando entre 17.6° C (julho) a 23.5° C (fevereiro), estação seca centrada no inverno, de maio a agosto, e chuvosa centrada no verão, de setembro a abril, com precipitação média de 1478 mm/ano. A altura do dossel da vegetação no PEG varia aproximadamente de 10 a 12 m. O solo na região é predominantemente Neossolo Quartzarênico (94%), arenoso com boa capacidade de enraizamento e apresenta baixa fertilidade natural, com teores reduzidos de nutrientes especiais para as plantas. Sua camada superficial “horizonte A” é caracterizada pela camada orgânica em decomposição, enquanto a camada abaixo “horizonte B” apresenta maior concentração de argila, e por conta dessa diferença na textura do solo os horizontes podem dificultar a infiltração de água no solo. Devido à baixa capacidade de retenção de água pelo solo arenoso, a região é susceptível à erosão natural (COOPER et al., 2005).

As medições micrometeorológicas (tabela 2) foram feitas de forma automática, entre 2001 a 2019, em duas torres micrometeorológicas, a primeira em 2001 (21.619238° S, 47.632327° W) com 21 m de altura e 710 m de altitude, e a segunda (21.618609°S e 47.633810°W) a partir de 2010 distante aproximadamente 100 m na direção sudeste da primeira, com 13 m de altura. Este posicionamento foi desenhado para que o *fetch* da torre tirasse vantagem da direção predominante do vento, geralmente de leste e nordeste diurna, e de sudeste noturna, e desta forma representativa da área sobre a vegetação do Cerrado.

Tabela 2. Variáveis coletadas no Sítio Experimental PEG

Variável (unidade)	Sensor
Temperatura do ar (°C)	Psicrômetro CSI HMP45C
Precipitação (mm)	Texas 500
Velocidade horizontal do vento (m/s)	RM Young
Saldo de radiação (W/m ²)	REBS
Fluxo de calor latente (W/m ²)	Eddy correlation (anemômetro sônico: Gill R-2 assimétrico 2001 – 2009 CSAT3 Campbell Sci 2009 - Atualmente) Analisador de gás por caminho aberto LI-7500

Fluxo de calor sensível (W/m ²)	Eddy correlation (anemômetro sônico: Gill R-2 assimétrico 2001 – 2009 CSAT3 Campbell Sci 2009 - Atualmente)
Umidade do solo (m ³ /m ³)	Refletômetro (FDR CS615); CRNS (Hydroinnova LLC)

Com a instalação de um mastro horizontal de 2.5 m, a 18 m de altura, medimos saldo de radiação (R_n, LITE, Kipp e Zonen, Delft, Holanda), radiação solar global (R_g, CM3, Kipp e Zonen) e os fluxos incidentes e refletidos de radiação fotossinteticamente ativa (PAR, LITE, Kipp e Zonen). A 21 m de altura foram medidas a precipitação (TB4, Hydrological Services Pty. Ltd., NSW, Austrália), velocidade do vento (RM Young) e a temperatura e umidade do ar (HMP45 Vaisala, Helsinque, Finlândia). Os fluxos turbulentos de calor (LE) e (H) foram medidos utilizando o método de *Eddy Covariance* (EC), composto por um anemômetro sônico (Gill R-2 assimétrico entre 2001 – 2009; CSAT3 Campbell Sci entre 2009 até atualmente) e um analisador de gás por caminho aberto (LI-7500 Licor Inc), a aquisição foi feita em 10 Hz com datalogger CR1000.

O processamento dos dados foi feito com o software *EddyPro* (Li-Cor, Lincoln, Nebraska, EUA). Os dados foram convertidos de formato binário para ASCII com software Card-Convert (Campbell Inc) e processados em blocos de 30 minutos. Para o cálculo das flutuações foram aplicados a média de blocos, eliminação de tendências lineares e média móvel. A compensação de atraso foi feita por meio da maximização da covariância, rotação de eixos para correção da inclinação pelo cálculo de rotação dupla, compensação de flutuação e densidade (WEBB et al., 1980), correção do aquecimento do sensor e os filtros de passa-alta e passa-baixa (<https://www.licor.com/env/support/EddyPro>).

3.3. Fechamento do balanço de energia

Para contornar incertezas da estimativa dos fluxos turbulentos de energia devido ao fechamento do balanço de energia, utilizou-se em ambos sítios experimentais a correção de Twine et al (2000), supondo que as medições de energia disponível representam a área de cobertura do EC e utilizando critérios baseados na razão de Bowen observada (1):

$$\beta = \frac{H_{obs}}{LE_{obs}} \quad (1)$$

Onde β = razão de Bowen observada; H_{obs} = fluxo de calor sensível observado; LE_{obs} = fluxo de calor latente observado

Os fluxos corrigidos estimados como:

$$LE_{cor} = \frac{Rn - G - Sa}{1 + \beta} \quad (2)$$

$$H_{cor} = Rn - G - LE_{cor} - Sa \quad (3)$$

Onde H_{cor} = fluxo de calor sensível corrigido; LE_{cor} = fluxo de calor latente corrigido; Rn = saldo de radiação; G = fluxo de calor no solo; Sa = variação de armazenamento de calor sensível e latente;

3.4. Modelagem dos fluxos de superfície e preenchimento das séries observacionais

Para fazer o preenchimento da série histórica dos fluxos do balanço de energia na resolução horária, utilizou-se o *SiB2 model* (SELLERS et al., 1996a) como preditor do saldo de radiação e dos fluxos atmosféricos turbulentos H e LE , da assimilação de CO_2 bruta PPB e líquida PPL . Com o modelo *SiB2* devidamente calibrado, preencheu-se para *SVG* 15% do saldo de radiação, 49% do fluxo de calor latente e 61% do fluxo de calor sensível. Para o *PEG*, o preenchimento foi de 13% do saldo de radiação, 44% do fluxo de calor latente e 68% do fluxo de calor sensível.

Nossa abordagem fez a representação da área de Mata Atlântica e Cerrado com estimativas espaciais de sensoriamento remoto para avaliar os parâmetros físicos e fisiológicos de índice de área foliar (LAI) e da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela folha ($FPAR$) (SELLERS et al., 1996b).

O *SiB2 model* foi executado no modo *off-line*, forçado com dados meteorológicos medidos no campo (radiação solar incidente, temperatura e umidade do ar, pressão de vapor d'água, velocidade horizontal do vento, precipitação e concentração de CO_2) no passo de tempo de 1 hora, calculando os fluxos de irradiância solar refletida e irradiância de onda longa emitida, fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente e suas componentes (evaporação do solo, transpiração e evaporação por interceptação da chuva), fluxo de calor no

solo, produtividade primária bruta e líquida, temperatura do solo e umidade do solo.

Os dados meteorológicos forçantes do modelo foram consistidos para se eliminar valores espúrios devido a mau funcionamento do sensor. As falhas decorrentes da consistência foram preenchidas utilizando-se informações da reanálise ERA5-Land (SABATER, 2019), para a escala da torre micrometeorológica, com método de regressão linear dos percentis horários das medições com a reanálise (QQ). Para a Mata Atlântica, no intervalo de 2009 a 2019, o preenchimento totalizou 16% para radiação solar incidente (QQ $R^2 = 0.99$), 18% para temperatura do ar (QQ $R^2 = 0.99$), 32% para pressão de vapor d'água (QQ $R^2 = 0.99$) e 42% para velocidade horizontal do vento (QQ $R^2 = 0.96$). Já para o Cerrado, no intervalo de 2001 a 2019, o preenchimento totalizou 5.1% para radiação solar incidente (QQ $R^2 = 0.99$), 4.4% para temperatura do ar (QQ $R^2 = 0.99$), 4.6% para pressão de vapor d'água (QQ $R^2 = 0.99$) e 7.6% para velocidade horizontal do vento (QQ $R^2 = 0.89$).

3.5. Estimativa de parâmetros com sensoriamento remoto

Como primeira etapa de estimativa de parâmetros na calibração do SiB2, os parâmetros *variantes no tempo* (base mensal) de LAI, FPAR, GREENESS *fraction* (N) e fração de cobertura do solo (VCOVER) foram estimados pelo algoritmo adaptado MAPPER (Sellers et al., 1996b). Sendo suas principais equações:

$$LAI = LAI_{max} * NDVI \quad (4)$$

Onde LAI = índice de área foliar; LAI_{max} = índice de área foliar máximo; NDVI = índice de vegetação da diferença normalizada, obtido do Landsat-8 (2013 a 2020)

$$FPAR = V N(1 - e^{(-kLAI/V)}); \quad (5)$$

Onde V = fração da cobertura vegetal; N = fração verde do dossel; LAI = índice de área foliar; k = coeficiente de extinção médio da radiação fotossinteticamente absorvida no dossel da vegetação;

$$N = \frac{LAI}{(LAI + stemsd)}; \quad (6)$$

Onde LAI = índice de área foliar; $stemsd$ = índice de área do tronco

$$VCOVER = \frac{LAI}{LAI_{max}}; \quad (7)$$

Onde LAI = índice de área foliar; LAI_{max} = índice de área foliar máximo

Os dados de NDVI foram obtidos em uma série histórica (2013 a 2020) do Landsat-8, resolução espacial de 30 m. Por conta da relevância que as coberturas vegetais exercem na partição energética dos ecossistemas (RODRIGUES et al., 2014), optou-se também pelo uso de mapas de vegetação (Projeto MapBiomas – coleção 3 da série anual de mapas de cobertura e uso do solo do Brasil, acessado em janeiro/2023 por meio da ferramenta *Google Earth Engine*).

Os parâmetros variantes no tempo, fazem parte de equações fundamentais na estrutura do modelo SiB2 (equações 8 a 15), como por exemplo na determinação do termo pertencente a k (equação 8), na obtenção do tempo médio de extinção do coeficiente de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (\bar{k}) (equação 9), na taxa de assimilação de CO₂ (equação 10), na determinação da fração do uso da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela planta (equação 11), no cálculo da assimilação líquida de CO₂ no dossel, e na PPL (equação 12).

$$k = N * (\delta_{v1}) + (\alpha_{v1}) + (-N) * (\delta_{n1}) + (\alpha_{n1}) \quad (8)$$

Onde N = fração de folha verde; δ_{v1} = transmitância da folha no canal visível; α_{v1} = refletância da folha no canal visível; δ_{n1} = transmitância da folha no canal infravermelho próximo; α_{n1} = refletância da folha no canal infravermelho próximo.

$$\bar{k} = \left[\frac{G(\mu)}{\mu} \right] [1 - w_{\pi}]^{1/2} \quad (9)$$

Onde $\left[\frac{G(\mu)}{\mu} \right]$ = projeção foliar média; w_{π} = coeficiente de dispersão foliar da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel

$$A = A_{n0} \int_0^{LAI/V} V N e^{-kLAI} dL = A_{n0} \Pi \quad (10)$$

Onde A_n = assimilação líquida de CO₂; V = fração da cobertura vegetal; N = fração verde do dossel; LAI = índice de área foliar; k = coeficiente de extinção da radiação fotossinteticamente absorvida no dossel da vegetação.

$$\Pi \approx \frac{FPAR}{\bar{k}} \quad (11)$$

Onde FPAR= fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel;

$$A_n = A - R_D \quad (12)$$

Onde A = taxa de assimilação (mol/m²s) e R_D = taxa de respiração foliar (mol/m²s).

$$R_D = v_{max} - F_d \quad (13)$$

Onde V_{max} = rubisco máximo e F_d = coeficiente de respiração foliar para plantas C3 (0.015) e C4 (0.025).

$$g_c = m \frac{A_n}{C_s} h_s p + b \quad (14)$$

Onde g_c = condutância estomática; m = coeficiente de observação 9 para planta C3, 4 para planta C4 e 6 para coníferas, A_n = assimilação líquida de CO₂, h_s = umidade relativa na superfície da folha; C_s = pressão parcial de CO₂ na superfície da folha (Pa) p = pressão atmosférica (Pa) e b = coeficiente de observação 0.01 para plantas C3 e 0.04 para plantas C4

$$v_m = v_{max} f_t(T_c) f_w(W_2) \quad (15)$$

Onde V_m = taxa efetiva de fotossíntese (mol/m²s); V_{max} = rubisco máximo; $f_t(T_c)$ = fator de estresse de temperatura e $f_w(W_2)$ = fator de estresse de umidade do solo

Na região do sítio experimental SVG, o campo espacial médio temporal do NDVI no verão e no inverno (Figura 3) mostra desvio entre eles, com predominância dos maiores valores em fevereiro (0.9 aproximadamente), e menores em setembro (0.82 aproximadamente). Segundo Alberton et al., (2023),

a baixa variação de fração verde das plantas sugere a presença dominante de espécies perenes. Essas espécies podem apresentar atividade ao longo do ano todo, o que provavelmente está relacionado a condições ambientais que permitem o crescimento e reprodução (MORELLATO et al., 2000).

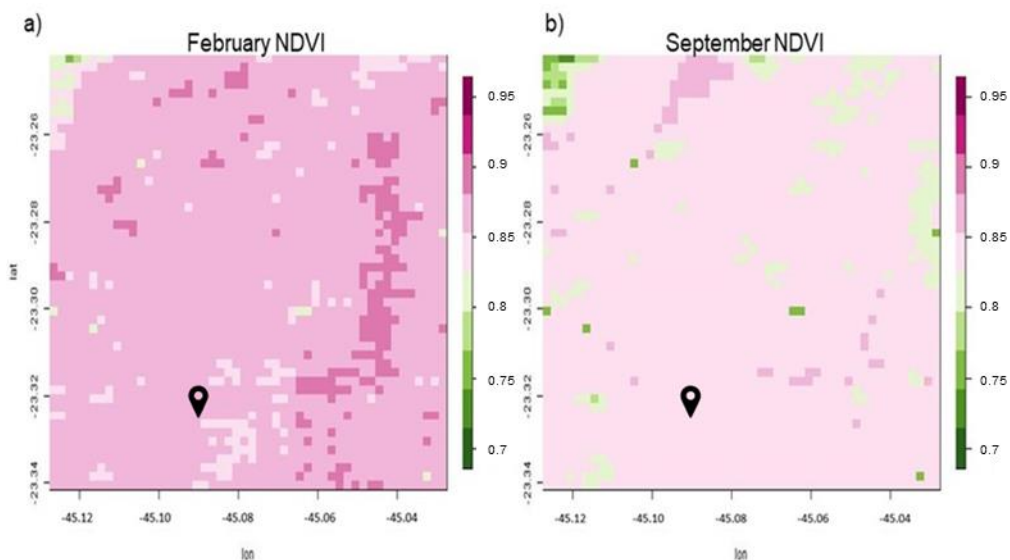


Figura 3. Campo espaciais médios de NDVI do Landsat-8, entre 2013 e 2020, para os meses de fevereiro (figura 3a) e setembro (figura 3b), na região do sítio experimental SVG.

Mutuamente a sazonalidade, destaca-se também a homogeneidade da região, exceto por pequenas áreas com NDVI reduzido em relação a área total, indicando ausência de árvores, principalmente na região noroeste e leste (setembro). De forma análoga, os campos espaciais médios do LAI (Figura 4) e do FPAR (Figura 5) no verão e no inverno apresentaram sazonalidade. Alberton et al., (2023) observou que a senescência foliar foi maior no período seco, porém também identificou que o início da nova folhagem aconteceu ainda durante a estação seca, especificamente no mês de agosto. Na área total da reserva o LAI variou de aproximadamente 4.90 e 5.5 m^2m^{-2} em fevereiro, decaindo até 3.5 e 4.5 m^2m^{-2} no período seco/inverno, a senescência foliar encontrada por Alberton et al., (2023) também foi maior no período seco para SVG. O parâmetro FPAR variou na mesma direção, de aproximadamente 0.98 em fevereiro, para 0.965 em setembro. A sazonalidade é reforçada ao analisarmos pontualmente o NDVI, LAI e APAR no footprint da torre (figura 6).

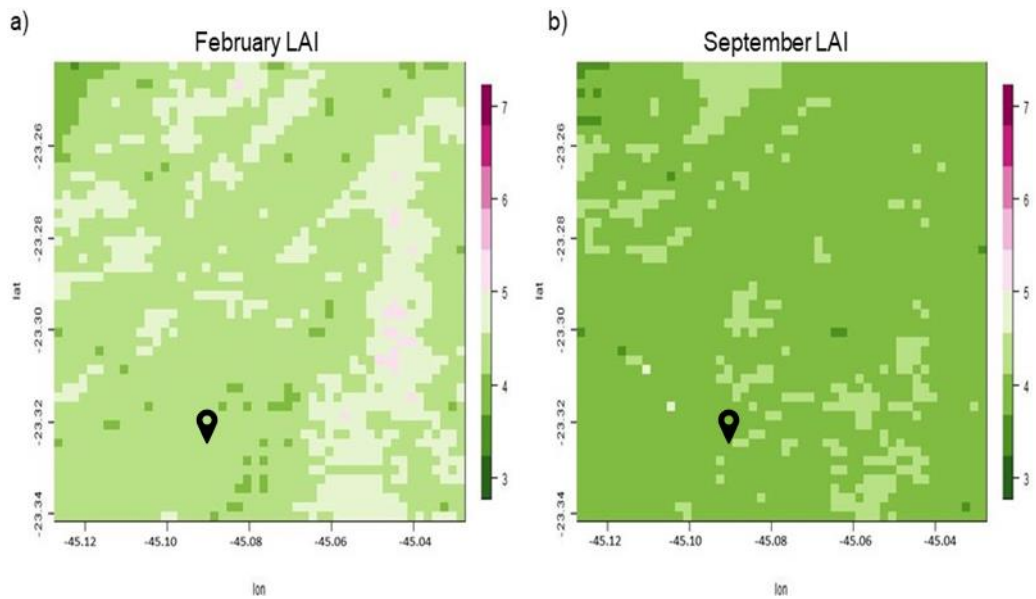


Figura 4. Campo espaciais médios de LAI (m^2m^{-2}) do Landsat-8, entre 2013 e 2020, para os meses de fevereiro (figura 5a) e setembro (figura 5b), na região do sítio experimental SVG.

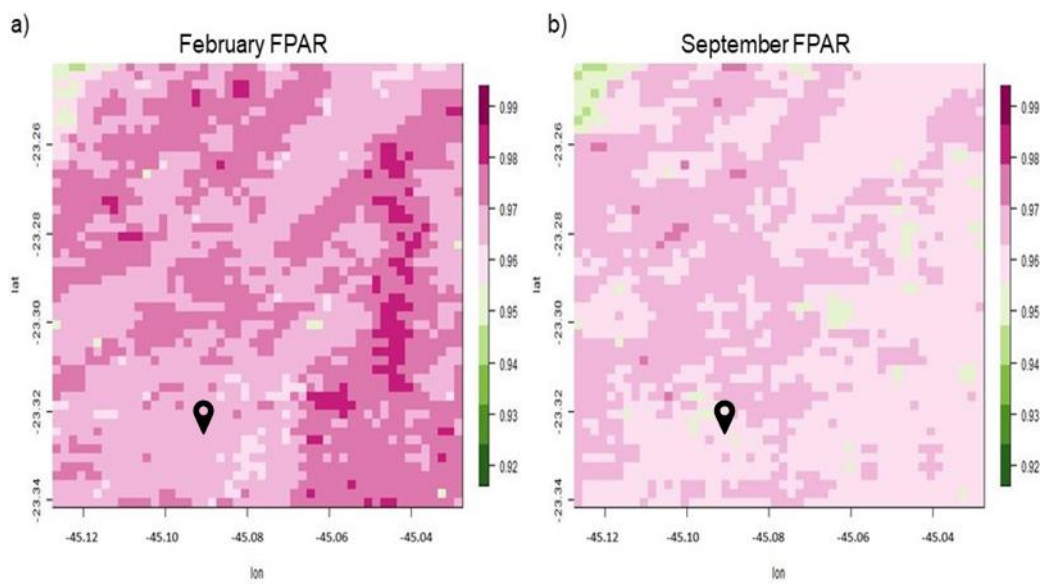


Figura 5. Campo espaciais médios de FPAR do Landsat-8, entre 2013 e 2020, para os meses de fevereiro (figura 6a) e setembro (figura 6b), na região do sítio experimental SVG.

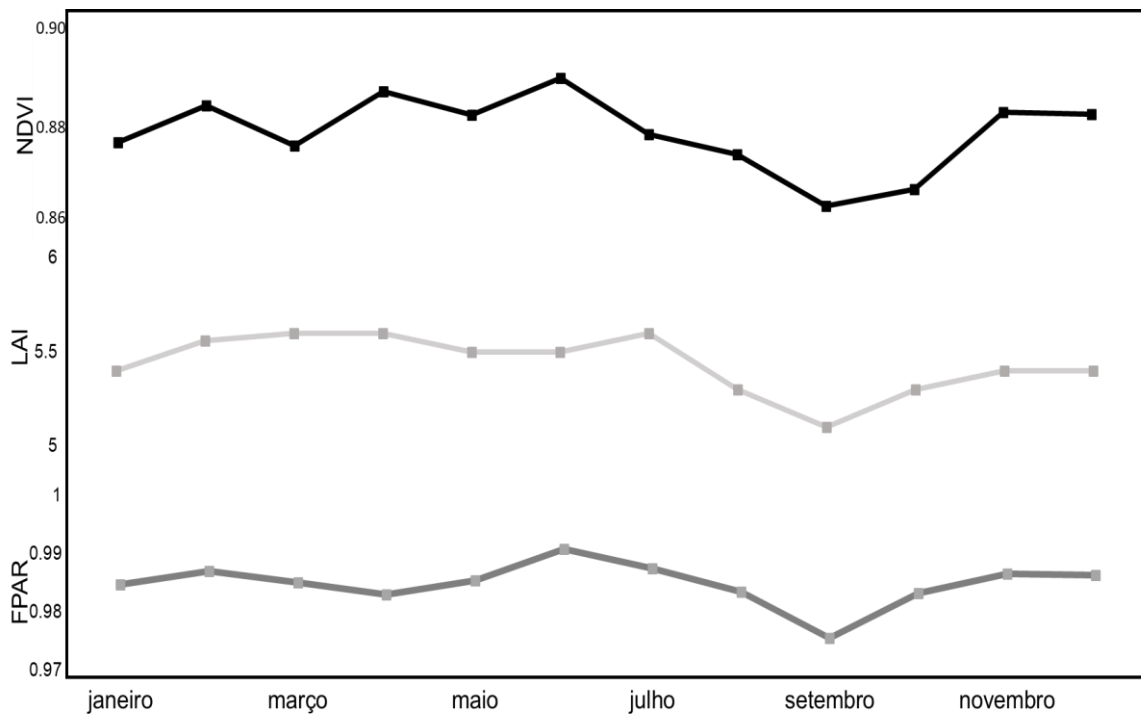


Figura 6. Média mensal de NDVI (preto), LAI (m²m⁻²) (cinza claro) e FPAR (cinza escuro), para o pixel da torre de fluxos SVG (linha preta).

No sítio experimental PEG, o campo espacial médio temporal do NDVI no verão e no inverno (Figura 7) mostra um grande desvio entre eles, nos limites polígono do PEG, predominantemente de valores altos em janeiro em torno de 0.85, e menores em agosto em torno de 0.70, como é de certa forma esperado devido ao forte efeito da sazonalidade na vegetação do cerrado. Alberton et al., (2023) observou que o verde do cerrado no PEG, foi notavelmente acentuado ao final da estação da seca, atingindo o pico máximo na estação chuvosa.

Em ambos os meses destaca-se uma pequena área com fisionomia de campo, próxima do centro do polígono, que mostrou o NDVI muito reduzido em relação à área total, e que indica o efeito da ausência das árvores. Exceto por este mínimo localizado, notou-se uma certa heterogeneidade espacial do NDVI, tanto para janeiro como para agosto, mas que não corresponderam a uma associação muito clara com o padrão das demais fisionomias dominantes da área (Figura 2d). Ecossistemas de savana comumente apresentam interação de difícil compreensão de fatores climáticos e fenológicos (ALBERTON et al., 2023; MA et al., 2014; WHITLEY et al., 2011).

