



Ingeniería agrícola y biosistemas

ISSN: 2007-3925

ISSN: 2007-4026

Universidad Autónoma Chapingo

Jiménez-Jiménez, Sergio Iván; Ojeda-Bustamante, Waldo;
Inzunza-Ibarra, Marco Antonio; Marcial-Pablo, Mariana de Jesús
Analysis of the NASA-POWER system for estimating reference
evapotranspiration in the Comarca Lagunera, Mexico
Ingeniería agrícola y biosistemas, vol. 13, no. 2, 2021, July-December, pp. 201-226
Universidad Autónoma Chapingo

DOI: <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.03.050>

Available in: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688672123001>

- How to cite
- Complete issue
- More information about this article
- Journal's webpage in redalyc.org



Scientific Information System Redalyc

Network of Scientific Journals from Latin America and the Caribbean, Spain and
Portugal

Project academic non-profit, developed under the open access initiative

Analysis of the NASA-POWER system for estimating reference evapotranspiration in the Comarca Lagunera, Mexico

Evaluación del sistema NASA-POWER para estimar la evapotranspiración de referencia en la Región Lagunera, México

Sergio Iván Jiménez-Jiménez^{1*}; Waldo Ojeda-Bustamante²; Marco Antonio Inzunza-Ibarra¹; Mariana de Jesús Marcial-Pablo¹

¹Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera del INIFAP. Margen Derecha Canal Sacramento km 6.5, Zona Industrial Gómez Palacio, Durango, C. P. 35140, MÉXICO.

²Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

*Corresponding author: jimenez.sergio@inifap.gob.mx, tel. (871) 159 0104 ext. 80516 .

Abstract

Introduction: The FAO-56 Penman-Monteith (PM) is one of the most solid and commonly used methods for estimating reference evapotranspiration (ET_0); however, it requires meteorological data that are not always available, so an alternative is the use of reanalysis data.

Objective: To estimate the error that the NASA-POWER (NP) system data can generate in the ET_0 of the Comarca Lagunera, Mexico.

Methodology: Daily and decadal average ET_0 were estimated in five different ways. In each case, a different method was used to estimate ET_0 (FAO-56 PM or Hargreaves and Samani [HS]) and a different meteorological data source (measured, NP data or combination of both).

Results: NP data can be used to provide temperature, solar radiation and relative humidity variables, but not wind speed. The NP data overestimate the measured ET_0 , an RMSE of 1.15 and 0.89 mm·d⁻¹ was found for daily and decadal periods, respectively.

Limitations of the study: A grid error analysis could not be carried out because the number of stations is limited.

Originality: The use of reanalysis data to estimate ET_0 has not been analyzed locally.

Conclusion: When measured data are not available, NP data and the HS equation can be used. When using the FAO-56 PM method and NP data, the *in situ* wind speed must be available.

Resumen

Introducción: El método FAO-56 Penman-Monteith (PM) es uno de los más usados y robustos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0); sin embargo, requiere datos meteorológicos que no siempre están disponibles, por lo que una alternativa es el uso de datos de reanálisis.

Objetivo: Estimar el error que pueden generar los datos del sistema NASA-POWER (NP) en la ET_0 de la Región Lagunera, México.

Metodología: Se estimó la ET_0 diaria y promedio decenal de cinco formas diferentes. En cada caso, se empleó un método para estimar la ET_0 (FAO-56 PM o Hargreaves y Samani [HS]) y una fuente de datos meteorológicos diferente (medidos, datos de NP o combinación de ambos).

Resultados: Los datos de NP se pueden emplear para proporcionar variables de temperatura, radiación solar y humedad relativa, pero no de velocidad de viento. Los datos de NP sobrestiman la ET_0 observada, para periodos diarios y decenales se encontró un RMSE de 1.15 y 0.89 mm·d⁻¹, respectivamente.

Limitaciones del estudio: No se pudo hacer un análisis del error por cuadrícula porque el número de estaciones es limitado.

Originalidad: El uso de datos de reanálisis para estimar la ET_0 no se ha analizado localmente.

Conclusión: Cuando no se cuenta con datos medidos se pueden emplear los datos de NP y la ecuación de HS. Cuando se utilice el método de FAO-56 PM y los datos de NP, se debe tener la velocidad del viento *in situ*.

Keywords: reanalysis data, assimilated data, FAO-56, Penman-Monteith, Hargreaves and Samani.

Palabras clave: datos de reanálisis, datos asimilados, FAO-56, Penman-Monteith, Hargreaves y Samani.



Introduction

Actual crop evapotranspiration is commonly estimated by considering reference evapotranspiration (ET_0) and crop coefficient. The former can be evaluated using the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) manual 56, where the FAO-56 Penman Monteith (FAO-56 PM) method is the most used for accuracy under different climatic conditions and regions (Allen et al., 1998).

The FAO-56 PM method requires several meteorological input variables, which are usually not available at the required frequency and quality. Therefore, variants of that methodology have been proposed to estimate ET_0 , such as the use of alternative equations to estimate it with limited meteorological data (Jabloun & Sahli, 2008), the use of empirical models based on machine learning algorithms (Huang et al., 2019; Mattar, 2018), among others. However, an emerging alternative that eliminates the need for a robust network of weather stations is the use of reanalysis data or gridded weather data. These data are commonly available for free on web platforms or published in regular gridded formats (with a time-lag of days) and can be used to obtain continuous data from a site or to fill geospatial gaps in weather data (Bai et al., 2010).

Reanalysis data are produced from the combination of measurement and simulation data using data assimilation techniques to obtain the most realistic description of climate occurrences. Reanalysis data have been used in applications where their performance, advantages and disadvantages are analyzed, such as in crop simulation models to estimate yields (Monteiro et al., 2018; Camargo-Rodriguez & Ober, 2019; Starr et al., 2020; Tyagi et al., 2019), ET_0 estimation (Martins et al., 2017; Paredes et al., 2018; Pelosi et al., 2020), irrigation scheduling, global warming assessment (Marzouk, 2021), among others.

Reanalysis data used to estimate ET_0 are mainly from NASA-POWER (NP), Global Land Data Assimilation System (GLDAS), Climate Forecast System ver. 2 (CFSv2), North American Land Data Assimilation System (NLDAS), Real-Time Mesoscale Analysis (RTMA), National Digital Forecast Database (NDFD) and gridMET. Of these, some have global coverage and others regional; the latter provide data with finer spatial and temporal resolution, although it should be noted that high spatial resolution does not necessarily indicate high accuracy (Blankenau et al., 2020).

The NP system is one of the most used systems for estimating ET_0 (Ndiaye et al., 2020; Negm et al., 2017; Srivastava et al., 2020) due to its frequent updating and near real-time data availability. Moreover, the

Introducción

La evapotranspiración real del cultivo se estima comúnmente considerando la evapotranspiración de referencia (ET_0) y el coeficiente de cultivo. La primera se puede evaluar usando el manual 56 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), donde el método FAO-56 Penman Monteith (FAO-56 PM) es el más usado por su precisión bajo diferentes condiciones climáticas y regiones (Allen et al., 1998).

El método FAO-56 PM requiere diversas variables meteorológicas de entrada, que usualmente no están disponibles en la frecuencia y calidad requerida. Por ello, se han propuesto variantes de dicha metodología para estimar la ET_0 , como el uso de ecuaciones alternas para estimarla con datos meteorológicos limitados (Jabloun & Sahli, 2008), el uso de modelos empíricos basados en algoritmos de aprendizaje automático (Huang et al., 2019; Mattar, 2018), entre otras. Sin embargo, una alternativa emergente que elimina la necesidad de contar con una red robusta de estaciones meteorológicas es el uso de datos de reanálisis o datos meteorológicos cuadrículados. Estos datos comúnmente están disponibles de manera gratuita en plataformas web o publicados en formatos de cuadrículas o mallas regulares (con un retraso de días a partir del presente), y se pueden utilizar para obtener datos continuos de un sitio o para rellenar vacíos geoespaciales de los datos meteorológicos (Bai et al., 2010).

Los datos de reanálisis se producen a partir de la combinación de datos de medición y simulación mediante técnicas de asimilación de datos para obtener la descripción más realista de las ocurrencias climáticas. Los datos de reanálisis se han empleado en aplicaciones donde se analiza su rendimiento, sus ventajas y desventajas, como la modelación biofísica de cultivos para estimar rendimientos (Monteiro et al., 2018; Camargo-Rodriguez & Ober, 2019; Starr et al., 2020; Tyagi et al., 2019), la estimación de la ET_0 (Martins et al., 2017; Paredes et al., 2018; Pelosi et al., 2020), la programación de riego, la evaluación del calentamiento global (Marzouk, 2021), entre otros.

Los datos de reanálisis que se han usado para estimar la ET_0 son principalmente de los sistemas NASA-POWER (NP), *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS), *Climate Forecast System ver. 2* (CFSv2), *North American Land Data Assimilation System* (NLDAS), *Real-Time Mesoscale Analysis* (RTMA), *National Digital Forecast Database* (NDFD) y gridMET. De estos, algunos son de cobertura global y otros regional; estos últimos, brindan datos con resolución espacial y temporal más fina, aunque se debe considerar que una alta resolución espacial

data can be accessed automatically through the mobile or web applications (Maldonado et al., 2019).

In several studies, NP system data are used without prior local assessment (e.g. Ndiaye et al., 2020), because insufficient information is available. However, these data contain uncertainty; therefore, they must be evaluated and validated locally with available *in situ* measurements. Regarding the above, the objective of this study was to analyze, by means of four error parameters, the errors that can be generated by meteorological data and variables of the NP system to estimate ET_o , using as reference data measured at seven meteorological stations.

Materials and methods

Study area

The study area was the area comprised by irrigation district 017 (DR 017) Comarca Lagunera and neighboring irrigation units (Figure 1). The predominant climate is classified as BWhw, corresponding to very arid, semiarid (García, 2004). The Comarca Lagunera is one of the most important agricultural areas in Mexico, but with great water pressure.

Meteorological stations

To evaluate ET_o estimation from climate data obtained from the NP system, daily data recorded at seven agrometeorological stations (Table 1) of the National

no necesariamente indica alta precisión (Blankenau et al., 2020).

El sistema NP es uno de los más usadas para estimar la ET_o (Ndiaye et al., 2020; Negm et al., 2017; Srivastava et al., 2020) debido su actualización frecuente y a su disponibilidad de datos en tiempo casi real. Además, se puede acceder a los datos en forma automática a través de la aplicación, móvil o web, del sistema (Maldonado et al., 2019).

En diversos estudios se emplean los datos del sistema NP sin realizar una evaluación local previa (Ndiaye et al., 2020), ya que no existe suficiente información para llevarla a cabo. No obstante, estos datos contienen incertidumbre; por ello, se deben evaluar y validar localmente con las mediciones *in situ* disponibles. Considerando lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar, mediante cuatro parámetros, los errores que pueden generar los datos y las variables meteorológicos del sistema NP para estimar la ET_o , usando como referencia datos medidos en siete estaciones meteorológicas.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La zona de estudio fue el área comprendida por el distrito de riego 017 (DR 017) Región Lagunera y las unidades de riego vecinas (Figura 1). El clima predominante se clasifica como BWhw, que corresponde a muy árido, semicálido (García, 2004).

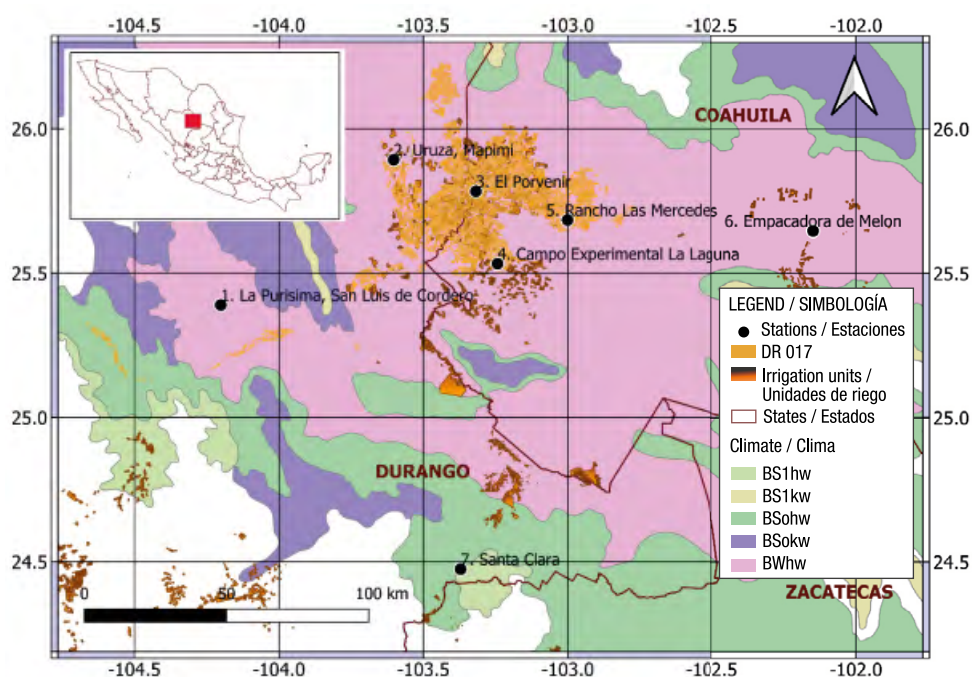


Figure 1. Study area. Lines represent the NASA-POWER system data grid.

