

CAPÍTULO 15

Indicadores Ambientais para o Bioma Cerrado Analisados com Uso de Geotecnologias

Antônio Heriberto de Castro Teixeira

Janice Freitas Leivas

Celina Maki Takemura

Inajá Francisco de Sousa

André Quintão de Almeida



15.1 Introdução

Em várias partes do bioma Cerrado, as demandas hídricas e as populações estão crescendo sob condições insustentáveis de consumo dos recursos naturais. Os consequentes impactos têm sido geralmente medidos em escalas locais, entretanto, com o contínuo desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas, estes podem ser atualmente analisados usando indicadores ambientais em largas escalas com precisões aceitáveis. Com os cenários de mudanças climáticas e de uso da terra, essas geotecnologias são poderosas ferramentas para o monitoramento dessas mudanças quando se almeja o desenvolvimento sustentável (Teixeira et al., 2020a, 2020b, 2021a, 2021b; Jardim et al., 2022).

As mudanças climáticas de uso da terra afetam os balanços de energia, água e carbono (Ceschia et al., 2010; Zhao; Running, 2010). A compreensão das respostas dos parâmetros hídricos e de vegetação, bem como das suas dinâmicas, é indispensável para o acesso a esses balanços (Yang et al., 2016; Zhang; Zhang, 2019). O bioma Cerrado tem uma larga diversidade de espécies naturais (Lewinsohn; Prado, 2005), mas sofre de vários impactos ambientais, tais como desflorestamento, queimadas, poluição do ar, da água e do solo, bem como a intensiva substituição das espécies naturais por culturas agrícolas (Giambelluca et al., 2009; Cabral et al., 2015; Arantes et al., 2015; Fernandes et al., 2018; Sano et al., 2019; Azevedo et al., 2020; Santos et al., 2021). Esses impactos demandam estudos em larga escala para o consumo sustentável dos recursos naturais (Nuñez et al., 2017; Araujo et al., 2019; Santos et al., 2020; Teixeira et al., 2021a, 2021b; Jardim et al., 2022).

A quantificação dos componentes dos balanços de energia, de água e de carbono usando sensoriamento remoto e grades de dados climáticos nos agroecossistemas do bioma Cerrado é um meio viável para a elaboração de indicadores ambientais para suporte ao manejo racional dos seus recursos naturais. Dentre os indicadores, destaca-se a evapotranspiração (ET), pois representa o principal uso dos recursos

hídricos pela vegetação bem suprida de água e, em adição, está relacionada com a produção de biomassa (BIO) (Teixeira et al., 2020a, 2020b). Por um lado, embora com esta relação, o aumento da ET implica em menor disponibilidade hídrica para usos ecológicos e humanos. Por outro lado, a substituição da vegetação natural por culturas agrícolas pode afetar a BIO (Ceschia et al., 2010). A quantificação desses efeitos e das dinâmicas ao longo dos anos é essencial para restaurações ecológicas e acesso à dimensão dos impactos ambientais (Yang et al., 2016; Zhang; Zhang, 2019).

Algumas medições dos componentes dos balanços de energia, água e carbono em campo já foram realizadas por diferentes métodos no bioma Cerrado (Giambelluca et al., 2009; Cabral et al., 2015; Fernandes et al., 2018). Entretanto, poucos esforços foram realizados para utilização de indicadores ambientais em larga escala nesse bioma. Em adição, medições pontuais não são viáveis para essa finalidade, devido às largas variações nas condições climáticas nos diferentes agroecossistemas do bioma. Devido a essas limitações, a extrapolação desses indicadores através de geotecnologias é uma alternativa viável para suporte às políticas públicas relacionadas ao uso dos recursos naturais.

Considerando a sua operacionalidade, o algoritmo Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving (Safer) foi desenvolvido usando medições simultâneas em campo e por sensoriamento remoto em culturas agrícolas irrigadas e vegetação natural sob fortes contrastes termo-hídricos no Nordeste do Brasil, para a determinação de indicadores ambientais baseados em parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e dados climáticos (Teixeira et al., 2008; Teixeira, 2010). O Safer também vem sendo usado em conjunto com o modelo da Eficiência do Uso da Radiação (EUR) (Monteith, 1977) para a estimativa da BIO (Teixeira et al., 2020a, 2020b, 2021b).

Objetivando a implementação de um sistema operacional no bioma Cerrado, com uso de dados históricos, testamos a última versão do algoritmo Safer em conjunto com o modelo EUR. Foi usado o produto

reflectância Modis MOD13Q1 na escala temporal de 16 dias e dados climáticos nessa escala no ano de 2016. Isto foi feito para demonstrar a viabilidade de aplicação do algoritmo para o monitoramento da dinâmica dos indicadores ambientais derivados dos componentes dos balanços de energia, água e carbono no bioma. Esse monitoramento é útil para subsidiar políticas públicas com relação ao manejo e conservação dos recursos naturais. As razões para uso de dados de 2016 foram duas: o bioma Cerrado estava recuperando os bons níveis de umidade dos na zona das raízes, após uma seca prolongada de 2012 a 2015 (Mariano et al., 2018; Rebello et al., 2020), e a disponibilidade de dados climáticos cobrindo todo o bioma ao longo desse ano. Embora a modelagem dos indicadores tenha sido realizada para apenas um ano, séries históricas de dados climáticos e imagens de satélites podem ser usadas na detecção de anomalias para períodos específicos de qualquer ano.

15.2 Área de estudo e métodos

na Figura 15.1, são apresentadas a localização do bioma Cerrado em cada região geográfica do Brasil, suas altitudes e as 133 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) utilizadas.

O bioma Cerrado enfrenta períodos de estiagens frequentes e suas espécies naturais desenvolvem resiliência com o aumento da aridez nessas condições mais secas (Almagro et al., 2017; Sano et al., 2019; Azevedo et al., 2020). Os dados climáticos foram interpolados pelo método “movimento da média” e usados no cálculo da evapotranspiração de referência (ET₀) pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). As grades dos dados climáticos foram usadas com as reflectâncias das bandas 1 e 2 do produto Modis MOD13Q1 na resolução espacial de 250 m e temporal de 16 dias (Teixeira et al., 2020b).

O algoritmo Simple Algorithm for Evapotranspiration (Safer) e o modelo Eficiência do Uso da Radiação (EUR), aplicados em conjunto na corrente pesquisa, são descritos com detalhes em Teixeira et al.

(2020a, 2020b). Para a determinação da evapotranspiração atual (ET) com o Safer, modela-se a razão dessa evapotranspiração para a de referência (ET₀), ou seja, a fração evapotranspirativa (ET_f), com parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e climáticos. Para o EUR, a BIO é modelada em função da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA_{abs}) e da ET_f.

