

DINÂMICA DO BALANÇO DE ENERGIA DETECTADA POR SENSORIAMENTO REMOTO NOS BIOMAS DO SEALBA

Antônio Heriberto de Castro Teixeira¹; **Inajá Francisco de Souza**¹; **Janice Freitas Leivas**²; **Celina Maki Takemura**²; **Ana Flávia Maria Santos Azevedo**³

¹Professor. São Cristóvão, Sergipe. Universidade Federal de Sergipe; ²Pesquisador. Campinas, São Paulo. Embrapa Territorial; ³Discente. São Cristóvão, Sergipe. Universidade Federal de Sergipe

RESUMO

Imagens MODIS foram usadas com dados climáticos de 2007 a 2021, aplicando-se o algoritmo SAFER, para análises das condições históricas do balanço de energia nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT), dentro da região de crescimento agrícola do SEALBA. Os valores médios do saldo de radiação (R_n) variam de 6,50 a 11,50 MJ m⁻² d⁻¹ sem diferenças significativas entre os biomas. Entretanto, os fluxos médios de calor latente (λE) ficam entre 3,80 e 6,80 MJ m⁻² d⁻¹ em FA e de 2,20 a 7,20 MJ m⁻² d⁻¹ em CT com valores correspondentes para calor sensível (H) ente 0,60 e 6,70 MJ m⁻² d⁻¹ em FA e de 0,60 a 8,40 MJ m⁻² d⁻¹ em CT. No período chuvoso, a razão $\lambda E/R_n$ ultrapassa 80% em ambos os biomas, indicando as melhores condições de umidade na zona das raízes das plantas, enquanto fora desse período cai para de 34% e 20% em FA e CT, respectivamente. Com relação a H/ R_n , seus maiores valores acontecem nos períodos secos do início e final do ano, quando é acima de 60% para ambos os biomas, indicando aquecimento, enquanto no meio do ano, esta razão fica abaixo de 20%, condições de resfriamento das plantas. Os valores de fluxo de calor no solo (G), menor componente do balanço de energia, variam de 0,37 a 0,43 MJ m⁻² d⁻¹ a 0,52 a 0,57 MJ m⁻² d⁻¹ para os biomas CT e FA, respectivamente. A modelagem conduzida na atual pesquisa apresentou potencial para o monitoramento da agricultura.

PALAVRAS-CHAVE: Partição da energia; Floresta Atlântica; Caatinga;;

INTRODUÇÃO

Mudanças climáticas e de uso da terra vêm acontecendo em distintos agros-ecossistemas, causando alterações nos componentes do balanço de energia e de água. Diante dessas alterações, aplicações de sensoriamento remoto através da união de imagens de satélites e dados climáticos, em diferentes escalas temporais e espaciais, são eficientes alternativas para o monitoramento dos impactos ambientais provocados, como subsídio ao manejo racional dos recursos naturais (Jardim et al., 2022; Teixeira et al., 2021a, b; Yang et al., 2016; Zhang e Zhang, 2019).

O saldo de radiação (R_n), i.e., a diferença entre os fluxos de energia que chegam e os que saem da superfície em ambos os comprimentos de onda, curtos e longos, é particionado nos fluxos de calor latente (λE), sensível (H) e no solo (G), com magnitudes dependentes da energia disponível e das condições de umidade na zona das raízes das plantas. A quantificação de λE é particularmente relevante, pois este fluxo representa a energia usada na evapotranspiração (ET), que é o principal uso dos recursos hídricos pela vegetação bem suprida de água nos agros-ecossistemas. Por outro lado, a magnitude de H pode indicar efeitos de aquecimento ou resfriamento das superfícies (Bhattarai et al., 2017; Teixeira et al., 2021a).

Embora a ET esteja relacionada com a produção de biomassa, o aumento nas suas taxas pelo incremento das áreas agrícolas, pode significar menor disponibilidade de água para usos ecológicos e humanos. A quantificação desses efeitos através da detecção da dinâmica desses fluxos ao longo do ano é importante para o acesso da dimensão dos impactos ambientais, principalmente em regiões agrícolas com mudanças climáticas e de uso da terra (Yang et al. 2016; Zhang e Zhang 2019).

Nos biomas da região costeira do Nordeste do Brasil, existem vários tipos de espécies vegetais, as quais estão sofrendo com impactos ambientais, tais como desflorestamentos; queimadas, poluições do ar, da água e do solo; bem como substituições intensivas da vegetação natural por culturas

agrícolas, como é o caso do SEALBA, região de crescimento agrícola envolvendo os estados de Sergipe (SE), Alagoas (AL) e Bahia (BA). Essa região envolve os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT), demandando estudos de balanço de energia em larga escala para suporte ao uso sustentável dos recursos naturais (Lewinsohn e Prado, 2005; Mariano et al., 2018).

Algumas medições dos componentes do balanço de energia por diferentes métodos foram realizadas nos biomas FA e CT (Marques et al., 2020; Pereira et al., 2010; Silva et al., 2017; Teixeira et al., 2008). Entretanto, medições pontuais não são viáveis para determinação desses componentes em larga escala, devido às largas variações nas condições ambientais. Em adição, poucos esforços foram conduzidos para o monitoramento desses componentes dentro desses biomas na região do SEALBA, considerando uma longa série de imagens de satélites e dados climáticos para o entendimento das respostas dos distintos agros-ecossistemas às condições ambientais desfavoráveis.

