



SAZONALIDADE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA BAHIA E ANÁLISE DA PROJEÇÃO FUTURA

Seasonality of reference evapotranspiration in Bahia and analysis of future projection

Estacionalidad de la evapotranspiración de referencia en Bahia y análisis de proyección futura

 <https://doi.org/10.35701/rcgs.v28.1161>

Wendy Kaori Matsunaga¹

Romero Thiago Sobrinho²

Sílvia Maria Dantas³

José Ivaldo Barbosa de Brito⁴

Histórico do Artigo:

Recebido em 03 de julho de 2025

Aceito em 29 de março de 2026

Publicado em 17 de maio de 2026

RESUMO


O presente estudo teve como objetivo validar e quantificar as estimativas da a evapotranspiração de referência (ET_o) com os dados provenientes do ERA5-Land para o estado da Bahia e investigar quais as tendências esperadas no período de 1993 à 2002 e para o ano de 2065. Foram utilizados os dados horários de superfície do ERA5-Land que pertence ao ECMWF, além disso análise utilizou o modelo CNRM-CM6-1-HR no cenário SSP2-4.5, disponibilizado pelo CMIP6. Para fins de validação, foram utilizados dados de sete estações meteorológicas convencionais no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Com base nos resultados obtidos a estimativa da ET_o com os dados da reanálise apresentaram uma boa relação com a dos dados observados nas estações. Dessa forma, na ausência de dados observacionais a ET_o pode ser estimada com dados de reanálise, uma vez comprovada que esta estimativa apresenta resultados confiáveis. A análise sazonal apontou padrões consistentes de evapotranspiração, associados a precipitação, radiação solar, temperatura e umidade do ar. As tendências climáticas do modelo CNRM-CM6-1-HR apontam para o aumento das taxas da ET_o em todas as estações do ano, em decorrência da redução das chuvas e aumento da temperatura na Bahia.

Palavras-chave: Tendências Climáticas; validação; CNRM-CM6-1-HR.

¹ Pesquisadora Dra. do Instituto Nacional de Pesquisas espaciais (INPE). Email: wendy.matsunaga@inpe.br

 <https://orcid.org/0000-0002-6778-5450>

² Dr., Agência Brasileira de Meteorologia (CLIMATEMPO). Email: romero-thiago@hotmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-9059-0590>

³ Dra., Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Email: silviadantasrn@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-0777-8475>

⁴ Professor Dr., Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Email: jivaldobrito@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-1845-935X>

ABSTRACT

The present study aimed to validate and quantify reference evapotranspiration (ET_o) estimates with ERA5-Land data for the state of Bahia and investigate what trends are expected in the period from 1993 to 2002 and for the year 2065. ECMWF's hourly ERA5-Land surface data were used. The analysis also used the CNRM-CM6-1-HR model in the SSP2-4.5 scenario provided by CMIP6. Data from seven conventional weather stations in the Meteorological Database for Teaching and Research (BDMEP) of the National Institute of Meteorology (INMET) were used for validation. Based on the results, ET_o estimates with reanalysis data showed a good relationship with observed weather station data. Therefore, in the absence of observational data, ET_o can be estimated with reanalysis data, once it has been proven that these estimates are reliable. The seasonal analysis showed consistent patterns of evapotranspiration associated with precipitation, solar radiation, temperature, and air humidity. The climate trends of the CNRM-CM6-1-HR model point to an increase in ET_o rates in all seasons of the year due to a decrease in rainfall and increase in temperature in Bahia.

Keywords: Climate Trends; validation; CNRM-CM6-1-HR.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo validar y cuantificar las estimaciones de la evapotranspiración de referencia (ET_o) con datos que provienen del ERA5-Land para el estado de Bahía e investigar cuales son las tendencias esperadas en el período de 1993 a 2002 y para el año 2065. Se utilizaron los datos horarios de superficie de ERA5-Land, pertenecientes al ECMWF. Además, el análisis utilizó el modelo CNRM-CM6-1-HR en el escenario SSP2-4.5, proporcionado por el CMIP6. Para la validación, se utilizaron datos de siete estaciones meteorológicas convencionales de la Base de Datos Meteorológicos para la Enseñanza y la Investigación (BDMEP) del Instituto Nacional de Meteorología (INMET). Con base en los resultados obtenidos, la estimación de la ET_o con los datos de reanálisis mostró una buena correlación con los datos observados en las estaciones. Por lo tanto, en ausencia de datos observacionales, la ET_o puede estimarse con datos de reanálisis, ya que se ha demostrado que esta estimación presenta resultados fiables. El análisis estacional mostró patrones consistentes de evapotranspiración, asociados a precipitación, la radiación solar, la temperatura y la humedad del aire. Las tendencias climáticas del modelo CNRM-CM6-1-HR indican un aumento en las tasas de ET_o en todas las estaciones del año, debido a la reducción de lluvias y el aumento de la temperatura en Bahía..

Palabras clave: Tendencias climáticas; validación; CNRM-CM6-1-HR.

INTRODUÇÃO

Evaporação é o processo em que a água de superfícies evaporantes, tais como lagos, rios, solos e vegetação, é convertida em vapor. A transpiração consiste da vaporização de água líquida contida nos tecidos vegetais e sua remoção para a atmosfera. Enquanto, a evapotranspiração é a evaporação e a transpiração acontecendo simultaneamente (Allen et al., 1998). É fundamental conhecer os diferentes conceitos de evapotranspiração, como, por exemplo, a evapotranspiração potencial (ETP), que é a água evaporada por uma ampla superfície vegetada, em crescimento ativo e abrangendo completamente um terreno bem suprido de umidade, tal que a demanda atmosférica em nem um momento é restringida por falta d'água no solo. A evapotranspiração real é a que ocorre numa superfície vegetada, independentemente de sua área, de seu porte e das condições de umidade do solo e sem imposição de qualquer condição de contorno. Evapotranspiração de referência (ET_o) é uma evapotranspiração potencial para uma condição específica, ou seja, é a evapotranspiração que ocorre

em uma superfície de cultura hipotética, com altura de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência do dossel constante e igual a 70 s.m^{-1} (Tomasella;Rossato, 2005).

Estudos envolvendo a estimativa e predição precisa da evapotranspiração de referência são de grande importância para o planejamento, dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação visando um uso mais eficiente da água, principalmente em áreas que sofrem de escassez hídrica (Lima et al., 2020). Como é o caso da maioria dos estados do nordeste brasileiro, incluindo a Bahia (Ribeiro et al., 2019; Rufo et al., 2019), com extensas regiões de produção agrícola. Devido a necessidade da utilização de um número relativamente elevado de variáveis meteorológicas para a estimativa da ETo e a existência de uma malha espacial de estações meteorológicas, no Brasil, com muitas lacunas, ou seja, ausência de estações meteorológicas em muitas áreas. Por outro lado, estudos envolvendo a utilização de dados de reanálise demonstram a viabilidade do seu uso na Bahia, principalmente em áreas dados fornecidos por estações meteorológicas (Matsunaga et al., 2024).

Portanto, buscou-se utilizar dados de reanálises validados para quantificar consistentemente no tempo e espaço, a variação sazonal da evapotranspiração no estado da Bahia. Em que o conjunto de dados ERA5-Land, do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) foi escolhido devido à sua resolução espacial refinada de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$; resolução temporal horária, com cobertura temporal desde primeiro de janeiro de 1950 até o presente e atualização em tempo quase real. Conforme Muñoz-Sabater (2019), esta reanálise combina dados de modelo com observações de todo o mundo em um conjunto de dados globalmente completo e consistente usando as leis da física. Fornecendo informações precisas sobre variáveis meteorológicas globais da superfície do planeta; e uma descrição precisa do clima passado.