Figura 1. Zona de estudio. Las líneas representan la malla de los datos del sistema NASA-POWER.

Network of Automated Agrometeorological Stations of the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2020) standardized to 2 m were used. This network is operated by the National Laboratory of Modeling and Remote Sensing. Selected meteorological stations have daily records from 2005 to 2020 of the variables mean (T_{mean}), minimum (T_{min}) and maximum (T_{max}) temperature, mean wind speed (u_2), mean relative humidity (RH) and cumulative solar radiation (R_s).

The accuracy of ET_0 estimates depends on the quality of the weather data used; therefore, a data quality control procedure is required. Allen (1996) describes different procedures to ensure the quality of weather input variables of ET_0 . This study analyzed the data used according to this author. Table 2 shows a summary of the quality control, and sensors measuring R_s and u_2 require continuous maintenance.

NASA-POWER (NP) system

The climate geoportal of the NP system (<https://power.larc.nasa.gov>) allows the extraction of values (from 1981 to date) of agroclimatological variables with global coverage. Table 3 shows the main features of the NP system database.

La región lagunera es una de las zonas agrícolas más importantes de México, pero con gran presión hídrica.

Estaciones meteorológicas

Para evaluar el desempeño de la estimación de la ET_0 a partir de datos climáticos obtenidos del sistema NP, se utilizaron datos diarios registrados en siete estaciones agrometeorológicas (Cuadro 1) de la Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2020) estandarizados a 2 m. Dicha red está a cargo del Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos. Las estaciones meteorológicas seleccionadas tienen registros diarios de 2005 a 2019 de las variables temperatura media (T_{media}), mínima (T_{min}) y máxima (T_{max}), velocidad media del viento (u_2), humedad relativa media (HR) y radiación solar acumulada (R_s).

La precisión en los cálculos de la ET_0 depende de la calidad de los datos meteorológicos utilizados; por tanto, se requiere un procedimiento de control de calidad de los datos. Allen (1996) describe diferentes procedimientos para asegurar la calidad de las variables meteorológicas de entrada de la ET_0 . En este trabajo, se evaluaron los datos utilizados de acuerdo

Table 1. List of weather stations used in the study.

Cuadro 1. Relación de estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

No./ Núm.	Name/ Nombre	Period with data (days)/ Periodo con datos (días)	Latitude (°)/ Latitud (°)	Longitude (°)/ Longitud (°)	Elevation (m a.s.l.)/ Elevación (m s. n. m.)	Last cumulative solar radiation data/ Último dato de radiación solar acumulada
1	La Purísima, San Luis de Cordero	01/06/2006 - 25/06/2020 (5138)	25.38	-104.20	1409	28/02/2019
2	Uruza, Mapimí	18/11/2008 - 21/10/2015 (2538)	25.89	-103.60	1114	01/09/2015
3	El Porvenir	01/07/2005 - 20/06/2014 (3276)	25.78	-103.31	1108	19/06/2014
4	Campo Experimental La Laguna	01/10/2005 - 21/03/2019 (4919)	25.53	-103.24	1114	24/02/2019
5	Las Mercedes	01/07/2005 - 20/06/2014 (3276)	25.68	-103.00	1101	19/06/2014
6	Empacadora de Melón	01/11/2005 - 25/06/2020 (5350)	25.64	-102.14	1193	28/02/2019
7	Santa Clara	16/10/2006 - 25/06/2020 (5001)	24.47	-103.37	1810	28/02/2019

Table 2. Data quality control.**Cuadro 2. Control de calidad de los datos.**

Feature / Característica	Weather station number / Número de estación meteorológica						
	1	2	3	4	5	6	7
Number of days downloaded / Número de días descargados	5138	2538	3276	4919	3276	5320	5001
Days analyzed / Días analizados	3653	1545	1529	2660	2596	4115	2423
Days analyzed out of total (%) / Días analizados del total (%)	71	61	47	54	79	77	49
Days with record of the five variables analyzed / Días con registro de las cinco variables analizadas	4349	1825	2000	4498	3108	4404	4444
Days without temperature record (T) / Días sin registro de temperatura (T)	157	542	70	53	103	358	45
Days with no Rs records / Días sin registro de Rs	617	555	90	99	110	871	48
Days with no RH records / Días sin registro de HR	288	613	74	113	133	437	67
Days with no u_2 records / Días sin registro de u_2	214	615	1256	376	125	352	48
Days with record $u_2 < 0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ / Días con registro de $u_2 < 0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	780	292	477	1786	517	357	2018
Records with $T_{\min} \geq T_{\max}$, $T_{\text{mean}} \geq T_{\max}$ and $T_{\min} \geq T_{\text{mean}}$ / Registros con $T_{\min} \geq T_{\max}$, $T_{\text{media}} \geq T_{\max}$ y $T_{\min} \geq T_{\text{media}}$	6	9	1	0	4	9	3
Records with $R_s/R_{so} > 1$ / Registros con $R_s/R_{so} > 1$	2	5	2	20	25	31	48

R_s = cumulative solar radiation; RH = relative humidity; u_2 = average wind speed; R_{so} = solar radiation on a clear day calculated with the equation of Allen et al. (1998).

R_s = radiación solar acumulada; HR = humedad relativa; u_2 = velocidad media del viento; R_{so} = radiación solar en un día despejado calculada con la ecuación de Allen et al. (1998).

Table 3. Characteristics of the NASA-POWER (NP) system.**Cuadro 3. Características del sistema NASA-POWER (NP).**

Parameter / Parámetro	Characteristics / Característica
Data period / Periodo de datos	1981 to date / 1981 a la fecha
Geographical coverage / Cobertura geográfica	Global
Download format / Formato de descarga	ASCII, CSV, GeoJSON and NetCDF / ASCII, CSV, GeoJSON y NetCDF
Temporal resolution / Resolución temporal	Daily / Diaria
Spatial resolution / Resolución espacial	<p>$0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ($55.56 \times 55.56 \text{ km}$ cell) for temperature, relative humidity (RH) and wind speed (u_2) variables. $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ for solar radiation and extraterrestrial solar radiation data /</p> <p>$0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (celda de $55.56 \times 55.56 \text{ km}$) para variables de temperatura, humedad relativa (HR) y velocidad de viento (u_2). $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ para datos de radiación solar y radiación solar extraterrestre</p>
Delay in data availability / Retraso en la disponibilidad de los datos	Approximately 2 days for temperature, RH and u_2 variables, and 5 days for R_s data / Aproximadamente 2 días para las variables de temperatura, HR y u_2 , y 5 días para los datos de R_s

The NP system collects information from several sources: directly measured data, satellite data, wind sensors and data derived from assimilated data systems. Daily temperature and RH data are derived from the Goddard Earth Observing System (GEOS) assimilation model version 4, 5.01 and 5.1, wind speed from the Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA-2) model, and solar radiation from satellite observations (White et al., 2008).

To conduct the study, data were downloaded from the NP system (Table 4) for the same period from the weather stations listed in Table 1. Cells with at least one agrometeorological station (Figure 1) were selected, i.e., data from 5 cells of $0.5 \times 0.5^\circ$ were downloaded.

Reference evapotranspiration (ET_0)

FAO 56 Penman-Monteith (PM) and Hargreaves and Samani (HS)

The estimate of ET_0 ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) with the FAO-56 PM method (Allen et al., 1998) is based on Equation 1. This method is recommended by the FAO for calculating ET_0 and is used to evaluate the accuracy of other methods.

$$ET_{0-PM} = \frac{0.408 \cdot \Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

con dicho autor. El Cuadro 2 muestra un resumen del control de calidad realizado, y se puede observar que los sensores que miden la R_s y u_2 requieren mantenimiento continuo.

Sistema NASA-POWER (NP)

El geoportal climático del sistema NP (<https://power.larc.nasa.gov>) permite extraer valores (de 1981 a la fecha) de variables agroclimáticas con cobertura mundial. Las características principales de la base de datos del sistema NP se muestran en el Cuadro 3.

El sistema NP recopila información de varias fuentes: datos medidos directamente, satelitales, sondas de viento y derivados de sistemas de datos asimilados. Los datos diarios de temperatura y HR se derivan del modelo de asimilación Goddard Earth Observing System (GEOS) versión 4, 5.01 y 5.1; la velocidad del viento, del modelo *Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications* (MERRA-2), y la radiación solar, de observaciones satelitales (White et al., 2008).

Para realizar el estudio, los datos se descargaron del sistema NP (Cuadro 4) para el mismo período de las estaciones meteorológicas indicadas en el Cuadro 1. Se seleccionaron las celdas con al menos una estación agrometeorológica (Figura 1); es decir, se descargaron datos de 5 celdas de $0.5 \times 0.5^\circ$.

Table 4. Agrometeorological variables from the NASA-POWER system used to estimate reference evapotranspiration.

Cuadro 4. Variables agrometeorológicas del sistema NASA-POWER utilizadas para estimar la evapotranspiración de referencia.

Symbol/Símbolo	Description/Descripción	Unit/Unidad
T_{\max}	Maximum air temperature at 2 m above the earth's surface/ Temperatura máxima del aire a 2 m sobre la superficie de la tierra	$^\circ\text{C}$
T_{\min}	Minimum air temperature at 2 m above the earth's surface/ Temperatura mínima del aire a 2 m sobre la superficie de la tierra	$^\circ\text{C}$
$T_{\text{mean}}/T_{\text{media}}$	Mean air temperature at 2 m above the earth's surface/ Temperatura media del aire a 2 m sobre la superficie de la tierra	$^\circ\text{C}$
RH/HR	Relative humidity at 2 m above the earth's surface/ Humedad relativa a 2 m sobre la superficie de la tierra	%
u_2	Mean wind speed at 2 m above the earth's surface/ Velocidad del viento media a 2 m sobre la superficie de la tierra	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Toa_dnw (Ra)	Cumulative extraterrestrial radiation/ Radiación extraterrestre acumulada	$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$
SFC_DWN (Rs)	Cumulative solar radiation/ Radiación solar acumulada	$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$

where R_n is the net radiation at the reference crop surface ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), G is the soil heat flux ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), e_s is the saturated vapor pressure (kPa), e_a is the actual vapor pressure (kPa), $e_s - e_a$ is the vapor pressure deficit (kPa), Δ is the slope of the saturated vapor pressure curve ($\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$) and γ is the psychrometric constant ($\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$). For daily time intervals, the values of G are relatively small and, therefore, the term is neglected (Allen et al., 1998).

The HS equation (Hargreaves & Samani, 1985) is used to estimate ET_o when only temperature data are available. This equation was developed for semi-arid areas and has good accuracy for the study area (e.g. Chávez-Ramírez et al., 2013).

$$ET_{o-HS} = 0.408 \cdot K_H \cdot Ra \cdot (T_{max} - T_{min})^{A_H} \cdot \left[\frac{T_{max} - T_{min}}{2} + K_T \right] \quad (2)$$

where ET_{o-HS} is the ET_o estimated by the HS equation ($\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$), Ra is the cumulative extraterrestrial radiation ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), K_H and K_T are the empirical calibration parameters and A_H is an empirical Hargreaves exponent. This study used the original values proposed by Hargreaves and Samani (1985):

$K_H = 0.0023$, $K_T = 17.8$ and $A_H = 0.5$.

Estimate of reference evapotranspiration (ET_o)

ET_o (daily and decadal average) was estimated in five different ways; each case used a method for estimating ET_o (FAO-56 PM or HS) and a different meteorological data source (measured at agrometeorological stations, NP data or combination of both) (Table 5). The FAO-56 PM method with data measured from agrometeorological stations (MEDEST) was used to calculate the observed ET_o . This ET_o was used to evaluate the performance of the five proposed cases. Evaluation is based on the FAO-56 PM method being the most reliable for different regions (Allen et al., 2000).

Cases C1 and C3 were proposed to know the accuracy of ET_o with NP reanalysis data. C2 arises to compare the yield of the HS equation in the area using MEDEST data. In C4 and C5, different data sources (MEDEST and NP) are mixed with the FAO-56 PM method. C4 was proposed because u_2 of NP is the variable with the lowest R^2 in validation performed by developers (Stackhouse et al., 2019), while C5 was proposed because it is common to have poor quality and quantity of R_s data in meteorological stations (Sayago et al., 2020).