Considerando aspectos operacionais, o algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) foi desenvolvido através de medições simultâneas dos componentes do balanço de energia em campo e por satélites no Nordeste do Brasil (Teixeira, 2010). A razão da escolha do SAFER na atual pesquisa deve-se ao fato de que, além da aplicabilidade, uma importante vantagem, com relação a outros algoritmos, é que na sua mais nova versão não há necessidade das bandas termais, sendo possível usar apenas as bandas no visível e infravermelho próximo, mais facilmente disponíveis que as termais (Consoli e Vanella, 2014). Em adição, as bandas termais do sensor MODIS, usado na pesquisa corrente, têm uma resolução espacial de 1 km, significando que as imagens cobririam mais pixels com misturas de tipos de superfície, quando comparadas com a resolução espacial de 250 m das bandas no vermelho e infravermelho próximo.

OBJETIVOS

Objetivando a criação de um sistema operacional de monitoramento dos componentes do balanço de energia em biomas com mudanças climáticas e de uso da terra, tomando a região SEALBA como referência, testamos a versão mais nova do algoritmo SAFER com o produto MODIS MOD13Q1 e dados climáticos na escala temporal de 16 dias e espacial de 250 m envolvendo um período de 15 anos de dados. Além da caracterização ambiental da região com dados históricos através das condições médias, análises posteriores de anomalias em anos específicos poderão ser realizadas para períodos específicos. Espera-se que o sucesso das aplicações dos métodos em região específica do Nordeste do Brasil, estimule replicações em outras condições ambientais com simples calibrações das equações de modelagem.

MATERIAL E MÉTODOS

Biomass e série de dados

A Figura 1 mostra a localização do SEALBA no Nordeste do Brasil e seus limites nos estados de Sergipe - SE, Alagoas - AL e Bahia - BA (Fig. 1a), juntamente com seus biomas Floresta Atlântica - FA e Caatinga - CT (Fig. 1b).

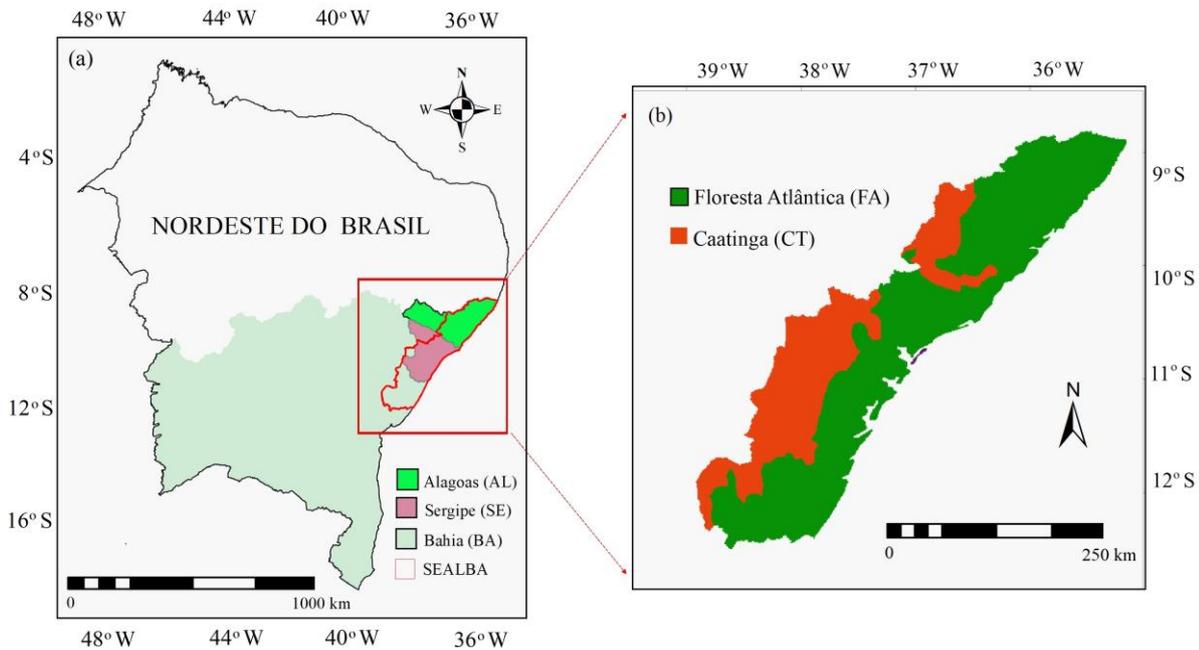


Figura 1: Localização da região do SEALBA no Nordeste do Brasil envolvendo os estados de Sergipe - SE, Alagoas - AL e Bahia - BA (Fig. 1a), juntamente com seus biomas Floresta Atlântica - FA e Caatinga - CT (Fig. 1b).

O bioma FA é caracterizado por florestas e ecossistemas associados às planícies costeiras com clima tropical úmido (Ribeiro et al., 2009). As condições ambientais são afetadas por massas de ar úmidas provenientes do Oceano Atlântico, promovendo elevados valores de temperatura e umidade do ar, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano (Francisquini et al., 2020). O bioma CT tem espécies compostas por árvores e arbustos com características para adaptações climáticas (Almagro et al. 2017), sob elevadas temperaturas e baixos valores de umidade do ar, com alguns períodos secos ao longo do ano, desenvolvendo resiliência com aumento da aridez (Beuchle et al. 2015). Ambos os biomas dentro do SEALBA vêm passando pela substituição da vegetação natural por culturas agrícolas, como grãos, fruteiras, cana-de-açúcar, silvicultura e pastagem (Procópio et al. 2019).