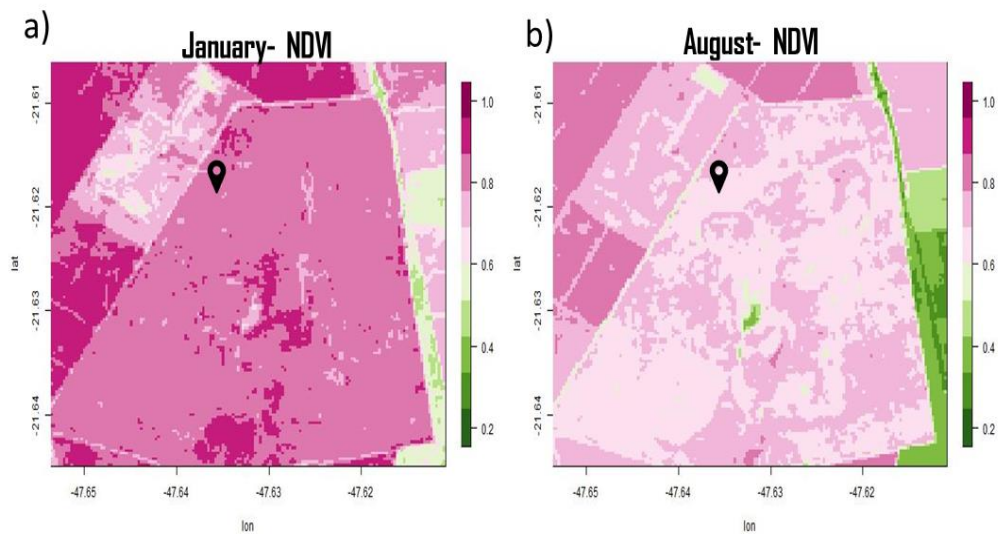


Figura 7. Campo espaciais médios de NDVI, para o sítio experimental PEG, provenientes do Landsat-8, entre 2013 e 2020, com localização da torre no alfinete preto, para os meses de janeiro (figura 7a) e agosto (figura 7b).

O estabelecimento de correlação entre as fisionomias do cerrado mostra-se complexa não apenas em relação ao NDVI como citado anteriormente, mas também floristicamente e pelas características de solos analisadas (RUGGIERO et al., 2002). Cooper et al., (2005) ainda reforçam que para o PEG, o detalhamento das classes taxonômicas de solos também foi insuficiente para compreensão total da variação da vegetação.

Analogamente, os campos espaciais médios do LAI (Figura 8) e do FPAR (Figura 9) no verão e no inverno também mostraram variação sazonal, modesta mas significativa. Na área total da reserva o LAI variou de aproximadamente $4.60 \text{ m}^2/\text{m}^2$ em Janeiro, para cair até de $4.25 \text{ m}^2/\text{m}^2$ no inverno (Figura 8b). Também o parâmetro FPAR variou na mesma direção, de aproximadamente 0.975 em Janeiro, para 0.955 em Agosto (Figura 9b).

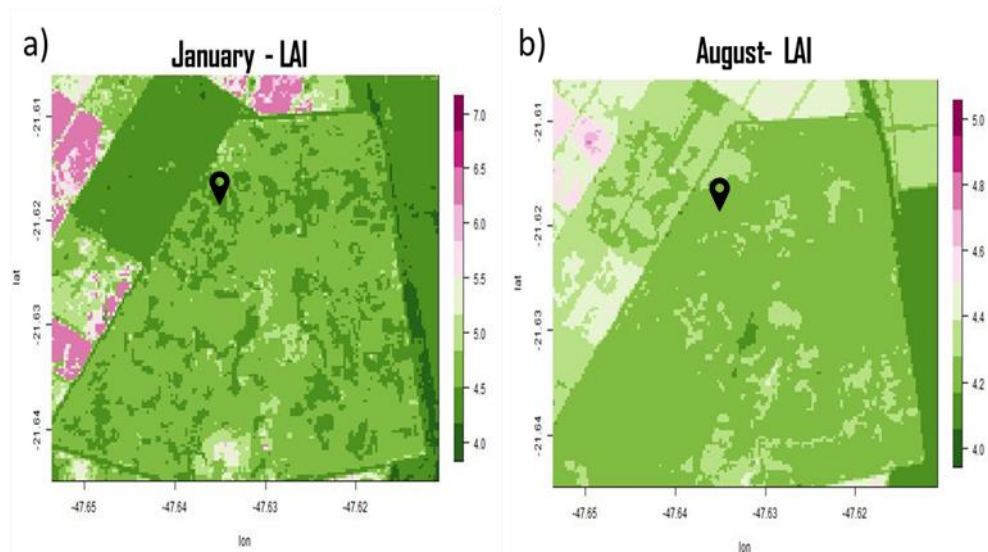


Figura 8. Campos espaciais médios (2013 a 2020) de LAI (m^2m^{-2}), para o sítio experimental PEG representando os meses de janeiro (figura 8a) e agosto (figura 8b).

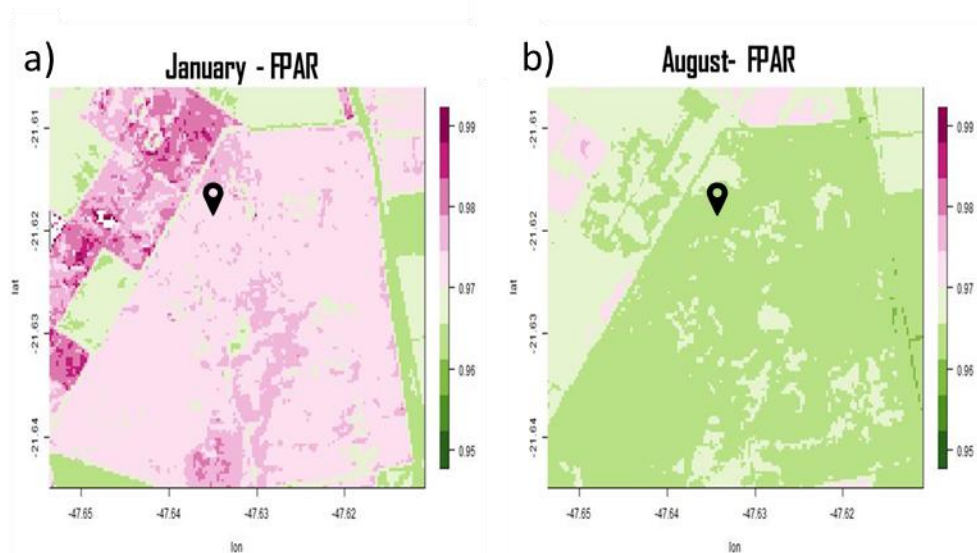


Figura 9. Campos espaciais médios (2013 a 2020) de FPAR, para o sítio experimental PEG representando os meses de janeiro (figura 9a) e agosto (figura 9b).

A sazonalidade destes parâmetros no footprint da torre, também apresentaram semelhança, mas com maior oscilação que a média espacial total (Figura 10). A sazonalidade da vegetação na área do PEG é uma característica já notada *in situ*, como por exemplo durante a estação seca, o aumento da senescência das folhas (ALBERTON et al., 2023) e da queda de folhagem (DA ROCHA et al., 2002), que surge como estratégia natural de redução da superfície de transpiração em decorrência da baixa disponibilidade hídrica. A fração foliar, componente mais importante da serrapilheira, é extremamente sensível a

variáveis meteorológicas como precipitação, umidade relativa e temperatura do ar, e pode indicar mudanças estruturais no cerrado (VALENTI et al., 2008).

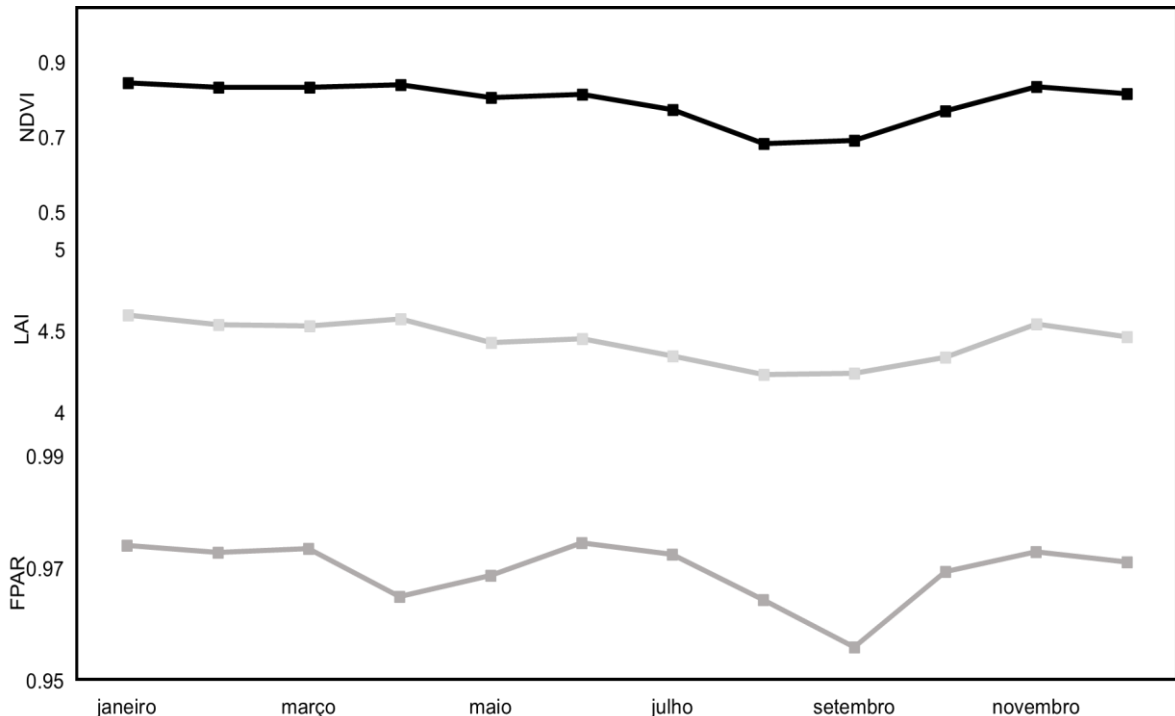


Figura 10. Média mensal de NDVI (preto), LAI (m^2m^{-2}) (cinza claro) e FPAR (cinza escuro), para o pixel da torre de fluxos PEG.

3.6. Armazenamento e perfil vertical CO₂

Para o sítio experimental SVG conta-se com medidas do analisador CO₂ rápido (no topo da torre EC a 63m - 01/01/2008 a 02/03/2011) e perfil vertical CO₂ nos níveis 59m, 40m, 25m, 9m, 5m, 1.5m, 1.0m e 0.4. Foi calculado o armazenamento (equação 17) e a variação temporal do armazenamento vertical de CO₂ (equação 17 – I) (St), utilizando a média móvel centrada de três pontos (MORGENSTERN et al., 2004) sobre as diferenças finitas entre medidas consecutivas. A integração em altura foi conduzida de maneira ponderada pelas espessuras das camadas verticais, levando em consideração a representatividade de cada nível de amostragem. Dessa forma, a abordagem permite uma análise refinada do armazenamento de CO₂, destacando a distribuição vertical e a influência de cada nível no processo de captura e armazenamento de carbono (CABRAL et al., 2011).

A regra do trapézio foi aplicada, para estimar a variação temporal do armazenamento vertical de CO₂ ($\mu mol/m^2s$) de todo o perfil, no período

disponível de dados (12/03/2010 a 02/03/2011). A técnica consiste em dividir o perfil vertical em segmentos discretos e calcular a área sob a curva de concentração de CO₂ em cada par de camadas consecutivas usando trapezoides. Esses trapezoides são formados pela linha que conecta os pontos de concentração de CO₂ em duas camadas adjacentes e os eixos vertical e horizontal. Os níveis representam as diferentes profundidades, cada um caracterizado por uma taxa de variação de profundidade.

$$F_s = h p_a \frac{\Delta St}{\Delta T} \quad (16)$$

Onde h = altura da medição (m); p_a = densidade molar média do ar seco e $\frac{\Delta St}{\Delta T}$ = variação temporal do armazenamento vertical de CO₂.

Foi calculado St ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) para toda coluna usando medidas do perfil vertical (equação 17 parte I) e apenas para o topo da coluna (equação 17 parte II):

$$St = \frac{CO_2 p * Pa}{R * (273.15 + Tar)} \quad (17 - I)$$

$$St = \frac{CO_2 * Pa}{R * (273.15 + Tar)} * 63 \quad (17 - II)$$

Onde $CO_2 p$ = concentração de CO₂ de toda coluna e CO_2 = concentração de CO₂ (ppm) medida no topo da coluna; Pa = pressão atmosférica (Pascal); R = constante dos gases ideais (J/mol K) sendo K = Kelvin; Tar = temperatura do ar (°C); 63 = altura da medição em metros

Visando o preenchimento da série temporal St (método trapezoidal), estabeleceu-se uma relação de dependência baseada na razão entre as estimativas de armazenamento do perfil vertical (método trapezoidal) e do topo. Obteve-se um fator de correção denominado espessura efetiva (dhe), que representa o tamanho da camada em um determinado passo de tempo. Essa abordagem surge como uma alternativa para o preenchimento da série St , considerando a variação temporal da espessura da camada, verificada pelo perfil

vertical do armazenamento CO₂ (figura 11). Dessa forma, a consideração de homogeneidade no cálculo do armazenamento do topo foi revista. A mediana horária do fator de correção (figura 12), filtrado no intervalo interquartil, foi utilizada recalculando o armazenamento do topo (equação abaixo). Posteriormente, foi gerada uma nova estimativa de armazenamento mais acurada e completa, baseada no método trapezoidal preenchido com o armazenamento do topo recalculado baseado na metodologia citada acima. Utilizando a estimativa de armazenamento CO₂ e as medições de campo do fluxo de carbono, foi calculado o FLE.

$$\Delta st = \frac{CO_2 * Pa}{R * (273.15 + Tar)} * dhe \quad (18)$$

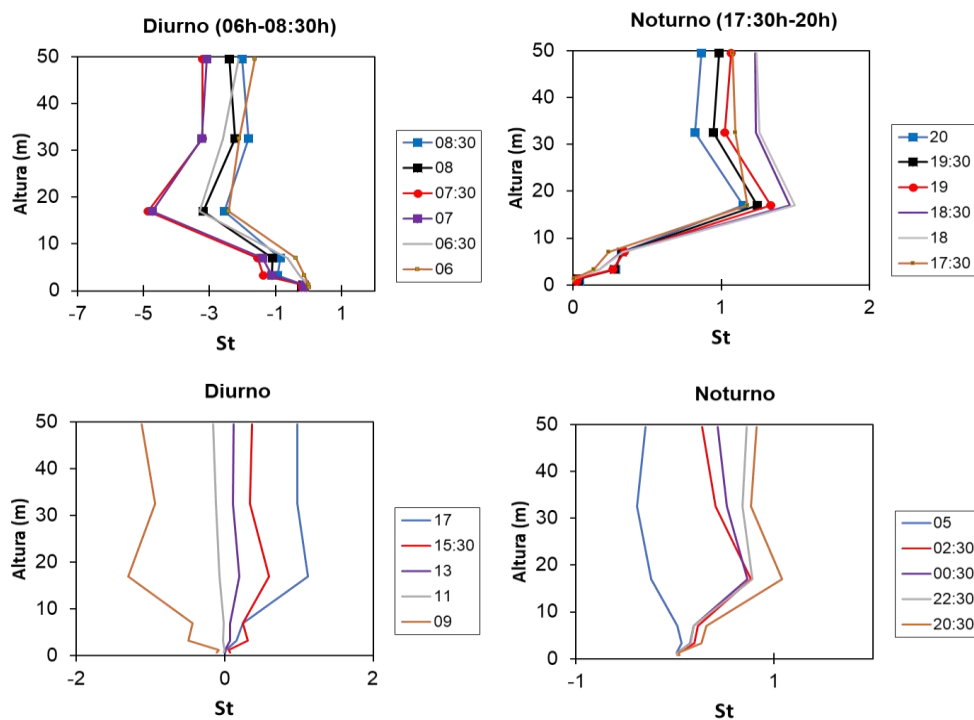


Figura 11 Perfil vertical St ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) para todo intervalo temporal avaliado no sítio experimental SVG, onde as cores indicam os horários no período do amanhecer, crepúsculo, diurno e noturno.

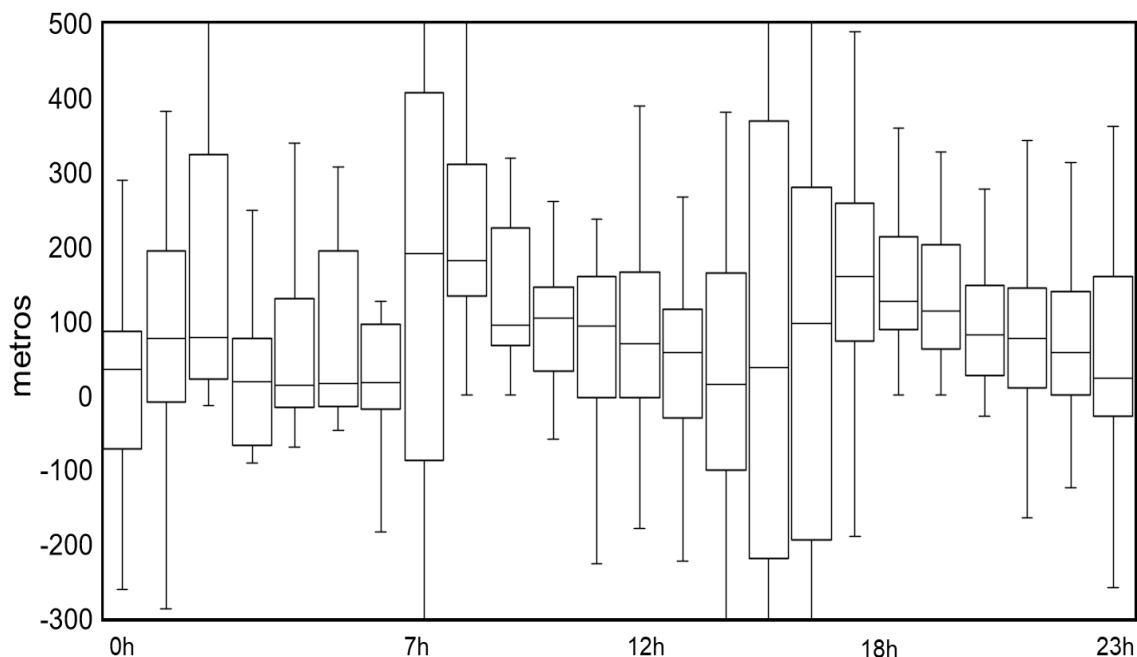


Figura 12. Boxplot do fator de correção de espessura efetiva (dhe), no passo de tempo horário, filtrado utilizando IQR.

Foram geradas estimativas de produtividade primária bruta (PPB), calculadas pela diferença entre FLE e a respiração do ecossistema (R_e). Para estimar R_e foram construídos modelos de regressão linear e exponencial, utilizando a temperatura do ar observada como forçante. Foram definidas classes incrementais de 1°C e associadas com a médias intervaladas de FLE (figura 13), sendo adotado o modelo exponencial devido ao melhor ajuste da curva.

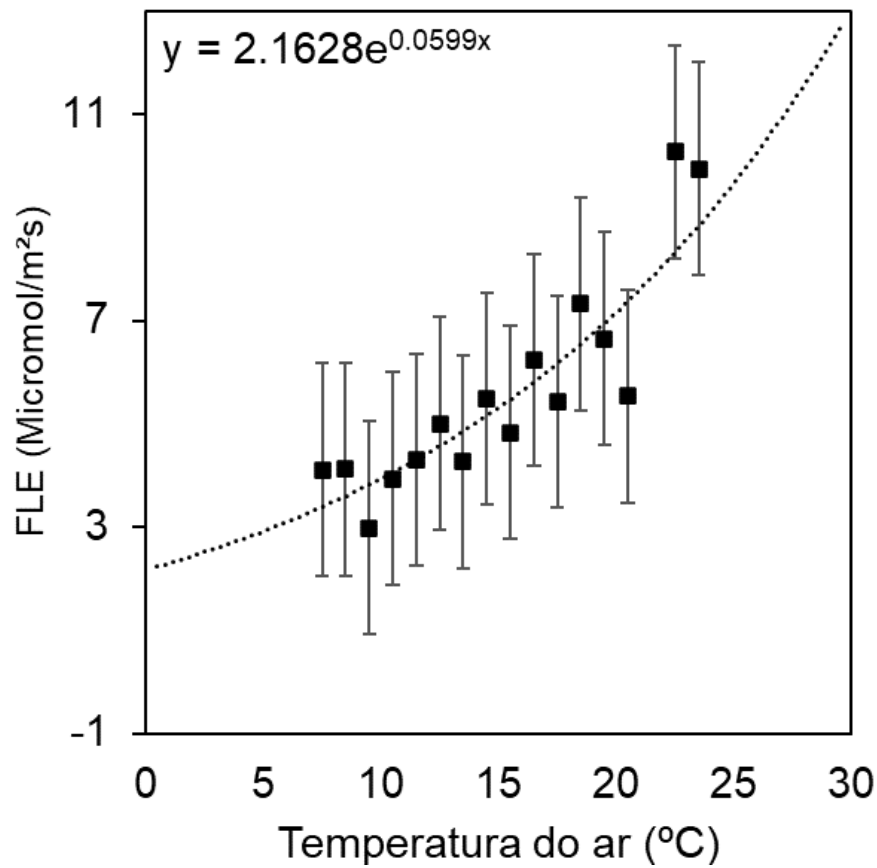


Figura 13. Dispersão entre as classes incrementais de 1°C da temperatura do ar observada no eixo x, e o valor médio de FLE ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) (no eixo y) ($R^2 = 0.81$), juntamente com o desvio padrão.

3.7. Calibração de parâmetros com fluxos de superfície

A calibração do modelo SiB2, em cada sítio experimental, foi feita como uma forma física defensável e transparente para se prover o preenchimento de falhas dos dados de campo, e desta forma garantir uma análise mais robusta da variabilidade temporal dos fluxos turbulentos.

A calibração baseia-se na prescrição de parâmetros iniciais separados em categorias: morfológicos, propriedades ópticas, fisiológicos e físicos do solo (tabela 3). Foram utilizados dois métodos para a calibração. O método *Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python*, ou LMFIT (NEVVILLE et al., (2016) minimiza uma função de otimização F_o igual ao desvio médio quadrático da variável simulada em relação à medição de campo. Para uma busca mais acurada e computacionalmente mais eficiente do domínio do erro mínimo, a otimização é feita em dois passos. No primeiro passo, dentro de um largo intervalo de possibilidades físicas do parâmetro a otimizar, a função F_o

é avaliada, para apenas alguns valores discretos do parâmetro igualmente espaçados no intervalo, denominado de forma computacional *brute*. A partir dos resultados obtidos se faz um segundo passo, selecionando-se um subintervalo para busca refinada do desvio mínimo, utilizando-se o método de *Levenberg-Marquardt* que faz análise não-linear e estima o valor ótimo do parâmetro. No segundo método, *Shuffled Complex Evolution* ou SCE (DUAN et al., 1993), se utiliza uma abordagem de populações múltiplas, representando diferentes soluções candidatas para um problema. Para muitas iterações ou populações testadas, o algoritmo as combina segundo operações de cruzamento e mutação, propondo variações nas soluções testadas ao longo da busca, de forma a explorar o espaço de busca com soluções ótimas. Esta técnica utiliza esta forma de embaralhamento para evitar uma solução ótima presa em domínio com mínimos locais, pois as soluções são constantemente embaralhadas na população.

Para o sítio experimental SVG, a calibração de parâmetros ópticos foi feita com a otimização do cálculo do saldo de radiação (R_n), e utilizou dados no intervalo temporal de 2009 a 2013 (Figura 14), feita simultaneamente para 11 parâmetros (tabela 3) baseada no método LMFIT. No caso dos fluxos de água e CO₂, foram realizados testes de sensibilidade individuais com o método SCE (Figura 15a), para diagnóstico dos valores ótimos dos parâmetros de inclinação da condutância estomática e assimilação líquida de CO₂ (m), projeção foliar média, fração verde do dossel (N) e taxa máxima de fotossíntese (v_{max}) (Figura 15a) no intervalo de 2009 a 2010, reportadas em Freitas (2012), utilizando a variável eficiência do uso da água (WUE - equação 19) na base diurna, em gCO₂/kg.

$$WUE = \frac{PPB}{ET} \quad (19)$$

Onde $PPB = FLE - Re$, é a produtividade primária bruta (gC/m²) diária, FLE o fluxo líquido de CO₂ diário e Re a respiração do ecossistema diária; e ET = evapotranspiração diária (mm)

Com o critério de filtragem da calibração WUE , foram selecionados apenas dias em que satisfizessem os critérios de: i) mais de 19 horas disponíveis

no cálculo da média; ii) $LE > 0.65 \cdot K_i$, para evitar dias com falhas horárias de LE que viessem a comprometer o total diário.