Este banco de dados usa variáveis atmosféricas ERA5, como temperatura e umidade do ar, como entrada para controlar campos de superfície, das variáveis meteorológicas, simulados. Isso é chamado de forçamento atmosférico e, sem ele, as estimativas baseadas em modelos podem se desviar rapidamente da realidade. Embora as observações não sejam utilizadas diretamente pelo ERA5-Land (Muñoz-Sabater, 2019). Em paralelo, o uso de dados meteorológicos na agricultura tem grande importância, pois são essenciais no monitoramento do desenvolvimento das culturas agrícolas. Portanto, são necessárias observações precisas nas coletas de dados nas estações, que leve a uma previsão da evapotranspiração e projeção de cenários futuros confiáveis (Lima et al. 2020).

As projeções de mudanças climáticas futuras desempenham um papel fundamental na melhoria da compreensão do sistema climático, bem como na caracterização de riscos sociais e opções de resposta. O Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) é a principal atividade da Fase 6

do Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) que fornece projeções climáticas com base em cenários alternativos de emissões futuras e mudanças no uso da terra produzidas com modelos de avaliação integrados (O'Neill et al., 2016).

Enquanto os Representative Concentration Pathway (RCP) são cenários de emissões de gases de efeito estufa que abrangem faixas de valores de forçamento radiativo até o ano 2100. O RCP4.5 é um cenário que estabiliza o forçamento radiativo em $4,5 \text{ W m}^{-2}$ em 2100 sem nunca exceder esse valor, ou seja, é o aumento do efeito estufa da atmosfera terrestre em $4,5 \text{ W.m}^{-2}$ gradativamente até 2100. Simulado com o Modelo de Avaliação de Mudança Global (GCAM), o RCP4.5 inclui emissões globais de longo prazo de gases de efeito estufa, espécies de vida curta e uso e cobertura da terra em uma estrutura econômica global (Thomson et al., 2011).

Posteriormente os RCPs foram substituídos por cenários SSP. Abrangendo uma gama ainda mais ampla de futuros de concentração de CO_2 , com o extremo superior (SSP5-8.5) produzindo concentrações mais elevadas do que o cenário RCP8.5 anterior e o cenário inferior SSP1-1.9 resultando em emissões de CO_2 até 350 ppm em a longo prazo (2150). Além disso, num aspecto mais técnico, as concentrações do SSP abrem novos caminhos. Pela primeira vez, as projeções de gases de efeito estufa estão disponíveis para 43 gases de efeito estufa, com variações latitudinais e sazonais capturadas. Por exemplo, em 2050, as concentrações do hemisfério norte no cenário SSP3-7.0 serão 1,2% e 4,3% superiores às médias do hemisfério sul para CO_2 e CH_4 , respectivamente; com implicações correspondentes não negligenciáveis para o forçamento radiativo (Meinshausen et al., 2020).

Neste contexto, este estudou buscou validar e quantificar as estimativas da ETo com os dados ERA5-Land para o estado da Bahia e averiguar quais as tendências esperadas para o ano de 2065, utilizando o modelo francês CNRM-CM6-1-HR no cenário SSP2-4.5, disponibilizado pelo CMIP6.

OBJETIVOS DO TRABALHO

- Validar a estimativa da ETo através dos dados das estações meteorológicas do INMET;
- Computar ETo pelo método de Penman Monteith-FAO no estado da Bahia com dados de reanálises do ERA-5Land do ECMWF na grade de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$;
- Gerar mapas sazonais e a média da ETo no período de 10 anos; e
- Gerar mapas sazonais e a média da ETo para 2065.

MATERIAL E MÉTODOS

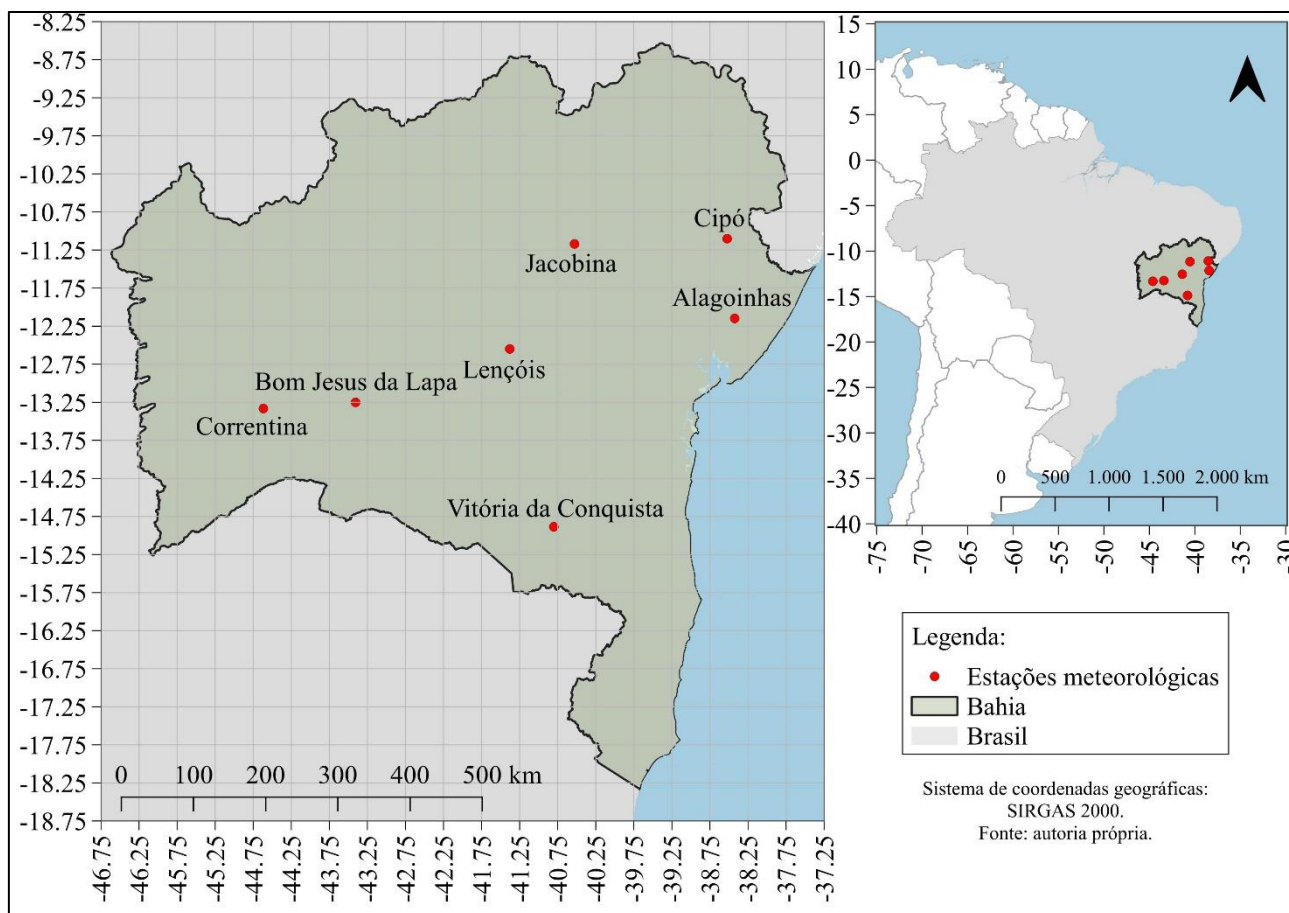
A área de estudo compreende o estado da Bahia (Figura 1), situada na região Nordeste do Brasil no período de 1º de janeiro 1993 a 31 de dezembro 2002. Foram utilizados os dados horários de superfície do ERA5-Land que pertence ao ECMWF, agrupados na frequência diária, para as variáveis de temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho a 2 m, o balanço da radiação solar e termal de superfície, componente u e v do vento a 10 m; com resolução horizontal 0,1° x 0,1° e a resolução nativa de 9 km.