Accuracy evaluation

First, the precision of the variables (T_{max} , T_{min} , T_{mean} , u_2 , RH and R_s) was evaluated by comparing the estimated

Evapotranspiración de referencia (ET_o)

FAO 56 Penman-Monteith (PM) y Hargreaves y Samani (HS)

La estimación de la ET_o ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) con el método de FAO-56 PM (Allen et al., 1998) se basa en la Ecuación 1. Dicho método es el aceptado por la FAO para calcular la ET_o y se usa para evaluar la precisión de otros métodos.

$$ET_{o-PM} = \frac{0.408 \cdot \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (1)$$

donde R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo de referencia ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), G es el flujo del calor del suelo ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), e_s es la presión de vapor de saturación (kPa), e_a es la presión real de vapor (kPa), $e_s - e_a$ es el déficit de presión de vapor (kPa), Δ es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ($\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$) y γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$). Para intervalos de tiempo diarios, los valores de G son relativamente pequeños y, por lo tanto, el término es despreciado (Allen et al., 1998).

La ecuación de HS (Hargreaves & Samani, 1985) se usa para estimar la ET_o cuando sólo se tienen datos de temperatura. Dicha ecuación fue desarrollada para zonas semiáridas y presenta buena precisión para la zona de estudio (Chávez-Ramírez et al., 2013).

$$ET_{o-HS} = 0.408 \cdot K_H \cdot Ra \cdot (T_{max} - T_{min})^{A_H} \cdot \left[\frac{T_{max} - T_{min}}{2} + K_T \right] \quad (2)$$

donde ET_{o-HS} es la ET_o estimada por la ecuación de HS ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$), Ra es la radiación extraterrestre acumulada ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), K_H y K_T son los parámetros de calibración empírica y A_H es un exponente empírico de Hargreaves. En este estudio se utilizaron los valores originales propuestos por Hargreaves y Samani (1985):

$K_H = 0.0023$, $K_T = 17.8$ y $A_H = 0.5$.

Estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o)

Se estimó la ET_o (diaria y promedio decenal) de cinco diferentes formas; en cada caso se empleó un método para estimar la ET_o (FAO-56 PM o HS) y una fuente de datos meteorológicos diferente (medidos en estaciones agrometeorológicas, datos de NP o combinación de ambos) (Cuadro 5). Para calcular la ET_o observada se empleó el método de FAO-56 PM con datos medidos de estaciones agrometeorológicas (MEDEST). Esta ET_o se usó para evaluar el desempeño de los cinco casos propuestos. La evaluación se basa en que el método de FAO-56 PM es el más confiable para diferentes regiones (Allen et al., 2000).

Table 5. Cases analyzed to estimate reference evapotranspiration (ET_0).**Cuadro 5. Casos analizados para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0).**

Cases / Casos	ET_0 method / Método ET_0	Data set / Conjunto de datos	Symbology / Simbología
Observed / Observada	FAO-56 PM	Measured at meteorological stations (MEDEST) / Medidos en estaciones meteorológicas (MEDEST)	Observed ET_0 / ET_0 observada
Case 1 (C1) / Caso 1 (C1)	FAO-56 PM	NASA-POWER (NP) System / Sistema NASA-POWER (NP)	PM_{NP}
Case 2 (C2) / Caso 2 (C2)	Hargreaves and Samani (HS)	MEDEST	HS_{EM}
Case 3 (C3) / Caso 3 (C3)	HS	NP	HS_{NP}
Case 4 (C4) / Caso 4 (C4)	FAO-56 PM	Wind speed data (u_2) measured at MEDEST and the rest of NP / Datos de velocidad de viento (u_2) medidos en las MEDEST y el resto de NP	PM_{NP+u_2}
Case 5 (C5) / Caso 5 (C5)	FAO-56 PM	NP solar radiation (R_s) data and the rest of the data measured in the MEDEST / Datos de radiación solar (R_s) de NP y el resto de datos medidos en las MEDEST	$PM_{EM+R_s(NP)}$

data from the NP system to the measured data. The accuracy assessment was performed with four statistical parameters: root mean square error (RMSE, Equation 3), mean error (ME, Equation 4), standard deviation of errors (SDE, Equation 5) and coefficient of determination (R^2 , Equation 6) (Cobaner et al., 2017; Jabloun & Sahli, 2008).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (V_{e,i} - V_{o,i})^2}{n}} \quad (3)$$

$$ME = \frac{\sum_i^n (V_{e,i} - V_{o,i})}{n} \quad (4)$$

$$SDE = \sqrt{\frac{\sum_i^n [(V_{e,i} - V_{o,i}) - ME]^2}{n - 1}} \quad (5)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_{o,i} - \bar{V}_o)(V_{e,i} - \bar{V}_e)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{o,i} - \bar{V}_o)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{e,i} - \bar{V}_e)^2}} \right]^2 \quad (6)$$

where V_o is the measured or observed value, V_e is the estimated value (in this case those extracted from the NP system), i is the day analyzed and n is the number of values or days analyzed.

Subsequently, the precision of the ET_0 of cases C1-C5 was evaluated (Table 4) using the same four statistical

El C1 y C3 se propuso para conocer la precisión de la ET_0 con datos de reanálisis de NP. El C2 surge para comparar el rendimiento de la ecuación de HS en la zona usando datos MEDEST. En el C4 y C5 se mezclan diferentes fuentes de datos (MEDEST y NP) con el método de FAO-56 PM. El C4 se propuso ya que la u_2 del NP es la variable que tuvo menor R^2 en la validación realizada por los desarrolladores (Stackhouse *et al.*, 2019), mientras que el C5 se propuso debido a que es común tener una deficiente calidad y cantidad de datos de la R_s en las estaciones meteorológicas (Sayago *et al.*, 2020).

Evaluación de la precisión

Primero se evaluó la precisión de las variables (T_{max} , T_{min} , T_{media} , u_2 , HR y R_s) comparando los datos estimados del sistema NP con respecto a los medidos. La evaluación de la precisión se realizó con cuatro parámetros estadísticos: raíz del cuadrado medio del error (RMSE, Ecuación 3), error medio (ME, Ecuación 4), desviación estándar de los errores (SDE, Ecuación 5) y coeficiente de determinación (R^2 , Ecuación 6) (Cobaner *et al.*, 2017; Jabloun & Sahli, 2008).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (V_{e,i} - V_{o,i})^2}{n}} \quad (3)$$

$$ME = \frac{\sum_i^n (V_{e,i} - V_{o,i})}{n} \quad (4)$$

parameters, where V_o is the observed ET_o and V_e is the value of the ET_o estimated with cases C1 to C5.

Sensitivity analysis of variables

A sensitivity analysis is essential to evaluate the impact of input variables on ET_o estimate with the FAO-56 PM equation. This analysis was performed according to the following approach: a systematic error was introduced to the value of a given climate parameter (temperature, RH, u_2 or R_s) and the other values were kept constant; then, ET_o was estimated with the FAO-56 PM method and ME and RMSE values of change in ET_o were calculated. Induced errors were within a range (Table 6) and were defined considering the maximum value of RMSE found in the evaluation of the precision of each variable, plus an increment of 5 %; that is, if a variable had a maximum RMSE of 5, then the range established would be ± 5 with an increment of 0.5 in that range.

Results and discussion

Assessment of variables

Temperature

The temperature data (T_{min} , T_{mean} and T_{max}) of the NP system, compared to those measured, had an R^2 of 0.84 to 0.95 and RMSE values lower than 4 °C. The lowest R^2 (0.84 to 0.90) and highest RMSE values (1.95 to 3.67 °C) were found for T_{min} , while the highest R^2 (0.92 to 0.95) and lowest RMSE values (1.29 to 2.16 °C) were for T_{mean} (Figure 2). These results agree with those found by other authors, where higher R^2 and lower RMSE are reported with T_{mean} . Negm et al. (2017) compared data from the NP system against 42 agrometeorological stations in

$$SDE = \sqrt{\frac{\sum_i^n [(V_{e,i} - V_{o,i}) - ME]^2}{n - 1}} \quad (5)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_{o,i} - \bar{V}_o)(V_{e,i} - \bar{V}_e)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{o,i} - \bar{V}_o)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{e,i} - \bar{V}_e)^2}} \right]^2 \quad (6)$$

donde V_o es el valor medido u observado, V_e es el valor estimado (para este caso los extraídos del sistema NP), i es el día analizado y n es el número de valores o días analizados.

Posteriormente, se evaluó la precisión de la ET_o de los casos C1-C5 (Cuadro 4) usando los mismos cuatro parámetros estadísticos, donde V_o es la ET_o observada y V_e es el valor de la ET_o estimada con los casos C1 al C5.

Análisis de sensibilidad de variables

Un análisis de sensibilidad es fundamental para evaluar el impacto de las variables de entrada en la estimación de la ET_o con la ecuación de FAO-56 PM. Dicho análisis se realizó de acuerdo con el siguiente enfoque: se introdujo un error sistemático al valor de un determinado parámetro climático (temperatura, HR, u_2 o R_s) y los otros valores se mantuvieron constantes; después, se estimó la ET_o con el método de FAO-56 PM y se calcularon los valores de ME y RMSE de cambio en la ET_o . Los errores inducidos estuvieron dentro de un rango (Cuadro 6) y se definieron considerando el valor máximo de la RMSE encontrado en la evaluación de la precisión de cada variable, más un incremento de 5 %; es decir, si una variable tenía un RMSE máximo de 5, entonces el rango establecido sería de ± 5 con un incremento de 0.5 en ese rango.

Table 6. Ranges of increase in variables to estimate their sensitivity.

Cuadro 6. Rangos de incremento en las variables para estimar su sensibilidad.

Variable	Range / Rango	Increase / Incremento
T_{max} , T_{min} and T_{mean} (°C)/ T_{max} , T_{min} y T_{media} (°C)	-4 to +4/-4 a +4	0.4
Relative humidity (%) / Humedad relativa (%)	-12 to +12/-12 a +12	1.2
Wind speed (m·s ⁻¹) / Velocidad del viento (m·s ⁻¹)	0 to 2/0 a 2	0.1
Solar radiation (MJ·m ⁻² ·d ⁻¹) / Radiación solar (MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	-4 to +4/-4 a +4	0.4

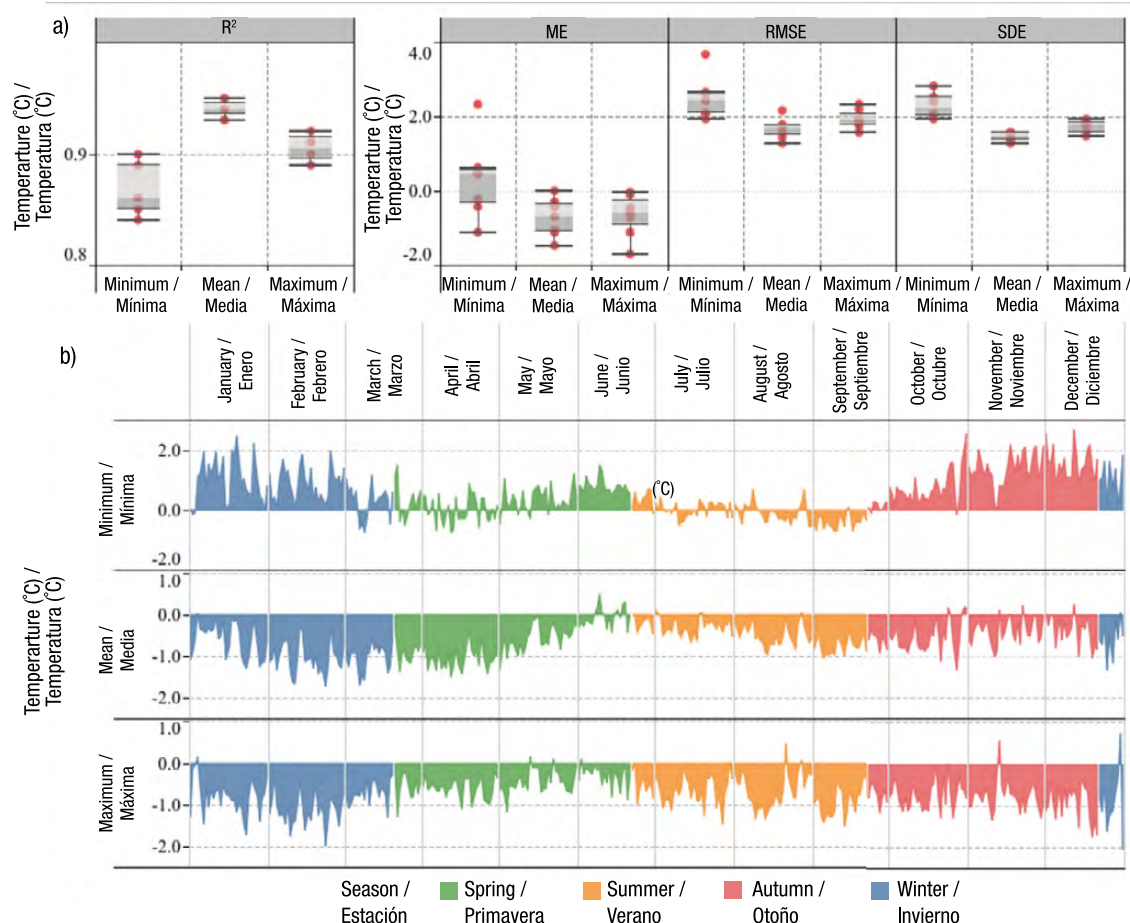


Figure 2. a) Box-and-axis plot of precision statistical parameters for temperature and b) mean temperature difference (estimated - measured) plot. R^2 = coefficient of determination; ME = mean error; RMSE = root mean square error; SDE = standard deviation of errors; T = temperature.