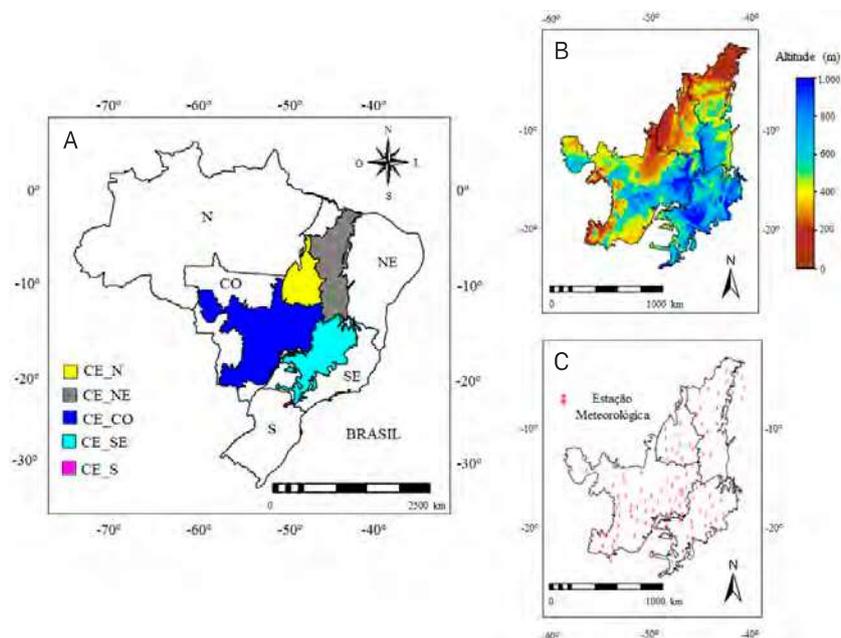
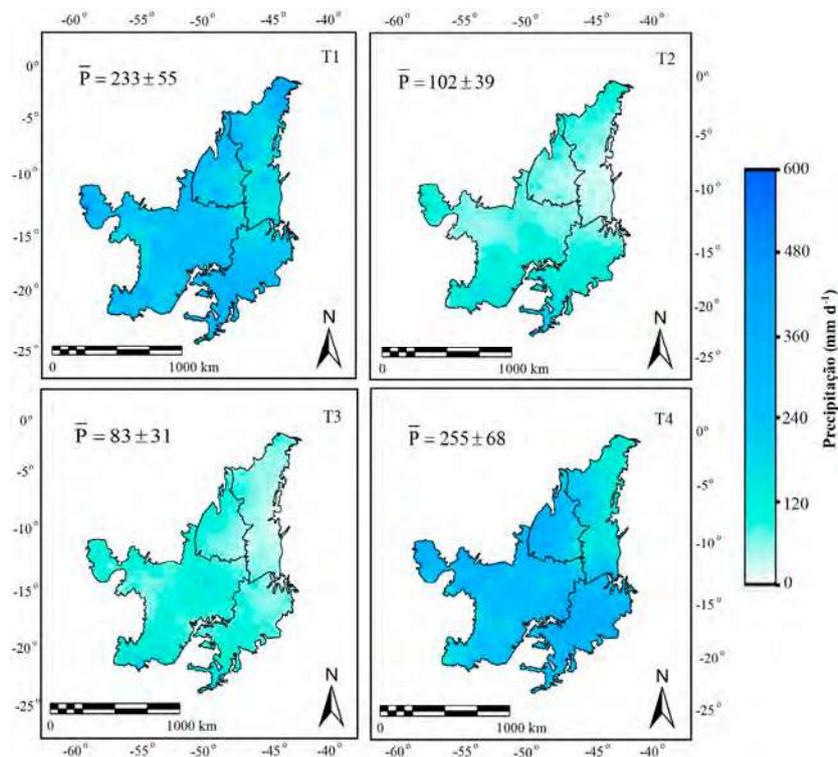


Figura 15.1. Localização do bioma Cerrado (CE) no Brasil. Limites nas regiões geográficas Norte (N), Nordeste (NE), Centro Oeste (CO), Sudeste (SE) e Sul (S) (A); distribuição espacial das altitudes (B); distribuição espacial das 133 estações meteorológicas utilizadas (C).

15.3 Dinâmica do balanço hídrico

Na Figura 15.2, são mostradas as distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da precipitação (P) no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016.



Trimestres (T): T1 – janeiro a março; T2 – abril a junho; T3 – julho a setembro; e T4 – outubro a dezembro.

Figura 15.2. Distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da precipitação (P) no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016. As barras em P significam médias para todo o bioma.

Variações espaciais e temporais nos valores de P ao longo do ano são fortemente percebidas entre os trimestres e regiões. Os menores valores são detectados em T3 (julho a setembro), quando o total médio trimestral foi abaixo de 85 mm T⁻¹, enquanto os maiores acontecem em T4 (outubro a dezembro), quando esse total foi em torno de 255 mm T⁻¹. Na escala anual, o valor total médio de P foi de 672 ± 153 mm ano⁻¹. Essa média anual está dentro dos valores de 560 a 1.663 mm ano⁻¹ reportados por Fernandes et al. (2018), entre 2003 e 2014, para este bioma,

mas muito menor que o valor superior dessa faixa, o que evidencia que mesmo que os ecossistemas desse bioma estivessem se recuperando de um período de seca de 2012 a 2015 (Mariano et al., 2018; Rebello et al., 2020), as quantidades de chuvas foram baixas para 2016.

De acordo com os valores percentuais de desvios padrões (DP), as maiores variações espaciais em P ocorreram em T2 (abril a junho), quando DP representou 38% da média dos pixels nesse trimestre, enquanto as menores foram em T1 (janeiro a março) quando DP foi 24% da média dos pixels nesse trimestre.

Na Tabela 15.1, são apresentados os valores trimestrais e anuais da precipitação (P) e desvios padrões, para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Tabela 15.1. Valores trimestrais e anuais de precipitação (P) e desvios padrões para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Trimestre ⁽¹⁾ / Bioma_Região ⁽²⁾	T1 (mm T ⁻¹)	T2 (mm T ⁻¹)	T3 (mm T ⁻¹)	T4 (mm T ⁻¹)	Ano (mm ano ⁻¹)
CE_N	209 ± 48	58 ± 21	74 ± 23	242 ± 57	583 ± 126
CE_NE	189 ± 64	53 ± 28	48 ± 17	152 ± 39	442 ± 104
CE_CO	228 ± 44	84 ± 29	91 ± 24	245 ± 48	648 ± 100
CE_SE	239 ± 52	108 ± 42	80 ± 26	287 ± 33	715 ± 118
CE_S	275 ± 5	225 ± 8	210 ± 13	264 ± 2	974 ± 19

⁽¹⁾ Trimestres (T): T1 – janeiro a março, T2 – abril a junho, T3 – julho a setembro, T4 – outubro a dezembro.

⁽²⁾ Bioma_Região: CE_N – Cerrado na região Norte, CE_NE – Cerrado na região Nordeste, CE_CO – Cerrado na região Centro Oeste, CE_SE – Cerrado na região Sudeste, CE_S – Cerrado na região Sul.

No bioma Cerrado dentro da região Norte (CE_N), com o valor anual de 583 mm ano⁻¹, os maiores valores de P ocorreram em T4 (outubro a dezembro), com total médio acima de 240 mm T⁻¹. As menores taxas foram em T2 (abril a junho), quando o total médio foi abaixo de

60 mm T⁻¹. De acordo com os valores médios e desvios padrões percentuais (DP), as maiores variações espaciais ocorreram em T2, quando DP representou 37% da média, enquanto as menores ocorreram em T1, com esse percentual de 23%.

Dentro da região Nordeste, o bioma Cerrado (CE_NE), com valor anual de 442 mm ano⁻¹, apresentou as menores quantidades de chuvas. As maiores taxas foram em T1 (janeiro a março), com total médio acima de 185 mm T⁻¹, enquanto o menor valor trimestral de P, abaixo de 50 mm T⁻¹, aconteceu em T3 (julho a setembro). Entretanto, as maiores variações espaciais, com DP representando 52% da média, foram em T2 (abril a maio), e as menores em T4 (outubro a dezembro), sendo DP 26% da média.

A maior parte do Cerrado está na região Centro-Oeste (CE_CO), com um total médio anual de 648 mm ano⁻¹; as chuvas se concentraram de outubro a dezembro (T4), com total médio trimestral de 245 mm T⁻¹. Similarmente à CE_NE, os menores valores foram em T2 (abril a junho), com total médio abaixo de 85 mm T⁻¹. As maiores variações espaciais foram em T2, com DP representando 35% da média dos pixels, enquanto as menores foram em T1 (19%).

Para o Cerrado dentro da região Sudeste (CE_SE), com uma precipitação anual média de 715 mm ano⁻¹, as maiores quantidades de chuvas, com valor trimestral de P acima de 285 mm T⁻¹, ocorreram em T4 (outubro a dezembro), quando ocorreram as menores variações espaciais, com DP representando apenas 12% da média. Os menores valores de P, com total trimestral em torno de 80 mm T⁻¹, aconteceram em T3 (julho a setembro). As maiores variações espaciais, com DP sendo 39% da média, foram em T2 (abril a junho).