Na análise de sensibilidade com o método SCE, percebe-se que o erro mínimo para o parâmetro m foi próximo de 12, para o parâmetro $gmudmu$ foi acima de 0.1, para o parâmetro N foi igual a 0.817 e para o parâmetro $vmax$ em torno de 60. Na sensibilidade do parâmetro m , nota-se uma tendência de queda do erro para valores acima de 12, e no parâmetro $gmudmu$ uma faixa de insensibilidade a partir de 0.1. Posteriormente, o conjunto ótimo de parâmetros obtido foi utilizado como conjunto inicial no método LMFIT para uma reavaliação de todos os parâmetros conjuntamente, notando-se que não houve alteração nos valores finais. Dados estes diagnósticos, para a escolha do parâmetro final se fez a premissa no caso SVG de estabelecer uma condição do ecossistema de Mata Atlântica na área experimental estar em clímax, portanto balanceado do ponto de vista de produtividade primária bruta e respiração do ecossistema, ou seja $FLE = 0$, e $PPB = Re$ na média diária dos dados utilizados. Esta foi uma forma de se levar em conta não somente os fluxos de CO_2 diurnos, mas também os noturnos, que controlam o ajuste do modelo simples de Re . Adicionalmente, esta opção trata de possibilitar avaliar uma hipótese conservadora, que viabilize comparar os cálculos da PPL com a literatura obtida de inventários de parcelas de campo por métodos halométricos, onde geralmente a vegetação encontra-se em estado de sucessão primária. Desta forma se fez um refinamento de escolha dos parâmetros tentando-se aproxima-los ao máximo dos diagnósticos de erro mínimo do teste de sensibilidade, obtendo-se valores mostrados na Tabela 3. Na avaliação de desempenho com os parâmetros escolhidos, notou-se um bom ajuste do fluxo de calor latente (figura 15b), e uma certa superestimativa do WUE diurno (figura 15a).

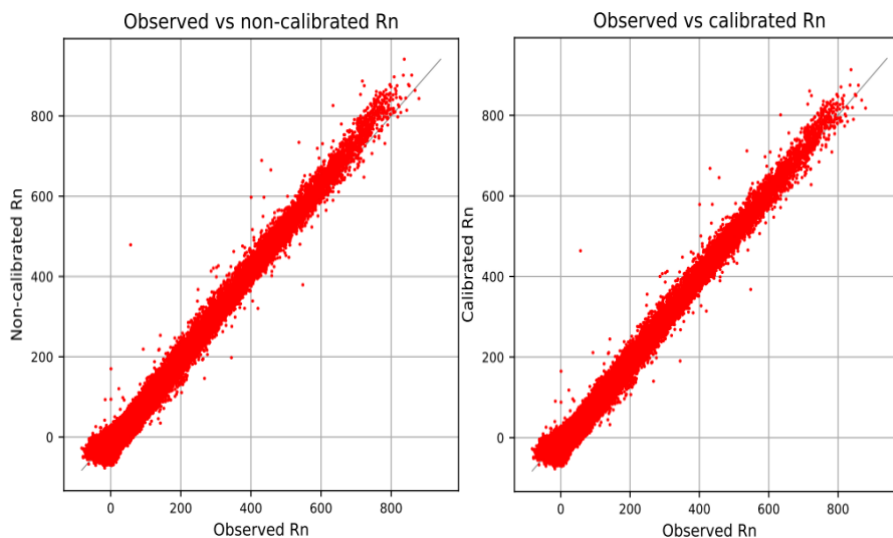


Figura 14. Comparação entre os dados Rn (W/m^2) observados (eixo das abscissas) e simulados pelo modelo SiB2 (eixo das ordenadas), onde a esquerda da figura representa a simulação com os valores defaults dos parâmetros e a direita os parâmetros otimizados. O processo de otimização foi baseado nos dados de Rn entre os anos de 2009 e 2013 observados para SVG. A estimativa da raiz quadrada do erro médio (RMSE) variou no caso inicial e calculado de 24.6 para 23.4.

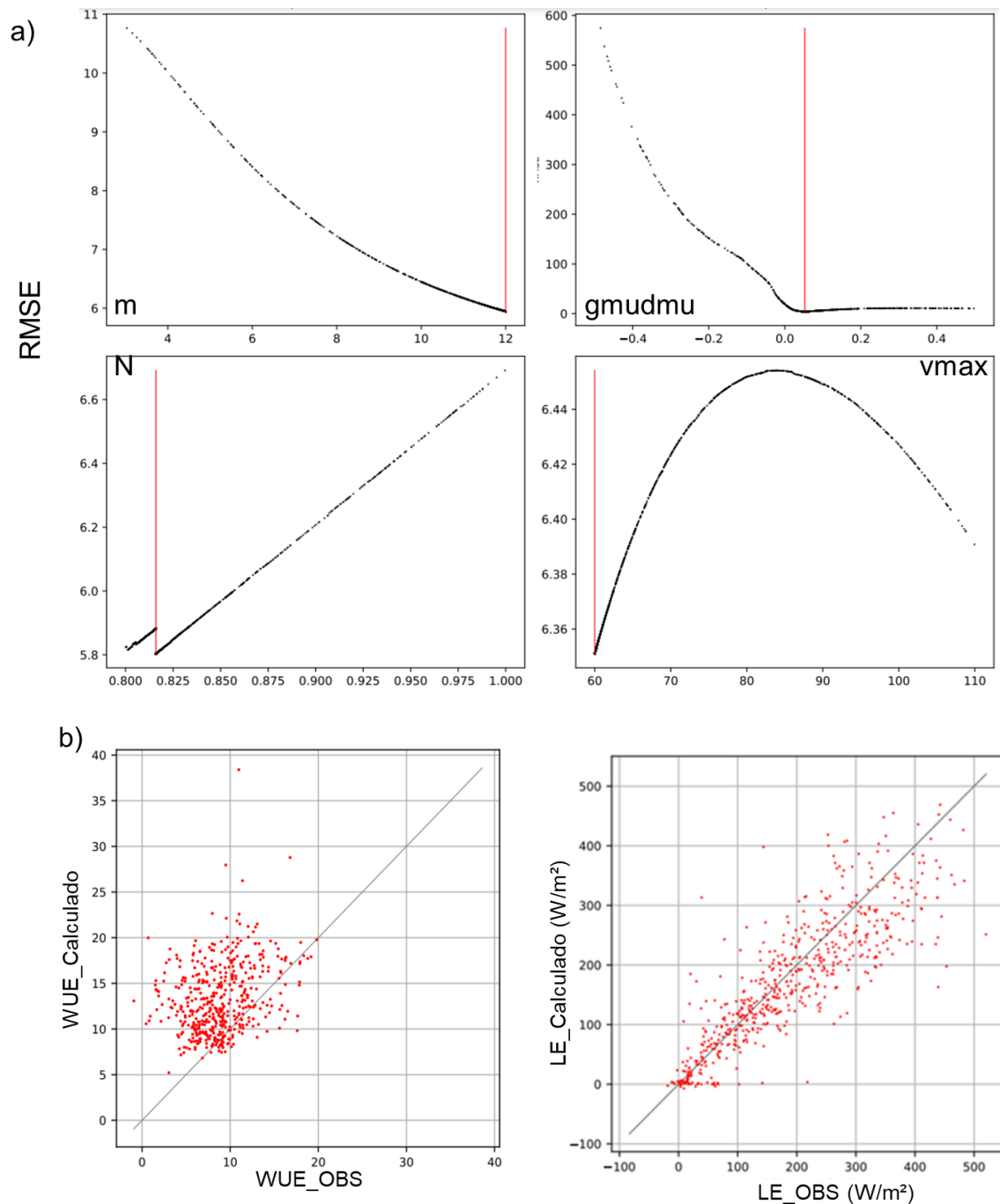


Figura 15. a) Estimativa da raiz quadrada do erro médio (RMSE) e ponto de ótimo para cada uma das calibrações individuais referente as variáveis do módulo de carbono (*gmudmu*, *M*, *N* e *vmax*); b) Comparação entre os dados WUE (à direita) e LE observados (à esquerda) no eixo das abscissas e simulados pelo modelo SiB2 (eixo das ordenadas).

No caso do sítio experimental de Cerrado PEG, a calibração foi feita inicialmente para os parâmetros ópticos com otimização do cálculo do saldo de radiação (R_n), utilizando dados no intervalo temporal de 2010 a 2017, de forma simultânea para os 11 parâmetros (tabela 3b), baseado no método LMFIT. A

otimização do fluxo de energia LE foi feita posteriormente com o método LMFIT, utilizando dados horários nos meses de janeiro, fevereiro e março (JFM) e junho, julho e agosto (JJA), para o ano de 2011, em dias selecionados sem precipitação. Os valores otimizados dos parâmetros de inclinação da condutância estomática, projeção foliar média e fração de IAF verde são mostrados na Tabela 3b. Estes valores foram interpolados para os demais meses do ano. Como no caso de SVG, a melhoria do desempenho com a calibração foi bastante marcante para os fluxos Rn e LE (figuras 16 e 17). No caso do PEG não foi feita avaliação dos fluxos de CO₂.

Em resumo, a calibração seguiu uma ordem de agregação serial de otimizações: 1) Estimativa dos parâmetros variantes no tempo LAI, N, FPAR com sensoriamento remoto (rotina Mapper); 2) prescrição inicial dos parâmetros variantes no tempo e otimização dos parâmetros ópticos para otimizar o saldo de radiação (método LMFIT); 3) ajuste de parâmetros fisiológicos, com otimização do fluxo de calor latente no caso PEG com método LMFIT, e com otimização do WUE diário na condição de FLE =0 no caso SVG utilizando o método SCE.

Tabela 3. A) Lista de parâmetros e valores otimizados no módulo de radiação (referentes ao período entre 2009 e 2013), e para o módulo de carbono no sítio experimental SVG.B) Lista de parâmetros e valores otimizados no módulo de radiação (referentes ao período entre 2010 e 2017), e para o módulo de carbono e água (referentes ao período entre 2011, utilizando a função de otimização LE) no sítio experimental PEG.

a) SVG Parâmetro – Módulo Radiação	Default	Otimizado	
Transmitância da folha (PAR – Radiação Fotossinteticamente Ativa – folha verde)	0.017	0.030	
Transmitância da folha (NIR – Radiação Próxima ao Infravermelho – folha verde)	0.001	0.0001	
Transmitância da folha (PAR - folha seca)	0.20	0.34	
Transmitância da folha (NIR - folha seca)	0.001	0.50	
Refletância da folha (PAR - folha verde)	0.07	0.02	
Refletância da folha (NIR - folha verde)	0.16	0.01	
Refletância da folha (PAR - folha seca)	0.50	0.419	
Refletância da folha (NIR - folha seca)	0.39	0.59	
Refletância do solo (PAR)	0.11	0.30	
Refletância do solo (NIR)	0.23	0.40	
Fator de distribuição do ângulo da folha	0.10	0.13	
SVG Parâmetro – Módulo Carbono e Água	Otimização SCE	Prescrição final	
Inclinação da condutância estomática e assimilação líquida de CO ₂ (M) (mol/m ² s)	12.0	19.0	
Projeção foliar média (gmudmu)	0.05	1.0	
Fração verde do LAI (N)	0.81	0.95	
Rubisco máximo (Vmax) (mol/m ² s)	60.0	66.0	
b) PEG Parâmetro – Módulo Radiação	Default	Otimizado	
Transmitância da folha (PAR – Radiação Fotossinteticamente Ativa – folha verde)	0.050	0.010	
Transmitância da folha (NIR – Radiação Próxima ao Infravermelho – folha verde)	0.250	0.305	
Transmitância da folha (PAR - folha seca)	0.001	0.005	
Transmitância da folha (NIR - folha seca)	0.001	0.005	
Refletância da folha (PAR - folha verde)	0.100	0.010	
Refletância da folha (NIR - folha verde)	0.450	0.100	
Refletância da folha (PAR - folha seca)	0.130	0.205	
Refletância da folha (NIR - folha seca)	0.390	0.350	
Refletância do solo (PAR)	0.080	0.155	
Refletância do solo (NIR)	0.200	0.205	
Fator de distribuição do ângulo da folha	0.250	0.050	
PEG Parâmetro – Módulo Carbono e Água	Default JFM / JJA	Otimizado JFM	Otimizado JJA
Inclinação da condutância estomática e assimilação líquida de CO ₂ (M) (mol/m ² s)	8.00	8.29	12.95
Projeção foliar média (gmudmu)	0.90	0.51	0.30
Fração verde do LAI (N)	0.90 / 0.60	0.99	0.43
Rubisco máximo (Vmax) (mol/m ² s)	100.00	120.00	119.77

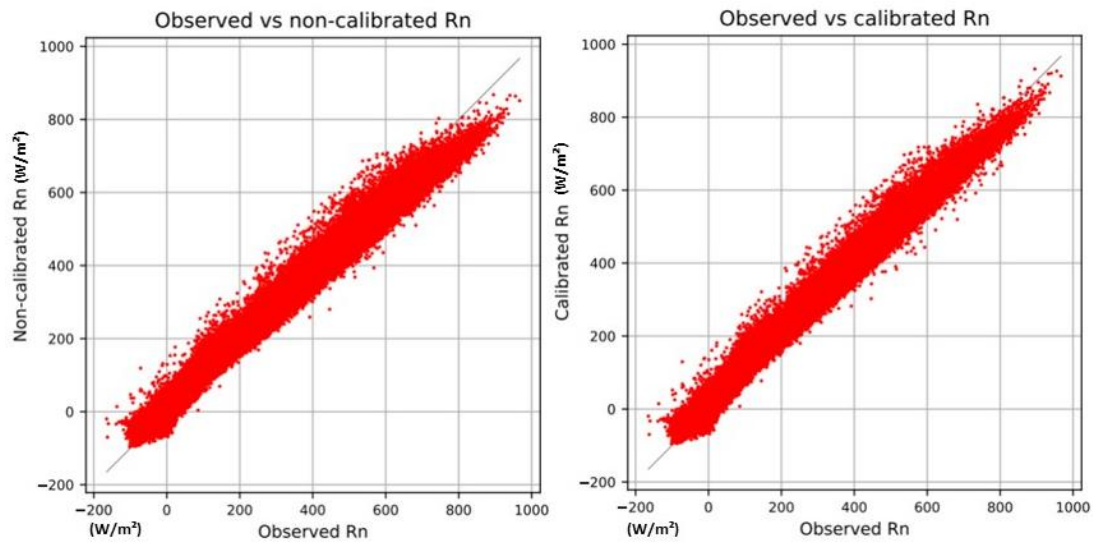


Figura 16. Comparação entre os dados R_n (W/m^2) observados (eixo das abscissas) e simulados pelo modelo SiB2 (eixo das ordenadas), onde a esquerda da figura representa a simulação com os valores defaults dos parâmetros e a direita os parâmetros otimizados. O processo de otimização foi baseado em todos os dados de R_n entre os anos de 2010 e 2017 observados no PEG. A estimativa da raiz quadrada do erro médio (RMSE) variou no caso inicial e calculado de 34.5 para 30.5, e o coeficiente de Nash-Sutcliffeefficiency (NSE) de 0.97 para 0.98.

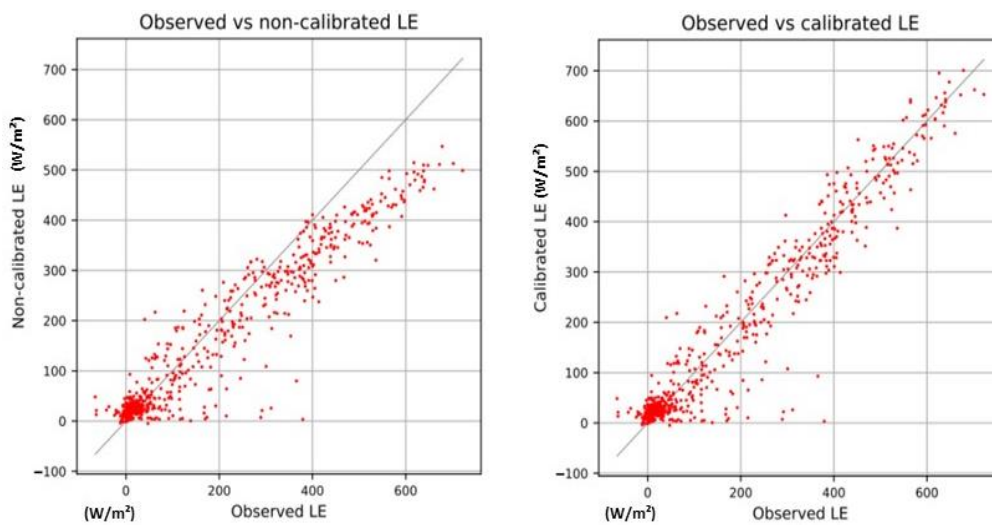


Figura 17. Comparação entre os dados LE (W/m^2) observados (eixo das abscissas) e simulados pelo modelo SiB2 (eixo das ordenadas), onde a esquerda da figura representa a simulação com os valores defaults dos parâmetros e a direita os parâmetros otimizados. O processo de otimização foi baseado em todos os dados de LE , referentes ao ano de 2011, observados no PEG e preenchidos pelo método TWI. A estimativa da raiz quadrada do erro médio (RMSE) variou no caso inicial e calculado de 72.8 para 66.7, e o coeficiente de Nash-Sutcliffeefficiency (NSE) de 0.72 para 0.76.

3.8. Umidade do Solo - Sensor CRNS (PEG)

A umidade do solo no PEG foi medida por dois instrumentos, um com varredura de perfil vertical utilizando a *frequency domain reflectometry* FDR (CS615 Campbell Sci) nas profundidades de 10, 20, 50, 80, 100, 150, 200 e 250 cm, instalado em outubro de 2000, e o segundo com varredura horizontal/vertical pelo *cosmic ray neutron* sensor CRNS (Hydroinnova LLC), instalado em julho de 2011 e disponível até agosto de 2018. Os sensores foram calibrados com amostras gravimétricas do solo local (BRUNO et al., 2004). O sensor CRNS representa uma inovação tecnológica, que alcança uma muito maior extensão horizontal da umidade do solo superficial, e prioriza a estimativa nos níveis mais rasos do solo. Não conhecemos relatos precedentes de publicações utilizando medições com CRNS em áreas de savana no Brasil. A estimativa da umidade do solo pelo CRNS passou por etapas de calibração, devido às interações com as moléculas de água presentes na atmosfera, biomassa e minerais. Os dados brutos do sensor CRNS foram obtidos pelo site (<http://cosmos.hwr.arizona.edu/Probes/StationDat/044/index.php>), com as seguintes variáveis utilizadas: contagem de nêutrons (MOD), fator de correção que considera o tamanho da sonda (PROBE), fator de correção devido à pressão atmosférica (PRESS) e fator de correção que considera mudanças na intensidade dos raios cósmicos como função do tempo (INTEN). Dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação, provenientes da torre EC localizada no PEG, e o cálculo da umidade absoluta do ar (ρ_v) também foram utilizados no processo de correção. Na primeira etapa de correção, baseada na contagem de nêutrons de acordo com a pressão de vapor (fh), assumiu-se que:

$$fh = 1 + 0.0054 * \rho_v; \quad (20)$$

Já a segunda etapa, biomassa, foi baseada no processo descrito por Baatz et al., (2014). Valores encontrados na literatura para a região do Cerrado Brasileiro (ROQUETTE, 2018) também foram utilizados para estabelecer a média do teor de matéria orgânica do solo. Como resultado dos processos expostos anteriormente, obtivemos a contagem de nêutron corrigida (N_{pihv}). Dessa forma, a umidade do solo foi obtida pela equação:

$$\theta = \left(\frac{\alpha_0}{\frac{N_{pihv}}{N_0} - \alpha_1} - \alpha_2 - lw - SOC \right) * BD; \quad (21)$$

onde $\alpha_0 = 0.0808(\text{cm}^3/\text{g})$, $\alpha_1 = 0.372$ e $\alpha_2 = 0.115(\text{cm}^3/\text{g})$ são fixos, $lw = 1.7 \%$ sendo o teor de água nos minerais do solo, SOC é o teor de água na matéria orgânica do solo, BD é a densidade do solo e N_0 obtido pelos dados de calibração disponíveis em (<http://cosmos.hwr.arizona.edu/Probes/StationDat/044/calib.php>)

Após a correção, o processo de calibração foi feito baseado nos dados de umidade do solo obtidos pelo método gravimétrico. Os dados de umidade volumétrica (θ , em m^3/m^3) média diária foram utilizados para avaliar o índice de umidade do solo (IUS ou SWI) e a *umidade do solo* (W), respectivamente como:

$$SWI = \frac{(\theta_i - \theta_{\min})}{(\theta_{\max} - \theta_{\min})} \quad (22)$$

$$W = \frac{\theta_i}{\theta_s} \quad (23)$$

Onde θ_i = umidade do solo média medida no dia i ; θ_{\min} = umidade mínima absoluta da série média diária; θ_{\max} = umidade máxima absoluta da série média diária, e θ_s = porosidade do solo, prescrito aqui como θ_{\max} .

Nota-se que a comparação do sensor CRNS mostrou forte correlação com as medidas do sensor FDR nas profundidades mais superficiais do solo, de 10 cm e 20 cm respectivamente (figura 18), enquanto nas profundidades maiores do FDR (de 50 a 250 cm) a correlação foi fraca. Sabendo antecipadamente que a amostragem vertical do CRNS é relativamente rasa, foi útil notar que os sensores FDR, que tem como um ponto fraco a baixa amostragem horizontal, compararam bem com o CRNS nas profundidades mais superficiais. Isto sugere que houve uma representatividade adequada da umidade superficial na área de investigação com as duas abordagens de medição, pelo menos no solo raso.

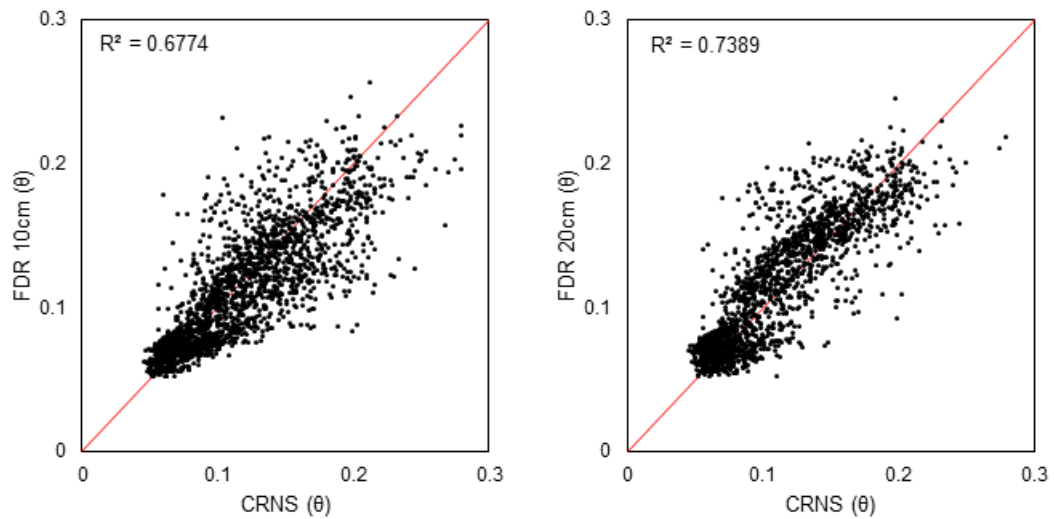


Figura 18. Umidade volumétrica (θ) média diária medida pelo sensor CRNS versus medida do sensor FDR na profundidade de (esquerda) 10 cm e (direita) 20 cm na área de Cerrado sensu stricto (savana florestal) PEG site

4. Resultados e discussão SVG

4.1. Caracterização Climática SVG

Analisou-se a variabilidade climática no intervalo de 2009 a 2019 com base nas médias mensais observadas em campo (figura 19). As variáveis meteorológicas exibiram uma clara sazonalidade (figura 20). O padrão sazonal também foi notório a partir da radiação solar incidente que variou de ≈ 110 a 250 (W/m^2) no inverno ao verão (Figura 19a). Interanualmente, a variabilidade sazonal da temperatura do ar e pressão de vapor d'água mostraram-se bastante sazonais no intervalo analisado, mostraram máximos/mínimos em janeiro/agosto, variando entre 11.3 a $20^\circ C \approx$ e ≈ 12 a 19 hPa (Figura 19c). Notou-se pela radiação solar incidente um período de máximos valores entre 2014 e 2016, fato que desencadeou efeito cascata pela maior disponibilidade energética neste período, aumentando valores de outras variáveis (temperatura do ar e pressão de vapor d'água). A velocidade horizontal do vento com máximos/mínimos na estação seca e chuvosa respectivamente (\approx agosto/fevereiro), variou entre que variaram entre ≈ 1.3 a 2.3 m/s (Figura 19d) na média mensal.