Os dados climáticos de entrada de 16 estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram radiação solar global incidente (R_G), temperatura do ar (T_a), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (u), cobrindo toda a região do SEALBA, possibilitando a interpolação pelo método "movimento da média". Com a interpolação e a extrapolação dos dados para 16 dias, foram obtidos pixels com as mesmas resoluções espacial e temporal das imagens de satélite. Esses dados foram usados em conjunto com o produto reflectância MOD13Q1, que tem resoluções temporal de 16 dias e espacial de 250 m, fornecendo 23 imagens compostas livres de nuvens ao longo do ano.

Modelagem do balanço de energia em larga escala

Para a modelagem dos componentes do balanço de energia com aplicação do SAFER obtiveram-se primeiramente os parâmetros de entrada por sensoriamento remoto combinando-os com as grades de dados climáticos. As equações e coeficientes de regressão foram previamente obtidos na região Nordeste do Brasil com medições simultâneas em campo e por satélite (Teixeira et al., 2008), com a metodologia descrita detalhadamente em Teixeira (2010).

O Índice da Diferença de Vegetação Normalizado (NDVI) foi calculado como:

$$R_n = (1 - \alpha_0) R_G - a_L \tau_{sw}$$

onde ρ_1 e ρ_2 são as reflectâncias nas bandas 1 (vermelho) e 2 (infravermelho próximo) provenientes do sensor MODIS.

O albedo da superfície (α_0) foi calculado conforme a equação de regressão:

$$\varepsilon_A = a_A (\ln \tau_{sw})^{b_A}$$

onde a, b e c são coeficientes de regressão 0,08, 0,41, e 0,14.

O saldo de radiação (R_n) foi estimado pela equação de Slob:

$$\varepsilon_0 = a_0 \ln NDVI + b_0$$

onde τ_{sw} é a transmissividade atmosférica para comprimento de ondas curtas e a_L é um coeficiente obtido em função da temperatura do ar (T_a).

A emissividade atmosférica (ε_A) foi calculada como:

$$T_0 = \frac{\sqrt[4]{R_G (1 - \alpha_0) + \sigma \varepsilon_a T_a^4 - R_n}}{\sigma \varepsilon_0}$$

onde a_A e b_A são os coeficientes de regressão 0,94 e 0,11, respectivamente.

A emissividade da superfície foi estimada por:

$$ET_f = \exp \left[a_{sf} + b_{sf} \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \left(\frac{ET_{ano}}{5} \right)$$

onde a_0 e b_0 são os coeficientes de regressão 0,06 e 1,00, respectivamente.

Pelo método residual a temperatura da superfície foi estimada pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$RFA_{inc} = a_R R_G$$

onde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann.

A razão de evapotranspiração atual (ET) para a de referência (ET_0) foi modelada:

$$RAF_{abs} = f_{RAF} RAF_{inc}$$

onde a_{sf} e b_{sf} são os coeficientes de regressão 1,80 e -0,008, respectivamente.

O fluxo de calor no solo (G) foi estimado como:

$$f_{RAF} = a_F NDVI + b_F$$

onde a_G e b_G são os coeficientes de regressão 3,98 e -25,47, respectivamente.

Considerando que os valores de ET/ET_0 na passagem do satélite não diferem significativamente dos diários, λE foi estimado como:

$$BIO = \varepsilon_{max} ET_f PAR_{abs} 0,864$$

onde 2,45 é um fator de conversão de unidades e ET_{024} é a evapotranspiração de referência diária calculada com os dados climáticos (Allen et al., 1998).

Para fechamento da equação simplificada do balanço de energia, o fluxo de calor sensível foi estimado como resíduo:

$$\frac{ET_{0_{ano}}}{5}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parâmetros climáticos atuantes

Como para o balanço de energia os principais parâmetros climáticos atuantes são a precipitação - P e a radiação solar global incidente - R_G (Dias-Torres et al., 2017), a Figura 2 apresenta seus valores médios, na escala de 16 dias das imagens MODIS para o período de 2007 a 2021, juntamente com os desvios padrões (DP), em termos de Dia do Ano (DA), nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro do SEALBA.