As maiores quantidades de chuvas no bioma Cerrado foram para as áreas do bioma dentro da região Sul (CE_S), com o total anual médio de 974 mm ano⁻¹, embora pelo tamanho reduzido represente muito pouco da área total (ver Figura 15.1). Esta área mostrou uma distribuição das chuvas mais regular ao longo do ano, quando comparada com as outras, mas os valores ligeiramente maiores de P (275 mm T⁻¹) foram em

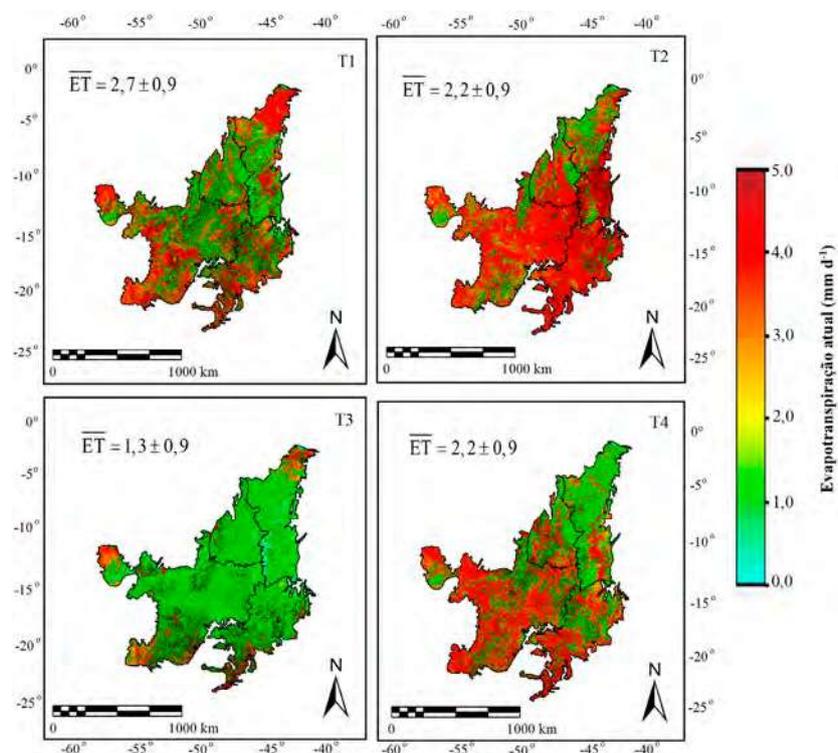
T1 (janeiro a março) e os menores em T3 (julho a setembro), em torno de 210 mm T⁻¹, uma diferença de apenas 24%. Com variações espaciais muito pequenas, DP representou apenas 1% a 6% do valor trimestral médio em T4 e T3, respectivamente.

Considerando todas as regiões em que o bioma Cerrado está inserido, as maiores quantidades de chuvas ocorreram de outubro a dezembro (T4) para as regiões Norte (CE_N), Centro-Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE), e de janeiro a março (T1) nas regiões Nordeste (CE_NE) e Sul (CE_S). Com relação aos menores valores de P, estes aconteceram de abril a junho (T2) em CE_N e CE_CO e de julho a setembro (T3) em CE_NE, CE_SE e CE_S.

Na Figura 15.3, são mostradas as distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da evapotranspiração atual (ET) no bioma Cerrado, com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016.

Como para P, variações espaciais e temporais nos valores dos pixels da ET entre os trimestres e as regiões em que o bioma Cerrado está inserido são fortemente detectadas. As menores taxas foram em T3 (julho a setembro), com média diária trimestral abaixo de 1,5 mm d⁻¹, e as maiores em T1 (janeiro a março), quando essa média foi acima de 2,5 mm d⁻¹. Na escala anual, o valor médio de ET foi de 2,1 ± 0,9 mm d⁻¹. Com medições em campo de balanço de energia no Cerrado, Giambelluca et al. (2009) reportaram valores médios da ET de 1,9 a 2,3 mm d⁻¹, variando de acordo com a densidade das plantas, enquanto com medições por sensoriamento remoto com imagens Landsat também nesse bioma, Laipelt et al. (2020) encontraram valores médios entre 2,0 e 3,2 mm d⁻¹ em ecossistemas de grama e pastagem. Os resultados desses estudos prévios envolvem as taxas de ET apresentadas na Figura 15.3.

De acordo com os valores de desvios padrões (DP), as maiores variações espaciais da ET ocorreram em T3 (julho a setembro), quando DP representou 68% da média dos pixels nesse trimestre, enquanto as menores foram em T1 (janeiro a março), quando DP foi 34% da média dos pixels nesse trimestre.



ET: Evapotranspiração atual; Trimestres (T): T1 – janeiro a março; T2 – abril a junho; T3 – julho a setembro; e T4 – outubro a dezembro.

Figura 15.3. Distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da evapotranspiração atual (ET) no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016. As barras em ET significam médias para todo o bioma.

Na Tabela 15.2, são apresentados os valores trimestrais e anuais da evapotranspiração atual (ET) e desvios padrões, para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Para a região do Cerrado dentro da região Norte (CE_N), os maiores valores da ET foram detectados em T1 (janeiro a março), com valor diário médio no trimestre acima de 2,0 mm d⁻¹, enquanto as menores taxas foram em T3 (julho a setembro), com essa média abaixo de 1,5 mm d⁻¹. Na escala anual, a ET em CE_N apresentou um total médio de

695 mm ano⁻¹. De acordo com os valores médios e desvios padrões (DP), as maiores variações espaciais ocorreram em T3, quando DP representou 63% da média, enquanto as menores ocorreram em T1, com esse percentual de 36%.

Tabela 15.2. Valores trimestrais e anuais a evapotranspiração atual (ET) e desvios padrões para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Trimestre ⁽¹⁾ / Bioma_Região ⁽²⁾	T1 (mm d ⁻¹)	T2 (mm d ⁻¹)	T3 (mm d ⁻¹)	T4 (mm d ⁻¹)	Ano (mm ano ⁻¹)
CE_N	2,4 ± 0,9	1,9 ± 0,8	1,1 ± 0,7	2,0 ± 0,8	1,9 ± 0,7
CE_NE	2,5 ± 1,1	2,1 ± 1,0	1,2 ± 0,8	1,7 ± 0,8	1,9 ± 0,7
CE_CO	2,7 ± 0,8	2,2 ± 0,9	1,4 ± 0,9	2,4 ± 0,9	2,2 ± 0,7
CE_SE	3,0 ± 0,9	2,2 ± 0,9	1,5 ± 1,0	2,3 ± 0,8	2,3 ± 0,7
CE_S	3,0 ± 0,6	2,5 ± 0,8	3,3 ± 0,9	3,0 ± 0,9	2,9 ± 0,6

⁽¹⁾ Trimestres (T): T1 – janeiro a março, T2 – abril a junho, T3 – julho a setembro, T4 – outubro a dezembro.

⁽²⁾ Bioma_Região: CE_N – Cerrado na região Norte, CE_NE – Cerrado na região Nordeste, CE_CO – Cerrado na região Centro Oeste, CE_SE – Cerrado na região Sudeste, CE_S – Cerrado na região Sul.

A região CE_NE se destaca pelos menores valores de ambos, P e ET. Similarmente a CE_N, os maiores valores da ET foram em T1 (janeiro a março), com valor diário no trimestre em torno de 2,5 mm d⁻¹, e as menores taxas em T3 (julho a setembro), também com média abaixo de 1,5 mm d⁻¹. Na escala anual, a ET em CE_NE apresentou o mesmo total médio de 695 mm ano⁻¹ como para CE_N. As maiores variações espaciais também foram em T3, com DP representando 66% da média dos pixels, e as menores em T1 (43%).