Além da sazonalidade anual, as variáveis meteorológicas tem na periodicidade e amplitude do ciclo diurno um padrão de influência dos controles de grande escala atmosférica. Comparando o ciclo diurno JFM e JJA, nota-se grande diferença de amplitude média diária entre as estações em decorrência da disponibilidade de radiação solar incidente (Figura 20).

O efeito da disponibilidade energética pode ser facilmente observado, pela diferença de amplitude da pressão de vapor d'água (em), entre JFM e JJA. Avaliando as medianas da temperatura do ar, JFM atingiu $21.5^\circ C$ enquanto JJA apenas $16.4^\circ C$ (Figura 20).

No caso da velocidade do vento (m/s), notou-se maior magnitude e amplitude, no período de JFM em comparação a JJA. Por se tratar de uma floresta úmida, a umidade relativa diária máxima apresentou relativa similaridade entre as estações, o destaque se deu quanto aos valores mínimos na estação seca ($\approx 10\%$ menor que a estação úmida) (Figura 20).

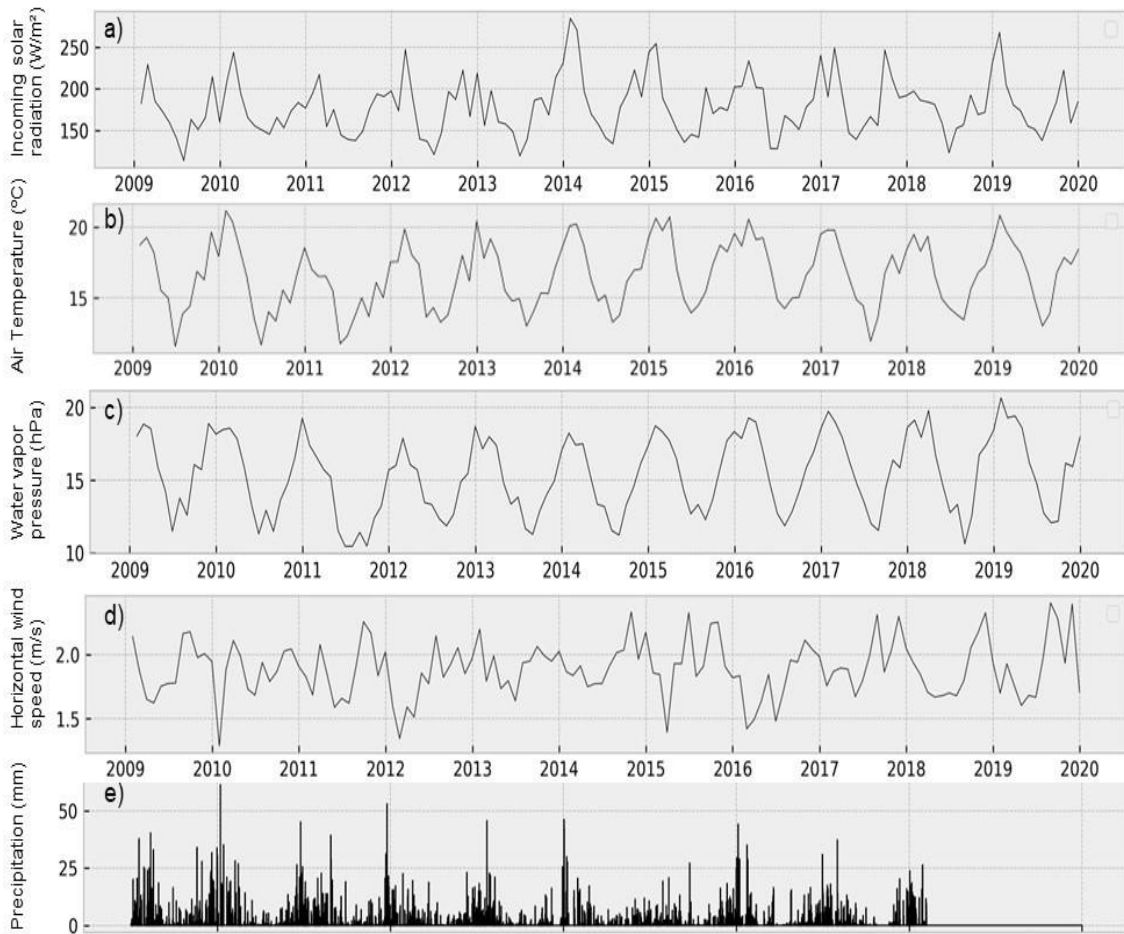


Figura 19 Média mensal das variáveis meteorológicas medidas na torre de fluxo do sítio experimental SVG para os anos de 2009 a 2019: a) irradiância de onda curta incidente (K_i) (W/m^2); b) temperatura do ar ($^{\circ}C$); c) pressão de vapor d'água (hPa); d) velocidade horizontal do vento (m/s) e e) precipitação horária (mm/h).

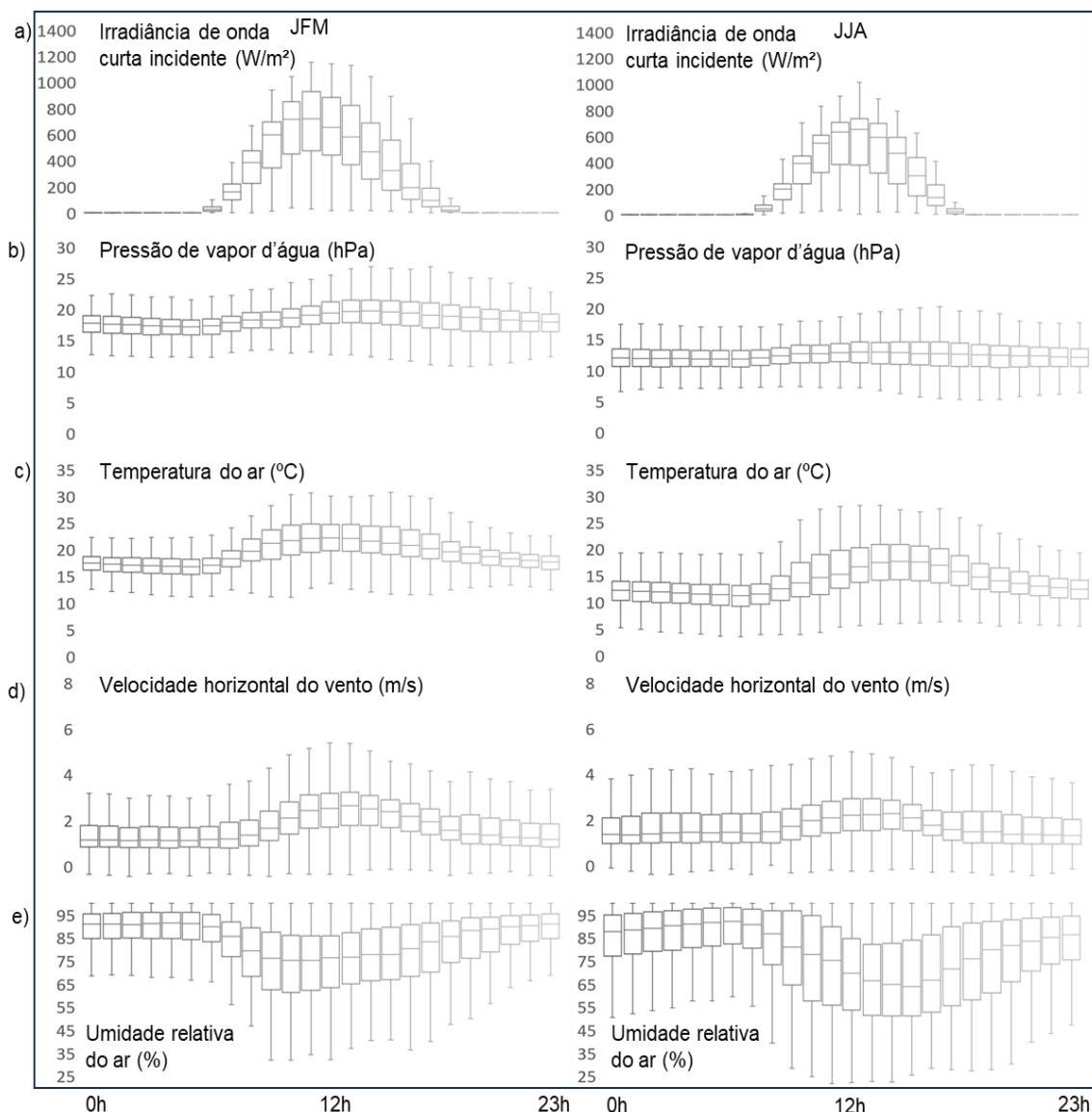


Figura 20. Boxplot do ciclo diurno de: a) irradiância de onda curta incidente (W/m^2), b) pressão de vapor d'água (hPa), c) temperatura do ar ($^{\circ}C$), d) velocidade horizontal do vento (m/s) e e) umidade relativa do ar (%), referentes ao sítio experimental SVG para os anos de 2009 a 2019.

Por meio da análise da chuva, observou-se significativa diferença entre as épocas secas e chuvosas (tabela 4). O regime pluviométrico entre 2009 e 2018 JFM, mostrou bem definidas a época seca no inverno e chuvosa no verão (Figura 19e), de média 2152 mm/a. Notou-se desvio abaixo da média referente ao período avaliado, de forma mais recorrente, a partir do ano 2012 (Figura 21). O período de desvio abaixo da média citado anteriormente, também foi observado quando comparado com a normal climatológica (2517 mm/a) da estação meteorológica mais próxima ao site, localizada no município de Ubatuba

(SP). Este desvio negativo contempla o período de seca extrema que afetou a região sudeste do Brasil, com ênfase nos verões de 2013-14 e 2014-15 (NOBRE et al., 2016).

Segundo Marengo et al., (2015), a atuação de um anticiclone por um período prolongado na estação chuvosa de 2014, repetiu-se com menor duração e intensidade também na estação chuvosa de 2015, acarretando o ressecamento progressivo da superfície. Concomitantemente em 2015, nota-se a maior média anual de temperatura (17.7°C) para SVG. Por outro lado, a menor média anual de temperatura (15.1°C) foi observada em 2011, ano de elevado índice pluviométrico. Destaca-se o ano de 2017, como o menor índice pluviométrico (987mm abaixo da normal climatológica de precipitação de Ubatuba (SP), e 623mm abaixo da média total do período avaliado) e 2009 com o maior índice pluviométrico (479 mm acima da normal climatológica de precipitação de Ubatuba (SP), e 844mm acima da média total do período avaliado).

Tabela 4. Média de longo prazo de variáveis meteorológicas e fluxos de energia observados (2009 a 2019) e calculadas pelo SiB2 (2009 a 2018 JFM) (transpiração Et, evaporação do solo Es e perda por interceptação Ei), em SVG.

	Temp ar (°C)	Chuva	Rn (W/m ²)	LE (W/m ²)	H (W/m ²)	G (W/m ²)	ET (mm/d)	Et (mm/d)	Es (mm/d)	Ei (mm/d)
Anual	16.7	2152.4	107.1	83.0	28.8	0.5	2.92	2.25 (77%)	0.24 (8.1%)	0.43 (14.9%)
Estação chuvosa	18.3	2290.0	125.1	98.8	31.0	-0.1	3.45	2.61 (75.6%)	0.27 (7.6%)	0.57 (16.8%)
Estação seca	14.6	784.8	89.7	67.3	24.7	1.2	2.35	1.88 (79.8%)	0.21 (8.9%)	0.26 (11.3%)

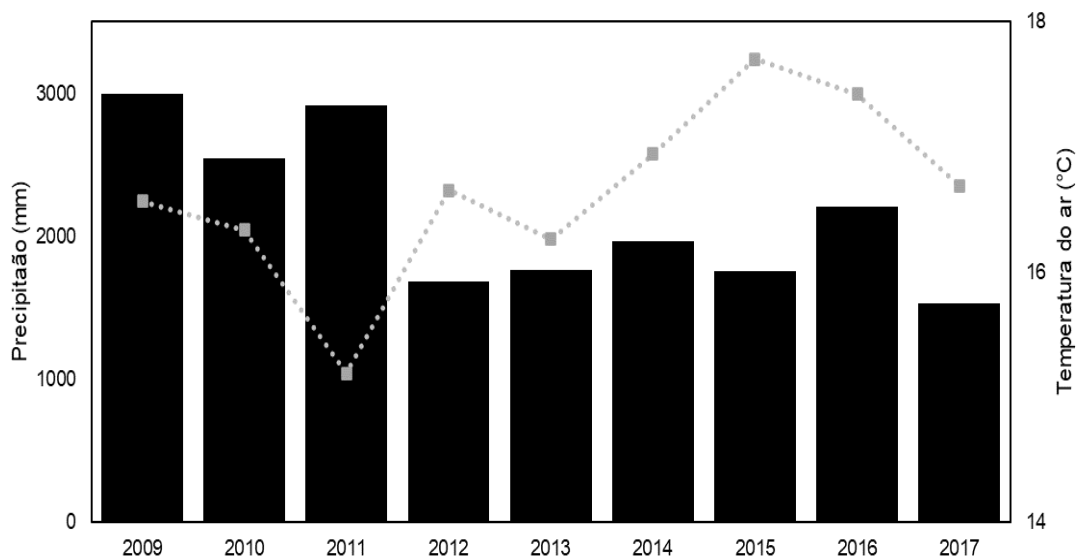


Figura 21. Média anual da temperatura do ar em tracejado (°C) e precipitação (mm), referentes ao sítio experimental SVG para os anos de 2009 a 2017.

4.2. Fluxos atmosféricos de calor SVG

A evapotranspiração ET calculada pelo modelo SiB2 é particionada em 3 componentes (Figura 22a), $ET = Et + Es + Ei$, e detalhadamente a transpiração (Et) corresponde a maior contribuição (77%) da ET, e predominantemente no período diurno (Figura 22a-c), enquanto a evaporação do solo (Es) e a interceptação (Ei) representam 8.1% e 14.9% respectivamente. Nota-se sazonalidade nas componentes da ET, principalmente nos casos de Et e Ei (Figura 22b). Para Ei, observa-se um máximo pronunciado no início do ciclo diurno médio aproximadamente entre as 06h e 09h (Figura 22c), característico de florestas tropicais úmidas como a Mata Atlântica. Durante a noite, a umidade relativa do ar tende a aumentar à medida que a temperatura do ar diminui (Figura 20), potencializando o processo natural de condensação e orvalho. Com o amanhecer, o aumento da temperatura do ar aquece a superfície das plantas, levando a uma rápida evaporação do orvalho e da umidade condensada, fato que pode explicar o pico de Ei notado.

Sazonalmente, a percentagem da partição das componentes é sensível (tabela 4) as variáveis limitantes, como a precipitação e umidade relativa do ar. Pode-se observar claramente que, no caso da Ei, (Figura 22b) existe um aumento na estação chuvosa (16.8%) e diminuição na estação seca (11.3%) em

decorrência desses fatores. O termo E_s depende diretamente da umidade do solo, notado pela sazonalidade da umidade do solo superficial (w_1) calculada pelo SiB2, que apresentou decréscimo na estação seca (Figura 22b).

Na média de todo o intervalo entre 2009 a 2018 JFM (Figura 22a), há uma condição bastante estacionária da média de ET, que apenas foi perturbada com uma oscilação em 2014, relacionado à queda de nebulosidade e aumento da radiação solar na ocasião da seca meteorológica (Figura 19a).

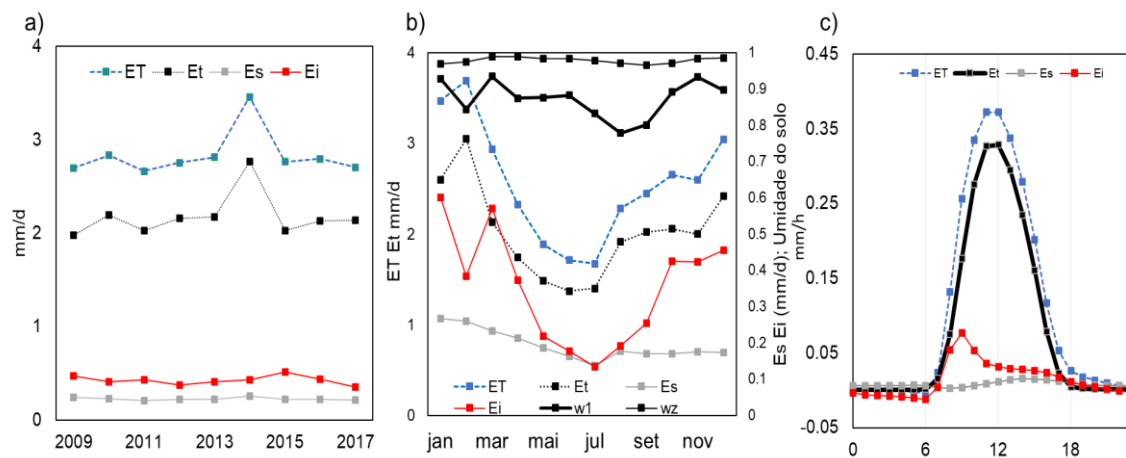


Figura 22. Ciclo médio anual (a), mensal (b) e ciclo diurno médio da evapotranspiração (ET), Et (transpiração), Es (evaporação do solo), Ei (perda por interceptação da chuva), w_1 (grau de saturação da umidade do solo na camada superficial) e w_z (grau de saturação da umidade do solo médio de todas camadas em profundidade) calculado pelo modelo SiB2 para o SVG, referente aos anos de 2009 a 2018.

Para o saldo de radiação R_n nota-se pronunciada variação ao longo do ano, com mínimos no inverno e máximos no verão, que é de forma geral um padrão controlado pela irradiância solar incidente (Figura 23), e muito recorrente no Sudeste do Brasil.

O padrão sazonal dos fluxos de energia LE e H no caso SVG mostrou uma oscilação bem definida, com amplitudes diferentes conforme cada um, o que indica a variação temporal da partição de energia entre estes fluxos (Figura 23). O fluxo de calor latente LE apresenta sazonalidade muito controlada pela energia radiativa, com mínimos e máximos semelhantes aos de R_n . Destaca-se o mês de fevereiro como o máximo anual da mediana para R_n , LE e H conjuntamente, e o mês de junho como o mínimo.

Observa-se uma clara distinção na variância da distribuição estatística ao longo do ano para o termo R_n , o que é um diagnóstico da variabilidade intramensal. Baseado na dimensão do interquartil, a variância de R_n é menor no inverno, devido à recorrência de dias com pouca nebulosidade, e maior no início da estação chuvosa, entre Outubro e Novembro, quando há tipicamente grande alternância de dias secos e chuvosos como também de nebulosidade variável ao longo do dia (Figura 23). Esta distribuição de variância de R_n é semelhante para os fluxos LE e H, o que reforça a noção do controle da energia radiativa na evapotranspiração de SVG. Para o fluxo H particularmente a amplitude sazonal é fraca, a tomar por base a variação mensal da mediana, mas ainda assim possível notar o mínimo no inverno e em concordância com os demais fluxos de energia.

O controle da energia radiativa nos fluxos de calor LE e H em escala mensal e interanual pode ser notado também na série histórica de 2009 a 2018, conforme a Fig. 24. A seca que afetou o sudeste brasileiro desde Novembro 2013 a Janeiro 2015 também foi notada pela queda de precipitação no sitio SVG (Figura 21), pelo aumento da ET (Figura 22), e que por vez foram acompanhados também por picos pronunciados no saldo de radiação R_n e fluxo de calor sensível H, conforme por exemplo os eventos de Jan 2024 e Jan 2025 (Fig. 24).

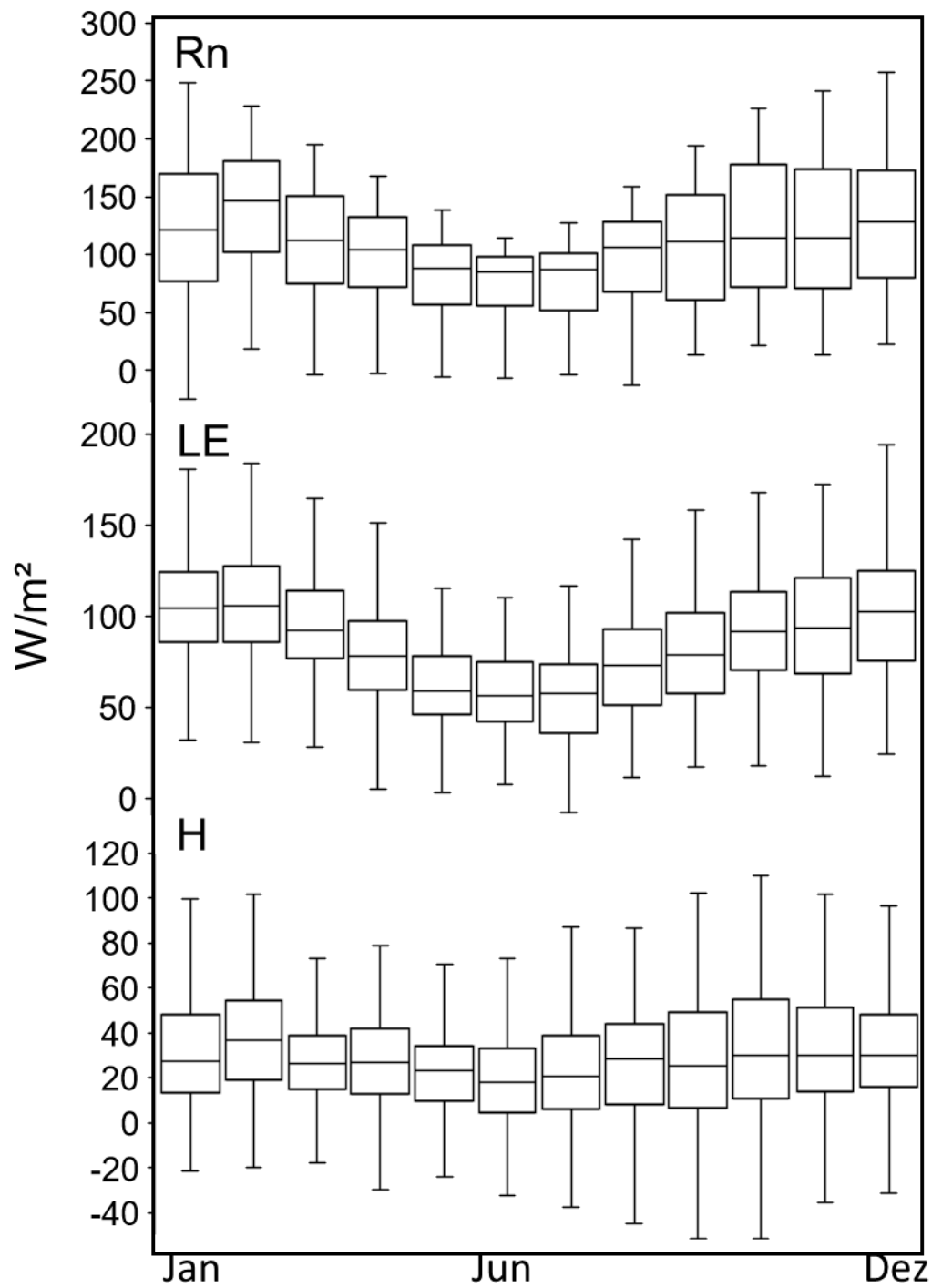


Figura 23. Boxplot da série temporal diária dos fluxos Rn (W/m^2), LE (W/m^2) e H (W/m^2) para SVG, no intervalo de 2009 a 2018 JFM.