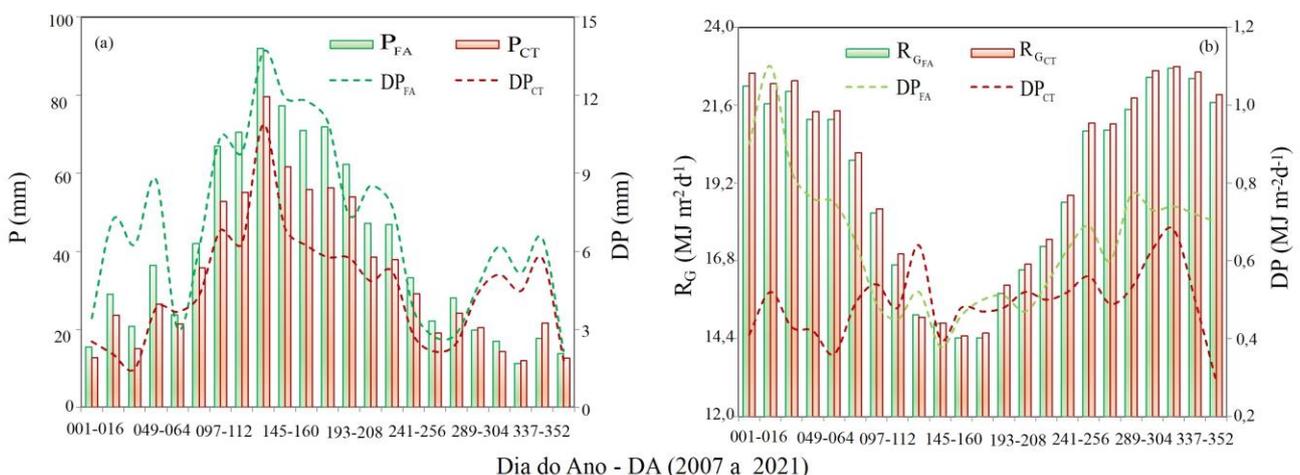


Figura 2: Médias dos pixels e desvios padrões (DP) para precipitação - P (Fig. 2a) e radiação solar global - R_G , na escala temporal de 16 dias das imagens MODIS para o período de 2007 a 2021, em termos de Dia do Ano (DA), nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) dentro do SEALBA.

Da Figura 2a, percebem-se concentrações das chuvas no meio do ano tanto para o bioma FA como para o bioma CT. Os maiores valores de P ocorrem de abril a julho (DA 097-208), quando o total médio para 16 dias fica acima de 60 mm em FA e maior que 50 mm em CT. Os valores menores de P, com totais médios para 16 dias inferiores a 15 mm em ambos os biomas, são de novembro a janeiro (DA 305-016). Considerando a escala anual, o total médio em CT, com 780 mm ano⁻¹, é 83% daquele para FA (936 mm ano⁻¹). As maiores variações espaciais das chuvas são para FA, com o valor anual de DP representando 17% da média, enquanto para CT este percentual é de 14%.

A radiação solar apresenta um comportamento oposto ao das chuvas ao longo do ano. Os níveis maiores de R_G são no início (janeiro a março, DA 001-064) e no final do ano (novembro a dezembro, DA 305-336), com valores para 16 dias acima de 22,5 MJ m⁻² d⁻¹ em ambos os biomas. Os valores inferiores acontecem no meio do ano de maio a julho (DA 145-192), com médias abaixo de 15,5 MJ m⁻² d⁻¹. Entretanto, poucas distinções existem nos valores de R_G entre os biomas quando comparadas com P, sendo a média anual de R_G em FA 99% daquela para CT. Pequenas diferenças ocorrem nas variações espaciais dos valores de R_G são verificadas entre os biomas no meio do ano, quando DP representa 3% dos valores médios dos pixels, mas fora desse período, maiores valores de DP ocorrem em FA, principalmente no início do ano (janeiro a março, DA 001-064), quando representam 4-5% das médias contra 2% em CT.

Saldo de radiação

A Figura 3 mostra, para o saldo de radiação (R_n) no SEALBA, a distribuição espacial na escala anual, juntamente com as médias e desvios padrões (DP) nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) (Fig. 3a); e a dinâmica dos valores médios dos pixels e desvios padrões (DP) para esses biomas na escala de 16 dias das imagens MODIS (Fig. 3b).

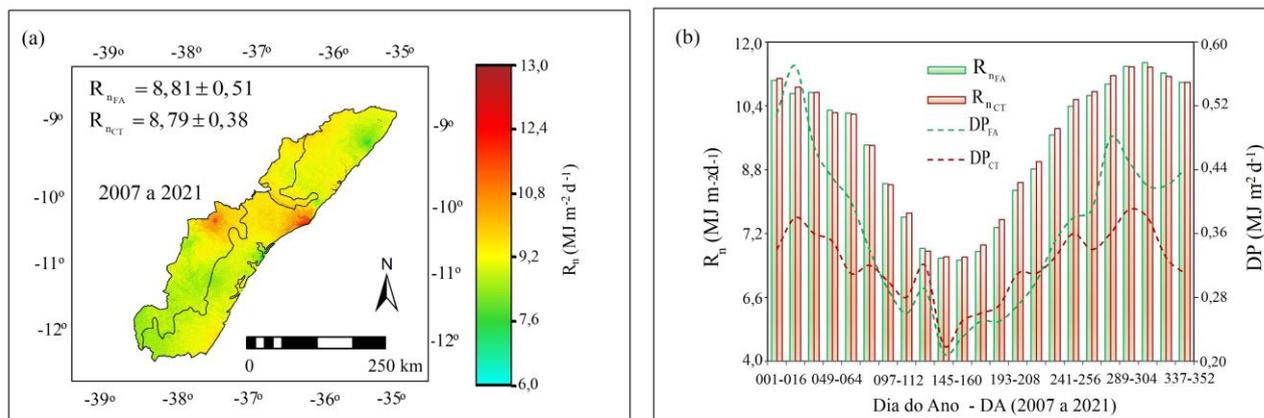


Figura 3: Saldo de radiação (R_n) no SEALBA. (a) Distribuição espacial na escala anual, juntamente com as médias e desvios padrões (DP) para os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT). (b) Dinâmica dos valores médios dos pixels e desvios padrões (DP) para esses biomas na escala de 16 dias das imagens MODIS.

A Figura 4 apresenta, para o fluxo de calor latente (λE) no SEALBA, a distribuição espacial na escala anual, juntamente com as médias e desvios padrões (DP) nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) (Fig. 4a); e a dinâmica dos valores médios dos pixels e desvios padrões (DP) para esses biomas na escala de 16 dias das imagens MODIS (Fig. 4b)

De acordo com a Figura 3a, percebe-se que, na escala anual, como para R_G , não ocorrem diferenças significativas nos valores médios de R_n entre os biomas, com os valores em torno de $8,80 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ em FA e CT. Entretanto, maiores variações espaciais são para FA, com o valor de DP representando 6% do valor médio, enquanto para CT, esse percentual é de 4%.