Para fins de validação, foram utilizados dados de sete estações meteorológicas convencionais no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), medidos ao longo de 10 anos (de 1º de janeiro de 1993 a 31 de dezembro de 2002), para os municípios estudados, utilizando instrumentos como termômetros de bulbo seco, para temperaturas máximas e mínimas do ar; termômetros de bulbo úmido para cálculo da umidade relativa média; heliógrafos para medir a insolação; anemômetros para a velocidade média do vento a 10 m; e pluviômetros de chuva.

Durante o período de 1981 a 2020, somente sete das 23 estações meteorológicas convencionais do INMET possuem dados com um número de falha, ou seja, dados ausentes em menos de 25% dos dias, em um período de anos contínuos, de 1993 a 2002. Portanto, estas sete estações foram selecionadas para o estudo, são elas: Alagoinhas, Bom Jesus da Lapa, Cipó, Correntina e Vitória da Conquista com até 20% dados com falha, e Jacobina e Lençóis com menos de 25% de dados faltantes. As localizações podem ser observadas na Figura 1.

As estações meteorológicas pertencem aos municípios de Alagoinhas e Cipó estão situados na mesorregião do Nordeste da Bahia e abraçam biomas da Mata Atlântica e Caatinga, exibindo níveis anuais de precipitação de 1.147,96 mm e 578,17 mm, respectivamente. Bom Jesus da Lapa ocupa a região do Vale do São Francisco, caracterizada pelos biomas Cerrado e Caatinga, apresentando uma precipitação anual de 814,55 mm. Na porção mais distante no oeste da Bahia, localiza-se Correntina, incorporada ao ecossistema do Cerrado brasileiro, com uma média anual de precipitação de 935,37 mm.

Figura 1: Mapa de localização das estações meteorológicas do INMET no estado da Bahia.



Fonte: Os autores, 2023.

Jacobina está localizada no Centro-Norte Baiano e com bioma caatinga. As médias anuais de precipitação são 857,45 mm. Enquanto, Lençóis e Vitória da Conquista localizam-se na mesorregião do Centro-Sul da Bahia, com um índice pluviométrico anual de 1054,47 mm e 735,44 mm e inseridos nos biomas da caatinga e Mata Atlântica, respectivamente (INMET, 2023). Para compração dos dados de reanálise e os observados em cada estação, foram utilizados dados ECMWF com resolução de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, considerando o ponto central equivalente à localização da estação meteorológica e seus quatro pontos periféricos ao norte, sul, leste e oeste com o objetivo de minimizar possíveis erros. Desta forma, foram validados sete pontos equivalentes às estações através do coeficiente de determinação (R^2).

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO) recomenda a utilização da evapotranspiração de referência (ET_o). Portanto, a ET_o foi estimada pelo método Penman Monteith-FAO (Equação 1) proposta por Allen et al., (1998) a partir da utilização a radiação líquida na superfície da cultura (R_n), temperatura diária do ar (T), velocidade do vento a 2 metros de altura (u_2), pressão de vapor de saturação (e_s), pressão de

vapor real (e_a) e curva de pressão de saturação (Δ) e constante psicrométrica (γ); considerando o fluxo do calor do solo (G) nulo.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

Na equação 1 a pressão de vapor saturada (e_s) pode ser determinada pela formula de Tétens (1930) em função da temperatura do ar (T) em graus celsius ($^{\circ}\text{C}$) (Equação 2), a pressão atual de vapor (e_a) utiliza a Temperatura do ponto de orvalho (T_d) através da Equação 3:

$$e_s = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 T}{T + 237,3} \right] \quad (2) \quad e_a = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 T_d}{T_d + 237,3} \right] \quad (3)$$

O balanço de radiação (R_n) na superfície é exposto na Equação 4, no caso das estações meteorológicas que não dispõem de dados de radiação solar e terrestre é parametrizado usando-se a insolação, a temperatura do ar e a pressão de vapor, de acordo com a equação sugerida por Allen et al. (1998), em que R_{ns} é o saldo de radiação solar (radiação de ondas curtas) e R_{nt} é o saldo de radiação termal (radiação de ondas longas):

$$R_n = R_{ns} - R_{nt} \quad (4)$$

Em geral, os dados de ventos estão disponíveis na forma de componentes zonal (u) e meridional (v), em 10 metros de altura do solo. Portanto, se faz necessário calcular a magnitude do vento \overline{VV} (Equação 5). Além disso, como na equação 1 a magnitude do vento é usada a dois metros de altura do solo, torna-se imperativo estimar a magnitude do vento a 2 metros, que de acordo com Allen et al. (1998) é dada pela Equação 6:

$$\overline{VV} = \sqrt{(u)^2 + (v)^2} \quad (5) \quad u_2 = \overline{VV} \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \quad (6)$$

Na presente pesquisa foi utilizado o Python 3.9.17 (Van Rossum; Drake, 1995) para a manipulação de dados e geração de mapas, com a instalação das bibliotecas Pandas (Reback et al., 2020), Xarray (Hoyer; Hamman, 2017), Numpy (Harris et al., 2020) e Matplotlib (Hunter, 2007) através do editor *Visual Studio Code* para processar dados de reanálises na frequência horária, em formato NetCDF. Dessa forma, as variáveis foram agrupadas em uma base de dados única e concatenadas em frequência diária.

Realizou-se a conversão da longitude de 0 a 360° para -180 a 180°, agrupados espacialmente na grade nativa do modelo. E foram utilizados dados de elevação em grades de 0,5° x 0,5° do Joint

Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (JISAO) que pertencem ao National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), em formato netcdf. Posteriormente, foi feita uma seleção das latitudes e longitudes mais próximas correspondentes à resolução do ERA5-Land para uni-los as demais variáveis. Por fim, os dados foram computados em função do tempo, da latitude e longitude para calcular e plotar as médias sazonais e anual da ETo na Bahia.

MODELO DO CMIP6

Os dados provenientes do CMIP6 de modelos globais dos centros de pesquisa que contribuem para confecção dos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Para este estudo foi utilizado o modelo CNRM-CM6-1-HR na grade de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ com cenário SSP2-P4.5 para análise das projeções do ano de 2065.

Foram utilizadas as variáveis diárias de temperatura do ar, e variáveis mensais da velocidade do vento e umidade relativa, todos próximos à superfície. Para o cálculo de R_n , foram utilizadas as seguintes variáveis: radiações de onda longa e onda curta que chegam à superfície e radiações de onda longa e onda curta que ascendem da superfície. Os dados foram interpolados para frequência diária para o cálculo de ETo e agrupados em médias sazonais.

A ETo do CNRM-CM6-1-HR foi estimada da mesma forma do ERA5-Land. E A pressão atual de vapor pôde ser determinada conhecendo a umidade relativa do ar (Equação 7):