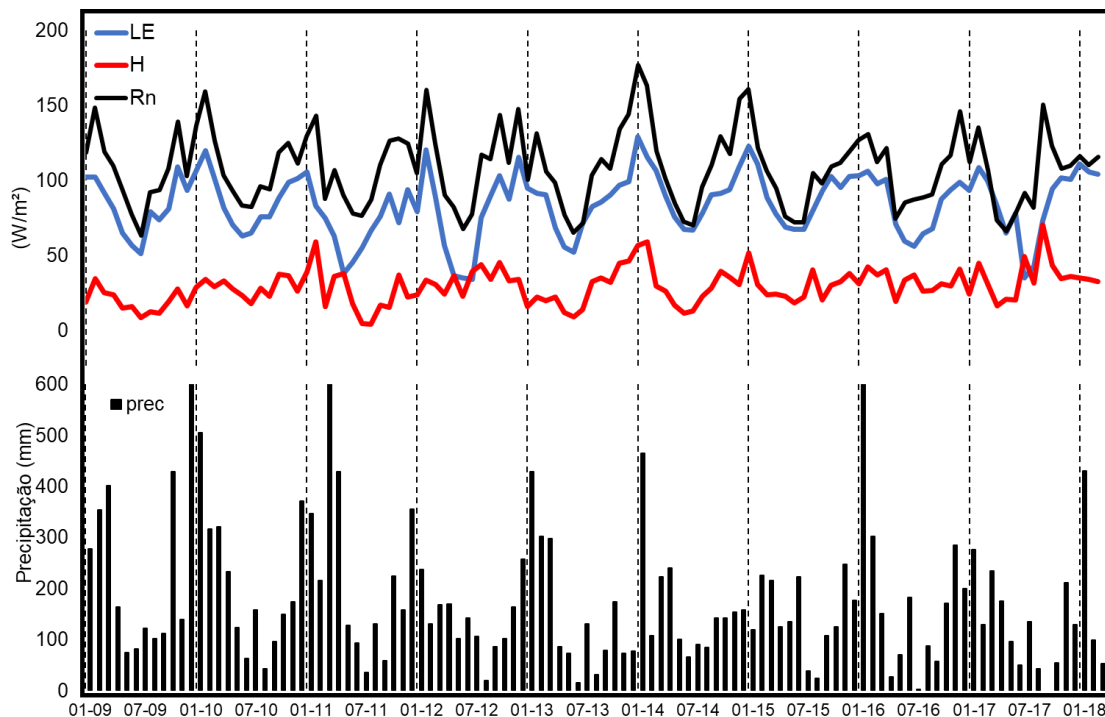


Figura 24. Média mensal de radiação disponível (W/m^2) em preto, fluxo de calor latente (W/m^2) (LE) em azul, sensível (W/m^2) (H) em vermelho, e precipitação mensal (barras) referente ao sítio experimental SVG para os anos de 2009 a 2018 (primeiro trimestre). As linhas verticais tracejadas indicam o início de cada ano.

4.3. Fluxo de CO₂ SVG

Nesse item são discutidos os termos do balanço de CO₂ durante o intervalo de medições do fluxo turbulento e do armazenamento de CO₂ entre 2008 a 2010, chamado aqui de intervalo de calibração com as medições de Fc e St feitas por Freitas (2012), e rediscutida com novas estimativas da variação temporal de St pelo método trapezoidal, do modelo de respiração do ecossistema Re, e, portanto, do FLE na resolução horária (Figura 25).

Também é discutido o balanço de CO₂ no intervalo de Jan/2009 a Mar/2018, aqui chamado de intervalo de longo prazo, e neste caso mostrando-se exclusivamente os valores de PPB, PPL, Re e Fie calculados pelo modelo calibrado (Figura 26).

A variação mensal dos termos do balanço de CO₂ tem grande relação de dependência com a precipitação (Figura 25a), com a irradiância solar incidente (Figura 26b), o que no todo indica o notável controle da sazonalidade climática. Identifica-se sazonalidade marcante para PPB e PPL, com mínimos em JJA e

máximos entre novembro a março (Figura 25a e Figura 26a). Este padrão mostra o aumento da produtividade concorrendo com a radiação solar, chuva, temperatura e umidade do ar (Figura 20c e 26b).

Na variação interanual, por exemplo em janeiro/2014 (Figura 26b) há um evento de alta oferta de radiação solar (K_i), que ocasionou picos na série de PPB e PPL, e por consequência também em FLE negativo. Por outro lado, na estação seca, com menos radiação solar, temperatura mais fria, maior déficit de pressão de vapor, nota-se emissão de CO₂ com FLE positivo, e por consequência mínimos de PPB e PPL.

A PPB média no intervalo de calibração foi de 9.1 g C/m²d, e superior à média no longo prazo, de 6.0 gC/m²d, conforme mostra a tabela 5. Esta diferença, todavia, não depende de variabilidade interanual ou intrasazonal, mas devido ao cálculo da média no intervalo de calibração não contar com preenchimento de falhas.

O ciclo diurno médio da PPB e PPL no intervalo de calibração (Figura 25b) mostrou valores positivos durante o dia, como esperado em decorrência da atividade solar, e próximas de zero durante à noite, coerente com a supressão da fotossíntese. No intervalo de longo prazo (Figura 26a) a variação horária da PPB média, calculada pelo modelo, como esperado aumenta durante o dia e é exatamente zero à noite (Fig. 20a). No intervalo de calibração, todavia, a PPB mostra um aumento abrupto entre 06 a 07 h (Fig. 25b), incoerente com a variação da radiação solar, mas devido à variação horária do FLE, na forma como estimada (linha preta Fig. 25b). Este padrão de variação abrupta do FLE decorre da variação do termo St (linha vermelha Fig. 25b), que mostra um pulso de perda de CO₂ acumulado aproximadamente na primeira hora do dia, e que não tem correspondência de um pulso de mesma proporção, mas positivo do fluxo turbulento F_c .

O termo de respiração do ecossistema Re , que foi baseada no modelo exponencial em função da temperatura do ar, mostrou média de 5.8 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, e que na média horária teve baixa amplitude diária, em torno de 1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, o que mostra que exerceu pouca influência na variação horária da PPB, se comparado com a alta influência dos termos F_c e St . Na escala mensal as medianas da respiração do ecossistema apresentaram mínimos de junho a setembro e máximos de novembro a março (Figura 26 a), com amplitude sazonal também

em torno de $1 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, mas com uma dispersão de aproximadamente $5 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ conforme os boxplots da figura 26a. Entende-se que os máximos e mínimos acontecem em decorrência da variação da atividade metabólica dos organismos do solo principalmente, coerente com a variação de temperaturas e umidade do solo.

Nossa estimativa de FLE médio no intervalo de calibração foi $-2.3 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ sem considerar preenchimento de falhas (52%), e com o preenchimento utilizando-se o modelo calibrado, foi de $-0.8 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. Estes resultados, comparados com as estimativas de Freitas (2012), que foram predominantemente de FLE positivo, mostra uma alteração substancial no tratamento das informações.

No intervalo de longo prazo o FLE foi aproximadamente nulo, conforme antecipado pela calibração do modelo. O padrão sazonal coerentemente mostrou contraste entre meses com FLE positivo com perdas de CO_2 no inverno, e FLE negativo como sumidor de CO_2 no verão (Figura 26a). O ciclo diurno médio do FLE (Figura 25b) também mostrou variação coerente com as forças climáticas, sendo no período diurno majoritariamente negativo, com absorção de CO_2 , e no período noturno positivo, com a respiração do ecossistema respondendo pelas componentes autotrófica e heterotrófica (Figura 26a).

O padrão de sazonalidade mostrado está em concordância com a avaliação de Alberton et al., (2023) feita com os mesmos dados. Especificamente Paiva et al., (2016) mostra que a produtividade primária teve valor mínimo no inverno e máximo no verão, para uma região de mata atlântica, no Parque Nacional Floresta da Tijuca, Rio de Janeiro (RJ) entre 2002 e 2011. No Parque Nacional do Itatiaia (RJ), região de mata atlântica, De Oliveira et al., (2021) e Delgado et al., (2018), também observaram este padrão sazonal.

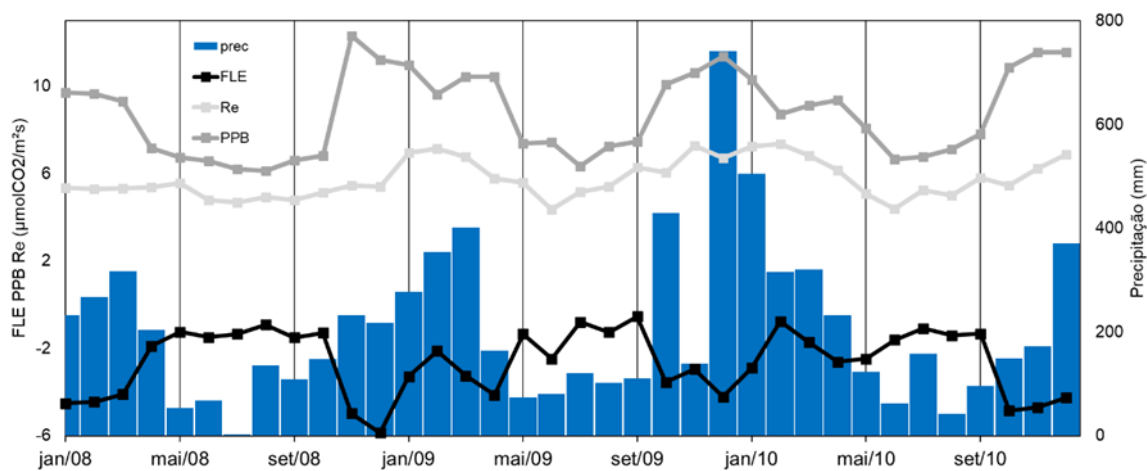
Para comparar a PPL média de longo prazo aqui calculada com outras estimativas de floresta tropical úmida da literatura utilizando métodos micrometeorológicos, que por sua vez geralmente só estimam a PPB, ou com métodos de parcela de campo, que só estimam a PPL, utilizamos a razão entre as médias calculadas de PPB ($6.0 \text{ gC}/\text{m}^2\text{d}$) e PPL ($5.1 \text{ gC}/\text{m}^2\text{d}$) (tabela 5), de aproximadamente 89%, para a conversão simples de uma variável para outra da literatura, marcadas com símbolo * na tabela 5.

A PPB estimada por Alberton et al., (2023) (5.2 gC/m²d) foi a que mais se aproximou deste trabalho, e justamente porquê utilizou as mesmas medições brutas de Freitas (2012), mas com métodos diferentes de estimar Re e preenchimento de falhas. A estimativa de PPB de Hutyra et al., (2008) foi a maior de todas, igual a 8.0 gC/m²d, e possivelmente dentre as várias razões metodológicas, principalmente porquê utilizou medições micrometeorológicas na floresta amazônica em Belterra, PA, com um clima mais quente.

As demais estimativas de PPB, que basearam-se em inventários de parcelas de campo, são comumente áreas de florestas nativas são áreas geralmente com vegetação de sucessão primária, em clímax onde a priori não há acúmulo ou perdas de carbono no longo prazo. Estas estimativas de PPB e PPL foram menores que a estimativa deste trabalho (CLARK et al., 2001; AJTAY et al., 1979; ROY et al., 2001), variando entre 30% a 60% abaixo da estimativa deste trabalho (Tabela 5), e também inferiores de forma geral às duas estimativas micrometeorológicas (HUTYRA et al., 2008, ALBERTON et al., 2023).

A se basear na estimativa deste trabalho, que iguala PPB com Re, sugere-se que pode estar simultaneamente superestimando tanto a PPB como Re. Essa questão é diferente de um dos problemas típicos da avaliação do FLE com eddy covariance, que tende a subestimar Re noturno devido à baixa turbulência, o que requer filtragem dos dados baseado por exemplo no critério de mínima velocidade de atrito u^* . A propósito, neste trabalho não foi necessário nem mesmo aplicar este filtro, que poderia levar eventualmente ao aumento do Re médio, o que conseqüentemente também aumentaria a PPB média de longo prazo, supondo-se o sistema em clímax.

a)



b)

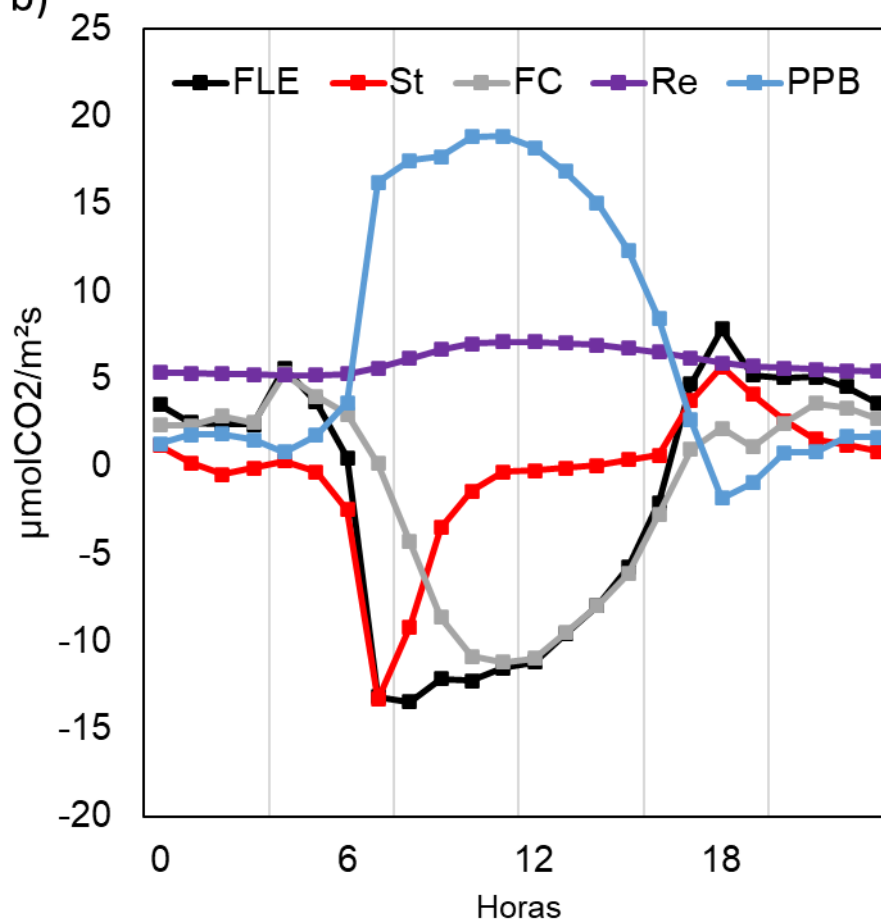


Figura 25. A) Série temporal de Re, PPB, FLE e precipitação (média mensal) para SVG; b) Ciclo diurno médio FLE, St, FC, Re e PPB para SVG.

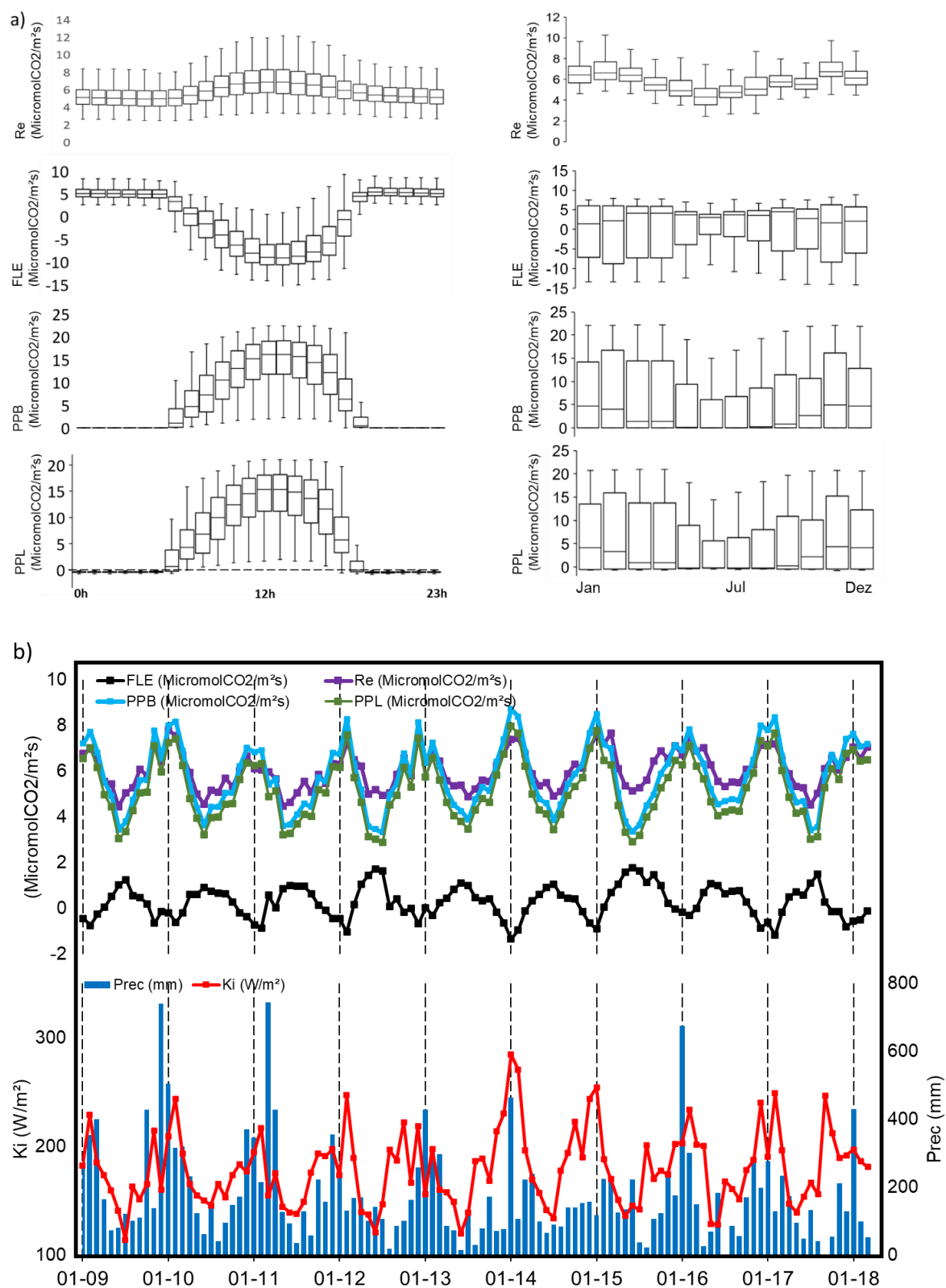


Figura 26. a) Ciclo diurno médio (à esquerda) e ciclo sazonal (à direita) das séries FLE, PPB e PPL calculadas pelo modelo SiB2, Re (modelo exponencial) para SVG no intervalo de 2009 a 2018 JFM; b) Série temporal da média mensal FLE, PPB, PPL (calculadas pelo modelo SiB2), Re (modelo exponencial), Precipitação e irradiância de

onda curta incidente (K_i) (dado observado) para SVG no intervalo de 2009 a 2018 JFM. As linhas verticais tracejadas indicam o início de cada ano.

Tabela 5. Valores de PPB observada e calculada (SiB2) para SVG, e valores PPB e PPL para regiões de floresta tropical úmida perenifólia.

Fonte	Método e local	Média PPB (gC/m ² d)	Média PPL (gC/m ² d)
Este estudo	Micrometeo (site SVG, mata atlântica)	6.0	5.3
Alberton et al., (2023)	Micrometeo (site SVG, mata atlântica)	5.2	4.6*
Hutyra et al., (2008)	Micrometeo (site k67, Amazonia, Belterra, PA)	8.0	7.1*
Clark et al., (2001)	Inventario global de parcelas de campo	3.9*	3.5
Ajtay et al., (1979)	Inventario global de parcelas de campo	2.3*	2.1
Roy et al., (2001)	Inventario global de parcelas de campo	3.8*	3.4

5. Resultados e discussão PEG

5.1. Caracterização Climática PEG

Discute-se a variabilidade climática no intervalo de 2001 a 2019 segundo as médias mensais das medições de campo (figura 27). As variáveis meteorológicas e os fluxos de calor mostraram sazonalidade marcante, segundo a pronunciada diferença de precipitação média entre as épocas secas e chuvosas (tabela 6). Neste sentido as médias mensais no inverno e no verão, respectivamente, variaram para a irradiância solar incidente de ≈ 150 a 300 (W/m^2) (Figura 27a), para a temperatura entre $\approx 17^\circ\text{C}$ a 26°C , para a pressão de vapor d'água entre ≈ 10 a 21 hPa (Figura 27c), e para a velocidade do vento entre $\approx 3,5$ a 2 m/s (Figura 27d).

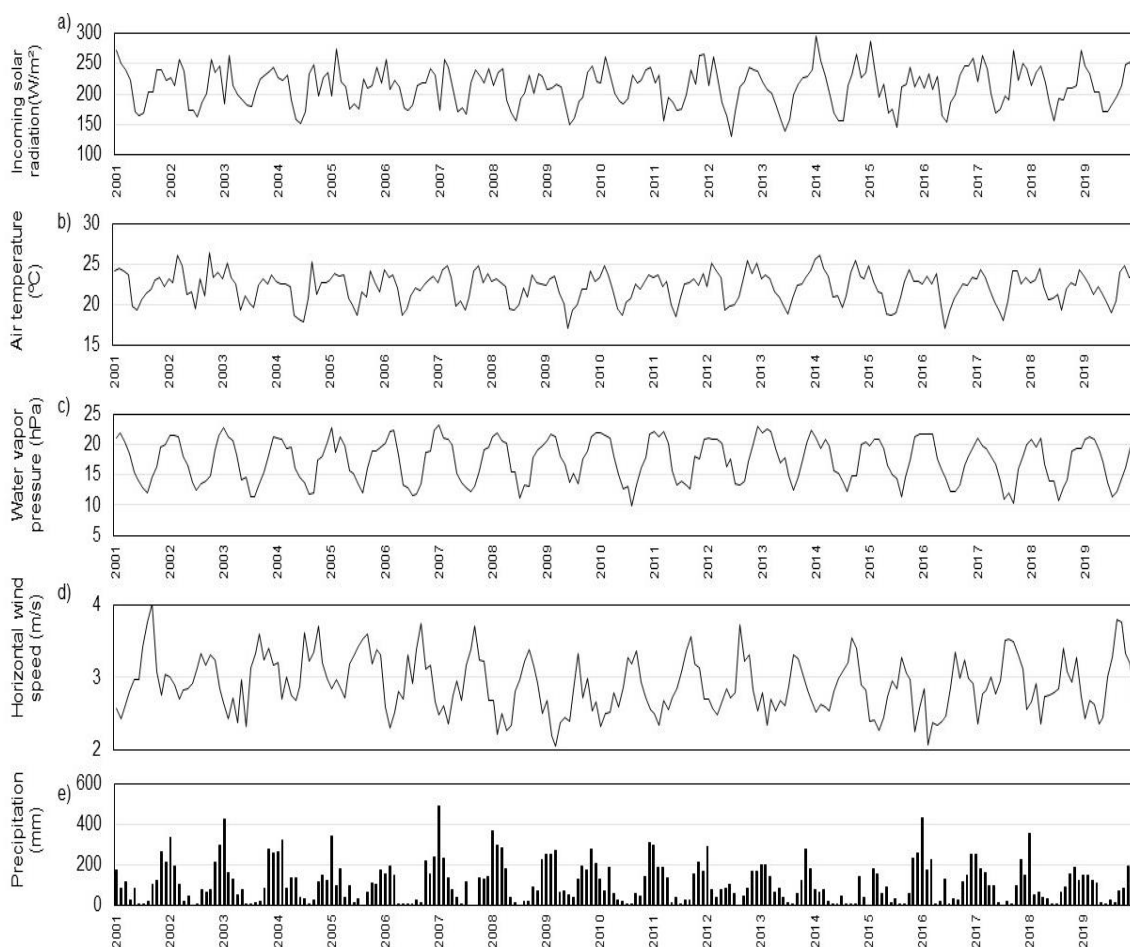


Figura 27. Média mensal das variáveis meteorológicas medidas na torre do Cerrado PEG para os anos de 2001 a 2019: a) irradiância de onda curta incidente

(W/m²); b) temperatura do ar (°C); pressão de vapor d'água (hPa); c) velocidade horizontal do vento (m/s) e e) precipitação (mm).