Comparando-se as Figuras 2b e 3b, percebe-se que ao longo do ano, os valores de R_n seguiram aqueles para R_G , Com R_n variando de $6,50$ a $11,50 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ na escala de 16 dias das imagens MODIS, sendo os valores mais elevados no início (janeiro a março, DA 001-064) e no final (outubro a dezembro, DA 289-365) do ano, enquanto os inferiores acontecem no meio do ano em ambos os biomas (maio a julho, DA 129-192), entretanto com taxas ligeiramente maiores no bioma CT. De acordo com os valores de DP, as maiores variações espaciais são para FA no início do ano. A razão R_n/R_G varia entre 0,44 de maio a junho (DA 145-160) a 0,52 de agosto e setembro (DA 241-256). No período de agosto a janeiro (DA 225-016), com essa razão acima de 0,50, ocorre uma maior energia disponível em ambos os biomas dentro da região do SEALBA. No bioma CT, Teixeira et al. (2017), com medições do satélite Landsat 5, encontraram essa razão variando de 0,41 a 0,47, o que também está em concordância com o atual estudo.

Fluxo de calor latente

A Figura 4 apresenta, para o fluxo de calor latente (λE) no SEALBA, a distribuição espacial na escala anual, juntamente com as médias e desvios padrões (DP) nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) (Fig. 4a); e a dinâmica dos valores médios dos pixels e desvios padrões (DP) para esses biomas na escala de 16 dias das imagens MODIS (Fig. 4b).

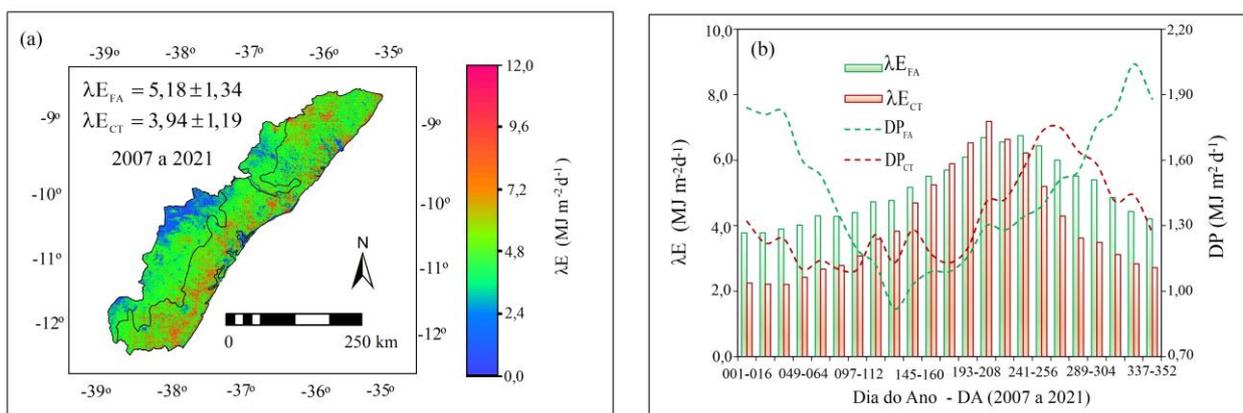


Figura 4: Fluxo de calor latente (λE) no SEALBA. (a) Distribuição espacial na escala anual juntamente com as médias e desvios padrões nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT). (b) Dinâmica dos valores médios dos pixels e desvios padrões para esses biomas na escala de 16 dias das imagens MODIS.

Ao contrário de R_n , pela Figura 4a, percebe-se que, na escala anual, as diferenças nos valores de λE entre os biomas são significativas, com o valor médio em FA 31% superior ao de CT. Embora o valor numérico de DP para FA seja superior ao de CT, este representou 26% do valor médio em FA enquanto esse percentual para CT foi de 30%, portanto representando maior variação espacial para este último bioma.

De acordo com a Figura 4b, as maiores diferenças nos valores de λE entre os biomas FA e CT, na escala de 16 dias, com os maiores para FA, ocorrem principalmente no início (janeiro a abril DA 001-112) e no final do ano (setembro a dezembro, DA 257-365), fora da estação chuvosa (ver também Fig. 2a). Os valores médios variam entre $3,70$ e $6,80 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para FA e de $2,20$ a $7,20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para CT. De junho (DA 177) a agosto (DA 224), período logo após a estação chuvosa, o bioma CT

apresenta taxas de λE superiores às de FA, quando não há limitação de umidade na zona das raízes das plantas em ambos os biomas. As maiores variações espaciais ocorrem no início (janeiro a março, DA 001-064) e no final do ano (novembro a dezembro, DA 305-352), quando os valores de DP superam 50% dos valores médios dos pixels. Dentro do período chuvoso, a razão $\lambda E/R_n$ ultrapassa 80% em ambos os biomas, indicando as melhores condições de umidade para as plantas, enquanto fora desse período, no início do ano (DA 001-016), esta razão cai para de 34% e 20% em FA e CT, respectivamente, indicando as maiores condições de estresse hídrico no bioma CT. Através de medições micrometeorológicas no bioma FA de 2013 a 2019, Guauque-Mellado et al. (2022) encontraram valores um pouco maiores dessa razão variando de 86 a 88% para FA na região Sudeste do Brasil, entretanto os autores desprezaram o parcelamento de R_n em G.