$$UR = \frac{e_a}{e_s} \quad (7)$$

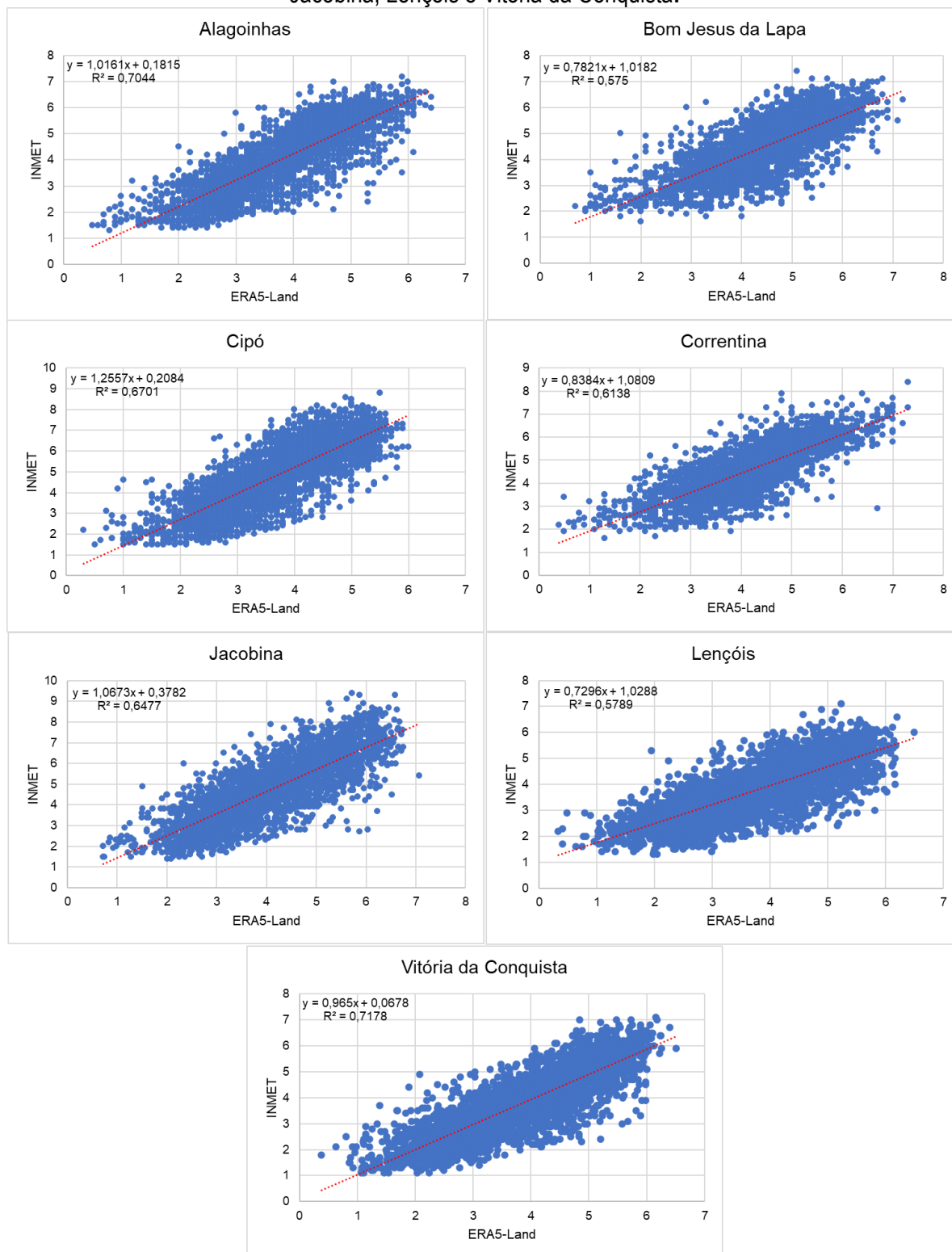
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística dos resultados é apresentada na Figura 2. Observa-se, de maneira geral, que o local que apresentou maior coeficiente de determinação entre os dados observados e os da reanálise foi Vitória da Conquista, seguido por Alagoinhas e Cipó, enquanto o de menor coeficiente foi encontrado em Lençóis. Pelos gráficos o valor mais elevado é em Vitória da Conquista 0,718, seguindo por Alagoinhas 0,704 e Cipó 0,670. Os menores R^2 são de Bom Jesus da Lapa 0,576 e Lençóis 0,579.

O coeficiente de determinação permite avaliar a confiabilidade dos dados da reanálise ERA5-land quando comparados aos dados das estações meteorológicas. Portanto, com base nos resultados obtidos a estimativa da ETo com os dados da reanálise apresentaram uma boa relação com a dos dados observados nas estações. Assim, na ausência de dados observacionais a evapotranspiração de

referência pode ser estimada com dados de reanálise, uma vez que se constatou que esta estimativa apresenta resultados com boa aceitação e confiáveis.

Figura 2: Coeficiente de determinação (R^2) para Alagoinhas, Bom Jesus da Lapa, Cipó, Correntina, Jacobina, Lençóis e Vitória da Conquista.



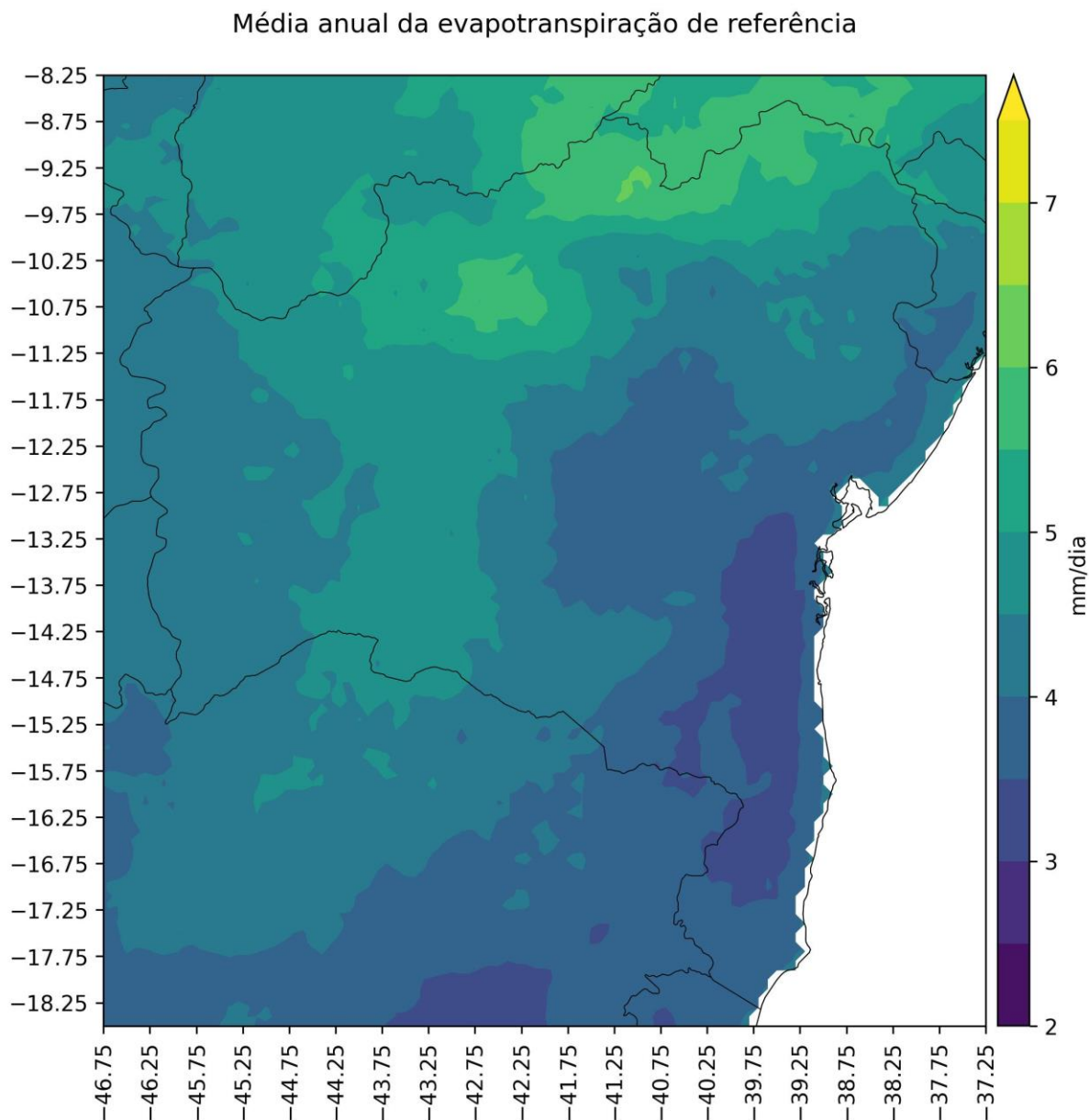
Fonte: Os autores, 2023.