No Cerrado dentro da região Centro-Oeste (CE_CO), os valores máximos também ocorreram em T1 (janeiro a março), mas com média acima de 2,5 mm d⁻¹, e mínimos em T3 (julho a setembro), com essa média abaixo de 1,5 mm d⁻¹. Entretanto, para essa região, o total médio anual foi de 805 mm ano⁻¹. As maiores variações espaciais também foram

em T3, com DP representando 68% da média dos pixels, e as menores em T1 (30%).

A região CE_SE seguiu os padrões das anteriores com valores máximos da ET, em torno de $3,0 \text{ mm d}^{-1}$ de janeiro a março (T1) e mínimos, com valores em torno de $1,5 \text{ mm d}^{-1}$ de julho a setembro (T3), mas com um total anual médio de 842 mm ano^{-1} . As maiores variações espaciais também foram em T3, com DP representando 63% da média dos pixels, e as menores em T1 (30%).

As maiores taxas da ET no bioma Cerrado foram dentro da região Sul (CE_S), quando de julho a setembro (T3) o valor médio diário ultrapassou $3,0 \text{ mm d}^{-1}$, enquanto as menores ocorreram em T2 (abril a junho), com a média diária ficando em torno de $2,5 \text{ mm d}^{-1}$. As elevadas taxas diárias produziram o maior total anual de $1.061 \text{ mm ano}^{-1}$. As maiores variações espaciais aconteceram em T2 (abril a junho), com DP representando 31% da média dos pixels, e as menores foram em T1 (janeiro a março) com esse percentual de 20%.

Considerando todas as regiões em que o bioma Cerrado está inserido, as maiores taxas da ET ocorreram de janeiro a março (T1) para as regiões Norte (CE_N), Nordeste (CE_NE), Centro-Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE) e de julho a setembro (T3) na região Sul (CE_S). Com relação às menores taxas da ET, estas foram de julho a setembro (T3) para as regiões Norte (CE_N), Nordeste (CE_NE), Centro-Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE) e de abril a junho (T2) em CE_S.

Contabilizando as taxas trimestrais de P e ET, cruzando as tabelas 1 e 2 e extrapolando os valores diários da ET para trimestrais, os únicos valores positivos de balanço hídrico (BH) ocorreram de outubro a dezembro (T4) em CE_N (BH = 58 mm), CE_CO (BH = 24 mm) e CE_SE (BH = 75 mm) e de janeiro a junho em CE_S (BH = 3 mm, de janeiro a março – T1 e 1 mm de abril a junho – T2). Para o bioma Cerrado dentro da região Nordeste (CE_NE) não ocorreram valores trimestrais positivos de BH. Os valores mais negativos foram detectados de abril a junho (T2) para CE_N (BH = -116 mm), CE_NE (BH = -142 mm), CE_CO (BH = -120 mm) e CE_SE (BH = -95 mm), enquanto

para CE_S estes foram de julho a setembro (T3) com BH de -95 mm. Entretanto, na escala anual, os valores de BH foram todos negativos, variando de -87 mm para CE_S a -253 mm para CE_NE. Constatou-se, portanto, na escala anual, as melhores condições hídricas para CE_S e as piores para CE_NE.

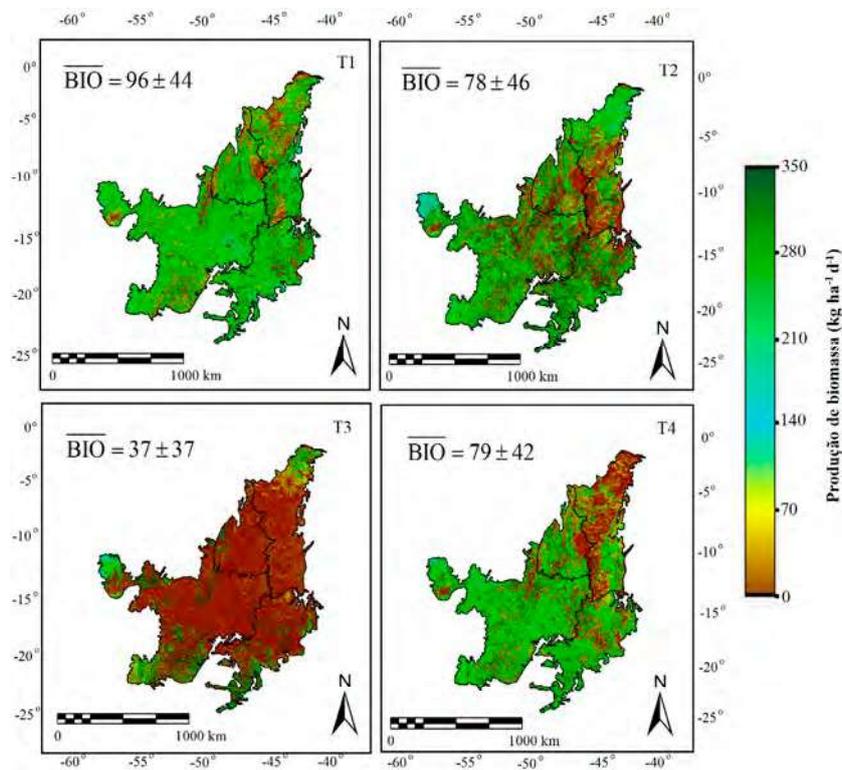
15.4 Dinâmica da produtividade da água

Na Figura 15.4, são mostradas as distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da BIO no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016.

Como para P e ET, variações espaciais e temporais nos valores dos pixels da BIO entre os trimestres e as regiões em que o bioma Cerrado está inserido são também fortemente detectadas. Os menores valores foram em T3 (julho a setembro), com média diária trimestral abaixo de $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, e os maiores em T1 (janeiro a março), quando essa média foi acima de $95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Na escala anual, o valor médio da BIO foi de $72 \pm 34 \text{ mm d}^{-1}$.

De acordo com os valores de desvios padrões (DP), as maiores variações espaciais da BIO ocorreram em T3 (julho a setembro), quando DP representou 100% da média dos pixels nesse trimestre, enquanto as menores foram em T1 (janeiro a março) quando DP foi 46% da média dos pixels nesse trimestre.

Os valores da BIO apresentados na Figura 15.4 estão de acordo com Arantes et al. (2015), que, usando o produto Modis MOD13Q1 Enhanced Vegetation Index, reportaram que o máximo de desenvolvimento da vegetação do bioma Cerrado ocorre de janeiro a março, caindo para a metade de agosto a setembro. O decréscimo da BIO em T3 (julho a setembro) no estudo corrente, também corrobora com Santos et al. (2021), que, também usando produtos Modis, constataram um declínio nos valores da BIO nas espécies desse bioma, após redução das chuvas.



BIO: produção de biomassa; Trimestres (T): T1 – janeiro a março; T2 – abril a junho; T3 – julho a setembro; e T4 – outubro a dezembro.

Figura 15.4. Distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da produção de biomassa (BIO) no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016. As barras em BIO significam médias para todo o bioma.

Na Tabela 15.3, são apresentados os valores trimestrais e anuais da BIO e desvios padrões, para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Pela Tabela 15.3, são percebidos os menores valores da BIO nos ecossistemas do Cerrado inseridos nas regiões Norte e Nordeste, enquanto os maiores aconteceram nas regiões Sul e Sudeste.

Tabela 15.3. Valores trimestrais e anuais a produção de biomassa (BIO) e desvios padrões para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Trimestre ⁽¹⁾ / Bioma_Região ⁽²⁾	T1 (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	T2 (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	T3 (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	T4 (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)	Ano (kg ha ⁻¹ d ⁻¹)
CE_N	74 ± 40	58 ± 37	25 ± 26	60 ± 36	54 ± 30
CE_NE	76 ± 49	63 ± 44	26 ± 28	47 ± 34	53 ± 27
CE_CO	86 ± 40	74 ± 46	35 ± 38	80 ± 42	69 ± 33
CE_SE	96 ± 46	71 ± 46	38 ± 42	74 ± 41	70 ± 37
CE_S	116 ± 37	105 ± 37	130 ± 59	111 ± 48	115 ± 40

⁽¹⁾ Trimestres (T): T1 – janeiro a março, T2 – abril a junho, T3 – julho a setembro, T4 – outubro a dezembro.