Figura 2. a) Gráfica de cajas y ejes de los parámetros estadísticos de precisión para la temperatura y b) gráfica de diferencia promedio de temperatura (estimada - medida). R^2 = coeficiente de determinación; ME = error medio; RMSE = raíz del cuadrado medio del error; SDE = desviación estándar de los errores; T = temperatura.

Sicily, Italy, located from 10 to 1470 m a.s.l. and found lower average RMSE values with T_{mean} (RMSE = 3.2 °C) and higher with T_{min} (RMSE = 5 °C). In the United States, White et al. (2008) had higher correlations with T_{mean} ($R^2 = 0.91$) and reported an average R^2 of 0.88 for T_{min} and T_{max} ; thereby concluding that if mountainous and coastal regions are excluded, the NP system is a reliable data source for daily temperature. In Egypt, Aboelkhair et al. (2019) found higher R^2 for T_{mean} .

Regarding SDE, average values of 2.32, 1.46 and 1.76 °C were found for T_{min} , T_{mean} and T_{max} , respectively (Figure 2a). This indicates greater variation between T_{min} from NP and measured data.

T_{mean} and T_{max} from NP data tend to underestimate the measured data, because ME values < 0 °C were found (Figure 2a). This agrees with that reported by Stackhouse et al. (2019), who validated measured data

Resultados y discusión

Evaluación de las variables

Temperatura

Los datos de temperatura (T_{min} , T_{media} y T_{max}) del sistema NP, con respecto a los medidos, presentaron un R^2 de 0.84 a 0.95 y valores de RMSE menores a 4 °C. Las menores R^2 (0.84 a 0.90) y mayores valores de RMSE (1.95 a 3.67 °C) se encontraron en la T_{min} , mientras que las mayores R^2 (0.92 a 0.95) y menores valores de RMSE (1.29 a 2.16 °C) se observaron en la T_{media} (Figura 2). Estos resultados coinciden con los obtenidos por otros autores, donde se reportan mayores R^2 y menores RMSE con la T_{media} . Negm et al. (2017) compararon los datos del sistema NP contra 42 estaciones agrometeorológicas en Sicilia, Italia, localizadas desde los 10 hasta 1470 m s. n. m., y encontraron valores promedio de

in several countries and found ME values < 0 for T_{mean} and T_{max} , and positive values for T_{min} . For T_{mean} , higher underestimates were found in the winter-spring months, while for T_{max} lower underestimates were observed in the spring months (Figure 2b).

Regarding T_{min} , the ME found are in the range of -1.1 to 2.34 °C. In general, at low values ($T_{\text{min}} < 10$ °C), the NP system data overestimated measurements, and

RMSE más bajos con T_{media} (RMSE = 3.2 °C) y más altos con T_{min} (RMSE = 5 °C). En Estados Unidos, White *et al.* (2008) obtuvieron mayores correlaciones con la T_{media} ($R^2 = 0.91$) y reportaron un R^2 promedio de 0.88 para la T_{min} y T_{max} ; con ello concluyeron que si se excluyen las regiones montañosas y costeras, el sistema NP es una fuente de datos confiable para la temperatura diaria. En Egipto, Aboelkhair *et al.* (2019) encontraron mayores R^2 para la T_{media} .

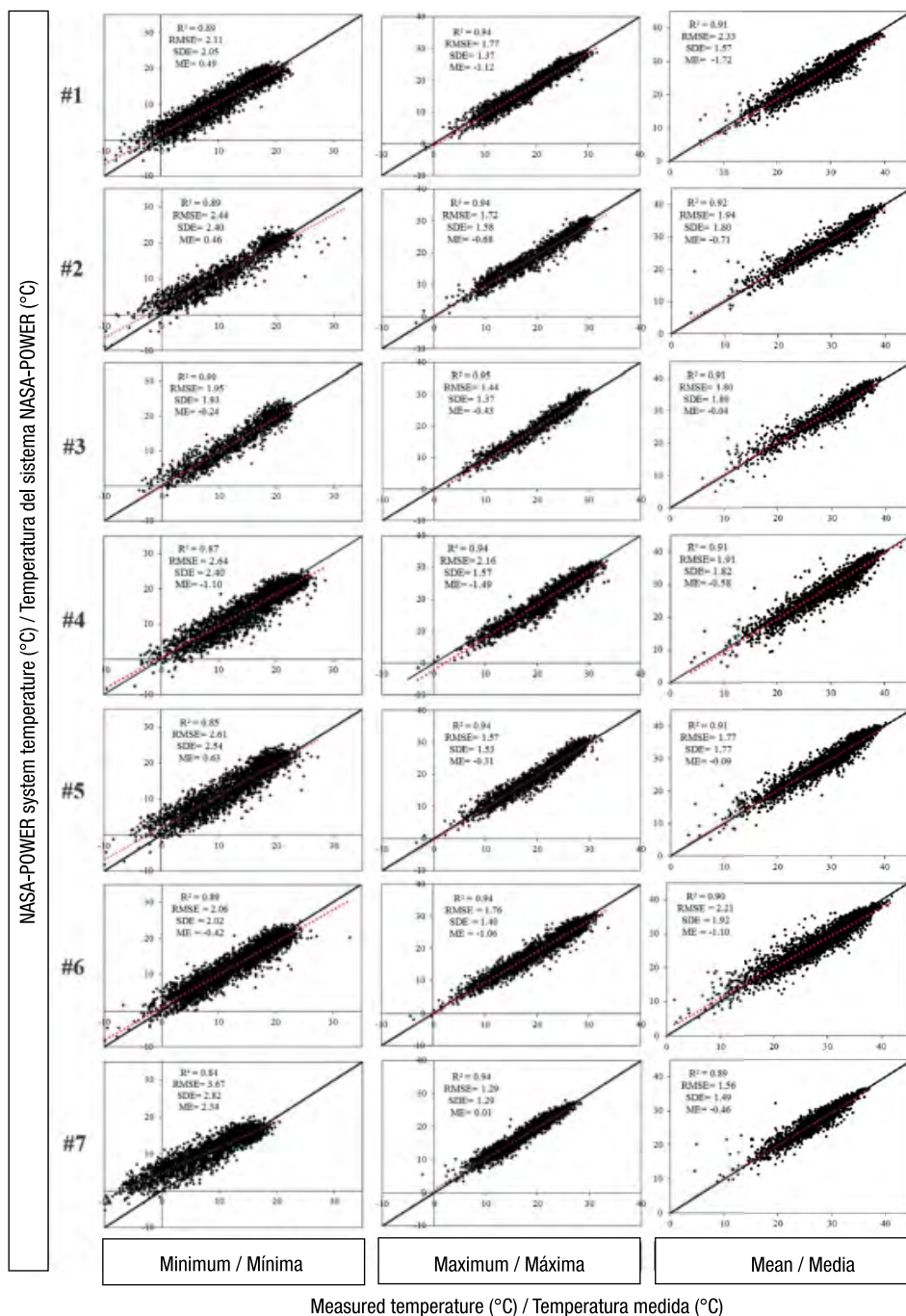


Figure 3. Minimum, mean and maximum temperature accuracy assessment per station. The number indicates the station. R^2 = coefficient of determination; RMSE = root mean square error; SDE = standard deviation of the errors; ME = mean error.

Figura 3. Evaluación de la precisión de la temperatura mínima, media y máxima por estación. El número indica la estación. R^2 = coeficiente de determinación; RMSE = raíz del cuadrado medio del error; SDE = desviación estándar de los errores; ME = error medio.

at higher values it was underestimated (Figure 3). This indicates that the maximum overestimation occurs mainly in the autumn-winter months (Figure 2b), where temperatures drop in the region. Bai et al. (2010) reported an underestimation of NP data for air temperature (T_{\max} and T_{\min}) in China, where the underestimation was higher for T_{\max} .

According to the results, there are differences between the measured data and those estimated by NP, which are not constant throughout the year. Among the factors that may account for variability of the data are topography, changes in land use or localized effects that may be sources of errors in assimilation models (White et al., 2008). In this sense, Negm et al. (2018) describe a methodology to improve accuracy of NP data considering the Julian day and site topography.

Relative humidity

R^2 values from 0.60 to 0.76, ME from -0.32 to -7.52 %, RMSE from 8.83 to 12.16 % and SDE from 8.18 to 10.38 were found (Figure 4a). Negm et al. (2017) had RMSE from 8 to 18 and indicate that coastal areas have higher RMSE values than inland areas. RMSE values found in this study are < 13 % because stations are in inland areas. In Egypt, Aboelkhair et al. (2019) had RMSE values from 4.2 to 31.8 %; moreover, they found that NP data underestimated the measured RH (ME < 0) at all stations, as found in this study and in that conducted by Rodrigues and Braga (2021). This underestimation

Con respecto a la SDE, se encontraron valores promedio de 2.32, 1.46 y 1.76 °C para la T_{\min} , T_{media} y T_{\max} , respectivamente (Figura 2a). Esto indica que existe mayor variación entre la T_{\min} de NP y los datos medidos.

Los datos de T_{media} y T_{\max} de NP suelen subestimar los datos medidos, ya que se encontraron valores de ME < 0 °C (Figura 2a). Esto concuerda con lo reportado por Stackhouse et al. (2019), quienes validaron información medida en diversos países y encontraron valores de ME < 0 para la T_{media} y T_{\max} , y valores positivos para T_{\min} . Para la T_{media} , las mayores subestimaciones se encontraron en los meses de invierno-primavera, mientras que para la T_{\max} las menores subestimación se observaron en los meses de primavera (Figura 2b).

En lo que respecta a la T_{\min} , los ME encontrados están en el rango de -1.1 a 2.34 °C. En general, con valores bajos (T_{\min} < 10 °C), los datos del sistema NP sobrestimaron las mediciones, y a valores más altos la subestimaron (Figura 3). Esto indica que las máximas sobrestimación se presenta principalmente en los meses de otoño-invierno (Figura 2b), donde las temperaturas descienden en la región. Bai et al. (2010) reportaron una subestimación de los datos de NP para la temperatura del aire (T_{\max} y T_{\min}) en China, donde la subestimación fue mayor en la T_{\max} .

De acuerdo con los resultados, existen diferencias entre los datos medidos y los estimados por NP, las cuales no son constantes a lo largo del año. Entre

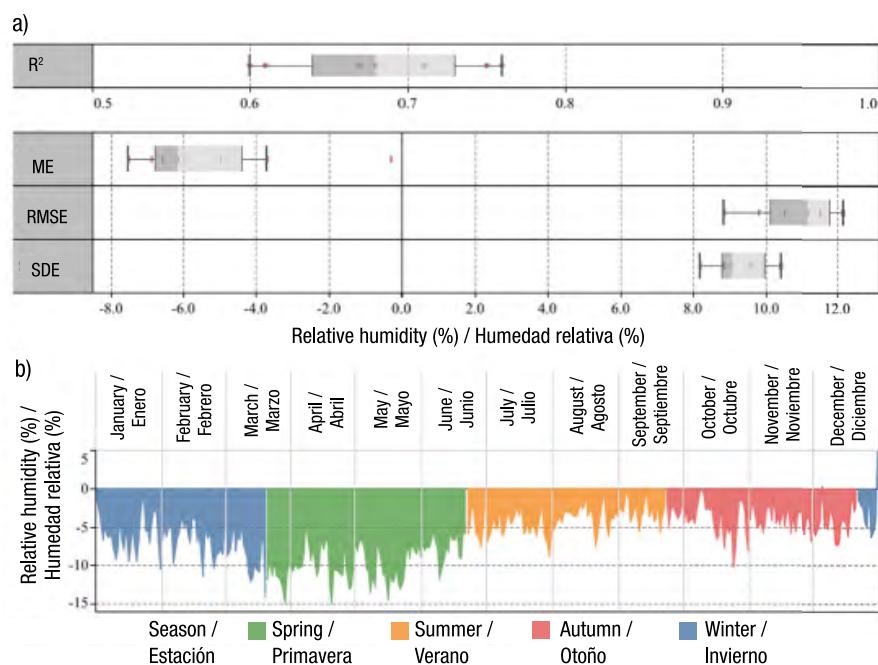


Figure 4. a) Box-and-axis plot of precision statistical parameters for relative humidity and b) mean relative humidity difference (estimated - measured) plot. R^2 = coefficient of determination; ME = mean error; RMSE = root mean square error; SDE = standard deviation of errors.

Figura 4. a) Gráfica de cajas y ejes de los parámetros estadísticos de precisión para la humedad relativa y b) gráfica de la diferencia promedio de humedad relativa (estimada - medida). R^2 = coeficiente de determinación; ME = error medio; RMSE = raíz del cuadrado medio del error; SDE = desviación estándar de los errores.