A ETo média anual estimada para o estado da Bahia varia entre 3 mm dia⁻¹ e 6,5 mm dia⁻¹ (Figura 3), possuindo a maior área semiárida dentre todos os estados do nordeste do Brasil (Avala et al., 2017). Dentro da região semiárida existe diferentes regimes de precipitação, Lopes et al. (2019) esclarecem que a maior precipitação (900 mm ano⁻¹) é observada nas porções leste e oeste e em áreas isoladas da Chapada Diamantina, e diminui em direção ao centro, atingindo valores anuais mínimos inferiores a 500 mm no extremo norte da Bahia. Portanto, é comum encontrar regiões, na Bahia, em que a perda por evapotranspiração é maior do que o volume da precipitação na maioria dos meses ou durante o ano todo, como foi observado por autores como Carvalho (2016), dos Santos et al., (2018) e Albuquerque et al., (2020).

A região com menores taxas de ETo está localizada no leste da Bahia, principalmente no Sudeste (Figura 3) com proximidade do litoral, nesta região ocorrem chuvas durante todo o ano (Dourado et al. 2013), com pouca variabilidade sazonal de temperatura e de umidade do ar. Um estudo realizado por Silva et al. (2019) que aplicou o conceito de grau de concentração de precipitação (PCD) à região do nordeste brasileiro, revelou faixas de valores entre 0,16 e 0,36 para o litoral sul da Bahia. Esses números indicam uma distribuição regular da precipitação ao longo de todo o ano, uma tendência possivelmente influenciada pelos distintos sistemas atmosféricos que operam nessa área em diferentes estações, como, por exemplo, a Zona de Convergência do Atlântico Sul, conforme apontado por Simões et al., (2018), sistemas frontais (Kousky, 1979) e ondas de leste conforme descrito por Gomes et al. (2019).

A ETo na Bahia apresenta variações marcantes ao longo das estações do ano e é influenciada diretamente pelos fatores climáticos e geográficos. Neste contexto, é mostrado na Figura 4 as configurações sazonais da ETo estimada para o verão (DJF), outono (MAM), inverno (JJA) e primavera (SON) do hemisfério sul, Figura 4a, 4b, 4c e 4d, respectivamente. Durante o verão (Figura 4a) a ETo em todo o estado da Bahia apresenta altas taxas de evapotranspiração de referência e atinge valores que chegam a 7,2 mm dia⁻¹, no nordeste do Estado devido ao aumento da radiação solar e da temperatura do ar. Contudo, é a estação associados ao principal período chuvoso na maior parte do estado (novembro a março), incluindo a região semiárida, com suas máximas chuvas em dezembro (Kousky; Chu 1978; Rao; Hada 1990; de Souza; Nascimento, 2020), decorrente da atuação da zona de convergência do Atlântico Sul e atuação de sistemas frontais, principalmente na parte sul do Estado. Durante a estação chuvosa, que geralmente ocorre nos meses mais quentes, a evapotranspiração intensa pode estar associada às altas temperaturas e a disponibilidade hídrica.

Figura 3: Mapa da média anual (1993 a 2002) da evapotranspiração de referência (ET_o) na Bahia (mm dia⁻¹).



Fonte: Os autores, 2023.

Na estação seguinte, no outono (Figura 4b), pode-se observar a redução da ET_o em todo o estado quando comparado ao trimestre anterior, desde a região oeste do estado (chapadões), região central (chapada Diamantina) até a região leste do Estado, isto é decorrente da diminuição da temperatura e radiação solar, quando comprada com o verão. Ressalta-se que no leste do Estado a diminuição de ET_o é acentuada e as chuvas mais intensas ocorrem de abril a agosto. Esse padrão sazonal está associado aos distúrbios ondulatórios de leste, conforme identificados por Yamazaki e Rao (1977) e Gomes et al. (2019), além disso, devido a proximidade do oceano a umidade do ar é elevada,

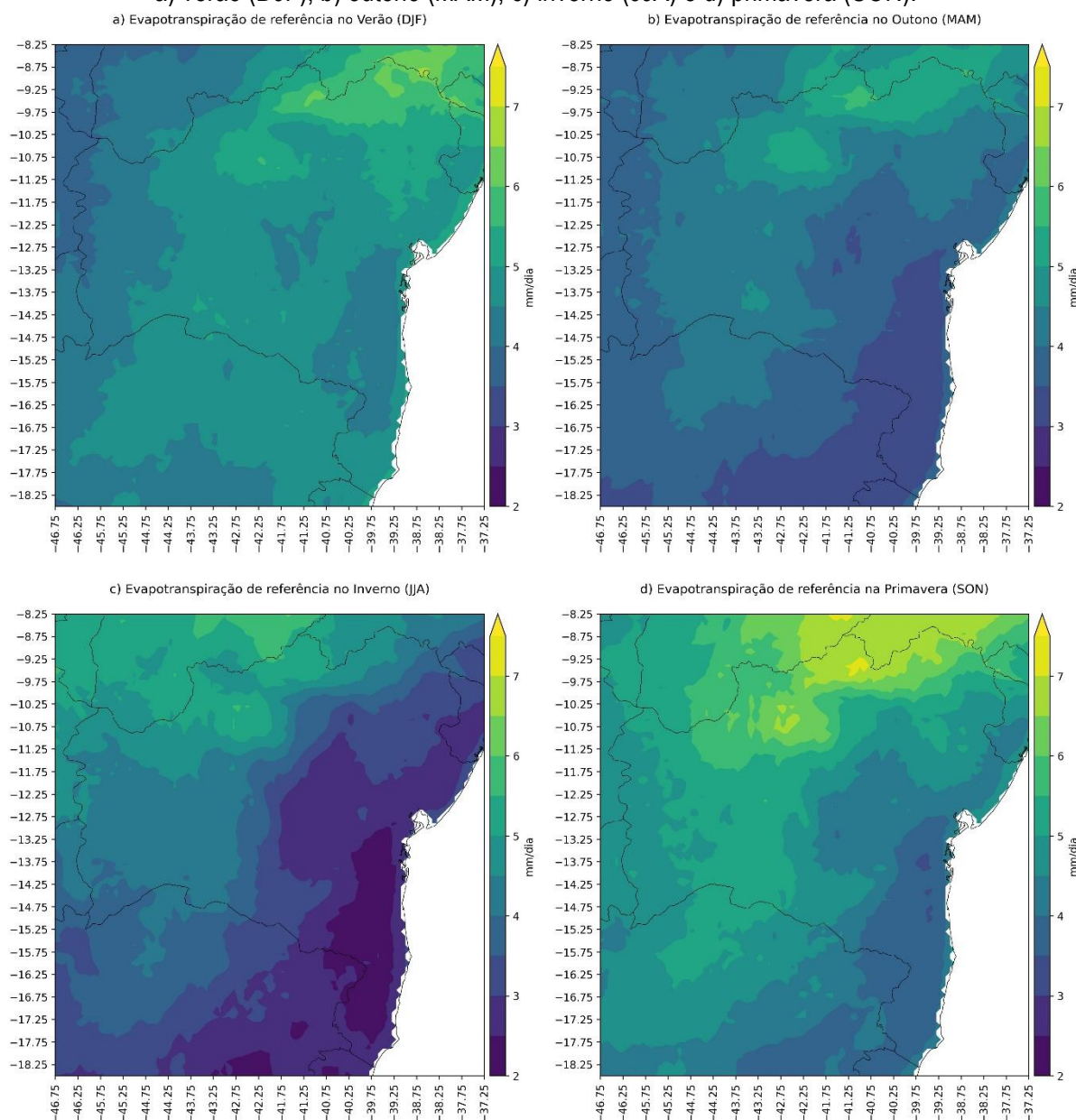
o que pode reduzir as taxas de evaporação. Além disso, na Bahia com um todo a estação com a maior umidade relativa média é o outono, mesmo não apresentando grande variabilidade sazonal de certa forma o aumento da umidade relativa no outono contribui para a diminuição da evapotranspiração.