⁽²⁾ Bioma_Região: CE_N – Cerrado na região Norte, CE_NE – Cerrado na região Nordeste, CE_CO – Cerrado na região Centro Oeste, CE_SE – Cerrado na região Sudeste, CE_S – Cerrado na região Sul.

Para consideração do efeito da umidade na zona das raízes e da radiação solar incidente na BIO ao longo do ano. Na Figura 15.5, é mostrada a dinâmica dos valores médios trimestrais da fração evapotranspirativa (ET_f) e da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RAF_{abs}), juntamente com seus desvios padrões (DP) para o bioma Cerrado inserido em cada região geográfica, durante o ano de 2016.

Os valores médios da ET_f ficaram entre 0,24 em CE_N e CE_NE de julho a setembro (T3) e 0,72 em CE_S também em T3. As respectivas médias anuais foram de 0,43 e 0,66. Os valores médios da RAF_{abs} estiveram entre 3,6 MJ m⁻² d⁻¹ em CE_N de julho a setembro (T3) e 5,8 MJ m⁻² d⁻¹ em CE_CO de janeiro a março (T1). Entretanto, as médias anuais foram entre 5,0 MJ m⁻² d⁻¹ em CE_NE e 5,4 MJ m⁻² d⁻¹ tanto para CE_CO como para CE_SE.

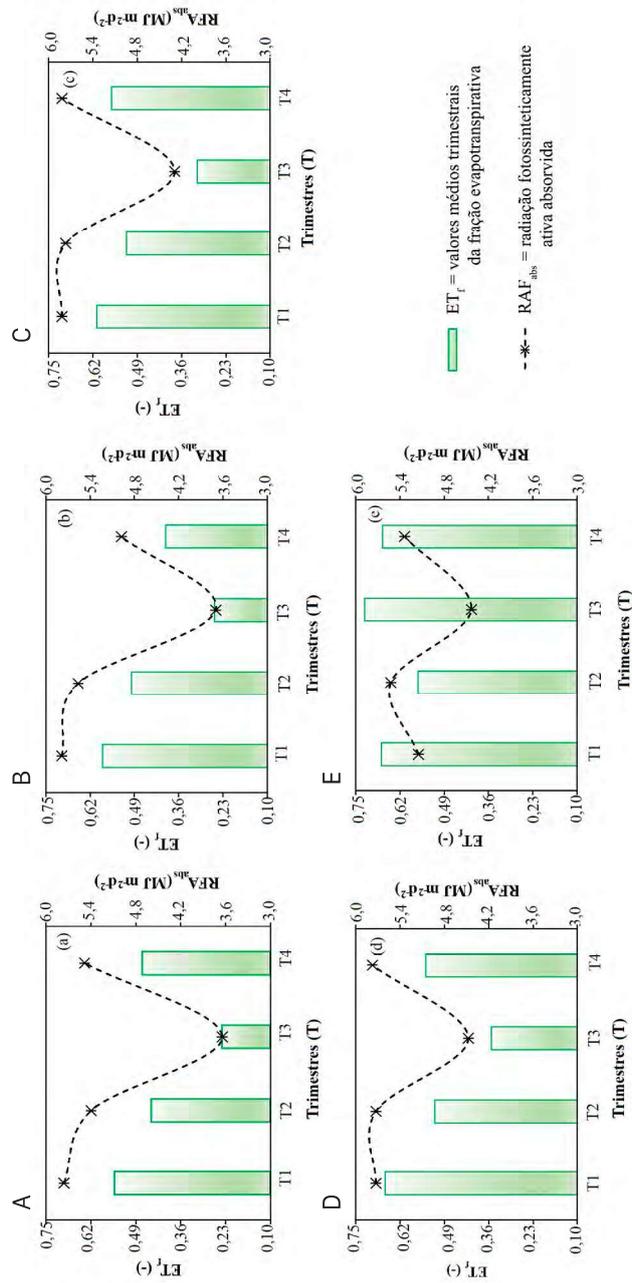


Figura 15.5. Dinâmica dos valores médios trimestrais da fração evapotranspirativa (ET_f) e da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RAF_{abs}), juntamente com seus desvios padrões (DP) para o bioma Cerrado, durante o ano de 2016. Bioma Cerrado dentro das regiões geográficas brasileira: Norte — CE_N (A); Nordeste — CE_NE(B); Centro Oeste — CE_CO (C); Sudeste — SE (D); Sul — S (E).

De acordo com Zhou e Zhou (2009), as variáveis climáticas que mais afetam a ET_f são a temperatura do ar, a umidade do ar e a energia disponível. Entretanto, seus valores dependem também da abertura dos estômatos e da adaptação das espécies à escassez hídrica (Mata-González et al., 2005), o que é mais notável nos ecossistemas do bioma Cerrado (Almagro et al., 2017; Sano et al., 2019; Azevedo et al., 2020).

Os resultados dos indicadores hídricos evidenciaram um atraso entre os valores de ET_f e BH ao longo do ano, o que deve estar relacionado ao tempo requerido para a umidade na zona das raízes recuperarem os bons níveis após as chuvas, mas também devido ao fato de que após estas, alguma quantidade de água é perdida por escoamento superficial e percolação, o que afeta a BIO e, então, a produtividade da água (PA).

De acordo com a Tabela 15.3, para CE_N, os valores máximos da BIO ocorreram em T1 (janeiro a março), quando a média trimestral foi acima de $70 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, devido aos seus maiores valores de ET_f e RFA_{abs} (médias de $0,55$ e $5,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Figura 15.5A). As taxas mínimas da BIO foram em T3 (julho a setembro), quando a média trimestral foi em torno de $25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, sob os menores valores de ET_f e RFA_{abs} (médias de $0,24$ e $3,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Figura 15.5A). Considerando a escala anual, a BIO foi de $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Na região CE_NE, os valores médios trimestrais da BIO mais elevados (Tabela 15.3), acima de $75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, aconteceram durante o trimestre mais chuvoso de janeiro a março (T1), quando, de acordo com a Figura 15.5B, ocorreram os máximos valores de ET_f (média de $0,58$) e RFA_{abs} (em torno de $5,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Entretanto, fora desse período, caiu abaixo de $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ em T3 (julho a setembro) sob os menores valores de ET_f e RAF_{abs} , respectivamente $0,25$ e $3,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figura 15.5B). Na escala anual, a BIO em CE_NE foi ligeiramente inferior a CE_N, em torno de $19 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, a menor taxa das regiões onde o bioma Cerrado está inserido.

As maiores taxas da BIO em CE_CO foram detectadas também em T1 (janeiro a março), mas com média diária trimestral acima de

85 kg ha⁻¹ d⁻¹ (Tabela 15.3), sob os mais elevados valores de 0,61 e 5,8 MJ m⁻² d⁻¹, para ET_f e RAF_{absf} respectivamente (Figura 15.5C). Os limites inferiores (Tabela 15.3) ocorreram em T3 (julho a setembro), entretanto com valores médios de 0,31 e 4,3 MJ m⁻² d⁻¹, para ET_f e RAF_{absf} respectivamente (Figura 15.5C). O valor anual para CE_CO de 25 t ha⁻¹ ano⁻¹ foi 30% mais elevado que para CE_N e CE_NE.

No bioma Cerrado, inserido na região Sudeste (CE_SE), as taxas mais elevadas da BIO, com média diária trimestral ultrapassando 95 kg ha⁻¹ d⁻¹ (Tabela 15.3), foram, como nas regiões prévias, em T1 (janeiro a março), mas, de acordo com a Figura 15.5D, com valores de ET_f (média de 0,66) e RAF_{abs} em torno de 5,8 MJ m⁻² d⁻¹. As taxas inferiores da BIO, como nas regiões prévias, também ocorreram em T3 (Tabela 15.3), mas com maior taxa média trimestral, acima de 35 kg ha⁻¹ d⁻¹, sob os valores mais baixos de 0,35 e 4,5 MJ m⁻² d⁻¹, para ET_f e RFA_{absf} respectivamente (Figura 15.5D). Com o valor anual de 26 t ha⁻¹ ano⁻¹, CE_SE se destaca com a segunda maior taxa da BIO, atrás da região CE_S.