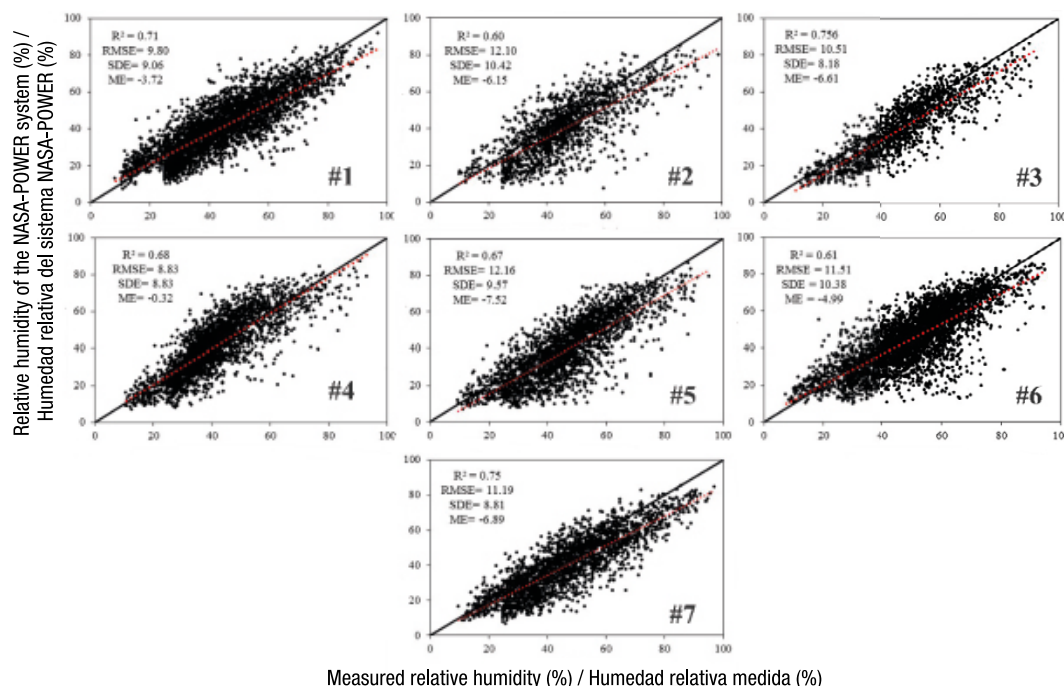


Figure 5. Relative humidity accuracy assessment. The number indicates the station. R^2 = coefficient of determination; RMSE = root mean square error; SDE = standard deviation of errors; ME = mean error.
Figura 5. Evaluación de la precisión de la humedad relativa. El número indica la estación. R^2 = coeficiente de determinación; RMSE = raíz del cuadrado medio del error; SDE = desviación estándar de los errores; ME = error medio.

is greater in the winter-spring months (Figure 4b), and according to Figure 5, the higher the RH, the greater the underestimation.

Wind speed (u_2)

The u_2 of the NP system was the variable with the lowest R^2 values (0.19 to 0.52). This behavior is also reported by Duarte and Sentelhas (2020), Najmaddin et al. (2017), and Rodrigues and Braga (2021). De Pondaca et al. (2011) indicate there are many challenges in u_2 determination, such as quality control of the measured data, so improving the quality could provide more accurate estimates.

NP system data tend to overestimate the measured u_2 values at all stations, as positive ME values of up to $1.43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ were found (Figure 6a). These overestimates are higher in the months of June to September (Figure 6b). RMSE values of 0.92 to $1.63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and SDE of 0.67 to $1.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ were found (Figure 6a). Stackhouse et al. (2019), in a global-level evaluation of the NP system, report average RMSE values of $1.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and positive ME values. Higher RMSE values (1.3 to $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) were reported by Negm et al. (2017). RMSE values found in the present study are within the range reported by these authors.

A relationship was found between error parameters and latitude of stations. The highest values of

los factores que pueden justificar la variabilidad de los datos se encuentra la topografía, cambios en el uso del suelo o efectos localizados que pueden ser fuentes de errores en los modelos de asimilación (White *et al.*, 2008). En este sentido, Negm *et al.* (2018) describen una metodología para mejorar la precisión de los datos de NP considerando el día juliano y la topografía del sitio.

Humedad relativa

Se encontraron valores de R^2 de 0.60 a 0.76, ME de -0.32 a -7.52%, RMSE de 8.83 a 12.16 % y SDE de 8.18 a 10.38 (Figura 4a). Negm *et al.* (2017) obtuvieron una RMSE entre 8 y 18, y señalan que las zonas costeras tienen valores más altos de RMSE que las zonas interiores. Los valores de RMSE encontrados en este trabajo son $< 13 \%$ debido a que las estaciones están en zonas interiores. En Egipto, Aboelkhair *et al.* (2019) obtuvieron valores de RMSE de 4.2 a 31.8 %; además, encontraron que los datos de NP subestimaron la HR medida ($\text{ME} < 0$) en todas las estaciones, tal como se encontró en este estudio y en el realizado por Rodrigues y Braga (2021). Dicha subestimación es mayor en los meses de invierno-primavera (Figura 4b), y de acuerdo con la Figura 5, a mayor HR mayor es la subestimación.

Velocidad del viento (u_2)

La u_2 del sistema NP fue la variable que presentó los valores más bajos de R^2 (0.19 a 0.52). Este

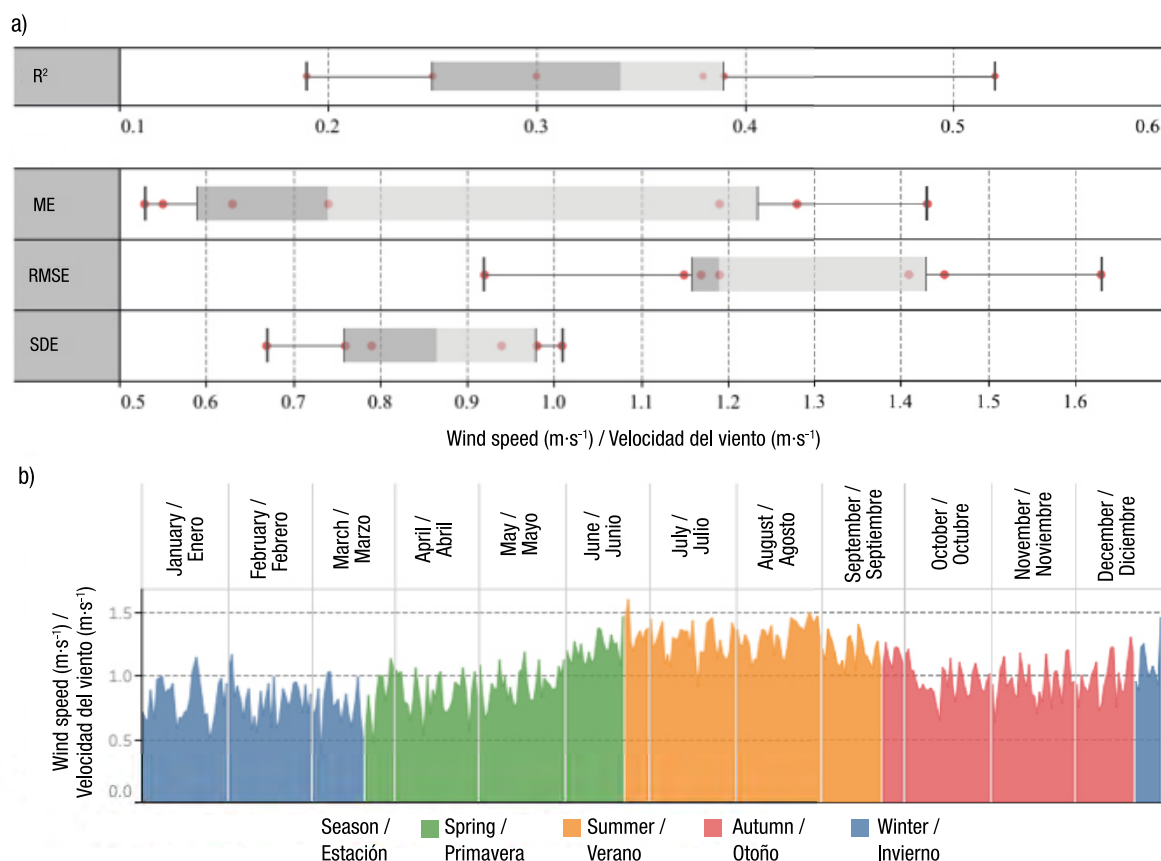


Figure 6. a) Box-and-axis plot of precision statistical parameters for wind speed and b) mean wind speed difference (estimated - measured) plot. R^2 = coefficient of determination; ME = mean error; RMSE = root mean square error; SDE = standard deviation of the errors.

Figura 6. a) Grafica de cajas y ejes de los parámetros estadísticos de precisión para la velocidad del viento y b) gráfica de la diferencia promedio de velocidad del viento (estimada - medida). R^2 = coeficiente de determinación; ME = error medio; RMSE = raíz del cuadrado medio del error; SDE = desviación estándar de los errores.

ME (>1.19) and RMSE (>1.40) were found at the southernmost stations (#1, #4 and #7), and the lowest values (ME = 0.53 and RMSE = 0.92) were found at the station located at the highest latitude (#2) (Figure 1). Stations #1, #4 and #7 had more noticeable overestimation of u_2 (Figure 7), while in the rest of the stations, at high u_2 ($> 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a tendency to underestimation is observed.

Solar radiation

R^2 values from 0.72 to 0.88 were found, where five stations were in the range of 0.81 to 0.84. Station #3 had an R^2 lower than 0.80, in addition to having the highest RMSE value (Figure 8a). R^2 values found coincide with those reported by other authors. In the United States, R^2 values from 0.76 to 0.97 have been reported (White et al., 2011), and in Spain, R^2 values from 0.85 to 0.96 (Sayago et al., 2020).

Regarding RMSE, values from 2.73 to 3.41 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ were found (Figure 8). These values agree with those

comportamiento también lo reportan Duarte y Sentelhas (2020), Najmaddin *et al.* (2017), y Rodrigues y Braga (2021). De Pondeca *et al.* (2011) indican que existen muchos desafíos en la determinación de la u_2 , como el control de calidad de los datos medidos, por lo que mejorar la calidad podría proporcionar estimaciones más precisas.

Los datos del sistema NP tienden a sobrestimar los valores medidos de u_2 en todas las estaciones, ya que se encontraron valores positivos de ME de hasta $1.43 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 6a). estas sobrestimaciones son mayores en los meses de junio a septiembre (Figura 6b). Además, se encontraron valores de RMSE de 0.92 a $1.63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y SDE de 0.67 a $1.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 6a). Stackhouse *et al.* (2019), en una evaluación a nivel global del sistema NP, reportan valores promedio de RMSE de $1.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y valores positivos de ME. Valores mayores de RMSE (1.3 a $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) fueron reportados por Negm *et al.* (2017). En este sentido, los valores de RMSE encontrados en el presente estudio están dentro del rango reportado por estos autores.

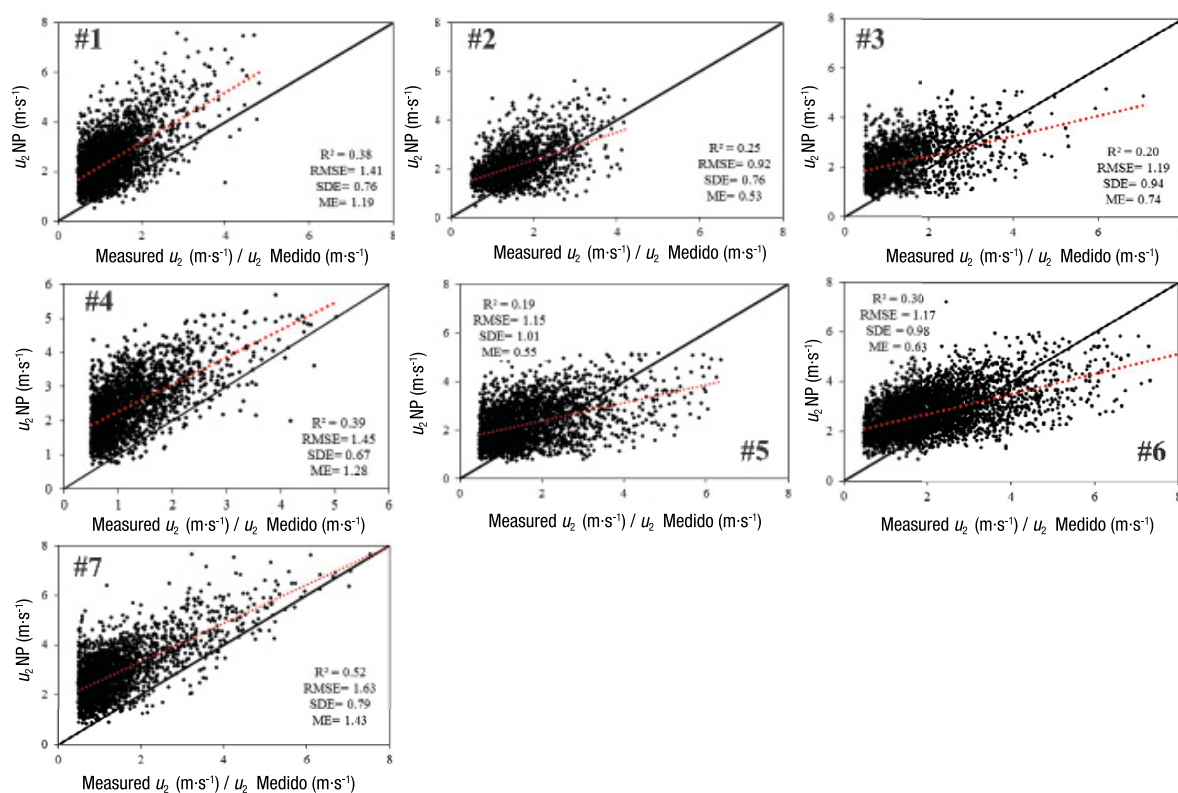


Figure 7. Wind speed (u_2) accuracy assessment. The number indicates the station. R^2 = coefficient of determination; RMSE = root mean square error; SDE = standard deviation of errors; ME = mean error.