Através do balanço hídrico no bioma FA, Pereira et al. (2010) encontraram valores médios diários, na escala anual, de λE de $7,84 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, um pouco maior que o nosso limite superior, mas para condições ambientais específica no Sudeste do Brasil. Entretanto com o mesmo método entre 2013 e 2018 no bioma FA, Rodrigues et al. (2021) quantificaram valores médios de λE numa faixa de $3,43$ a $4,42 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, similares aos detectados no estudo corrente para as condições secas do início e final do ano. Com de medições de balanço de energia em campo entre 2014 e 2015 no bioma CT, Silva et al. (2017) reportaram valores diários de λE entre $2,40$ durante a estação seca e $4,80 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ na estação chuvosa. Também com medições microclimáticas de 2014 a 2015, Marques et al. (2020) encontraram taxas diárias de λE entre $0,49$ e $0,74 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ no período seco até a faixa entre $4,17$ e $6,37 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Os valores superiores nesses estudos representam as condições em que as espécies do bioma CT estão sobre ótimas condições de umidade na zona das raízes, similares aos obtidos no estudo corrente, entretanto os inferiores são menores do que o nosso, mas foram obtidos em áreas mais secas do bioma CT, mais para o interior do Nordeste do Brasil. De acordo com Guauque-Melado (2022), os biomas respondem diferentemente às condições de estresse hídrico de acordo com o clima da região, como no caso de CT, cujas espécies desenvolvem adaptações fisiológicas para superação dessas condições (Marques et al., 2020).

Fluxo de calor sensível

A Figura 5 apresenta, para o fluxo de calor latente (H) no SEALBA, a distribuição espacial na escala anual, juntamente com as médias e desvios padrões (DP) nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) (Fig. 5a); e a dinâmica dos valores médios dos pixels e desvios padrões (DP) para esses biomas na escala de 16 dias das imagens MODIS (Fig. 5b).

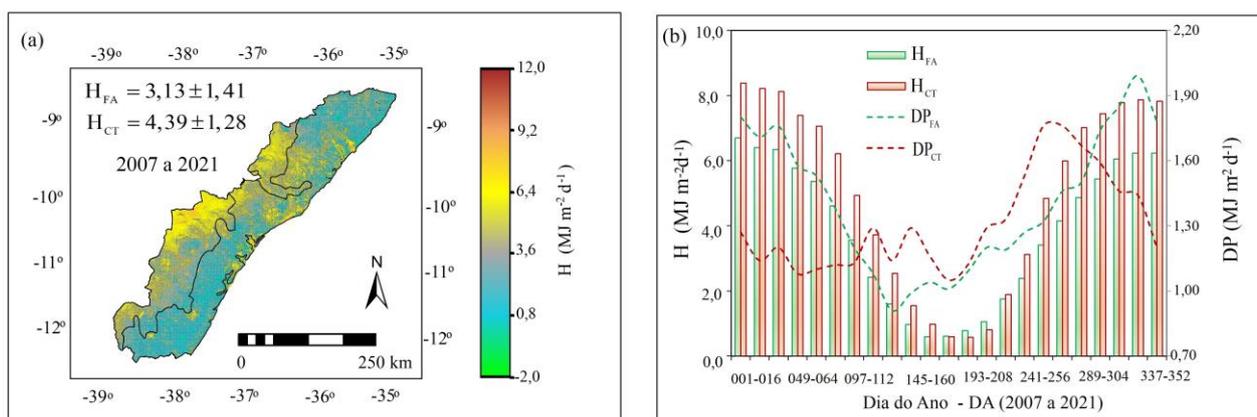


Figura 5: Fluxo de calor sensível (H) no SEALBA. (a) Distribuição espacial na escala anual juntamente com as médias e desvios padrões nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT). (b) Dinâmica dos valores médios dos pixels e desvios padrões para esses biomas na escala de 16 dias das imagens MODIS.

Como para λE , pela Figura 5a, percebe-se que, na escala anual, as diferenças nos valores de H entre os biomas são significativas, com o valor médio em CT 40% superior daquele para FA. Embora a taxa média de H em CT seja bem superior àquela para FA, pelos valores de DP para FA representando 45% do valor médio contra esse percentual de 29% para CT, percebe-se maiores variações espaciais de H no bioma FA ao longo do ano.

De acordo com os valores de H na escala de 16 dias das imagens MODIS, apresentados na Figura 5b, os valores médios variam entre 0,60 e 6,70 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para FA e de 0,60 a 8,40 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para CT. As maiores taxas, acima de 6,00 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ são de novembro a fevereiro (DA 321-048) em ambos os biomas, ocorrendo nos períodos mais secos. Os limites inferiores de H, abaixo de 1,00 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, ocorrem durante a estação chuvosa, no meio do ano, de junho a julho (DA 161-208). Embora em geral o bioma CT apresente maiores valores que para FA, há um curto período de tempo em que H em CT é ligeiramente inferior, de junho a agosto (DA 177-224). Pelos valores de DP, as maiores variações espaciais são entre maio e julho (DA 145-208), quando ultrapassaram mais de 150% os valores médios dos pixels, enquanto as menores variações espaciais ocorrem entre janeiro e março (DA 001-064), quando DP representa menos que 30% e 20% dos valores médios em FA e CT, respectivamente. De novembro a março (DA 321-064), os valores da razão H/R_n ultrapassam 60% em ambos os biomas, indicando maiores condições de aquecimento, enquanto de maio a agosto (DA 145-224) esta razão cai para abaixo de 20%, evidenciando condições resfriamento. Este comportamento está de acordo com Marques et al. (2020), que confirmam o aumento da contribuição de H quando ocorre a mudança de limitação da energia disponível para a limitação de água na zona das raízes. O aumento do percentual de R_n em H foi observado também em floresta tropical no Vietnã em condições de estresse hídrico (Kuricheva et al., 2021). Através de medições de balanço de energia em campo no bioma FA de 2013 a 2019, Guauque-Mellado et al. (2022) encontraram valores dessa razão variando de 14 a 16% para FA na região Sudeste do Brasil, um pouco inferiores aos da estação chuvosa do estudo corrente, mas desprezando o parcelamento de R_n em G.