Embora com uma área contendo o bioma Cerrado bem inferior às outras (ver Figura 15.1A), de acordo com a Tabela 15.3, CE_S se destaca com pelos valores da BIO acima de 100 kg ha⁻¹ d⁻¹ bem distribuídos ao longo do ano. Diferentemente das outras regiões em que o Cerrado está inserido, os trimestres em que ocorreram os valores máximos de 130 kg ha⁻¹ d⁻¹ foi em T3 (julho a setembro), sob o maior valor médio de ET_f de 0,72, mas com o menor valor médio de RFA_{abs} de 4,4 MJ m⁻² d⁻¹ (Figura 15.5E). A menor média trimestral da BIO, de 105 kg ha⁻¹ d⁻¹ (Tabela 15.3), ocorreu em T2 (abril a junho), sob o menor valor de ET_f de 0,57, mas o maior de RFA_{abs} de 5,5 MJ m⁻² d⁻¹ (Figura 15.5E), evidenciando o efeito mais forte ET_f com relação à RFA_{abs} na magnitude da BIO. A região CE_S apresentou a maior taxa anual da BIO de 115 t ha⁻¹ ano⁻¹, seis vezes àquela para CE_NE.

Considerando todas as regiões onde o bioma Cerrado está inserido, os trimestres com maiores taxas da BIO ocorreram de janeiro a março em CE_N, CE_NE, CE_CO e CE_SE, diferenciando apenas para CE_S em que estas aconteceram em T3 (julho a setembro). As taxas mais bai-

xas aconteceram em T3 (julho a setembro) em CE_N, CE_NE, CE_CO e CE_SE, com exceção apenas para CE_S, onde estas foram detectadas em T2 (abril a julho). De acordo com os valores das médias e de desvio padrão (DP) apresentados na Tabela 15.3, as maiores variações espaciais da BIO ocorreram em T3 (julho a setembro) em CE_SE, quando DP foi 112% da média, enquanto as menores aconteceram em T1 (janeiro a março) para CE_S, quando o percentual correspondente foi de 32%.

Para todas as regiões em que o bioma Cerrado está inserido, a ET_f influenciou mais os valores da BIO do que a RAF_{abs} , sendo isso mais evidenciado em CE_S, quando as taxas máximas da BIO ocorreram sob os mais baixos valores de RAF_{abs} e mais elevados de ET_f (Tabela 15.3 e Figura 15.5E). Isto demonstra que os níveis de umidade do solo têm um controle mais forte na BIO no bioma Cerrado (Seneviratne et al., 2010). Deve-se salientar que no estudo corrente, BIO é a produção de biomassa diária e não a biomassa atual, podendo acontecer de vegetação mais alta apresentar menor taxa que para vegetação mais baixa.

Cruzando os valores da ET e da BIO das Tabelas 15.2 e 15.3, a produtividade da água (PA), considerada aqui como a razão da BIO para a ET, apresentou maiores valores de janeiro a junho (T1-T2) para todas as regiões em que o bioma Cerrado está inserido, sendo em torno de 3,1 kg m⁻³ para CE_N; 3,0 kg m⁻³ para CE_NE; 3,3 kg m⁻³ para CE_CO; 3,2 kg m⁻³ para CE_SE e 4,3 kg m⁻³ para CE_S. Os valores inferiores de PA foram em T3 (julho a setembro), com exceção de CE_S que ocorreram em T4 (outubro a dezembro), sendo as médias de 2,3 kg m⁻³ para CE_N; 2,2 kg m⁻³ para CE_NE; 2,5 kg m⁻³ para ambos CE_CO e CE_SE; e 3,7 kg m⁻³ para CE_S. As mais fortes diferenças na PA foram detectadas entre as regiões CE_S e CE_NE com valor anual de 3,9 e 2,7 kg m⁻³, respectivamente.

Para integração das condições do crescimento vegetativo e das chuvas no Cerrado, na Figura 15.6, são mostradas as relações entre BIO e P, considerando os valores trimestrais durante o ano 2016, para cada região onde o bioma está inserido.

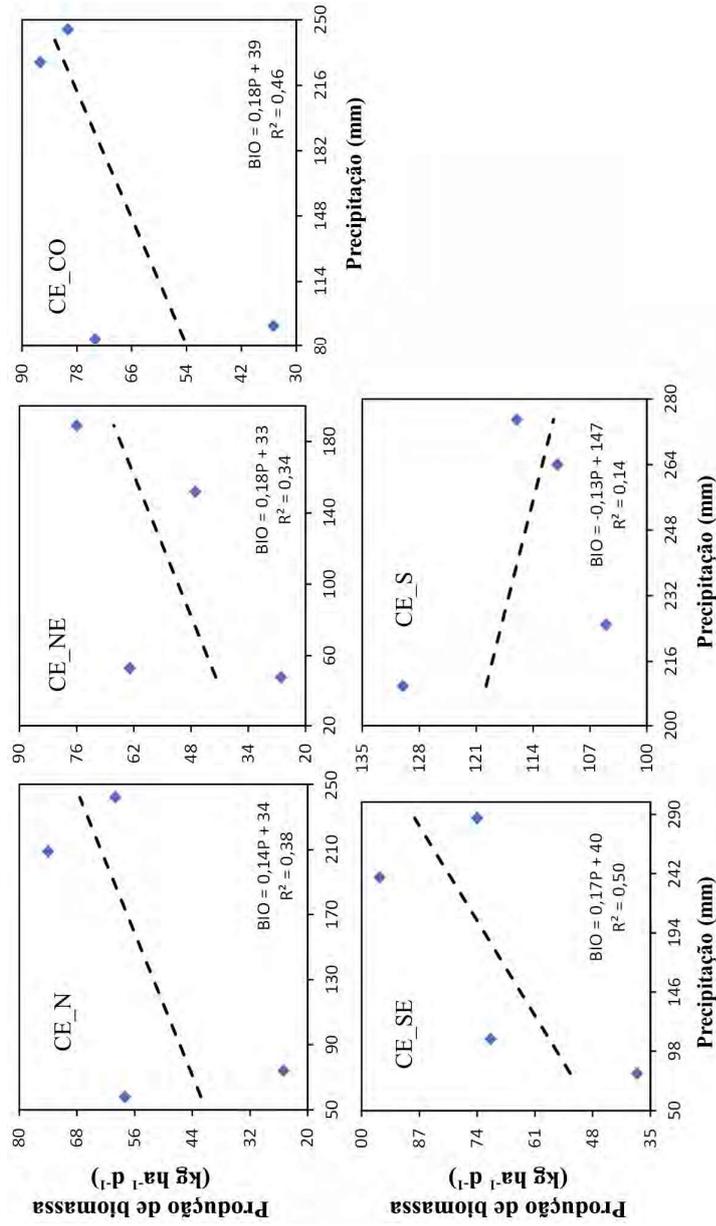


Figura 15.6. Relações entre os valores trimestrais durante o ano de 2016, da produção de biomassa (BIO) com aqueles para precipitação (P) no bioma Cerrado inserido nas regiões Norte (CE_N), Nordeste (CE_NE), Centro Oeste (CE_CO), Sudeste (CE_SE) e Sul (CE_S).

Pela Figura 15.6, por um lado, ocorreu correlação negativa entre BIO e P apenas para o bioma Cerrado inserido na região Sul (CE_S), com valor muito baixo de R^2 , o que significa situações da água sendo drenada e escoada para longe da zona das raízes e não sendo utilizada pelas plantas, evidenciando benefício de técnicas de armazenamento da água das chuvas. Por outro lado, as correlações positivas mais elevadas foram para o bioma inserido nas regiões Centro Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE), indicando melhor aproveitamento da água das chuvas no crescimento vegetativo. Mesmo com as águas das chuvas sendo drenadas e escoadas em CE_S, os elevados valores de ET_f (média anual de 0,66), juntamente com altos valores de RFA_{abs} (média anual de $5,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) promoveram as taxas mais elevadas da BIO entre as regiões onde o Cerrado está inserido.