Figura 7. Evaluación de la precisión de la velocidad de viento (u_2). El número indica la estación. R^2 = coeficiente de determinación; RMSE = raíz del cuadrado medio del error; SDE = desviación estándar de los errores; ME = error medio.

of Negm et al. (2017), who had values from 2.0 to 4.8 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, and those of Bai et al. (2010), with RMSE values of 3.1 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. NP Rs data tend to underestimate the measured values. Only station #2 had a ME > 0 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. According to Figure 8b, mean differences are higher in the months from May to October, which corresponds with the rainy season (National Water Commission [CONAGUA], 2020). According to Sayago et al. (2020), the accuracy of NP Rs data depends on atmospheric conditions, because they found on clear days an R^2 of 0.96 and an RMSE of 1.78 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, concluding that these estimators are deficient on cloudy days.

Figure 9 shows that the larger the Rs value, the NP data tend to underestimate, and the smaller the Rs (< 20 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), NP data tend to overestimate.

Sensitivity analysis of variables

Figure 10 shows the values of ME and RMSE of ET_o when errors were introduced in the values of climatic variables; each variable shows a different impact on ET_o accuracy. Negative errors induced in T_{mean} and RH show an overestimation of observed ET_o (ME > 0 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$), and positive errors in T_{max} , T_{min} , u_2 and Rs resulted in

Se encontró una relación entre los parámetros de error y la latitud de las estaciones. Los mayores valores de ME (>1.19) y RMSE (>1.40) se encontraron en las estaciones que están más al sur (#1, #4 y #7), y los valores más bajos (ME = 0.53 y RMSE = 0.92) se encontraron en la estación ubicada a mayor latitud (#2) (Figura 1). En las estaciones #1, #4 y #7 es más notoria la sobrestimación de la u_2 (Figura 7), mientras que en el resto de estaciones, a u_2 altas (> 3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) se muestra una tendencia a la subestimación.

Radiación solar

Se encontraron valores de R^2 de 0.72 a 0.88, donde cinco estaciones estuvieron en el rango de 0.81 a 0.84. La estación #3 presentó un R^2 menor que 0.80, además de que fue la que tuvo el mayor valor de RMSE (Figura 8a). Los valores de R^2 encontrados coinciden con los reportados por otros autores. En Estados Unidos se han reportado valores de R^2 de 0.76 a 0.97 (White et al., 2011), y en España, valores de R^2 de 0.85 a 0.96 (Sayago et al., 2020).

En lo que respecta al RMSE, se encontraron valores de 2.73 a 3.41 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (Figura 8). Estos valores coinciden con los de Negm et al. (2017), quienes obtuvieron

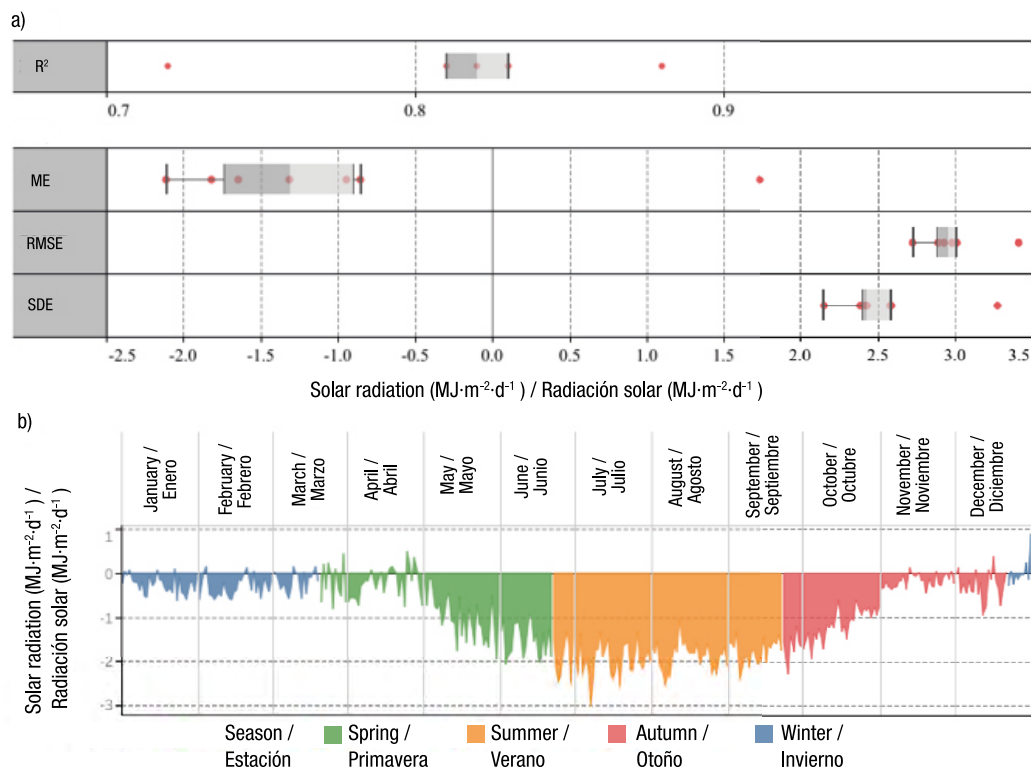


Figure 8. a) Box-and-axis plot of precision statistical parameters for solar radiation and b) mean solar radiation difference (estimated - measured) plot. R^2 = coefficient of determination; RMSE = root mean square error; SDE = standard deviation of errors; ME = mean error.

Figura 8. a) Grafica de cajas y ejes de los parámetros estadísticos de precisión para la radiación solar y b) gráfica de la diferencia promedio de radiación solar (estimada - medida). R^2 = coeficiente de determinación; RMSE = raíz del cuadrado medio del error; SDE = desviación estándar de los errores; ME = error medio.

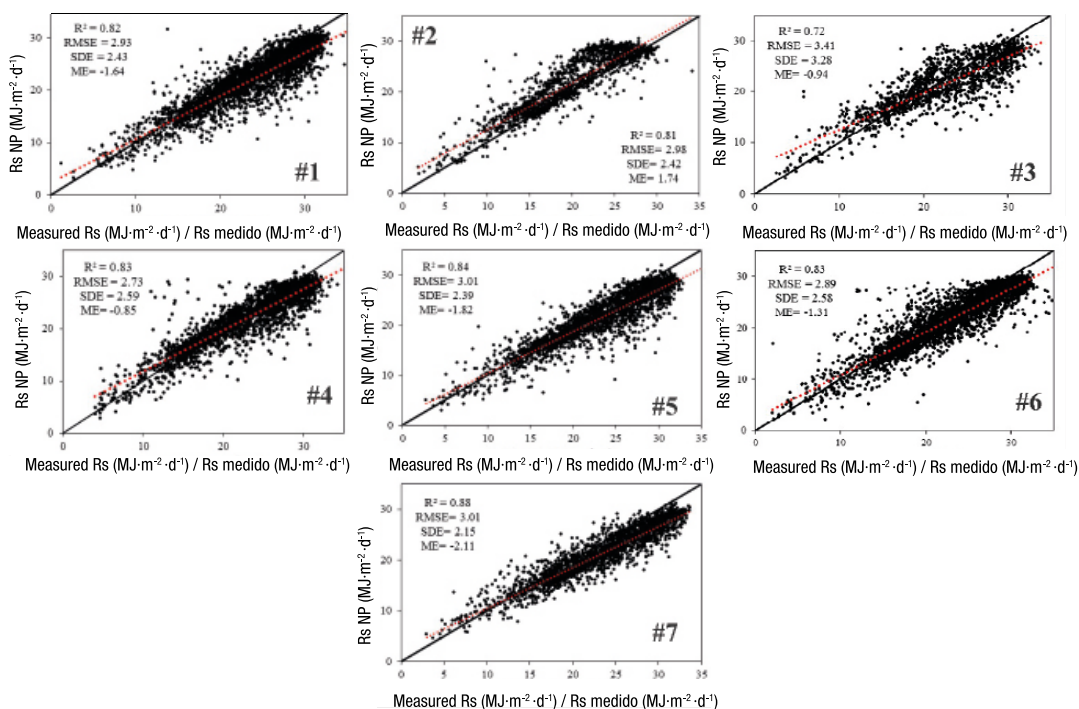


Figure 9. Solar radiation (Rs) accuracy assessment. The number indicates the station. R^2 = coefficient of determination; RMSE = root mean square error; SDE = standard deviation of errors; ME = mean error.

Figura 9. Evaluación de la precisión de la radiación solar (Rs). El número indica la estación. R^2 = coeficiente de determinación; RMSE = raíz del cuadrado medio del error; SDE = desviación estándar de los errores; ME = error medio.

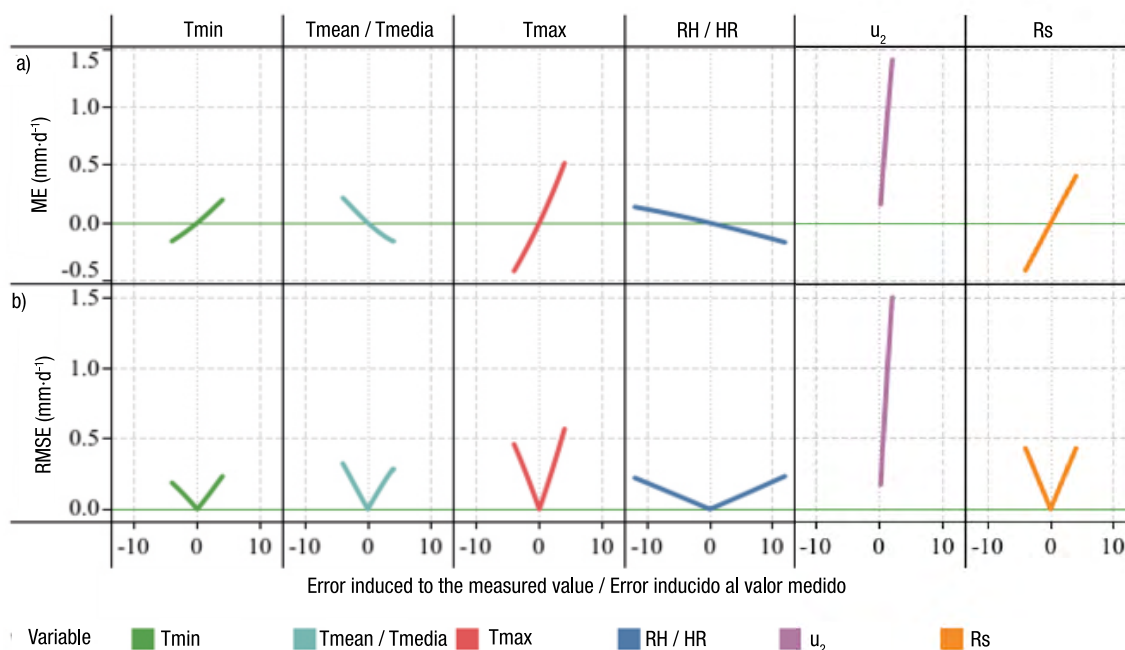


Figure 10. Reference evapotranspiration (ET_0) estimation based on variations induced to measured values. a) mean error (ME) and b) root mean square error (RMSE). Tmin = minimum temperature; Tmean = mean temperature; Tmax = maximum temperature; RH = relative humidity; u_2 = wind speed; Rs = solar radiation.

Figura 10. Estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) con base en las variaciones inducidas a los valores medidos. a) error medio (ME) y b) raíz del cuadrado medio del error (RMSE). Tmin = temperatura mínima; Tmedia = temperatura media; Tmax = temperatura máxima; HR = humedad relativa; u_2 = velocidad del viento; Rs = radiación solar."

an overestimation of ET_0 (Figure 10a). Similar behaviors to those shown in Figure 10 have been found in studies conducted in different regions when sensitivity analysis is performed (Biazar et al., 2019; Debnath et al., 2015; Ndiaye et al., 2017).