Fluxo de calor no solo

A Figura 6 apresenta, para o fluxo de calor no solo (G) no SEALBA, a distribuição espacial na escala anual, juntamente com as médias e desvios padrões (DP) nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT) (Fig. 6a); e a dinâmica dos valores médios dos pixels e desvios padrões (DP) para esses biomas na escala de 16 dias das imagens MODIS (Fig. 6b).

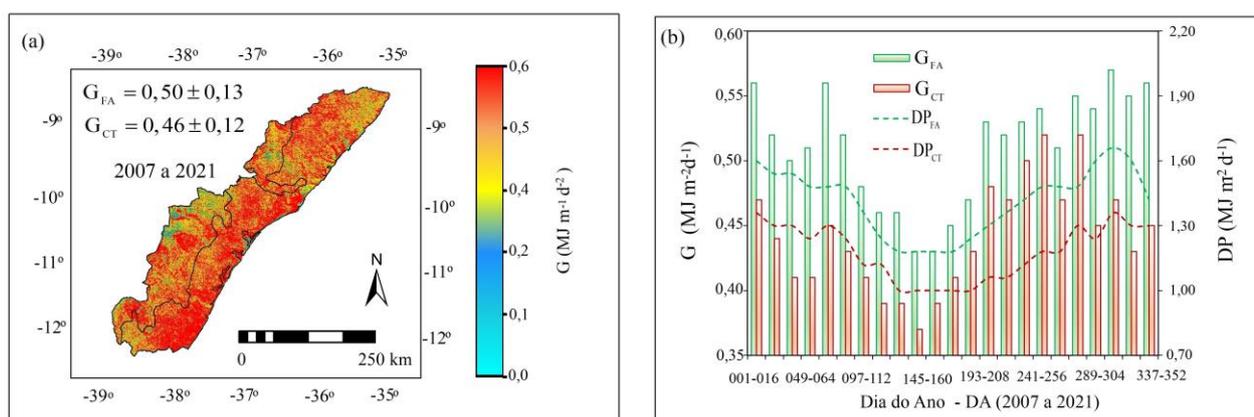


Figura 6: Fluxo de calor no solo (G) no SEALBA. (a) Distribuição espacial na escala anual juntamente com as médias e desvios padrões nos biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT). (b) Dinâmica dos valores médios dos pixels e desvios padrões para esses biomas na escala de 16 dias das imagens MODIS.

Como para R_n , de acordo com a Figura 6a, percebe-se que, na escala anual, não ocorrem diferenças significativas nos valores médios de G , mas com valores ligeiramente superiores em FA (9%) que em CT. Entretanto as variações espaciais são similares entre biomas nessa escala, com o valor de DP representando 26% do valor médio em ambos.

De acordo com Figura 6b os valores médios de G foram os de menores magnitudes entre os componentes do balanço de energia, confirmando-se que em alguns casos pode ser desprezado (Teixeira et al, 2017, 2021a). Embora a amplitude anual não seja tão grande, os valores mínimos de 0,43 e 0,37 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para FA e CT, respectivamente, acontecem de maio a junho (DA 145-160), enquanto os máximos de 0,57 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ocorrem de novembro a dezembro (DA 321-336) para FA e de 0,52 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ de outubro a novembro (DA 289-304) em CT. Os valores de DP representam de 23 a 38% os valores médios considerando os dois biomas, para os períodos dentro e fora da estação chuvosa, respectivamente. Entretanto a razão G/R_n foi de 4% para CT e 7% para FA. Os menores valores de G para CT podem ser explicados devido aos valores serem na escala diária, e a cobertura do solo sendo menor, mais radiação de ondas longas é emitida durante a noite, quando comparadas às condições de cobertura mais densa do bioma FA, que retém mais essa radiação.

CONCLUSÃO

Foi demonstrada a viabilidade do monitoramento dos componentes do balanço de energia através da aplicação do algoritmo SAFER com o produto reflectância MODIS MOD13Q1 em conjunto com dados climáticos interpolados no período de 2007 a 2021 na região de crescimento agrícola do SEALBA, Nordeste do Brasil, classificando-se os biomas Floresta Atlântica (FA) e Caatinga (CT).

Não há diferenças significativas nos valores de saldo de radiação (R_n) e fluxo de calor no solo (G) entre FA e CT dentro do SEALBA. Mas grandes distinções são detectadas na partição de R_n nos fluxos de calor latente (λE) e sensível (H). As maiores diferenças nos valores de λE entre os biomas FA e CT, com os valores mais elevados para FA, ocorrem principalmente no início e no final do ano, fora da estação chuvosa, quando acontecem as taxas mais elevadas de H . Os valores maiores de λE , e menores de H , ocorrem durante a estação chuvosa, de junho a julho, quando o bioma CT apresenta taxas de λE superiores e de H inferiores as de FA.