Tabela 6. Média de longo prazo de variáveis meteorológicas e de fluxos, referente ao período avaliado de 2001 a 2019, para o PEG.

	Temperatura do ar (°C)	Precipitação (mm)	Rn (W/m ²)	LE (W/m ²)	H (W/m ²)	G (W/m ²)	ET (mm/d)	Et (mm/d)	Es (mm/d)	Ei (mm/d)
Anual	22.1	1309	141.5	96.9	51.6	-1.8	3.4	2.3 (68%)	0.7 (20%)	0.4 (12%)
Estação chuvosa	23.25	1108	169.2	127.0	50.3	-1.6	4.0	2.6 (65%)	0.9 (22%)	0.5 (13%)
Estação seca	20.0	128	114.4	66.1	51.6	-2.0	2.2	1.7 (77%)	0.3 (14%)	0.2 (9%)

A chuva mostrou média de 1309 mm/a em todo intervalo (Figura 27e), que foi portanto abaixo da abaixo da normal climatológica (1478 mm/a) (Figura 28 linha azul). Este desvio foi mais recorrente a partir do ano 2010, quando a chuva foi acima da normal apenas no ano 2016. Foi notável o ano de 2014 como o maior desvio negativo, de 488 mm/ano, que por sua vez foi seguido por vários anos de chuva abaixo da média, prolongando-se 2019 (Figura 28). Em todo o intervalo a temperatura média foi de 22.1°C (Figura 28). Na ocasião da seca meteorológica de 2014, nota-se a maior média anual, de 23.2°C.

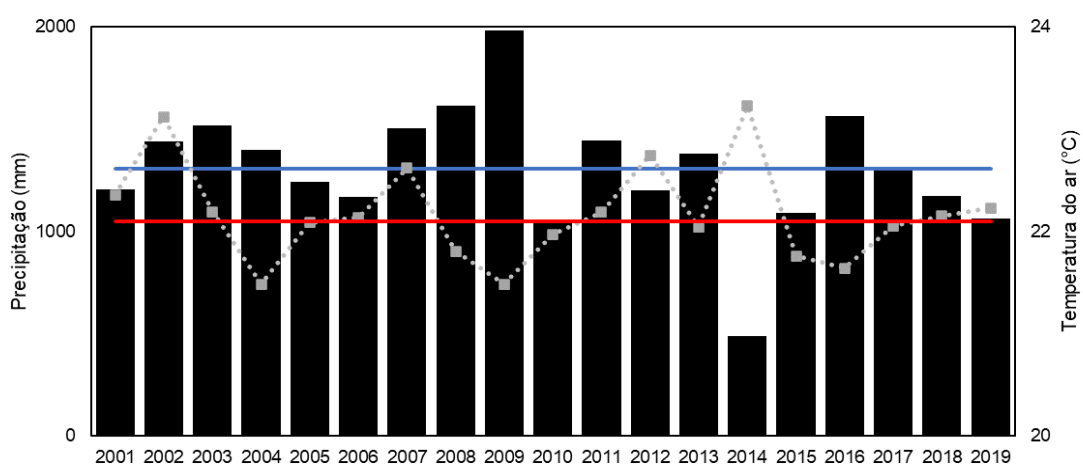


Figura 28. Média anual da temperatura do ar em tracejado (°C) e precipitação (mm – barras), referentes ao sítio experimental PEG para os anos de 2001 a 2019, contendo a média da temperatura em vermelho (°C) (linha vermelha) e a normal climatológica de precipitação (linha azul).

No ciclo diurno médio, a irradiância de onda curta incidente (Figura 29a), é caracterizada por um aumento gradual após o nascer do sol, atingindo o máximo próximo ao meio dia, seguido por um declínio gradual até o por do sol. No período chuvoso, o ângulo de elevação solar é menor em comparação com o período seco, o que resulta em uma distribuição mais ampla da radiação ao longo do dia (Figura 29a). Além disso, a maior presença de nebulosidade (JFM) principalmente no período da tarde, pode levar a uma maior variabilidade horária na irradiância, com períodos de aumento e diminuição de acordo com o deslocamento das nuvens.

Nota-se para pressão de vapor d'água e temperatura do ar o efeito de grande sazonalidade, com máximos em JFM e mínimos em JJA de acordo com a disponibilidade radiativa. As medianas de pressão de vapor d'água encontram-se em aproximadamente 22 hPa em JFM e 12 hPa em JJA.

Para a temperatura do ar (JFM) (Figura 29c), desde o amanhecer até a máxima diária, a mediana varia entre aproximadamente 22°C até 28°C, enquanto em JJA há maior amplitude diária, variando entre aproximadamente 15°C a 25°C, como esperado devido à menor nebulosidade e umidade do ar.

A umidade relativa do ar a mediana diária mínima variou entre aproximadamente 37% em JJA, mas com muitos eventos atingindo 20%, e em JFM em torno de 60%, com extremos até 40% (Figura 29e).

A velocidade do vento apresentou magnitude diária um pouco superior em JJA (Figura 29d), em torno de 3,5 m/s mas com muitos eventos atingindo 5 m/s, e também maior amplitude diária quando comparada com JFM, que mostrou mediana de aproximadamente 2,5 m/s, como esperado devido à sazonalidade dos padrões de vento de grande escala.

A amplitude do ciclo diurno (Figura 29) tem influência dos controles de grande escala atmosférica, mas também tipicamente o controle de características locais do sistema solo-vegetação, que estimulam ou limitam os fluxos de energia e CO₂ na variabilidade temporal horária. Dentre os controles locais destacam-se a sazonalidade da senescência e dormência do estrato arbóreo e herbáceo do Cerrado. A umidade do solo (discutida detalhadamente nos dois capítulos seguintes), também pode ser citada como exemplo de controle local, pois a menor oferta de água no solo reduz fortemente a magnitude da ET, fato observado no evento de seca 2014-2015 (Figura 35).

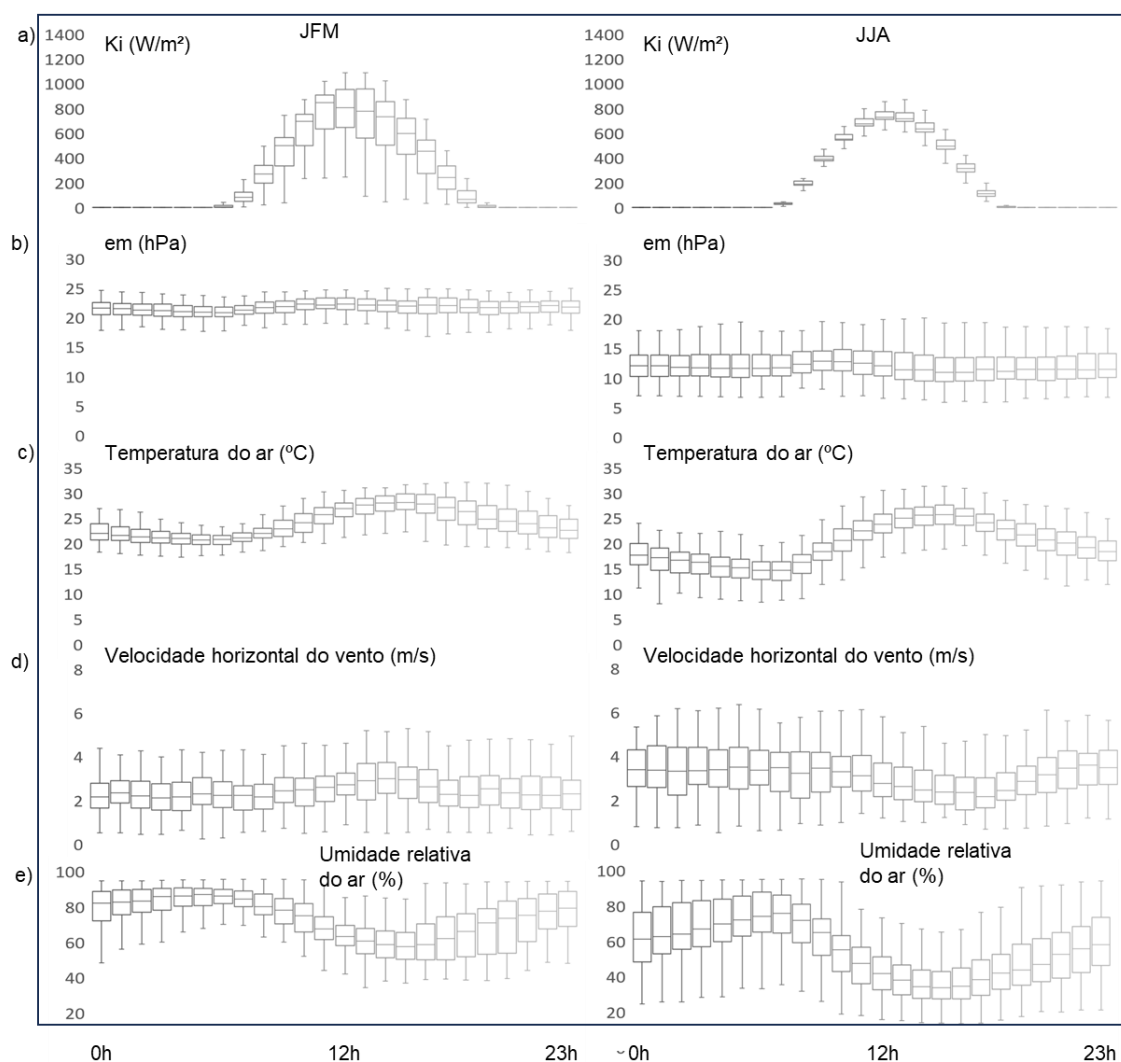


Figura 29. Boxplot do ciclo diurno de: a) irradiância de onda curta incidente (W/m^2), b) pressão de vapor d'água (hPa), c) temperatura do ar ($^{\circ}C$), d) velocidade horizontal do vento (m/s) e e) umidade relativa do ar (%), referentes ao sítio experimental PEG, para os anos de 2001 a 2019.

5.2. Umidade do Solo PEG

Comparou-se a variação sazonal da umidade do solo medida pelo CRNS com as medições do FDR estimadas como média entre as profundidades de 10 a 100 cm (denominada FDR10-100 cm), e como média entre as profundidades de 150 a 200 cm (denominada FDR150-200cm), conforme a figura 30, para o período comum de dados (2012 a 2017). A sazonalidade do SWI demonstra um padrão de variabilidade semelhante do SWI do CRNS com o FDR10-100 cm. Estas estimativas mostraram o mínimo SWI sazonal geralmente distribuído de julho a setembro, a recarga do solo a partir do início da estação chuvosa em

outubro e indo até dezembro, e finalmente atingindo o máximo em janeiro, que coincide com o mês mais chuvoso (Figura 30). A partir de janeiro há uma depleção suave da umidade do solo, tanto no CRNS quanto no FDR10-100 cm. Para as maiores profundidades, o padrão do FDR150-200 cm mostrou que a recarga do solo é mais lenta, indo até novembro (Figura 30). Este atraso na recarga do perfil da umidade do solo em profundidade também foi reportado por Bruno et al., (2004) no mesmo local, o que parece típico em regiões tropicais de solos bastante permeáveis, como também foi notado em solo e vegetação de floresta úmida na Amazônia por Bruno et al., (2006).

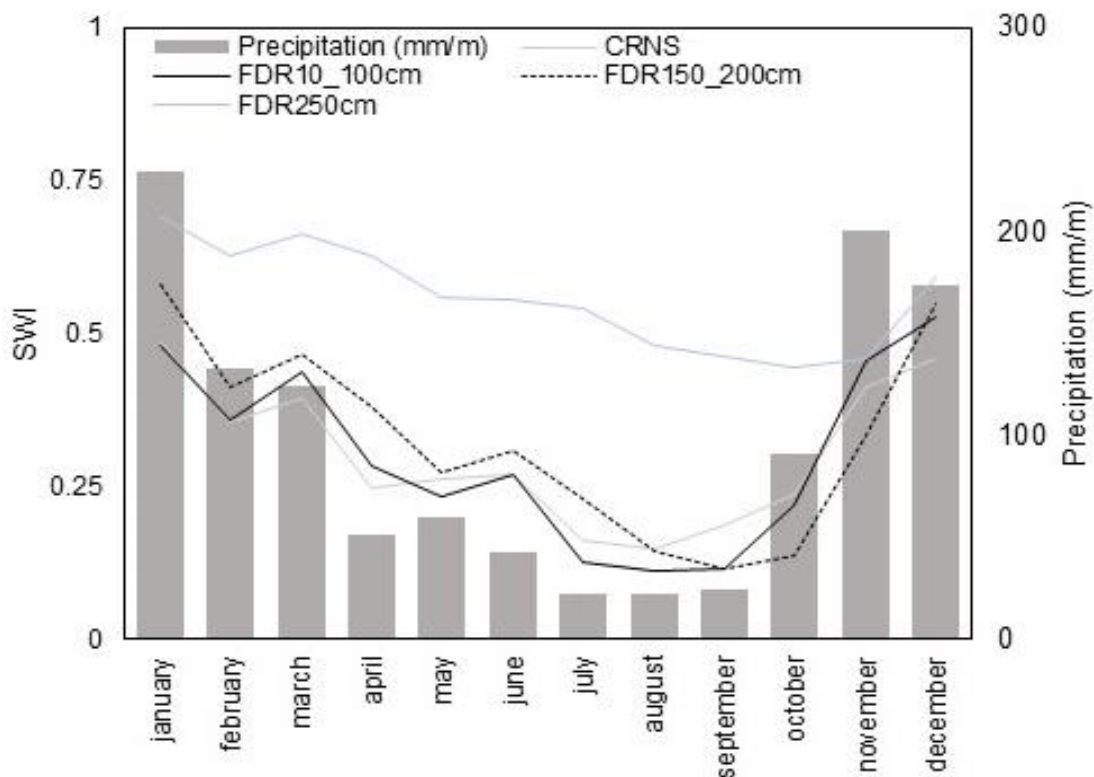


Figura 30. Média mensal de precipitação (mm), SWI (CRNS e FDR) no sítio experimental PEG, para a camada média 1 (FDR10_100cm) incluindo os níveis de 10, 20, 50, 80, 100 (linha preta), camada média 2 (FDR150_200cm) incluindo os níveis 150 e 200cm (tracejado preto) e 250cm (linha azul claro), CRNS referentes ao período comum de dados.

Com esta distinção de padrão sazonal acima e abaixo da profundidade de 100 cm, por objetividade estimou-se a umidade média dos sensores FDR em 2 camadas, chamando de camada 1 nos níveis mais rasos, calculada como a média entre os níveis de 10 a 100cm, e de camada 2 nos níveis mais profundos, calculada como a média entre 150 e 200cm. Também restringimos o cálculo do

SWI médio anual das camadas 1 e 2 respectivamente aos meses JFM, Julho-Agosto-Setembro (JAS) e Outubro-Novembro (ON), que correspondem às fases de máximo sazonal de umidade, mínimo sazonal, e padrão recarga do solo.

Conforme a figura 31a, nota-se a variabilidade interanual da umidade do solo nestas diferentes camadas do solo, em todas estas fases do ano, quando houve uma marcante depleção de umidade no ano de 2014.

De forma geral todas as camadas, em todas as fases do ano, ora estimada pelo FDR (Figura 31a) ou pelo CRNS (Figura 31b), mostraram uma redução brusca devido à seca meteorológica. Nota-se que o caso mais sensível à perturbação da seca foi o SWI na fase JAS, ou seja, na fase de mínimo sazonal, notado para ambas as camadas rasa 1 e profunda 2, estimada pelo FDR. Neste caso a queda de umidade na estação seca se prolongou nos anos seguintes (2016 e 2017), na medida em que não houve uma recuperação comparável aos níveis anteriores a 2014.

Nos demais casos houve aparentemente uma recuperação proporcional à quantidade de chuva a partir de 2015. Para a estimativa de SWI pelo CRNS (Figura 31) nota-se o mesmo padrão, ou seja, na fase JAS houve uma depleção de umidade a partir de 2014, enquanto que nas demais fases do ano houve uma recuperação.

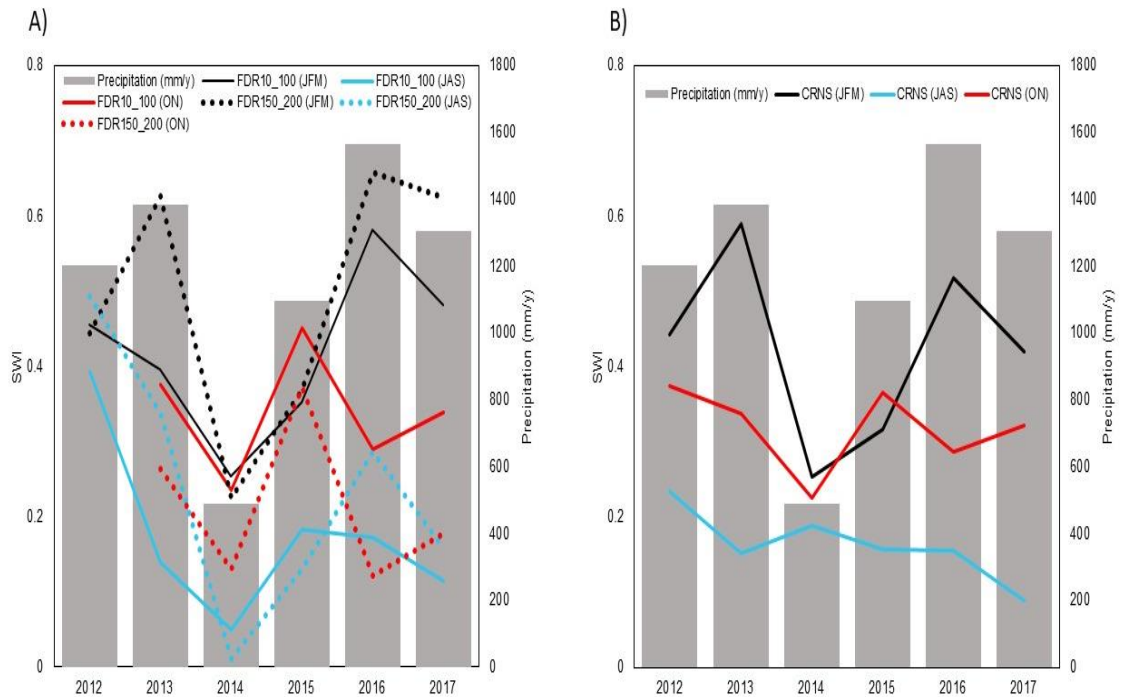


Figura 31. Precipitação acumulada (barra cinza, em mm a-1) e SWI médio anual com medições no sítio experimental PEG. A camada média 1 inclui os níveis de 10 a 100 cm e a camada média 2 nos níveis de níveis de 150 e 200cm, estimadas para 3 fases do ano, correspondente aos meses JFM (linhas preta sólida e pontilhada), Julho-Agosto-Setembro (JAS - linhas azul sólida e pontilhada)) e Outubro-Novembro (ON – linhas vermelha sólida e pontilhada), para (A) medições do FDR e (B) medições do CRNS (só camada 1)

5.3. Fluxos atmosféricos de calor e água PEG

Na média de todo o intervalo entre 2001 a 2019 (Figura 32), a evapotranspiração ET calculada pelo modelo SiB2 é particionada em 3 componentes, $ET = Et + Es + Ei$, mostrou a transpiração (Et) com maior contribuição de 68%, e predominantemente no período diurno (Figura 32b), enquanto a evaporação do solo Es e a interceptação Ei representaram 20% e 12% respectivamente.

Comparativamente na região PEG, Domingues (2014) encontrou valores apenas ligeiramente diferentes, com a transpiração de aproximadamente 60%, seguida da interceptação (22%) e evaporação do solo (17%). Em termos da variação sazonal, a partição das componentes é próxima da média anual durante a estação chuvosa, porém na estação seca as percentagens se alteram um pouco, com queda de Es (11%) e Ei (7.5%), enquanto Et aumenta (81%) (Figura 32a). A queda na estação seca de Es e Ei decorre claramente da redução das chuvas e da umidade do solo superficial, esta última sendo o principal limitante de Es.

Apesar da diferença de intervalo temporal na estimativa de ET neste trabalho (2001-2019) e o de Cabral et al., (2015) (2009-2012), o total anual de 3.46 mm/d (tabela 6) foi próximo ao dos autores de 3.36mm/d.

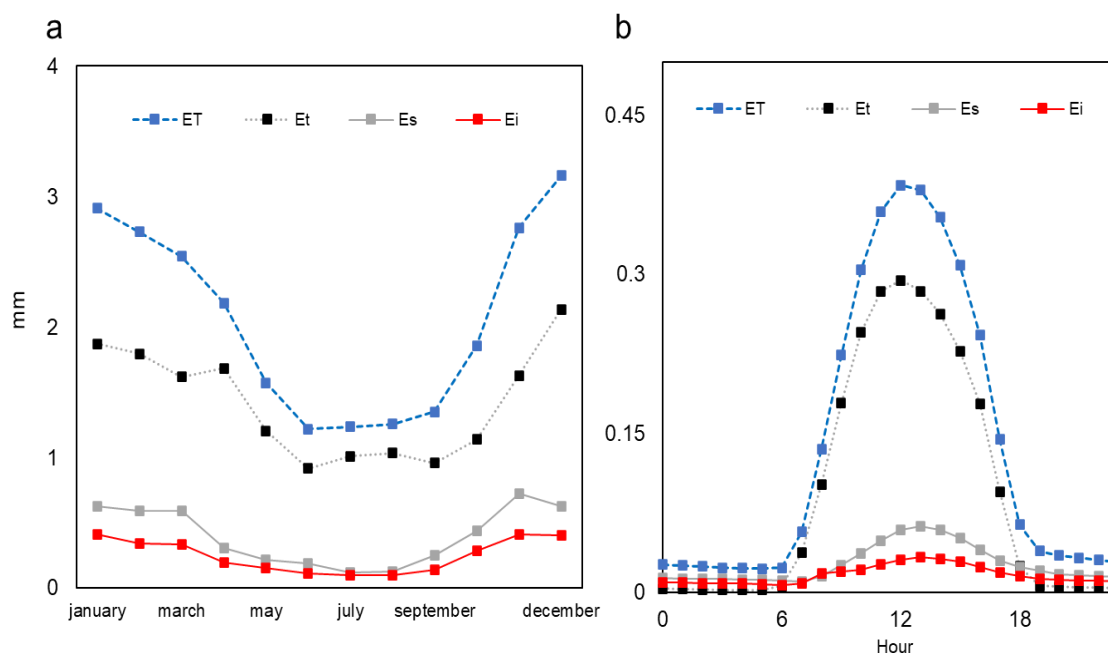


Figura 32. Ciclo mensal médio (a) e diário (b) da evapotranspiração (ET), Et (transpiração), Es (evaporação do solo) e Ei (perda por interceptação da chuva), calculado pelo modelo SIB2 para o PEG, referente aos anos de 2011 a 2019.

O saldo de radiação, LE e H, mostram claro padrão sazonal caracterizado por contraste entre as épocas úmidas e secas e significativa diferença de magnitude entre LE e H (Figura 33).

Durante os meses mais quentes e úmidos, o saldo de radiação é maior impulsionado pela maior disponibilidade energética, e aliado a maior oferta de umidade do solo (Figura 30), contribuem para os valores máximos do fluxo de calor latente. Observa-se, uma variação da mediana diária de LE próximo a 125 W/m², com grande amplitude dos valores máximos e mínimos. Neste período, o fluxo de calor sensível tende a ser menor devido a menor diferença de temperatura entre o solo e a atmosfera (Figura 33).

No inverno e ao final da estação seca (agosto-setembro), nota-se valores máximos de H variando entre aproximadamente 50 a 80 W/m², enquanto LE apresenta os valores mínimos próximos a 60 W/m² e baixa amplitude (Figura 33). A diminuição da oferta energética refletida pela atenuação de Rn, assim como a redução da precipitação (tabela 6), são os principais agentes para a configuração apresentada no período seco.