Para integração das condições do crescimento vegetativo e dos fluxos hídricos no Cerrado, na Figura 15.7, são mostradas as relações entre BIO e ET, considerando os valores trimestrais durante o ano de 2016, para cada região onde o bioma está inserido.

No caso das correlações da BIO com ET (Figura 15.7), elas foram positivas para o bioma Cerrado inserido em todas as regiões, com os valores maiores nas regiões Norte (CE_N) e Nordeste (CE_NE), apresentando R^2 de 0,99 em ambas, enquanto as menores foram para a região Sul que apresentou R^2 de 0,82. Nas duas primeiras regiões os valores de ET_f são os mais baixos (média anual de 0,43), mas sob elevados valores de RAF_{abs} (média anual de $5,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), explicando a forte correlação da ET com a BIO, pois mesmo com bons níveis de radiação solar nessas regiões, há necessidade de umidade na zona das raízes para que os fluxos hídricos ocorram. No caso de CE_S, a ET mais condicionada às variações da demanda atmosférica, a qual apresenta maior variação ao longo do ano devido à posição latitudinal.

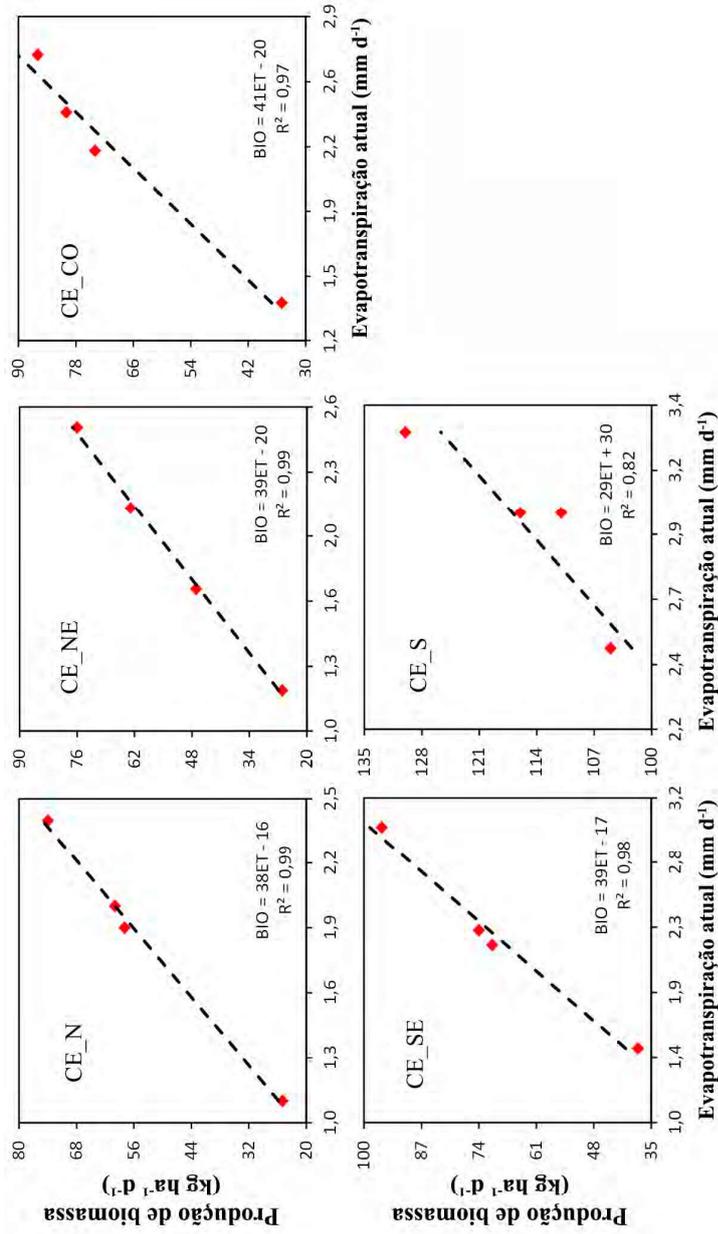


Figura 15.7. Relações entre os valores trimestrais durante o ano de 2016, da produção de biomassa (BIO) com aqueles para evapotranspiração atual (ET) no bioma Cerrado inserido nas regiões Norte (CE_N), Nordeste (CE_NE), Centro Oeste (CE_CO), Sudeste (CE_SE) e Sul (CE_S).

15.5 Considerações finais

Neste capítulo, demonstrou-se a viabilidade da aplicação conjunta do algoritmo Safer e do modelo da eficiência do uso da radiação com o produto de reflectância Modis MOD13Q1 e grades de dados climáticos para o monitoramento da dinâmica de indicadores ambientais no bioma Cerrado. Diferenças espaciais e temporais nos valores de precipitação (P), evapotranspiração atual (ET) e produção de biomassa (BIO) produziram resultados distintos para o balanço hídrico (BH) e produtividade da água (PA). As maiores diferenças entre os valores de BH e PA nas regiões onde o bioma Cerrado está inserido foram detectadas entre a região mais úmida, Sul (CE_S e a mais seca, Nordeste (CE_NE).

A variabilidade das chuvas, afetando os níveis de umidade na zona das raízes, foi o principal parâmetro climático para as magnitudes da ET e da BIO, o que explica as largas diferenças entre os ecossistemas do Cerrado nas regiões Nordeste e Sul. Deve ser enfatizado que as variações na ET podem ser também causadas por áreas com diferentes demandas atmosféricas e graus de cobertura do solo pela vegetação do bioma, afetando as partições entre transpiração e evaporação do solo.

Todos os balanços hídricos anuais nas diferentes regiões onde o bioma Cerrado está inserido foram negativos, com a região Nordeste apresentando a maior deficiência hídrica, evidenciando que os ecossistemas do bioma nessa região sofrem mais com a escassez hídrica, tomando o ano de 2016 como referência. A distribuição das chuvas e a demanda atmosférica ao longo do ano no bioma Cerrado contribuíram para a magnitude da fração evaporativa (ET_f). Entretanto, ocorreram atrasos entre ET_f e BH, o que pode ser explicado pelo tempo necessário para a recuperação dos bons níveis de umidade do solo após as chuvas, mas também porque alguma quantidade de água da chuva é perdida por escoamento superficial e percolação, afetando a BIO e então a PA.

As correlações positivas mais elevadas entre BIO e ET foram para o bioma inserido nas regiões Centro-Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE), enquanto a única negativa da relação da BIO com P foi na região Sul (CE_S). Mesmo que com evidência de drenagem e escoamento das águas das chuvas nessa última região, os elevados valores de ET_f , juntamente com altos valores de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA_{abs}), promoveram as mais elevadas taxas da BIO entre as regiões, com consequentes maiores valores de PA, embora esta região represente uma pequena parcela do bioma.

As taxas da BIO foram mais fortemente relacionadas com a ET_f do que com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA_{abs}) em todas as regiões onde o Cerrado está inserido, demonstrando que os níveis de umidade do solo têm um controle mais forte na BIO no bioma Cerrado. No entanto, isto foi mais evidenciado para o bioma dentro da região Sul (CE_S), onde os maiores valores da BIO ocorreram com os valores mais baixos de RFA_{abs} e mais altos de ET_f .

Embora os métodos tenham sido aplicados para um ano específico, o sucesso do uso conjunto de imagens do sensor MODIS e grades de dados climáticos mostrou potencial para a implementação de um sistema operacional de monitoramento das condições hídricas e de vegetação com o uso de uma série histórica de dados com detalhes suficientes para uso de indicadores ambientais para o Cerrado, para dar suporte a políticas públicas relacionadas ao manejo e conservação dos recursos naturais do bioma, com a possibilidade de replicação dos métodos em outras condições ambientais. Pesquisas futuras podem focar na detecção de anomalias nos componentes do balanço hídrico e produtividade da água para anos específicos em comparação com as condições históricas.