Dentro do período chuvoso, a razão $\lambda E/R_n$ ultrapassa 80% em ambos os biomas, indicando as melhores condições de umidade para as plantas, enquanto fora desse período, no início do ano, esta razão cai para de 34% e 20% em FA e CT, respectivamente, evidenciando condições de estresse hídrico na zona das plantas. No período de novembro a dezembro, os valores da razão H/R_n ultrapassam 60% em ambos os biomas, indicando maiores condições de aquecimento, enquanto de maio a agosto esta razão cai para abaixo de 20%, evidenciando condições de resfriamento.

Mesmo que a modelagem tenha sido testada em uma região específica do Nordeste do Brasil, a aplicabilidade do uso conjunto de imagens de satélites e dados climáticos interpolados apresenta grande potencial para implementação de um sistema de monitoramento dos componentes do balanço de energia em larga escala, com possibilidade de replicações dos métodos em quaisquer condições ambientais após prováveis necessidades de calibrações das equações de regressão.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro ao projeto "Monitoramento dos balanços de energia, de água e de carbono com geotecnologias na região do SEALBA", Processo 311532/2021-7.

REFERÊNCIAS

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy, 1998.

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.

Beuchle, R.; Grecchi R.C.; Shimabukuro, Y.E.; Seliger, R.; Eva, H.D.; Sano, E.; Achard, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116-127, 2015.

Bhattarai, N., Wagle, P., Gowda, P.H., Kakani, V.G. Utility of remote sensing-based surface energy balance models to track water stress in rain-fed switchgrass under dry and wet conditions. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 113, 128-141, 2017.

Consoli, S; Vanella, D. Comparisons of satellite-based models for estimating evapotranspiration fluxes. **Journal of Hydrology**, v. 513, p. 475-489, 2014.

Díaz-Torres, J.J.; Hernández-Mena, L.; Murillo-Tovar, M.A.; León-Becerril, E.; López-López, A.; Suárez-Plascencia, C.; Aviña-Rodríguez, E.; Barradas-Gimate, A.; Ojeda-Castillo, V. Assessment of the Modulation Effect of Rainfall on Solar Radiation Availability at the Earth's Surface. **Meteorological Applications**, v. 24, p. 180-190, 2017.

Francisquini, M.I.; Lorente, F.L.; Pessenda, L.C.R.; Junior, A.A.B.; Mayle F.E.; Cohen, M.C.L.; França, M.C.; Bendassolli, J.A.; Giannini, P.C.F.; Schiavo, J.A.; Macario, K. Cold and humid Atlantic Rainforest during the last glacial maximum, northern Espírito Santo state, southeastern Brazil. **Quarterly Science Review**, v. 244, p. 106489, 2020.

GUAUQUE-MELADO, D.; RODRIGUES, A.; TERRA, M.; YANAGI, S.; DIOTTO, A.; de MELLO, C. Evapotranspiration under Drought Conditions: The Case Study of a Seasonally Dry Atlantic Forest. **Atmosphere**, v. 13, 871, 2022.

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, p. 1911, 2022.

Kuricheva, O.A.; Avilov, V.K.; Dinh, D.B.; Sandler, R.B.; Kuznetsov, A.N.; Kurbatova, J.A. Seasonality of Energy and Water Fluxes in a Tropical Moist Forest in Vietnam. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 299, 108268, 2021.

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.; Schiltmeyera, 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.

Marques, T.V.; Mendes, K; Mutti, P.; Medeiros, S.; Silva, L.; Perez-Marin, A.M.; Campos, S.; Lúcio, P.S.; Lima, K.; Reis, J. dos; Ramos, T.M.; Silva, D.F. da; Oliveira, C.P.; Costa, G.B.; Antonino, A.C.D.; Menezes, R.S.C.; Santos e Silva, C.M.; Bergson Bezerra, B. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from seasonally dry tropical forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 287, p. 107957, 2020.

- Pereira, D.R.; Mello, C.R. de; Silva, A.M. da; Yanagi, S.N.M. Evapotranspiration and estimation of aerodynamic and stomatal conductance in a fragment of Atlantic Forest in Mantiqueira range region, MG. **Cerne**, v. 16, p. 32-40, 2010.
- Procopio, S. de O.; Cruz, M.A.S.; Almeida, M.R.M. de; Jesus Junior, L.A. de; Nogueira Junior, L.R.; Carvalho, H.W.L. de. Sealba: região de alto potencial agrícola no Nordeste brasileiro. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2019. (Embrapa Tabuleiros Costeiros, Documentos, 221).
- Rodrigues, A.F.; Mello, C.R. de; Terra, M.C.N.S.; Beskow, S. Water balance of an Atlantic Forest remnant under a prolonged drought period. **Ciência Agrotecnica**, v. 45, e008421, 2021.
- 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.
- Silva, P.F. da; Lima, J.R. de S.; Antonino, A.C.D.; Souza, R.; Souza, E.S. de; Silva, J.R.I.; Alves, E.M. Seasonal patterns of carbon dioxide, water, and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71-82, 2017.
- 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.; Hernandez, F.B.T.; Franco, R.A.M. Large-scale radiation and energy balances with Landsat 8 images and agrometeorological data in the Brazilian semiarid region. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, 016030, 2017.
- 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.; Pacheco, E.P.; Silva, C.O.F.; Dampieri, M.G.; Leivas, J.F. SAFER applications for water productivity assessments with aerial camera onboard a remotely piloted aircraft (RPA). A rainfed corn study in Northeast Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 22, p. 105514, 2021b.
- 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, 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.