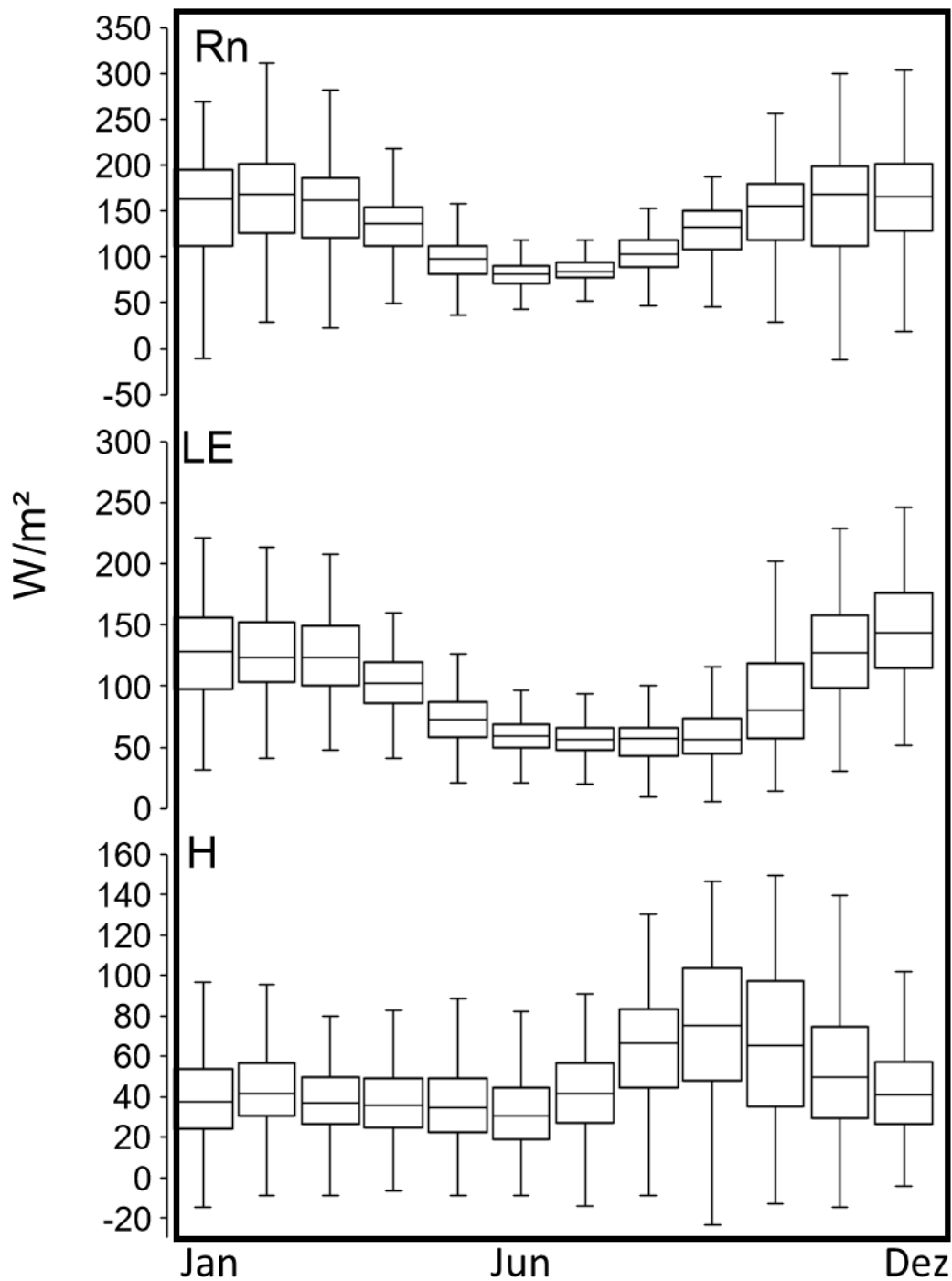


Figura 33. Boxplot da série temporal diária dos fluxos R_n (W/m^2), LE (W/m^2) e H (W/m^2) para o PEG, no intervalo de 2001 a 2019.

Uma forte oscilação no padrão temporal dos termos LE e H ocorreu particularmente por ocasião da seca meteorológica no ano de 2014, prolongado até 2015. Na estação seca de 2014 e de 2015 o termo LE caiu pronunciadamente e o termo H teve picos acima dos notados em outros anos, o que provocou picos

muito altos na razão de Bowen e mínimos pronunciados na FE. Em outros eventos de oscilação temporal dos termos LE e H como na estação seca de 2012 e 2017, também nota-se perturbação na razão de Bowen e FE (Figura 34).

O que aparentemente houve de comum nos eventos de 2014-15 foi uma redução da umidade do solo média mensal, na comparação interanual, tanto na estação chuvosa como na estação seca (Figura 34). De forma geral o efeito da seca manifestada em 2014 prolongou-se até o ano seguinte, manifestado na partição dos fluxos de energia durante a época da estação seca, apesar da seca meteorológica já ter sido finalizada.

Nestes picos pronunciados da razão de Bowen, a energia disponível foi utilizada predominantemente para aquecer a superfície, concorrente com o aumento do fluxo de calor sensível, fato reforçado pelo comportamento de FE que apresentou valores mínimos de sua série, em contrapartida aos máximos da razão de Bowen. De forma geral em todo o intervalo temporal, β foi de aproximadamente 0.25 na estação chuvosa, com um padrão interanual aparentemente estacionário, e com pico anual de aproximadamente 1 no final da estação seca (Figura 34). Especialmente nos eventos anômalos associados à seca meteorológica, notou-se durante a estação seca que β foi acima de 2 em 2014 e acima de 4 em 2015, como uma forma de oscilação interanual do sistema. No estudo entre 2009 e 2012, Cabral et al., (2015) não reportaram estimativas de β acima de 2, o que veio a se manifestar somente depois com o evento da grande seca.

Como destaque na figura 35, percebe-se para o período da seca meteorológica, H consideravelmente superior aos demais anos, tendo destaque principalmente entre o período chuvoso (setembro-abril). Concomitantemente, percebe-se a relação inversa entre o fluxo de calor latente e sensível. Essa relação inversa também é observada para na análise comparativa entre as componentes da evapotranspiração (E_s+E_i) e o fluxo de calor sensível (Figura 35). Nota-se que não houve limitação energética (R_n) durante a seca meteorológica (Figura 35). Essa constatação reforça que a redução da precipitação, discutida anteriormente, foi o fator preponderante na perturbação dos fluxos.

A análise sazonal dos fluxos de energia, calor e componentes da ET (Figura 35) mostra claramente que a partição do saldo de radiação favorece de

forma dominante o fluxo de calor latente em relação ao fluxo de calor sensível, com ênfase no período chuvoso. No período seco percebe-se maior proximidade dos fluxos, ocasionada pelo aumento da magnitude de H e redução LE em virtude dos fatores limitantes como redução da precipitação.

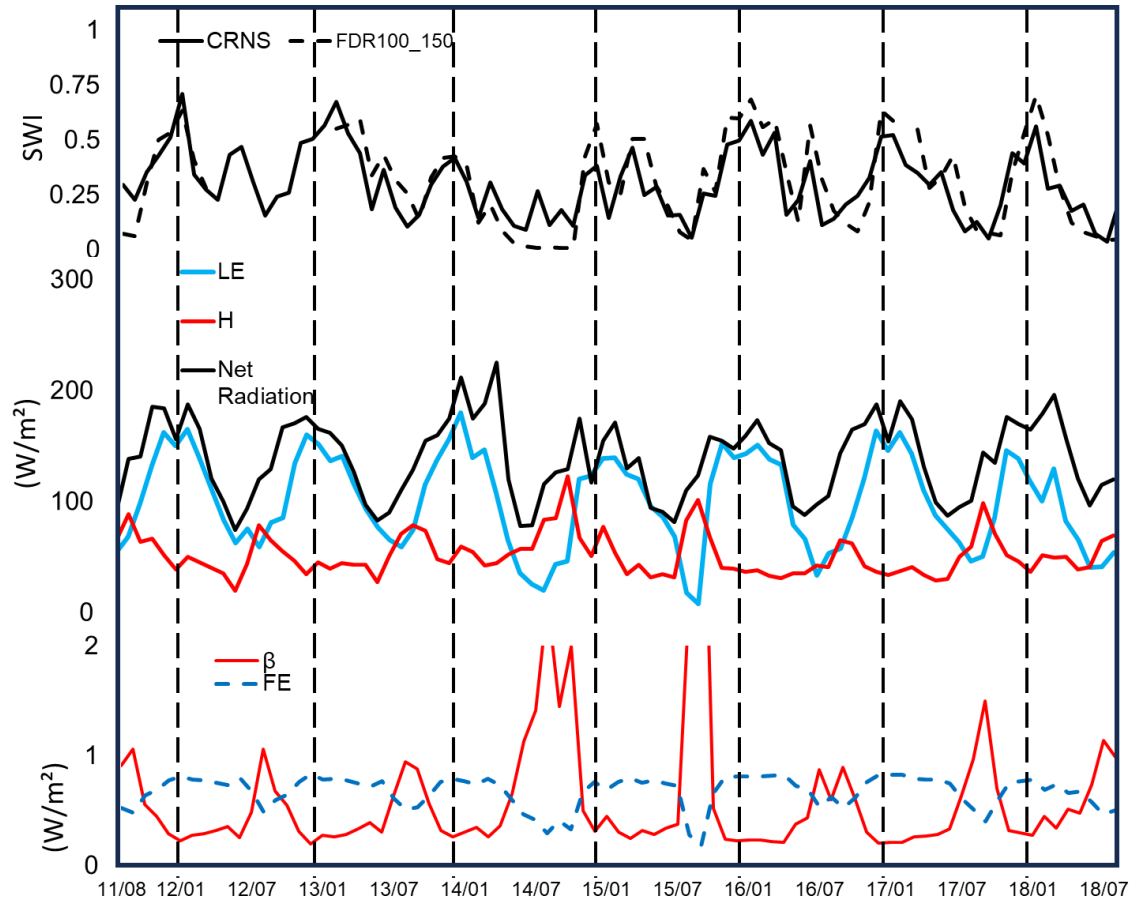


Figura 34. Média mensal de SWI FDR100_150 (nível profundo), CRNS (nível raso), saldo de radiação (W/m^2) em preto, fluxo de calor latente (W/m^2) (LE) em azul, sensível (W/m^2) (H) em vermelho, razão de Bowen e FE referente ao sítio experimental PEG para os anos de 2011 a 2018. As linhas verticais tracejadas indicam o início de cada ano.

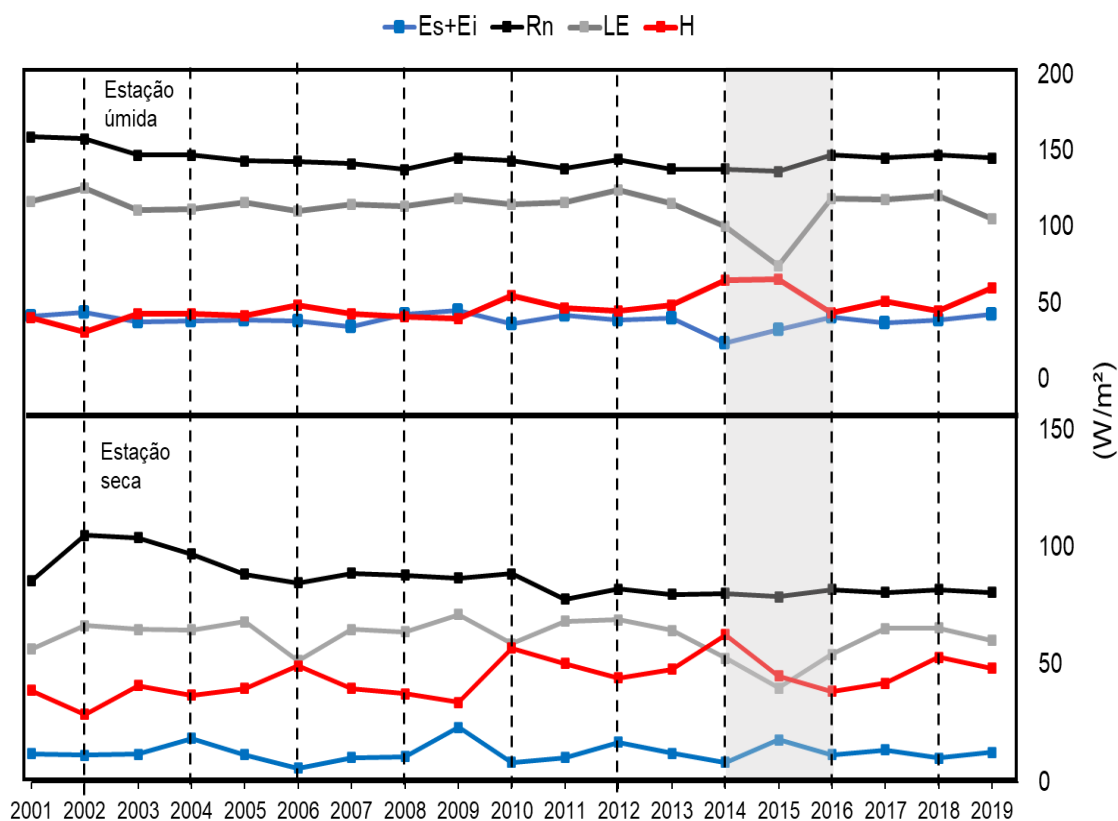


Figura 35. Média Mensal para o período úmido e seco, referente ao fluxo de calor sensível (H) (W/m^2), latente (LE) (W/m^2), somatório das componentes Es (evaporação do solo) e Ei (perda por interceptação da chuva) para o período de 2001 a 2019 no PEG. As linhas verticais tracejadas indicam o início de cada ano.

Resumidamente, temos por estes resultados notado a marcada influência da umidade do solo na estimativa da ET, que se manifestou em escala sazonal, e também na escala interanual com propagações temporais de forma bastante clara, mas talvez ainda pouco simples de se prever com modelos simples. Há neste aspecto algumas limitações a se esclarecer. Já se reconhece como a ET é fortemente relacionada com a oferta de energia disponível no ecossistema do Cerrado (DA ROCHA et al., 2009; CABRAL et al., 2015), mas que também a umidade do solo é covariada com o saldo de radiação, o que presume um controle complexo e mutuamente dependente de influências em que as variáveis não respondem isoladamente pelo controle.

Parte deste entendimento é possivelmente explicado por sua modificação fenológica sazonal, que durante o final da estação chuvosa até a estação seca, manifesta a senescência foliar na maioria das suas espécies arbóreas, e no estrato herbáceo manifesta a dormência, o que contribuiu para

redução da capacidade fotossintética da vegetação, da absorção de CO₂ e, portanto, da transpiração (DA ROCHA et al., 2002; 2009; VOURLITIS e DA ROCHA 2011).

Trata-se assim parcialmente de um sistema de vegetação com conhecidas características adaptativas para tolerância ao estresse hídrico. Esta constituição variante temporalmente do sistema foliar do Cerrado pode ser a explicação para alguns eventos que medimos, quando o aumento da umidade do solo não produziu efeitos proporcionais na ET. Por exemplo, nota-se a ocorrência de vários eventos de chuva isolados no tempo, mas restritos ao longo da estação seca, que desdobram-se em expressivos pulsos de umidade do solo por vários dias, como em Junho/2013, Julho/2014 e Junho/2017.

Perturbações como a ocorrência de fogo, no ecossistema do Cerrado, são comuns, com posterior regeneração (KLINK et al., 2005), podendo mudar a fisionomia do cerrado para campos abertos (MIRANDA et al., 2002), e assim afetar o balanço hídrico (BELCHER, 2013). Não temos registros de queimada no sítio do PEG desde aproximadamente 50 anos atrás, e foi descartada a priori este tipo de influência nas nossas medições.

6. Comparação entre os ecossistemas de Mata Atlântica (SVG) e Cerrado (PEG)

De forma comparativa, a tabela 7 mostra que os valores médios das variáveis meteorológicas e fluxos de energia nos ecossistemas da Mata Atlântica (SVG) e do Cerrado (PEG), e apresentam diferenças marcantes que refletem características distintas.

Tabela 7. Médias de longo prazo referentes a precipitação e fluxos de energia, anualmente e para as estações seca e chuvosa em SVG e PEG. Células hachuradas em cinza mostram o máximo comparativo entre os sítios experimentais.

Variável	Mata Atlântica (SVG)	Cerrado (PEG)
Precipitação (mm/ano) (Anual)	2152.4	1309
Seco / Chuvoso	784.8 / 2290.0	128 / 1108
Amplitude Sazonal	1505.2	980
Saldo de Radiação (W/m ²) (Anual)	107.4	141.5
Seco / Chuvoso	89.7 / 125.1	114.4 / 169.2
Amplitude Sazonal	35.4	54.8
Fluxo de Calor Latente (W/m ²) (Anual)	83.0	96.9
Seco / Chuvoso	67.3 / 98.8	66.1 / 127.0
Amplitude Sazonal	31.5	60.9
ET (mm/d) anual	2.9	3.4
ET (mm/d) Seco / Chuvoso	2.3 / 3.4	2.3 / 4.4
Fluxo de Calor Sensível (W/m ²) (Anual)	28.8	51.6
Seco / Chuvoso	24.7 / 31.0	51.0 / 50.3
Amplitude Sazonal	-8.3	0.7
Razão de Bowen β (anual)	0.34	0.53
Seco / Chuvoso	0.36 / 0.31	0.77 / 0.39
Amplitude Sazonal	0.05	0.38
Fração evaporativa FE=LE/(LE+H) (anual)	0.74	0.65
Seco / Chuvoso	0.73 / 0.76	0.56 / 0.71
Amplitude Sazonal	0.03	0.15

Observa-se na precipitação uma disparidade entre os dois locais, na Mata Atlântica a precipitação média anual é muito superior, o que está em consonância com as características de floresta nebulosa, a 1000 m de altitude e próxima da costa. Em contraste, a área de Cerrado é caracterizada por

topografia mais plana e mais distante do litoral, com temperatura média aproximadamente 4° C superior, de menor precipitação e estação seca mais bem definida (tabela 7).

Para o saldo de radiação, no Cerrado o valor é maior igual a 142 W/m², comparado à 107 W/m² no SVG, devido à maior nebulosidade no sítio de Mata Atlântica, que é uma floresta nebulosa, condicionada pela incidência da brisa marítima na encosta da Serra do Mar e que promove a formação de neblina e nebulosidade de forma geral em uma estreita faixa paralela à costa na região do alto planalto, onde se encontra a área experimental.

Em ambos os sítios, os fluxos H e LE mostram pronunciada dependência do saldo de radiação na variabilidade diurna e sazonal. De forma simples, as médias de ET e H mostraram-se assim coerentemente superiores na área do Cerrado PEG (tabela 7), iguais a aproximadamente 3.4 mm/d e 52 W/m², comparadas com 2.9 mm/d e 29 W/m² no SVG.

É também no site PEG que ocorre a maior sazonalidade dos fluxos de energia H e LE, e que se estende também para a partição de energia média anual. A amplitude sazonal de LE, ou diferença entre média da estação chuvosa e seca, é de aproximadamente 61 W/m² no PEG, comparado com 32 W/m² no SVG. Com relação à partição de energia, a média e amplitude anual da razão de Bowen (β) foram de 0.53 e 0.38 no Cerrado PEG, maiores que na Mata Atlântica iguais a 0.34 e 0.05 respectivamente (Tabela 7).

Ainda com relação à partição de energia, para a fração evaporativa $FE = LE/(LE+H)$, por conseguinte a média foi inferior no Cerrado PEG, mas a amplitude anual foi superior, ou seja, iguais a 0.65 e 0.15 no Cerrado PEG, comparadas com a Mata Atlântica SVG iguais a 0.74 e 0.03 respectivamente (Tabela 7).

7. Conclusão

Este estudo buscou um entendimento amplo o possível dos fluxos superfície-atmosfera de calor, água e CO₂ em áreas experimentais de mata atlântica e cerrado no estado de SP, utilizando um conjunto de medições automáticas de campo no longo prazo, e modelos de processos biofísicos para preenchimento de falhas, de forma a viabilizar uma análise da variabilidade sazonal e interanual dos padrões microclimáticos, da partição de energia e do balanço de CO₂.

As duas áreas de estudo são muito distintas quanto ao clima e vegetação, o sitio PEG em Cerrado denso localizado a ≈ 300 km da costa e 700 m a.s.l, de médias de temperatura do ar $\approx 22,5$ °C e precipitação 1300 mm/a, e o sitio SVG em floresta de mata atlântica nebulosa, localizado a ≈ 20 km da costa e 1000 m a.s.l, de médias de temperatura do ar $\approx 16,0$ °C e precipitação 2200 mm/a. Trata-se de uma área muito úmida, chuvosa e fria de Mata atlântica quando comparada com a área de Cerrado.

As diferenças do balanço de energia entre as áreas mostram um padrão muito definido pela energia radiativa disponível e pela sazonalidade do clima e da vegetação. Como média anual, o saldo de radiação R_n no Cerrado é 142 W/m² e assim superior se comparado a 107 W/m² na Mata atlântica, o que repercute diretamente na evapotranspiração ET e fluxo de calor sensível H, de 3.4 mm/d e 52 W/m², comparadas com 2.9 mm/d e 29 W/m², respectivamente.

Apesar da ET (ou LE) superior no Cerrado, a fração evaporativa foi maior na Mata atlântica, e de menor sazonalidade se baseada na amplitude anual, de 0.74 e 0.03 respectivamente, comparadas com 0.65 e 0.15 no Cerrado. Coerentemente, a média e amplitude anual da razão de Bowen ($\beta = H/LE$) foi maior no Cerrado, igual a 0.53 e 0.38, comparado com 0.34 e 0.05 na Mata Atlântica respectivamente.

Este padrão de variabilidade da partição de energia é em parte coerente com a dependência e variação de R_n . E também devido às características fenológicas do Cerrado, que reduzem a capacidade fotossintética e transpiração na estação seca, levando eventualmente à senescência das árvores e dormência de gramíneas, em oposição à Mata atlântica, que tem estrutura

melhor definida como arbórea e arbustiva de característica perenifólia. Apesar da fenologia da vegetação do Cerrado levar à mínima capacidade transpirativa exatamente por ocorrência da estação seca, a diferença de ET entre as duas áreas deu-se na estação úmida. Mais exatamente, na estação seca/úmida respectivamente a ET média foi de 2.3 / 3.4 mm/d na Mata atlântica, e de 2.3 / 4.4 mm/d no Cerrado.

A investigação do papel da umidade do solo na variabilidade temporal da evapotranspiração no Cerrado PEG, corroborada por dois sistemas de medição independentes, mostrou a dimensão e extensão do impacto da seca meteorológica na partição de energia. A umidade do solo foi marcada por uma pronunciada anomalia negativa em 2014, que provocou um aumento da razão de Bowen, e que prolongou-se até o ano seguinte durante a estação seca, apesar da seca meteorológica já finalizada.

Para a Mata Atlântica/SVG, este estudo enfatizou o balanço de CO₂ e testou a condição de clímax de produtividade vegetal ($PPB = Re$) para ajustar o modelo de preenchimento de falhas, o que levou a diagnósticos de produtividade que de forma geral superestimaram as médias de inventários de parcelas de campo. Este resultado provavelmente decorre de um modelo de Re superestimado, que por sua vez condiciona uma PPB e PPL superestimadas, o que a propósito foi detectado na otimização da eficiência do uso da água WUE . Se faz necessária uma avaliação posterior da calibração, buscando uma melhor otimização do WUE diurno e dos fluxos de CO₂ noturnos conjuntamente, na tentativa de comparar melhor com a literatura. Parte desta incerteza também decorre das limitações da medição experimental, como falhas dos dados brutos no campo e a ocorrência de fluxos de difícil mensuração devido à topografia complexa.

No que concerne à sazonalidade da produtividade vegetal, os resultados da Mata atlântica mostraram uma certa construção em relação aos estudos anteriores (Freitas, 2012; Alberton et al., 2023). Em concordância com a disponibilidade energética, FLE e PPB apresentaram sazonalidade marcante, com maior atividade nos trimestres quentes e úmidos em comparação aos trimestres secos e amenos em SVG.