Induced errors to u_2 indicate that this variable produces the largest values of ME and RMSE associated with ET_0 (Figure 10). A difference, compared to the measured value, of $+0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ can generate an overestimation in ET_0 of up to $0.4 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, while a difference of $+2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ can generate an overestimation of $1.5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$. These results show high sensitivity of ET_0 to u_2 , which has been reported by Debnath et al. (2015), and Tabari and Hosseinzadeh (2014) in arid and semiarid regions. Debnath et al. (2015) indicate that in such regions wind flow probably replaces moist air with dry air very rapidly, which causes an increase in ET_0 compared to other regions.

Considering the RMSE values (Figure 10b), T_{\max} has, in general, the second largest influence on ET_0 estimate, followed by Rs, T_{mean} , T_{\min} and RH. Table 7 shows RMSE values derived from ET_0 estimate when values with some errors are introduced. These errors are considering the maximum RMSE values found in the evaluation of precision of NP variables.

valores de 2.0 a $4.8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, y los de Bai *et al.* (2010), con valores de RMSE de $3.1 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. En general, los datos de Rs de NP tienden a subestimar los valores medidos. Solamente la estación #2 presentó un $ME > 0 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. De acuerdo con la Figura 8b, las diferencias promedio son mayores en los meses de mayo a octubre que corresponde con la temporada de lluvias (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2020). Según Sayago *et al.* (2020), la precisión de los datos de Rs de NP depende de las condiciones atmosféricas, ya que encontraron en días despejados una R^2 de 0.96 y una RMSE de $1.78 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, con lo que concluyeron que estos estimadores son deficientes en días nublados.

En la Figura 9 se observa que entre más grande es el valor de Rs, los datos de NP tienden a subestimar, y entre más pequeño es el Rs ($< 20 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), los datos tienden a sobrestimar.

Análisis de sensibilidad de variables

La Figura 10 muestra los valores de ME y RMSE de la ET_0 cuando se introdujeron errores en los valores de las variables climáticas; cada variable muestra un impacto diferente en la precisión de la ET_0 . Los errores negativos inducidos en la T_{media} y la HR muestran una sobrestimación de la ET_0 observada ($ME > 0 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$),

Table 7. Root mean square error (RMSE) when estimating reference evapotranspiration (ET_0) with modified climate values from the NASA-POWER (NP) system.

Cuadro 7. Raíz del cuadrado medio del error (RMSE) al estimar la evapotranspiración de referencia (ET_0) con valores climáticos modificados del sistema NASA-POWER (NP).

Variable	Behavior with measured data / Comportamiento con datos medidos	Maximum RMSE / RMSE máximo	ET_0 sensitivity ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) / Sensibilidad de la ET_0 ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)
T_{\min}	Underestimates and overestimates / Subestima y sobrestima	3.67 °C	Difference of 3.67 °C in comparison to measured data leads to an overestimation of ET_0 of 0.18 (RMSE). Difference of -3.67 °C leads to an underestimation of ET_0 of 0.18 / Diferencia de 3.67 °C con respecto a datos medidos genera una sobrestimación de la ET_0 de 0.18 (RMSE). Diferencia de -3.67 °C genera una subestimación de la ET_0 de 0.18
$T_{\text{mean}} / T_{\text{media}}$	Underestimates / Subestima	2.16 °C	Difference of -2.16 °C leads to and overestimation of ET_0 of 0.17 / Diferencia de -2.16 °C genera una sobrestimación en la ET_0 de 0.17
T_{\max}	Underestimates / Subestima	2.33 °C	Difference of -2.33 °C leads to and underestimation of ET_0 of 0.28 / Diferencias de -2.33 °C genera una subestimación en la ET_0 de 0.28
RH / HR	Underestimates / Subestima	12.16 %	Difference of -10.87 % leads to an overestimation of ET_0 of up to 0.22 / Diferencias de -10.87 % genera una sobrestimación en la ET_0 de hasta 0.22
u_2	Overestimates / Sobrestima	1.63 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Difference of +1.63 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ leads to an overestimation of ET_0 of 1.26 / Diferencias de +1.63 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ genera una sobrestimación en la ET_0 de 1.26
R_s	Underestimates / Subestima	3.41 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	Difference of -3.41 leads to an underestimation of ET_0 of up to 0.37 / Diferencias de -3.41 genera una subestimación en la ET_0 de hasta 0.37

T = temperature; R_s = cumulative solar radiation; RH = relative humidity; u_2 = mean wind speed.

T = temperatura; R_s = radiación solar acumulada; HR = humedad relativa; u_2 = velocidad media del viento.

According to Table 7, even though the maximum RMSE of RH of the NP system is 12.16 %, this variable can generate a difference in ET_0 of 0.22 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, which is less than that produced by the maximum RMSE of T_{\max} , R_s and u_2 . Of these variables, the only one that can generate a difference greater than 0.5 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ compared to the ET_0 observed is u_2 ; therefore, it is suggested that this be measured directly *in situ*.

Performance for reference evapotranspiration (ET_0) estimation

Figure 11 shows mean difference ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) between estimated ET_0 and observed ET_0 , and C1 overestimates the observed ET_0 over the entire year. The magnitude of overestimation is related to the precision of each variable and has been reported when only NP data

y errores positivos en T_{\max} , T_{\min} , u_2 y R_s dieron lugar a una sobrestimación de la ET_0 (Figura 10a). En estudios realizados en diferentes regiones se han encontrado comportamientos similares a los mostrados en la Figura 10 cuando se realiza el análisis de sensibilidad (Biazar *et al.*, 2019; Debnath *et al.*, 2015; Ndiaye *et al.*, 2017).

Los errores inducidos a la u_2 indican que esta variable produce los mayores valores de ME y RMSE asociadas a la ET_0 (Figura 10). Una diferencia, con respecto al valor medido, de +0.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ puede generar una sobrestimación en la ET_0 de hasta 0.4 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, mientras que una diferencia de +2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ puede generar una sobrestimación de 1.5 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$. Estos resultados muestran la alta sensibilidad de la ET_0 a la u_2 , lo cual ha sido reportado por Debnath *et al.* (2015), y Tabari y

and the FAO-56 PM method are employed (Maldonado et al., 2019; Negm et al., 2017; Srivastava et al., 2020). The largest mean C1 differences occur in the spring months because this is when NP data underestimate T_{mean} and RH by the greatest magnitude, coupled with the overestimation of u_2 (Figure 11). Summer months show the smallest differences, and coincide with the highest u_2 , overestimates, so we would expect to find the highest ET_o overestimates; however, they also coincide with T_{max} underestimates and the highest Rs underestimates.

C2 shows underestimates in summer, while overestimates occur in spring and autumn. C3 is influenced by the behavior of C2 and accuracy of NP in temperature variables. C3 tends to underestimate ET_o from winter to summer and overestimates in autumn. C4 shows overestimates in the first four months of the year, which may be due to the underestimation of T_{mean} and RH data; however, the rest of the year shows a tendency to overestimation, which is where the impact of Rs and T_{max} data of the NP system is manifested. As expected, C5 shows the same behavior as Figure 8b, because only the NP Rs value was used.

Concerning decadal average ET_o (Figure 11b), the same behaviors of Figure 11a are observed; however, mean differences decrease when ET_o is analyzed on a decadal basis. In other studies, it has been observed that when using reanalysis data, accuracy improves when using 10-day average values compared to daily data (Monteiro et al., 2018).

When decadal mean ET_o was analyzed (Figure 12), higher R^2 values were found (greater than 0.84) than with daily data; SDE and RMSE values decreased. This indicates a better accuracy of ET_o when using decadal mean values of the NP system.

For daily ET_o with C1, RMSE values from 0.99 to 1.36 were found, and for decadal mean ET_o , from 0.63 to 1.02 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$. Errors of daily ET_o of 0.68 to 1.27 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ have been reported by Negm et al. (2017), who indicate that for most stations the observed ET_o is overestimated. Maldonado et al. (2019), with measured data from agrometeorological stations located in different countries at different altitudes, reported RMSE values from 0.31 to 1.45 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$. Although NP data overestimate ET_o with values close to 1 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, they had R^2 values higher than 0.73, indicating that bias correction strategies can be employed as proposed by Rodrigues and Braga (2021).

C2 tends to underestimate ET_o for values $> 5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, while, for lower values, it overestimates it. With daily ET_o values, an RMSE of 0.75 to 1.06 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ was obtained, while with decadal averages, values of 0.46 to 0.69 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ were found (Table 8). These values

Hosseinzadeh (2014) en regiones áridas y semiáridas. Debnath et al. (2015) indican que en dichas regiones el flujo del viento, probablemente, reemplaza el aire húmedo con aire seco muy rápidamente, lo que causa un aumento en la ET_o en comparación con otras regiones.

Considerando los valores de RMSE (Figura 10b), la T_{max} tiene, en general, la segunda mayor influencia en la estimación de la ET_o , seguida de Rs, T_{media} , T_{min} y HR. En el Cuadro 7 se muestran los valores de RMSE que se obtienen en la estimación de la ET_o cuando se introducen valores con cierto error. Estos errores son tomando en cuenta los valores de RMSE máximos obtenidos en la evaluación de la precisión de las variables de NP.

De acuerdo con el Cuadro 7, a pesar de que la RMSE máxima de la HR del sistema NP es de 12.16 %, esta variable puede generar una diferencia de la ET_o de 0.22 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, la cual es menor a la producida por la RMSE máxima de T_{max} , Rs y u_2 . De estas variables, la única que puede generar una diferencia mayor de 0.5 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ con respecto a la ET_o observada es la u_2 ; por tanto, se sugiere que ésta se mida directamente *in situ*.

Desempeño en la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o)

En la Figura 11 se muestra la diferencia promedio ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) entre la ET_o estimada y la ET_o observada, y se aprecia que el C1 sobrestima la ET_o observada en todo el año. La magnitud de la sobrestimación está relacionada con la precisión de cada variable, y se ha reportado cuando únicamente se emplean datos de NP y el método de FAO-56 PM (Maldonado et al., 2019; Negm et al., 2017; Srivastava et al., 2020). Las mayores diferencias promedio del C1 se presentan en los meses de primavera debido a que es cuando los datos de NP subestiman con mayor magnitud la T_{media} y la HR, aunado a la sobrestimación de la u_2 (Figura 11). Los meses de verano muestran las menores diferencias, y coinciden con las más altas sobrestimaciones de la u_2 , por lo que se esperaría encontrar las máximas sobrestimaciones de la ET_o ; sin embargo, también coinciden con subestimaciones de T_{max} y las máximas subestimación de Rs.

El C2 muestra subestimaciones en verano, mientras que las sobrestimaciones se presentan en primavera y otoño. El C3 está influenciado por el comportamiento del C2 y la precisión de NP en las variables de temperatura. En este sentido, el C3 tiende a subestimar la ET_o de invierno a verano y a sobrestimar en otoño. El C4 muestra sobrestimaciones en los primeros cuatro meses del año, lo cual puede deberse a la subestimación de los datos de T_{media} y HR; no obstante, el resto del año muestra una tendencia a la sobrestimación, que es

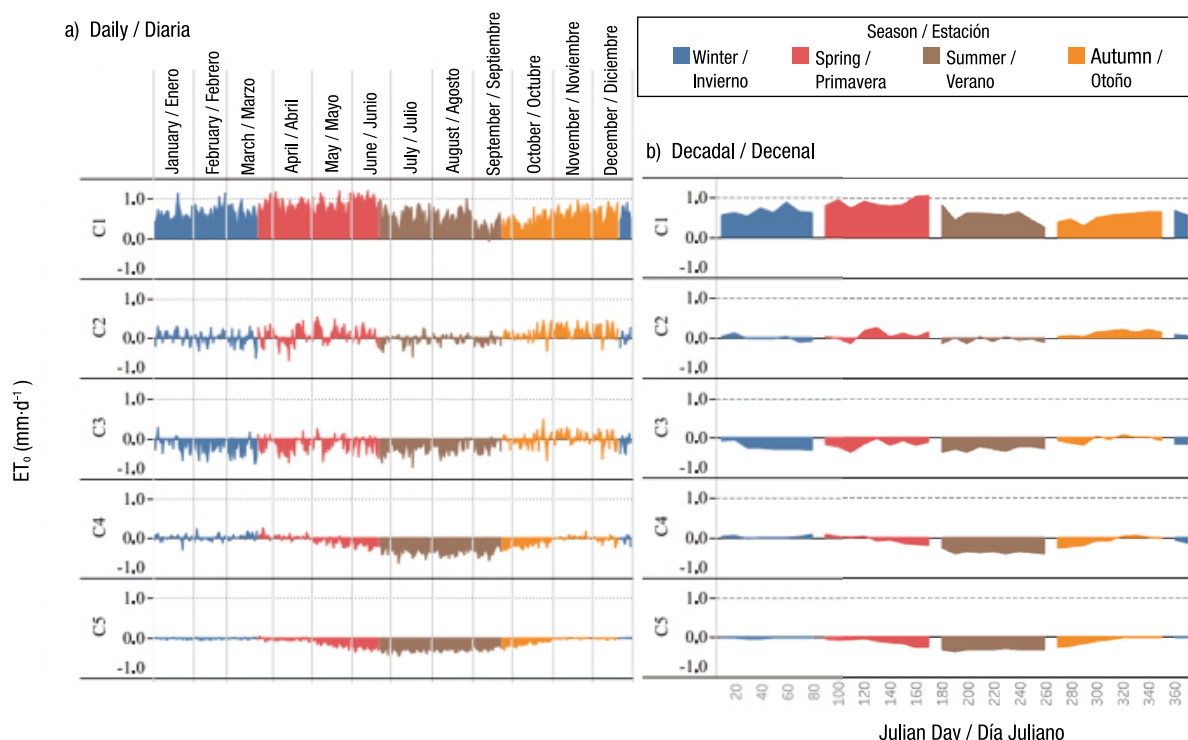


Figure 11. Mean differences between estimated and observed reference evapotranspiration (ET_0).
 Figura 11. Diferencias promedio entre evapotranspiración de referencia (ET_0) estimada y la observada.