Durante o inverno austral as regiões próximas ao litoral diminuem ainda mais a taxa de evapotranspiração, alcançando valores de 1,4 até 2,6 mm dia⁻¹. E assim como no outono, uma significativa área do estado expressa perdas menores do que 5 mm dia⁻¹ por ETo (Figura 4c). De acordo com Kousky (1980) a região leste do nordeste brasileiro, que abrange essencialmente toda a costa da Bahia, possui complexa interação entre a circulação da Brisa Terrestre, as Brisas predominantes do leste e os ventos alísios de sudeste. A diminuição da ETo no inverno, no estado da Bahia com um todo, em relação as demais estação do ano é decorrente da diminuição da temperatura e da radiação solar.

Observa-se na Figura 4d que do inverno para a primavera a ETo apresenta um grande aumentar na sua taxa sazonal, em alguns lugares ao norte alcançarem até 8 mm dia⁻¹ na média da estação primaveril. Esse comportamento também é observado por Lima (2016), em um estudo de análise intercomparativa da ETo no estado da Bahia utilizando a série histórica do INMET, em que a medida em que a insolação aumenta (aumento do numero de horas com brilho solar) há um aumento das temperaturas mínimas e máximas e diminuição da umidade relativa do ar nos municípios de Salvador, Paulo Afonso, Monte Santo, Caravelas e Barreiras para os meses de setembro a novembro. Na Bahia com um todo a estação com maior taxa de ETo é a primavera, pois é a estação com menor umidade relativa e menor taxa de precipitação.

Os resultados obtidos demonstram que, na ausencia de dados observados em estações, a reanálise ERA5-Land é um conjunto de dados recomendável para estimativa de ETo, bem como para o monitoramento das condições do clima, principalmente devido as suas resoluções espacial de 0,1° x 0,1° e temporal temporal horária, com cobertura desde o dia primeiro de janeiro de 1950 até o presente e atualização em tempo quase real. Ressalta-se que Xavier et al. (2022) realizaram um ótimo trabalho de reanálise com um número de variáveis capazes de estimar ETo, em um resolução de 0,1° x 0,1°. Entretanto, ao contrário da reanálise ERA5-Land, a de Xavier et al. (2022) não são atualizadas rotineiramente. Portanto, o uso das reanálises do ERA5-Land são úteis em estudos ambientais sobre no território brasileiro.

Figura 4: Mapa das médias sazonais da evapotranspiração de referência (ET_o) na Bahia (mm dia⁻¹); a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA) e d) primavera (SON).



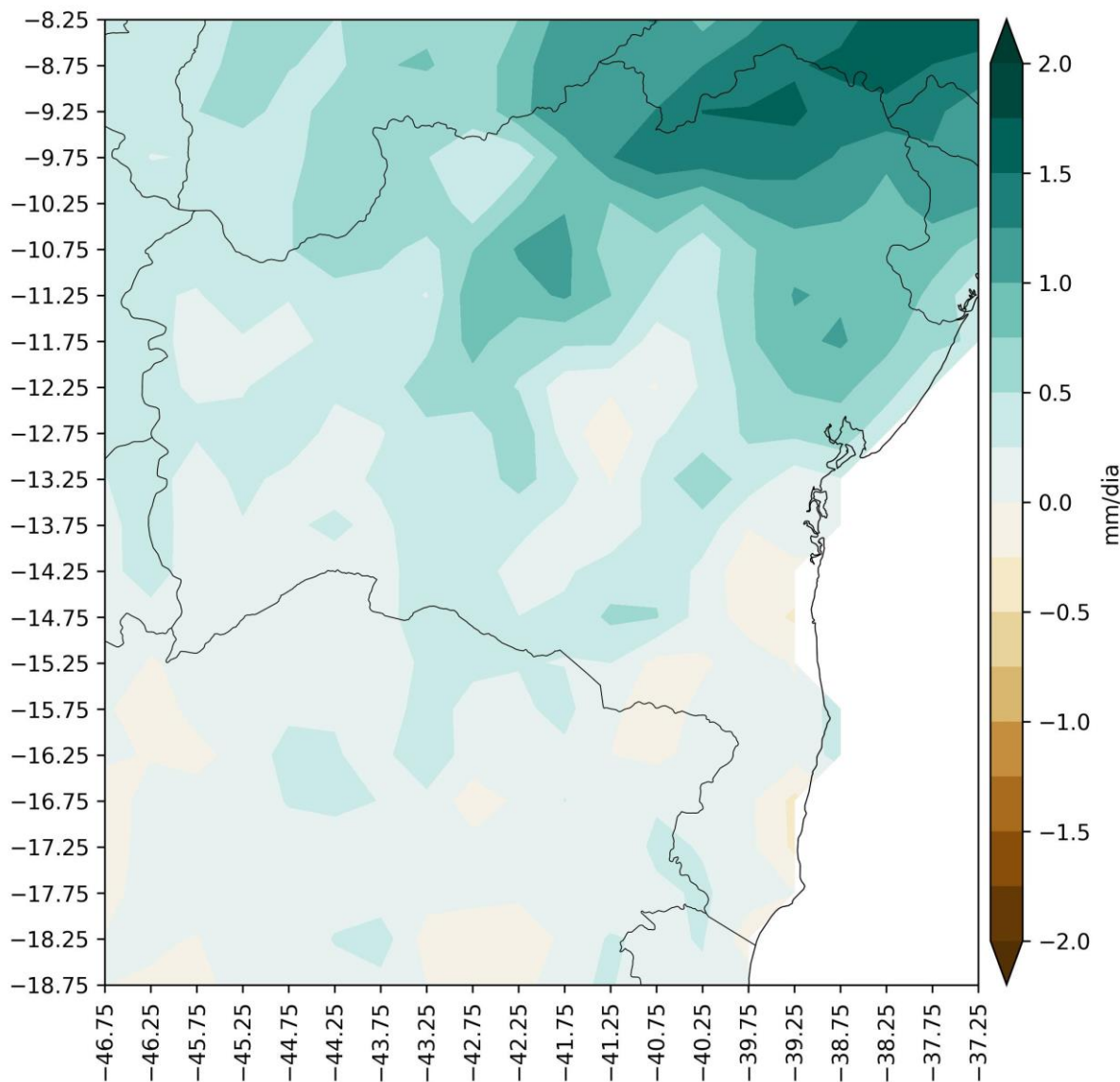
Fonte: Os autores, 2023.

PROJEÇÕES DO MODELO CNRM-CM6-1-HR EM 2065

De maneira geral, alterações nos padrões de E_{T_o}, com aumento das taxas na maior parte do estado (Figura 5). O deslocamento das áreas com menos E_{T_o} da faixa litoral sul para a norte pode ser explicada por uma persistência de uma área de alta pressão sobre essa região e que está associada com o padrão espacial de atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) na zona sul do estado, demonstrado nos estudos de Teodoro et al., 2022.

Figura 5: Mapa da projeção média anual da anomalia de evapotranspiração de referência (ET_o) na Bahia (mm dia⁻¹), futuro (2065) menos o presente (1993 à 2002), no cenário SSP2-4.5.