15.6 Referências

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A. Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil. **Scientific Reports**, v. 7, p. 8130, 2017.

ARANTES, A. E.; FERREIRA, L. G.; COE, M. T. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: Past, present, and future influences of land cover and land use. **ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 117, p. 66-78, 2015.

ARAÚJO, L. M.; TEIXEIRA, A. H. de C.; BASSOI, L. H. Evapotranspiration and biomass modelling in the Pontal Sul Irrigation Scheme. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, p. 2326-2338, 2019.

AZEVEDO, G. B. de; REZENDE, A. V.; AZEVEDO, G. T. O. S.; MIGUEL, E. P.; AQUINO, F. G.; BRUZINGA, J. S. C.; OLIVEIRA, L. S. C. DE; PEREIRA, R. S.; TEODORO, P. E. Woody biomass accumulation in a Cerrado of Central Brazil monitored for 27 years after the implementation of silvicultural systems. **Forest Ecology and Management**, v. 455, 117718, 2020.

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

CESCHIA, E.; BEZIAT, P.; DEJOUX, J. F.; AUBINET, M.; BERNHOFER, C.; BODSON, B.; BUCHMANN, N.; CARRARA, A.; CELLIER, P.; DI TOMMASI, P.; ELBERS, J. A.; EUGSTER, W.; GRÜNWARD, T.; JACOBS, C. M. J.; JANS, W. W. P.; JONES, M.; KUTSCH, W.; LANIGAN, G.; MAGLIULO, E.; MARLOIE, O.; MOORS, E. J.; MOUREAUX, C.; OLIOSO, A.; OSBORNE, B.; SANZ, M. J.; SAUNDERS, M. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 139, p. 363-383, 2010.

FERNANDES, F. H. S.; SANO, E. E.; FERREIRA, L. G.; BAPTISTA, G. M. DE M.; VICTORIA, D. de C.; FASSONI-ANDRADE, A. L. Degradation trends on MODIS derived estimates of productivity and water use efficiency: a case study for the cultivated pastures in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 11, p. 30-40, 2018.

GIAMBELLUCA, T. W.; SCHOLZ, F. G.; BUCCI, S. J.; MEINZER, F. C.; GOLDSTEIN, G.; HOFFMANN, W. A.; FRANCO, A. C.; BUCHERTA, M. P. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1365-1376, 2009.

JARDIM, A. M. R. F.; JÚNIOR, G. N. A.; da SILVA, M. V.; DOS SANTOS, A.; da SILVA, J. L. B.; PANDORFI, H.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. de; TEIXEIRA, A. H. de C.; TEODORO, P. E.; de LIMA, J. L. P. M.; JUNIOR, C. A. S.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, E. A.; SILVA, T. G. F. S. Using Remote Sensing to Quantify the Joint Effects of Climate and Land Use/Land Cover Changes on the Caatinga Biome of Northeast Brazilian. **Remote Sensing**, v. 14, 1911, 2022.

LAIPELT, L.; RUHOFF, A.L.; FLEISCHMANN, A.S., KAYSER, R.H.B., KICH, E. de M., ROCHA, H.R da, NEALE, C.M.U. Assessment of an automated calibration of

the SEBAL algorithm to estimate dry-season surface-energy partitioning in a Forest–Savanna transition in Brazil. **Remote Sensing**, v. 12, 1108, 2020.

LEWINSOHN, T. M.; PRADO, P. I. How many species are there in Brazil? **Conservation Biology**, v. 19, p. 619–624, 2005.

MARIANO, D. A.; SANTOS, C. A. C. dos; WARDLOWA, B. D.; ANDERSON, M. C.; SCHILTMAYERA, A. V.; TADESSEA, T.; SVOBODA, M. D. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 213, p. 129–143, 2018.

MATA-GONZÁLEZ, R.; MCLENDON, T.; MATIN, D. W. The inappropriate use of crop transpiration coefficients (K_c) to estimate evapotranspiration in arid ecosystems: A review. **Arid Land Research and Management**, v. 19, p. 285–295, 2005.

MONTEITH, J. L. Climate and efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 281, p. 277–294, 1977.

NUÑEZ, D. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. de C.; FRANCO, R. A. M.; LEIVAS, J. F. L. Water productivity using SAFER – Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving in watershed. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 524–529, 2017.

REBELLO, V. P. A.; GETIRANA, A.; FILHO, O. C. R.; LAKSHMI, V. Spatiotemporal vegetation response to extreme droughts in eastern Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, 100294, 2020.

SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; BEZERRA, A. S.; COUTO, A. F.; VASCONCELOS, V.; SCHÜLER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 818–828, 2019.

SANTOS, G. L. dos; PEREIRA, M. G.; DELGADO, R. C.; MAGISTRALI, I. C.; SILVA, C. G. da; OLIVEIRA, C. M. M. de; LARANJEIRA, J. P. B.; SILVA, T. P. da. Degradation of the Brazilian Cerrado: Interactions with human disturbance and environmental variables. **Forest Ecology and Management**, v. 482, 118875, 2021.

SANTOS, J. E. O.; CUNHA, F. F.; FILGUEIRAS, R.; SILVA, G. H.; TEIXEIRA, A. H. de C.; SILVA, F. C. S.; SEDIYAMA, G. C. Performance of SAFER evapotranspiration using missing meteorological data. **Agricultural Water Management**, v. 233, p. 1–8, 2020.

SENEVIRATNE, S. I.; CORTI, T.; DAVIN, E. L.; HIRSCHI, M.; JAEGER, E. B.; LEHNER, I.; ORLOWSKY, B.; TEULING, A. J. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 99, p. 125–161, 2010.

- TEIXEIRA, A. H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco River basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287-1319, 2010.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; MOURA, M. S. B.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, p. 110-127, 2008.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; GARÇON, E. A. M.; TAKEURA, C. M.; QUARTAROLI, C. F.; ALVAREZ, I. A. Modeling large-scale biometeorological indices to monitor agricultural-growing areas: applications in the fruit circuit region, São Paulo, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 1, p. 1-14, 2020a.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; TAKEMURA, C. M.; LEIVAS, J. F.; PACHECO, E. P.; SILVA, G. B.; GARÇON, E. A. M. Water productivity monitoring by using geotechnological tools in contrasting social and environmental conditions: Applications in the São Francisco River basin, Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, p. 1-9, 2020b.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; STRUIVING, T. B.; REIS, J. B. R. S.; SIMÃO, F. R. Energy balance and irrigation performance assessments in lemon orchards by applying the SAFER algorithm to Landsat 8 images. **Agricultural Water Management**, v. 247, p. 1-9, 2021a.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; PACHECO, E. P.; GARÇON, E. A. M.; TAKEMURA, C. M. Biophysical characterization and monitoring large-Scale water and vegetation anomalies by remote sensing in the agricultural growing areas of the Brazilian semi-arid region. In: PANDEY, P. C.; SHARMA, L. K. (ed.). **Advances in remote sensing for natural resource monitoring** New Jersey: Wiley Library, 2021b. p. 94-109.
- YANG, Y.; GUAN H.; BATELAAN, O.; MCVICAR, T. R.; LONG, D.; PIAO, S.; LIANG, W.; LIU, B.; JIN, Z.; SIMMONS, C. T. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1-8, 2016.
- ZHANG, X.; ZHANG, B. The responses of natural vegetation dynamics to drought during the growing season across China. **Journal of Hydrology**, v. 574, p. 706-714, 2019.
- ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 through 2009. **Science**, v. 329, p. 940-943, 2010.
- ZHOU, L.; ZHOU, G. Measurement and modeling of evapotranspiration over a reed (*Phragmites australis*) marsh in Northeast China. **Journal of Hydrology**, v. 372, p. 41-47, 2009.