De forma geral os achados deste estudo vão de encontro ao entendimento dos padrões de funcionalidade hídrica, energética e de

produtividade das florestas no Brasil, para ecossistemas no Cerrado e Mata Atlântica. Em particular, trata-se da quantificação de variáveis e índices hidroclimatológicos baseados em medições de campo, de reconhecida importância para a validação de modelos do sistema climático terrestre, que por sua vez propiciam um entendimento da interação dos ecossistemas com o clima e suas diversas formas de oscilação e mudança. Este entendimento pode trazer implicações para definir estratégias de conservação e gestão sustentável da biodiversidade, e de quantificação e valoração de seus serviços ecossistêmicos.

8. Sugestão para trabalhos futuros

Como sugestão de continuidade deste trabalho, sugerimos:

- Estimar o FLE para o sítio experimental PEG e avaliar o balanço de CO₂, utilizando o método dhe estabelecido em SVG proporcionalmente à altura do dossel e da medição;
- Replicar a metodologia de avaliação dos fluxos de energia e CO₂, para um novo sítio experimental de área antropizada na Mata Atlântica em Extrema (EXT) – Minas Gerais (Chittolina et al., 2022);
- Integrar os parâmetros variantes espaciais provenientes da rotina Mapper, na calibração e simulação do modelo SiB2-regional, para os sítios experimentais de SVG, PEG e EXT;
- Refinar a resolução espacial de variáveis climáticas como temperatura do ar, baseado em modelos estatísticos (Martin et al., 2020), e avaliar efeitos topográficos nas estimativas de evapotranspiração no modelo SiB2-regional

9. Referências

ADAMS, B.; WHITE, A.; LENTON, T. M. An analysis of some diverse approaches to modelling terrestrial net primary productivity. *Ecological Modelling*, v. 177, p. 353-39, 2004.

AJTAY, G. L.; KETNER, P.; DUVIGNEAUD, P.; BOLIN, B.; DEGENS, E. T.; KEMPE, S. The global carbon cycle. *SCOPE*, v. 13, p.129-18,1979.

ALBERTON, B.; MARTIN, T. C. M.; DA ROCHA, H. R.; RICHARDSON, A. D.; MOURA, M. S. B.; TORRES, R. S.; MORELLATO, L. P. C. Relationship between tropical leaf phenology and ecosystem productivity using phenocameras. *Frontiers in Environmental Science*. v. 11, Article 1223219, 2023.

ALBERTON, B.; TORRES, R. S.; SILVA, T. S. F.; ROCHA, H. R.; MOURA, M. S. B.; MORELLATO, L.P. C. Leafing Patterns and Drivers across Seasonally Dry Tropical Communities. *Remote Sensing*, v. 11, n. 19, 2019.

ALVES, L.F.; VIEIRA, S.A.; SCARANELLO, M.A.; CAMARGO, P.B.; SANTOS, F.A.M.; JOLY, C.A.; MARTINELLI, L.A. Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical moist forest (Brazil). *Forest Ecology and Management*. v. 260, p.679-691, 2010.

ANNISS, L. J. Evaluation of Dry-Down Events in the Brazilian Cerrado Using CosmicRay Soil Moisture Probes. Undergraduate Research, University of Bristol. Bristol, U.K, Report No. 2021RP005, 2021.

BAATZ, R.; BOGENA, H.; HENDRICKS, H.; HUISMAN, J.; QU, W.; MONTZKA, C. and VEREECKEN, H. Calibration of a catchment scale cosmic-ray probe network: A comparison of three parameterization methods. *Journal of Hydrology*, v. 516, p.231-244, 2014.

BALDOCCHI, D. FALGE, E.; GU, L.; OLSON, R.; HOLLINGER, D.; RUNNING, S.; ANTHONI, P.; BERNHOFER, C. DAVIS, K.; EVANS, R.; FUENTES, J.; GOLDSTEIN, A.; KATUL, G.; LAW, B.; LEE, X.; MALHI, Y.; MEYERS, T.; MUNGER, W.; OECHEL, W.; PAW U, K. T. PILEGAARD, K.; SCHMID, H. P.; VALENTINI, R.; VERMA, S.; VESALA, T.; WILSON, K.; WOFSY, S. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem–Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 82, n. 11, p. 2415-2434, 2001.

BALDOCCHI, D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of Global Change Biology. *Global change biology*, v. 26, n. 1, p. 242-260, 2020.

BEER, C.; REICHSTEIM, M.; TOMELLERI, E.; CIAIS, P. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science*, v.329, p.834-838, 2010.

BELCHER, C. M. *Fire Phenomena and the Earth System: An Interdisciplinary Guide to Fire Science*. College of Life and Environmental Sciences, University of Exeter, UK, John Wiley & Sons, Ltd, 2013.

BRUNO, R. D. and ROCHA, H. R. D. Variabilidade observada da umidade do solo em floresta tropical e cerrado. Master's degree dissertation, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2004.

BRUNO, R. D.; DA ROCHA, H. R.; DE FREITAS, H. C.; GOULDEN, M. L.; MILLER, S. D. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. *Hydrological Processes: An International Journal*, v. 20, p. 2477-2489, 2006.

BUCCI, S. J.; SCHOLZ, F. G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. C.; FRANCO, A. C.; ZHANG, Y.; & HAO, G.-Y. Water relations and hydraulic architecture in Cerrado trees: adjustments to seasonal changes in water availability and evaporative demand. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 20, p. 233-245, 2008.

CABRAL, O. M. R.; GASH, J. H. C.; ROCHA, H. R.; MARSDEN, C.; LIGO, M. A. V.; FREITAS, H. C.; TATSCH, J. D.; GOMES, E. Fluxes of CO₂ above a plantation of *Eucalyptus* in southeast Brazil. *Agricultural Forest Meteorology*, v.151, p. 49–59, 2011.

CABRAL, O. M.; DA ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; FREITAS, H. C.; LIGO, M. A. Water and energy fluxes from a savana florestal (cerrado) in southeast Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 4, p. 22-40, 2015.

CLARK, D. A. S.; BROWN, D. W.; KICKLIGHTER, J. Q.; CHAMBERS, S. T.; GOWER, J.; THOMLINSON, J. I. Measuring net primary production in forests: a synthesis of current concepts and field methods. *Ecological Applications*, v. 11, p.356-370, 2001.

CHITTOLINA, M. Resposta hidrológica de bacias de cabeceira na Serra da Mantiqueira avaliada com multi-instrumentação. Doctoral thesis. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2022.

COELHO, C.A.S.; DE OLIVEIRA, C.P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M.S.; CARPENEDO, C.B.; SILVEIRA CAMPOS, J.L.P.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. S.; DUTRA, L. M. M.; DA ROCHA R. P.; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Climate Dynamics*. v. 46, p. 3737-3752, 2016.

COOPER, M.; RUGGIERO, P. G. C.; SPAROVEK, G.; PIRES NETO, A. G. Solos da Gleba Cerrado Pé-de-Gigante. O cerrado Pé-de-Gigante: ecologia e conservação–Parque Estadual de Vassununga. Parte 1: caracterização física do Cerrado Pé-de-Gigante e uso das terras na região, SMA, São Paulo, 2005.

COSTA, M.H.; PIRES, G.F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *International Journal of Climatology*. v. 30, p. 1970-1979, 2010.

CUNHA, A.P.M.A.; BRITO, S.S.B.; RIBEIRO NETO, G.G.; ALVALÁ, R.C.S. Drought between 1963 and 2017 in the Federal District, Brazil. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. v.4, p. 487-498 2018.

DA ROCHA, H.R.; FREITAS, H.C.; ROSOLEM, R.; JUÁREZ, R.I.N.; TANNUS, R.N.; LIGO, M.A.; CABRAL, O.M.R.; DIAS, M.A.F.S. Measurements of CO₂ exchange over a savana florestal (Cerrado sensu stricto) in southeast Brazil. *Biota Neotropica*. v. 2, 2002.

DA ROCHA, H. R.; MANZI, A. O.; CABRAL, O. M.; MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; SALESKA, S. R., COUPE, N. R.; WOFSEY, S. C.; BORMA, L. S.; ARTAXO, P.; VOURLITIS, G.; NOGUEIRA, J. S.; CARDOSO, F. L.; NOBRE, A. D.; KRUIJT, B.; FREITAS, H. C.; VON RANDOW, C.; AGUIAR, R. G.; MAIA, J. F. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *Journal of Geophysical Research*, v. 114, p.1-8, 2009.

DELGADO, R.C.; PEREIRA, M.G.; TEODORO, P.E.; SANTOS, G.L.; de CARVALHO, D.C.; MAGISTRALI, I.C.; VILANOVA, R.S. Sazonalidade da produção primária bruta na Mata Atlântica do Brasil. *Global Ecology and Conservation*. 2018.

DE OLIVEIRA S., DELGADO, C. R.; VILANOVA, R. S.; DE SANTANA, R. O.; DE ANDRADE, C. F.; TEODORO, P. E.; LIMA, M. NMDI application for monitoring different vegetation covers in the Atlantic Forest biome, Brazil. *Weather and Climate Extremes*. v.33, 100329, 2021.

DOMINGUES, L. M. O balanço de água superficial no Brasil calculado com o modelo SiB2-Regional: padrões médios e sensibilidade a eventos de aquecimento e seca. Masters dissertation, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2014.

DUAN, Q. Y.; GUPTA, V. K.; SOROOSH, S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of optimization theory and applications*, v. 76, p. 501-521, 1993.

FERRÉ, P. A.; RUDOLPH, D.L.; KACHANOSKI, R.G. Spatial averaging of water content by time domain reflectometry: implications for twin rod probes with and without dielectric coating. *Water Resources Research*, v. 32, p. 271-279. 1996.

FIELD, C. B.; BEHRENFELD, M. J.; RANDERSON, J. T. PAUL, F. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*. v. 281, p. 237-240, 1998.

FRANZ, T. E.; ZREDA, M.; FERRE, T. P. A.; ROSOLEM, R.; ZWECK, C.; STILLMAN, S.; SHUTTLEWORTH, W. J. Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources. *Water Resources Research*, v. 48, p. 1-9, 2012.

FREITAS, H. C. A influência dos transportes advectivos na estimativa do balanço de CO₂ do ecossistema: Um estudo de caso para a mata atlântica com uso de técnicas micrometeorológicas. Doctoral thesis, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2012.

FURMAN, A.; Ferre, T. P. A.; WARRICK, A. W. A sensitivity analysis of electrical resistivity tomography array types using analytical element modeling, *Vadose Zone Journal*. v. 2, p. 416-423, 2003.

GARDNER, T. A. Tree-Grass Coexistence in the Brazilian Cerrado: Demographic Consequences of Environmental Instability. *Journal of Biogeography*. v. 33, p. 448–63, 2006.

GEIDER, R. J.; DELUCIA, E. H.; FALKOWSKI, P. G.; FINZI, A. C.; GRIME, J. P.; GRACE, J.; WOODWARD, F. I. Primary productivity of planet earth: biological determinants and physical constraints in terrestrial and aquatic habitats. *Global change biology*. v.7, p. 849-882, 2001.

HUTYRA, L. R.; MUNGER, J. W.; HAMMOND-Pyle, E.; SALESKA, S. R.; RESTREPO-COUBE, N.; DAUBE, B. C.; de CAMARGO, P. B.; WOFSY, S. C. Resolving systematic errors in estimates of net ecosystem exchange of CO₂ and ecosystem respiration in a tropical forest biome. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, p.1266–1279, 2008.

INSTITUTO FLORESTAL - IF. 2006. Plano de manejo do Parque Estadual da Serra do Mar. Instituto Florestal, Instituto Ekos Brasil, São Paulo. http://www.iflorestal.sp.gov.br/Plano_de_manejo/PE_SERRA_MAR (último acesso em 22/01/2023).

JOLY, C.A.; METZGER, J.P.; TABARELLI, M. Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. *New Phytologist Tansley Review*, v. 204, n.3, p. 459-473, 2014.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian cerrado. *Conservation biology*, v. 19, p. 707-713, 2005.

LATANSIO-AIDAR, S. R.; OLIVEIRA, A. C. P. D.; ROCHA, H. R. D.; AIDAR, M. P. M. Fitossociologia de um Cerrado denso em área de influência de torre de fluxo de carbono, Pé-de-Gigante, Parque Estadual de Vassununga, SP. *Biota Neotropica*, v.10, p. 195-207, 2010.

MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 15, p. 332-337, 2000.

MARENGO, J.A.; CUNHA, A.P.; CUARTAS, A.L.; DEUSDARÁ LEAL, K.R.; BROEDEL, E.; SELUCHI, M.E.; MICHELIN, C. M.; BAIÃO, C. F. P.; ÂNGULO, E. C.; ALMEIDA, E. K.; KAZMIERCZAK, M. L.; MATEUS, N. P. A.; SILVA, R. C.; BENDER, F. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. *Frontiers in Water*, v. 3, p. 1-13, 2021.

MARENGO, J.A.; CUNHA, A.P.; CUARTAS, A.L.; DEUSDARÁ LEAL, K.R.; BROEDEL, E.; SELUCHI, M.E.; MICHELIN, C. M.; BAIÃO, C. F. P.; ÂNGULO, E. C.; ALMEIDA, E. K.; KAZMIERCZAK, M. L.; MATEUS, N. P. A.; SILVA, R. C.; BENDER, F. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. *Frontiers in Water*, v. 3, p. 1-13, 2021.

MARENGO, J.A; NOBRE, C.A.; SELUCHI, M.E.; CUARTAS, A.; ALVES, L.M.; MENDIONDO, E.M.; OBRÉGON, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP*, n. 106, p. 31-44, 2015.

MARTIN, T. C.; ROCHA, H. R.; PEREZ, G. M. P. Fine scale surface climate in complex terrain using machine learning. *International Journal of Climatology*, p.1-18, 2020.

MCNEILL, J. D. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers, Tech. Note TN-6, edited, Geonics Limited of Mississauga, Ontario, Canada, 1980.

MIRANDA, H. S. et al. The Fire Factor. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (eds.). *The Cerrado of Brazil: Ecology and natural history of a neotropical savanna*. New York: Columbia University Press, p. 69-88, 2002.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, v.9, p.747-766, 1972.

MORELLATO, L. P. C.; TALORA, D. C.; TAKAHASI, A.; BENCKE, C. C.; ROMERA, E. C.; ZIPPARRO, V. B. Phenology of atlantic rain forest trees: A comparative Study¹. *Biotropica* v. 32, p. 811-823, 2000.

MORGENSTERN, K. Sensitivity and uncertainty of the carbon balance of a Pacific Northwest Douglas-fir forest during an El Niño/La Niña cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, Dordrecht, v. 123, p. 201-219, 2004.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, p. 853-858, 2000.

NEGRÓN-JUAREZ, R.I. Variabilidade Climática Regional e Controle da Vegetação no Sudeste: Um estudo de Observações sobre cerrado e Cana-de-açúcar e Modelagem Numérica da Atmosfera. Doctoral thesis, Universidade de São Paulo, p. 159. São Paulo, SP, 2004.

NEVVILLE, M.; STENSITZKI, T.; ALLEN, D. B.; RAWLIK, M.; INGARGIOLA, A.; NELSON, A. LMFIT: Non-linear least-square minimization and curve-fitting for Python. *Astrophysics Source Code Library*, ascl-1606. 2016.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; BORMA, L. S., CASTILLA-RUBIO, J. C.; SILVA, J. S.; CARDOSO, M.; NOBRE, A. D. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. v. 113, p. 10759-10768, 2016.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; RATTER, J. A. Vegetation physiognomies and woody flora of the cerrado biome. In *The Cerrados of Brazil*, ed. Oliveira, P. S. and R. J. Marquis, 91-120. Columbia University Press, New York, NY, USA, 2002.

OTTO, F.E L., AND COAUTHORS. Factors other than climate change, main drivers of 2014/15 water shortage in southeast Brazil. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96, S35–S40. 2016.

PAIVA, C.M., FERNANDES, F.R. Estudo da Produtividade Primária do Bioma Mata Atlântica via Sensoriamento Remoto. *Anu. do Inst. Geociências* 38 (2), 5–14, 2016.

PIELKE, R.A., DALU, G. A., SNOOK, J.S., LEE, T.J., KITTEL, T.G.F. Non linear influence of mesoescala land use on weather and climate. *Journal of*

Climate, v.4, p.1053-1069, 1991.

PRADO, D. E. (2003). As caatingas da América do Sul. In *Ecosistemas brasileiros* (pp. 121-162). Editora da Universidade Estadual de Campinas.

PROJETO MAPBIOMAS - Coleção 3 da Série Anual de Mapas da Cobertura e Uso do solo do Brasil, acessado em 18/06/2022 no link:<https://mapbiomas.org/>

QUESADA, C. A.; MIRANDA, A. C.; HODNETT, M. G.; SANTOS, A. J. B.; MIRANDA, H. S.; BREYER, L. M. Seasonal and depth variation of soil moisture in a burned open savanna (campo sujo) in central Brazil. *Ecological Applications*, v. 14, p. 33-41, 2004.

RADAMBRASIL. 1983. Projeto Radambrasil: levantamento de recursos naturais. IBGE. Rio de Janeiro.

RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*. v. 142, p. 1141-1153, 2009.

RODRIGUES, T.R.; VOURLITIS, G.L.; LOBO, F.A.; OLIVEIRA, R.G.; NOGUEIRA, J.S. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical savanna ecosystem of south central Mato Grosso, Brazil. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. v.119, p. 1-13, 2014.

ROY, J., MOONEY, H. A., & SAUGIER, B. *Terrestrial global productivity*. Elsevier. 2001.

ROQUETTE, J. G. Distribuição da biomassa no cerrado e a sua importância na armazenagem do carbono. *Ciência Florestal*, v.28, p. 1350-1363, 2018.

RUGGIERO, P. G.; BATALHA, M. A.; PIVELLO, V. R.; MEIRELLES, S. T. Soil-vegetation relationships in cerrado (Brazilian savanna) and semideciduous forest, Southeastern Brazil. *Plant Ecology*. v. 160, p. 1-16, 2002.

SABATER, M. J.: ERA5-Land hourly data from 1981 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019.

SALESKA, S.; DA ROCHA, H.; KRUIJT, B.; NOBRE, A. Fluxos de Carbono do Ecossistema e Metabolismo da Floresta Amazônica. *Amazonia Glob. Change. Geophysical Monograph Series*. v. 186, p. 389-407, 2009.

SANTOS, A.J.B.; SILVA, G.T.D.A.; MIRANDA, H.S.; MIRANDA, A.C.; LLOYD, J. Effects of fire on surface carbon, energy and water vapour fluxes over campo sujo savanna in central Brazil. *Functional Ecology*, v. 17, p. 711-719, 2003.

SELLERS, P. J.; RANDALL, D. A.; COLLATZ, G. J.; BERRY, J. A.; FIELD, C. B.; DAZLICH, D. A.; BOUNOUA, LA. A Revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of climate*, v. 9, p. 676-705, 1996.

SELLERS, P. J.; TUCKER, C. J.; COLLATZ, G. J.; LOS, S. O.; JUSTICE, C. O.; DAZLICH, D. A.; RANDALL, D. A. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Journal of climate*. v. 9, p. 706-737, 1996.

SETZER, J. Atlas climatológico do Estado de São Paulo. São Paulo: CESP, p. 235, 1966.

SIQUEIRA, M. B. S.; PETERSON, A. T.; OLIVEIRA, G. Utilizing spatial information to infer the eco-geographic limits of species' ranges in spatialeco, un programa de análises espaciais de dados de biodiversidade. *Oecologia Australis*, v.15, p. 228-236, 2011.

SIQUEIRA, M. F.; MORENO, C. E.; GRACIA, M.; JONCKHEERE, I. Spatially explicit assessments of tropical forest structure, biomass, and productivity using Google Earth Engine and MapBiomas. *Frontiers in Environmental Science*. v.10, p. 1-14, 2012.

SKOLE, D. L.; TUCKER, C. J. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. *Science*. v. 260, p. 1905-1910, 1993.

SOARES-FILHO, B. S.; MOUTINHO, P.; NEPSTAD, D. C.; ANDERSON, A.; RODRIGUES, H. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. v. 107, p. 821-10826, 2010.

SPAROVEK, G., BERND, Z., SANO, E. E., & NOBRE, C. A. Brazilian Agriculture and Environmental Legislation: Status and Future Challenges. *Environmental Science & Technology*. v. 50, p. 4966–4970, 2016.

TABARELLI, M.; PINTO, L. P.; SILVA, J. M. C.; HIROTA, M.; BEDÊ, L. Challenges and opportunities for biodiversity conservation in the Brazilian Atlantic Forest. *Conservation Biology*. v.19, p. 695-700, 2005.

TANNUS, R.N. Funcionalidade e sazonalidade sobre Cerrado e sobre Ecótono FlorestaCerrado: Uma investigação com dados micrometeorológicos de energia e CO₂. Masters dissertation, Universidade de São Paulo. São Paulo 92p, 2004.

TATSCH, J., D., 2006: Uma análise dos fluxos de superfície e do microclima sobre cerrado, cana-de-açúcar e eucalipto, com implicações para mudanças climáticas regionais. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 132p.

TORN, A. A Search Clustering Approach to Global Optimization, Toward Global Optimization 2, Edited by L. C. W. Dixon and G. P. Szeg6, North-Holland, Amsterdam, Holland, p. 49-62, 1978.

TWINE, T. E.; KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M.; COOK, D. R.; HOUSER, P. R.; MEYERS, T. P.; PRUEGER, J. H.; STARKS, P. J.; WESELY, M. L. Correcting Eddy-Covariance Flux Underestimates over a Grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*. v. 103, p. 279–300, 2000.

VALENTI, M. W.; CIANCIARUSO, M. V.; BATALHA, M. A. Seasonality of litterfall and leaf decomposition in a cerrado site. *Brazilian Journal of Biology*, v. 68, n. 3, p. 459-465, 2008.

VICO, G.; DRALLE, D.; XUE, F.; THOMPSON, S.; MANZONI, S. How competitive is drought deciduousness in tropical forests? A combined eco-hydrological and eco-evolutionary approach. *Environmental Research Letters* v.12, 065006, 2017.

VIEIRA, S.A.; ALVES, L.F.; AIDAR, M.P.M.; ARAÚJO, L.S.; BAKER, T.; BATISTA, J.L.F.; CAMPOS, M.C.; CAMARGO, P.B.; CHAVE, J.; DELITTI, W.B.C.; HIGUCHI, N.; HONORIO, E.; JOLY, C.A.; KELLER, M.; MARTINELLI, L.A.; MATTOS, E.A.; METZKER, T.; PHILLIPS, O.; SANTOS, F.A.M.; SHIMABUKURO, M.T.; SILVEIRA, M., TRUMBORE, S.E. Estimation of biomass and carbon stocks: the case of the Atlantic Forest. *Biota Neotropica*. v. 11, p. 104-121, 2008.

VIANA, V.M. and TABANEZ, A.A.J. Biology and conservation of forest fragments in the Brazilian Atlantic moist forest. In: W.F. Laurance & R.O. Bierregaard (eds.). *Forest patches in tropical landscapes*. Island Press, Washington, DC, p. 151-167, 1996.

VIEIRA, S.; DE CAMARGO, P. B.; SELHORST, D.; DA SILVA, R.; HUTYRA, L.; CHAMBERS, J. Q.; BROWN, I. F.; HIGUCHI, N.; DOS SANTOS, J.; WOFSY, S. C.; TRUMBORE, S. E.; MARTINELLI, L. A. Forest structure and

carbon dynamics in Amazonian tropical rain forests. *Oecologia*, v. 140, p. 468-479, 2004.

VOURLITIS, G. L., & DA ROCHA, H. R. Flux dynamics in the cerrado and cerrado-forest transition of Brazil. *Ecosystem function in global savannas: measurement and modeling at landscape to global scales*, p. 97-116, 2011.

WEBB, E. K.; Pearman, G. I.; Leuning, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 106, p. 85-100, 1980.

WHITLEY, R. J.; CatrionaMacinnis-Ng, M. O.; Hutley, L. B.; Beringer, Jason, Zeppel, Melanie, Williams, Mathew, et al. WHITLEY, R. J.; MACINNIS-NG, C. M. O.; HUTLEY, L. B.; BERINGER, J.; ZEPPEL, M.; WILLIAMS, M.; TAYLOR, M.; EAMUS, D. Is productivity of mesic savannas light limited or water limited? Results of a simulation study. *Global Change Biology*, p.17, p. 3130-3149, 2011.

ZREDA, M.; DESILETS, D.; FERRÉ, T.; SCOTT, R. Measuring SMC non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophysical Research Letters*, v. 35, L21402, 2008.