Projeção da evapotranspiração de referência anual



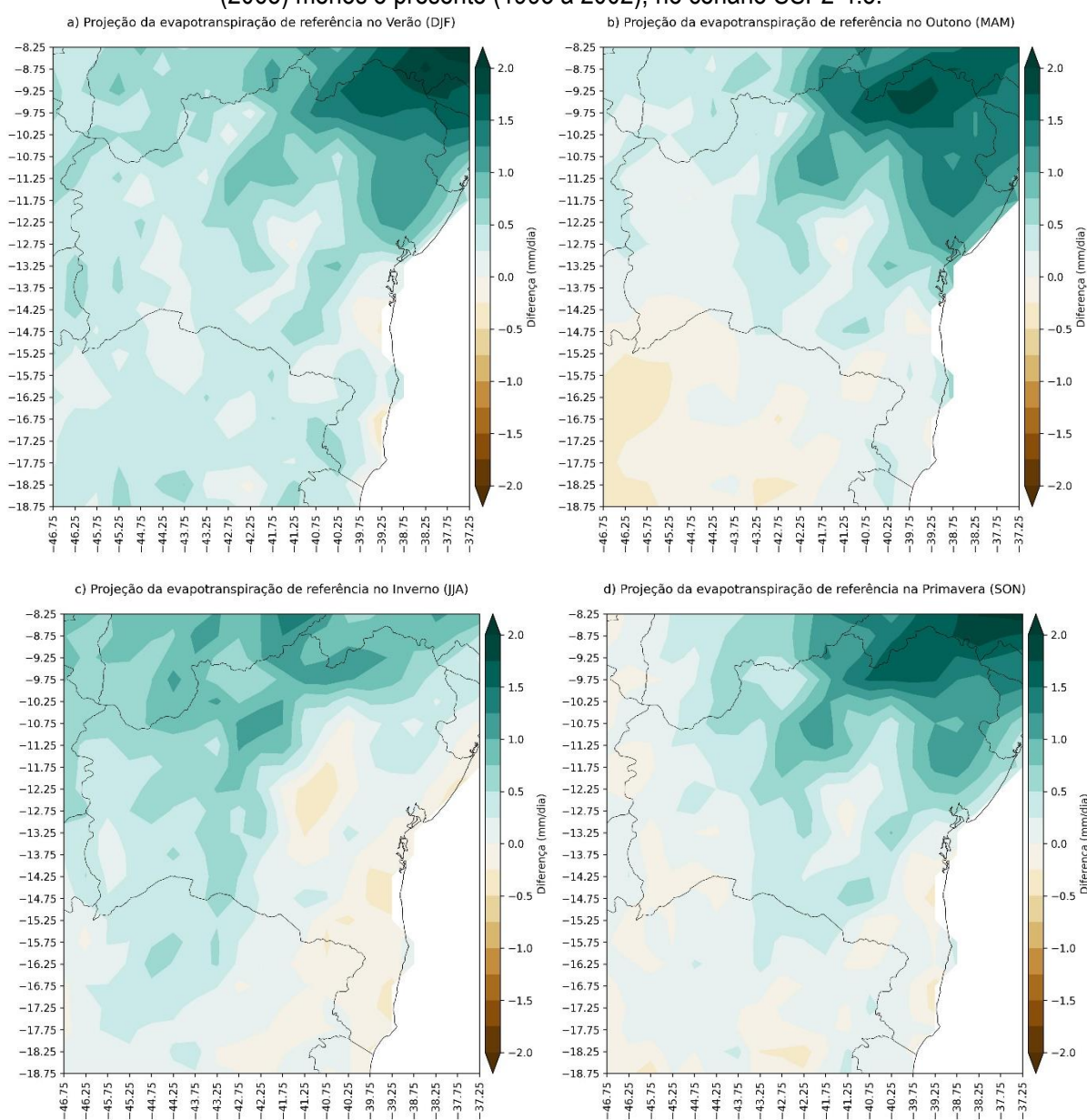
Fonte: Os autores, 2023.

Além do aumento das taxas de ET_o no estado da Bahia, espera-se mudanças nos seus padrões sazonais para 2065 (Figura 6a; 6b; 6c; 6d). Nóbrega et al. (2022) fizeram uso dos cenários RCP modelos do CMIP6 e indicaram o aumento espacial e de magnitude da aridez em todas as regiões da Bacia do São Francisco, principalmente na região Nordeste do Brasil. Os cenários RCP8.5 e SSP5-8.5, mesmo gerando cenários mais extremos, apresentaram resultados semelhantes aos cenários RCP4.5 e SSP2-4.5. Em paralelo, o indicativo de intensificação da aridez pode estar associado a estabilidade ou

redução da precipitação com aumento da temperatura no cenário SSP 4.5 com projeção do aumento da temperatura do ar média em torno de 3 °C, variação da precipitação em torno de 4,5 a 6,0% até o final do século e aumento do clima semiárido no Nordeste (Moraes, 2021).

Marengo e Valverde (2007) indicam para o Nordeste uma tendência de redução de chuvas acompanhada de aumento de temperatura para final do século XXI. Gerando assim o aumento da ETo nas estações de verão, outono e primavera (Figura 6a, 6b, e 6d) na maior parte do estado. Enquanto espera-se redução somente na faixa leste do estado durante o inverno (Figura 6c).

Figura 6: Mapa das projeções sazonais da anomalia de evapotranspiração de referência (ETo) na Bahia (mm dia⁻¹); a) verão (DJF), b) outono (MAM), c) inverno (JJA) e d) primavera (SON). Futuro (2065) menos o presente (1993 à 2002), no cenário SSP2-4.5.



Fonte: Os autores, 2023.

CONCLUSÕES

A validação da ETo é um passo importante para verificar a eficácia e limitações do uso de dados de reanálise. Neste ponto, destaca-se a necessidade da continuação e manutenção das estações meteorológicas para a aprimoração deste tipo de estudo. E em paralelo, o uso de base de dados como o ERA5-Land permite analisar uma grande área de estudo, como o estado da Bahia, oferecendo resultados mais abrangentes de condições do clima presente e futuro.

Como não há o fornecimento da ETo como variável em estações meteorológicas convencionais ou automáticas, estimá-la pelo método Penman Monteith-FAO em uma resolução de 9 km é de total relevância para todas as localidades, não apenas da Bahia, mas para todo território nacional. A variação sazonal da ETo na Bahia é um fenômeno complexo, diretamente influenciado pelo clima e espaço geográfico e o uso de dados da reanálise ERA5-Land para sua estimativa é essencial para a compreensão das variabilidades espaciais e temporais. Contudo, para as localidades que dispõe de estações meteorológicas a reanálise não substitui os dados observados, pois quanto mais precisos e fidedignos são os dados observado mais confiável e precisa é a reanálise.

A análise das diferentes estações do ano durante um período de 10 anos revelou padrões consistentes de evapotranspiração, estreitamente ligados a precipitação, radiação solar, temperatura e umidade do ar. Essa compreensão é imprescindível para uma gestão sustentável dos recursos hídricos e planejamento de atividades agrícolas.

As tendências climáticas do modelo CNRM-CM6-1-HR em 2065 apontam para o aumento das taxas da ETo em todas as estações do ano, como consequência de redução de chuvas e aumento de temperatura na Bahia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

Albuquerque, P. E. P., Guimarães, D. P., Viana, J. H. M., Albuquerque Filho, M. R., & Santos, F. C. Caracterização do balanço hídrico climatológico decedial na Fazenda Santa Luzia, município de Jaborandi, BA. EMBRAPA-Milho e Sorgo, Sete Lagoas (MG), (1), 1-14, 2020.

Allen, R. G. A Penman for all seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(4), 348-368, 1986.

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109, 1998.
- Alvala, R., Cunha, A. P., Brito, S. S., Seluchi, M. E., Marengo, J. A., Moraes, O. L., & Carvalho, M. A. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 91, 2017. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170209>
- Carvalho, A. A. D., Montenegro, A. A. D. A., Assis, F., Tabosa, J. N., Cavalcanti, R. Q., & Almeida, T. A. Spatial dependence of attributes of rainfed maize under distinct soil cover conditions. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 23, 33-39, 2019. <https://doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v23n1p33-39>
- Carvalho, T. de O. Análise da temperatura do ar, precipitação, evapotranspiração e índice hídrico do município de Itapetinga-BA. **Revista de Geociências Do Nordeste**, 2, 344–353, 2016. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2016v2n01D10472>
- Dourado, C. D. S., Oliveira, S. R. D. M., & Avila, A. M. H. D. Análise de zonas homogêneas em séries temporais de precipitação no Estado da Bahia. **Bragantia**, 72, 192-198, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052013000200012>
- Gomes, H. B., Ambrizzi, T., Pontes da Silva, B. F., Hodges, K., Silva Dias, P. L., Herdies, D. L., ... & Gomes, H. B. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. **Climate Dynamics**, 53, 1393-1411, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04667-7>
- Harris, C. R., Millman, K. J., Van Der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ... & Oliphant, T. E. Array programming with NumPy. **Nature**, 585(7825), 357-362, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- Hoyer, S., & Hamman, J. Xarray: ND labeled arrays and datasets in Python. **Journal of Open Research Software**, 5(1), 2017. <https://doi.org/10.5334/jors.148>
- Hunter, J. D. Matplotlib: A 2D graphics environment. **Computing in science & engineering**, 9(03), 90-95, 2007. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Instituto Nacional De Meteorologia (INMET). Banco de Dados Meteorológicos – 1993 a 2002). Brasília: INMET, 2023. Disponível em: (bdmep.inmet.gov.br). Acesso em: 06 abr. 2023.
- Reback, J., McKinney, W., Van Den Bossche, J., Augspurger, T., Cloud, P., Klein, A., ... & Seabold, S. pandas-dev/pandas: Pandas 1.0. 5. **Zenodo**, 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3898987>
- Kousky, V. E., & Chug, P. S. Fluctuations in Annual Rainfall for Northeast Brazil1. **Journal of the Meteorological Society of Japan**. Ser. II, 56(5), 457-465, 1978. <https://doi.org/10.2151/jmsj1965.56.5.457>
- Kousky, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, 107(9), 1140-1153, 1979. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<1140:FIONB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1140:FIONB>2.0.CO;2)
- Kousky, V. E. Diurnal rainfall variation in northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, 108(4), 488-498, 1980. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<0488:DRVINB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<0488:DRVINB>2.0.CO;2)
- Lima, A. D. O. Análise Intercomparativa da evapotranspiração de referência do estado da Bahia pelo método de Penman-Monteith: série histórica (1961-2014) vs. normais climatológicas (1961-1990), 2016.
- Lima, E. F., Moraes, R. G. S., Fonseca, B. L. A. S., & da Silva, C. M. Comparação de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática e estimativa da evapotranspiração de referência em Imperatriz/MA. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, 5(2), 214-220, 2020. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.2.2020.3184.214-220>
- Lopes, J. R. F., Dantas, M. P., & Ferreira, F. E. P. Variabilidade da precipitação pluvial e produtividade do milho no semiárido brasileiro através da análise multivariada. **Nativa**, 7(1), 77-83, 2019. <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i1.6243>

- Marengo, J. A., & Valverde, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, 8(1), 5-28, 2007.
- Matsunaga, W.K., Sales, E.S.G., Júnior, G.C.A., Silva, M.T., Lacerda, F.F., de Paiva Lima, E., dos Santos, C.A.C. and de Brito, J.I.B. Application of ERA5-Land reanalysis data in zoning of climate risk for corn in the state of Bahia—Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, 155(2), 945-963, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04670-3>
- Meinshausen, M., Nicholls, Z. R., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., ... & Wang, R. H. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. **Geoscientific Model Development**, 13(8), 3571-3605, 2020. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>
- Moraes, J. B. D. Áreas suscetíveis a desertificação no Brasil e projeções para cenários de mudanças climáticas, 2021.
- Nóbrega, M. R. R., Silva, M. V. M. D., Lima, C. E. S., Silva, G. K. D., Gonçalves, S. T. N., & Silveira, C. D. S. Impacto das Mudanças Climáticas na Aridez da Bacia Estendida do rio São Francisco, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 37, 185-197, 2022. <https://doi.org/10.1590/0102-77863710032>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, 9(9), 3461-3482, 2016. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Rao, V. B., & Hada, K. Characteristics of rainfall over Brazil: Annual variations and connections with the Southern Oscillation. **Theoretical and applied climatology**, 42, 81-91, 1990. <https://doi.org/10.1007/BF00868215>
- Ribeiro, C. S., & Garcia de Oliveira, G. A questão hídrica no semiárido baiano: conflitos pelo uso da água e as tecnologias sociais de aproveitamento de água de chuva. *Revista del CESLA. International Latin American Studies Review*, (23), 355-381, 2019.
- Rufo, T. F., Sobrinho, F. L. A., & de Araújo, G. C. C. A região do Matopiba: modernização agrícola, dinâmicas e transformações urbanas, em especial os cerrados piauienses. **Boletim de Geografia**, 37(3), 244-261, 2019. <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v37i3.43216>
- Santos, R. A. dos, Martins, D. L., & Santos, R. L. Balanço hídrico e classificação climática de Köppen e Thornthwaite no município de Feira de Santana (BA). **Geo Uerj**, (33), 34159, 2018. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2018.34159>
- Souza, T. S. de, & Nascimento, P. dos S. Análise da variabilidade espacial e temporal da precipitação pluviométrica na região hidrográfica do Recôncavo Sul (BA). **Revista Brasileira de Climatologia**, 27, 1-18, 2020. <https://doi.org/10.5380/abclima.v27i0.68353>
- Sabater, J. M. ERA5-Land hourly data from 1981 to present. Copernicus climate change service (C3S) climate data store (CDS). *Eur. Centre Medium-Range Weather Forecasts, Eur. Union, Tech. Rep.*, 2019. <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
- Silva, B. K. N., Amorim, A. C. B., Silva, C. M., Lucio, P. S., & Barbosa, L. M. Rainfall-related natural disasters in the Northeast of Brazil as a response to ocean-atmosphere interaction. **Theoretical and Applied Climatology**, 138, 1821-1829, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02930-9>
- Simões, Y. D. S., Silva, E. H. B. C., & Araújo, H. A. D. Rainfall zoning of Bahia State, Brazil: an update proposal. **Revista Ambiente & Água**, 13, 2018. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2171>
- Simões, Y. D. S., Araújo, H. A. D., & Cohim, E. Trend analysis of rain indicators for the state of Bahia, Brazil. **International Journal Hydrology**, 4(2), 67-74, 2020. <https://doi.org/10.15406/ijh.2020.04.00228>
- de Sousa, F. D. A. S., Macedo, M. J. H., Guedes, R. V. de S., & da Silva, V. P. R. O Índice de Precipitação Padronizada (IPP) na identificação de extremos de chuvas e secas na bacia do rio Paraguauçu (BA). **Ambiência**, 12(2), 2016. <https://doi.org/10.5935/ambiencia.2016.02.14>

Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., ... & Edmonds, J. A. RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic change**, 109, 77-94, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>

TOMASELLA, J., & ROSSATO, L. Balanço hídrico: Tópicos em Meio Ambiente e Ciências Atmosféricas. INPE, São José dos Campos, 12p, 2005.

Teodoro, T. A., Reboita, M. S., & Escobar, G. C. J. Principais Padrões de Verão da Pressão ao Nível do Mar sobre a Região da América do Sul no Clima Presente e em Projeções Futuras. **Anuário do Instituto de Geociências**, 45, 1-12, 2022. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2022_45_40597

Van Rossum, G., & Drake, F. L. **Python reference manual**. Amsterdam: Centrum voor Wiskunde en Informatica. 111, 1-52, 1995.

Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W., & Alves, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, 42(16), 8390-8404, 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>

Yamazaki, Y., & Rao, V. B. Tropical cloudiness over the south Atlantic Ocean. **Journal of the Meteorological Society of Japan**. 55(2), 205-207, 1977. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.55.2_205