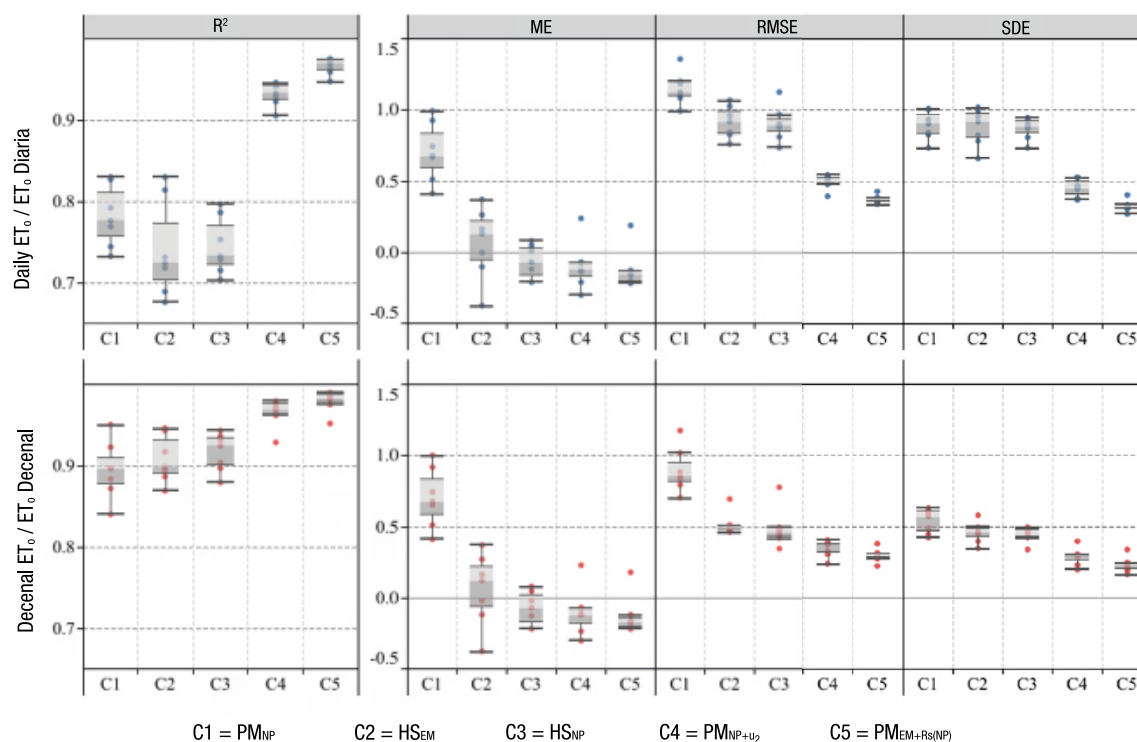


Figure 12. Evaluation of daily and decadal reference evapotranspiration (ET_0) using statistical parameters. R^2 = coefficient of determination; ME = mean error; RMSE = root mean square error; SDE = standard deviation of the errors.

Figura 12. Evaluación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) diaria y decenal mediante parámetros estadísticos. R^2 = coeficiente de determinación; ME = error medio; RMSE = raíz del cuadrado medio del error; SDE = desviación estándar de los errores.

Table 8. Values of estimators associated with reference evapotranspiration (ET₀) in five case studies.
Cuadro 8. Valores de los estimadores asociados con la evapotranspiración de referencia (ET₀) en los cinco casos de estudio.

Estimator / Estimador	Case / Caso	Tipo	La Purísima	Uruza, Mapimí	El Porvenir	Campo experimental La Laguna	Rancho Las Mercedes	Empacadora de Melón	Santa Clara	Mean / Promedio	
R ²	C1	D	0.78	0.83	0.73	0.77	0.74	0.79	0.83	0.78	
		E	0.90	0.95	0.87	0.84	0.88	0.90	0.92	0.89	
	C2	D	0.83	0.81	0.72	0.69	0.68	0.72	0.73	0.74	
		E	0.95	0.94	0.90	0.87	0.92	0.89	0.89	0.91	
	C3	D	0.79	0.80	0.73	0.73	0.72	0.75	0.71	0.75	
		E	0.94	0.94	0.90	0.90	0.92	0.93	0.93	0.92	
	C4	D	0.94	0.94	0.91	0.93	0.93	0.92	0.94	0.93	
		E	0.98	0.97	0.93	0.96	0.96	0.97	0.98	0.96	
	C5	D	0.96	0.97	0.95	0.96	0.97	0.97	0.97	0.96	
		E	0.98	0.99	0.95	0.97	0.98	0.99	0.99	0.98	
	RMSE	C1	D	1.08	1.11	1.20	1.36	1.12	0.99	1.18	1.15
			E	0.83	0.85	0.88	1.18	0.79	0.70	1.02	0.89
		C2	D	0.75	0.82	0.91	0.95	1.02	1.06	0.84	0.91
			E	0.50	0.48	0.47	0.50	0.46	0.69	0.48	0.51
		C3	D	0.73	0.81	0.90	0.88	0.96	1.12	0.87	0.90
E			0.34	0.41	0.46	0.44	0.47	0.78	0.49	0.49	
C4		D	0.48	0.51	0.53	0.49	0.48	0.54	0.39	0.49	
		E	0.38	0.37	0.40	0.37	0.30	0.33	0.23	0.34	
C5		D	0.38	0.35	0.43	0.36	0.38	0.33	0.35	0.37	
		E	0.29	0.28	0.38	0.29	0.31	0.22	0.27	0.29	
ME		C1	D	0.67	0.74	0.67	0.99	0.50	0.41	0.92	0.70
			E	0.67	0.74	0.65	1.00	0.51	0.41	0.91	0.70
		C2	D	0.37	0.26	-0.01	0.13	-0.11	-0.38	0.16	0.06
			E	0.37	0.27	-0.03	0.11	-0.12	-0.38	0.16	0.06
		C3	D	-0.07	0.04	-0.00	0.08	-0.21	-0.61	-0.13	-0.13
	E		-0.07	0.05	-0.02	0.08	-0.22	-0.60	-0.13	-0.13	
	C4	D	-0.30	0.24	-0.07	-0.21	-0.08	-0.13	-0.13	-0.10	
		E	-0.30	0.23	-0.08	-0.24	-0.08	-0.13	-0.12	-0.10	
	C5	D	-0.20	0.18	-0.16	-0.14	-0.21	-0.13	-0.22	-0.13	
		E	-0.20	0.18	-0.17	-0.17	-0.21	-0.13	-0.22	-0.13	

Table 8. Values of estimators associated with reference evapotranspiration (ET_o) in five case studies. (cont.)
Cuadro 8. Valores de los estimadores asociados con la evapotranspiración de referencia (ET_o) en los cinco casos de estudio. (cont.)

Estimador/ Estimador	Case/ Caso	Tipo	La Purísima	Uruza, Mapimí	El Porvenir	Campo experimental La Laguna	Rancho Las Mercedes	Empacadora de Melón	Santa Clara	Mean/ Promedio
SDE	C1	D	0.84	0.82	1.00	0.93	1.00	0.90	0.73	0.89
		E	0.49	0.42	0.60	0.63	0.61	0.56	0.44	0.54
	C2	D	0.66	0.78	0.91	0.95	1.01	0.99	0.83	0.88
		E	0.34	0.40	0.47	0.49	0.44	0.57	0.45	0.45
	C3	D	0.73	0.81	0.90	0.88	0.94	0.94	0.87	0.87
		E	0.33	0.41	0.46	0.44	0.42	0.49	0.48	0.43
	C4	D	0.38	0.45	0.52	0.44	0.47	0.52	0.37	0.45
		E	0.22	0.30	0.40	0.28	0.29	0.30	0.20	0.28
	C5	D	0.32	0.30	0.40	0.34	0.31	0.31	0.27	0.32
		E	0.20	0.22	0.34	0.24	0.23	0.18	0.16	0.22

R² = coefficient of determination; RMSE = root mean square error; ME = mean error; SDE = standard deviation of errors; D = daily; E = decadal mean.
R² = coeficiente de determinación; RMSE = raíz del cuadrado medio del error; ME = error medio; SDE = desviación estándar de los errores; D = diario; E = promedio decenal.

are lower than those found in C1; however, with daily values C1 shows higher R^2 .

C3 shows similar values of error parameters as C2 due to high precision of NP temperature data. RMSE and SDE values in C3 are lower than in C1 for daily and decadal ET_o . Najmaddin et al. (2017) note that when using reanalysis data in an arid zone, lower RMSE values are found with the HS method than with the FAO-56 PM method; this may be due to the precision of NP u_2 and the high sensitivity of ET_o to this variable. Therefore, for the study area, when there are no measured data, it is recommended to use the NP data with the HS method (C3), and not with the PM method (C1), and preferably to estimate values of decadal mean ET_o .

The highest R^2 values and lowest RMSEs were found in C4 and C5 for both daily and decadal ET_o . This indicates that NP data, except for u_2 , can be used as an option to fill geospatial gaps in meteorological data to estimate ET_o . Comparing both cases, in the case of C5, we found $R^2 > 0.95$, and RMSE values $< 0.43 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ for daily ET_o and $< 0.38 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ for decadal mean ET_o . On the other hand, in the case of C4, we observed $R^2 > 0.91$ and RMSE $< 0.53 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ for daily ET_o , and $R^2 > 0.93$ and RMSE $< 0.40 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ for decadal mean ET_o (Table 8). The above indicates greater accuracy is obtained with C5, where only NP Rs data were used. This makes sense, since more NP variables are used in C4, including Rs, which show some error compared to measured data. The difference in RMSE of C4, compared to C1, shows the effect that u_2 has on that of ET_o .

Conclusions

Reanalysis data can be an important tool for areas with no information to estimate ET_o or when this information is incomplete because it facilitates access to values of various meteorological variables of interest, such as temperature, relative humidity, wind speed and solar radiation. However, before using the data, it should be validated using values measured in the area, so that accuracy provided by data set can be quantified and alternatives for bias correction can be sought. Often, measured data are not available to make an evaluation; therefore, an alternative is to compare several reanalysis data sets and select those with the same behaviors, although there are not many well-documented studies available in the literature on this subject.

Of the five cases analyzed, those that combine measured data and NP system data with the FAO-56 PM method (C4 and C5) had the lowest RMSE and highest R^2 values. This indicates that both cases can be used for the study area and estimate ET_o with high accuracy.

donde se manifiesta el impacto de los datos de Rs y T_{\max} del sistema NP. Como era de esperarse, el C5 muestra el mismo comportamiento que la Figura 8b, ya que solamente se empleó el valor de Rs de NP.

Con respecto a la ET_o promedio decenal (Figura 11b), se observan los mismos comportamientos de la Figura 11a; sin embargo, las diferencias promedio disminuyen cuando se analiza la ET_o de manera decenal. En otros estudios se ha observado que cuando se emplean datos de reanálisis, la precisión mejora cuando se usan valores promedio de 10 días en comparación con datos diarios (Monteiro et al., 2018).

Cuando se analizó la ET_o promedio decenal (Figura 12) se obtuvieron valores de R^2 más altos (mayor a 0.84) que con los datos diarios; además, disminuyeron los valores de SDE y RMSE. Esto indica una mejor precisión de la ET_o al usar valores decenales promedio del sistema NP.

En la ET_o diaria con el C1 se encontraron valores de la RMSE de 0.99 a 1.36, y para la ET_o promedio decenal, de 0.63 a 1.02 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$. Errores de la ET_o diaria de 0.68 a 1.27 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ han sido reportado por Negm et al. (2017), quienes indican que para la mayoría de las estaciones se sobrestima la ET_o observada. Maldonado et al. (2019), con datos medidos de estaciones agrometeorológicas localizadas en diferentes países a diferentes altitudes, reportaron valores de RMSE de 0.31 a 1.45 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$. A pesar de que los datos del NP sobrestiman la ET_o con valores cercanos a 1 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, éstos presentaron valores de R^2 superiores a 0.73, lo cual indica que se pueden emplear estrategias para corrección de sesgo como lo plantean Rodrigues y Braga (2021).

El C2 tiende a subestimar la ET_o para valores $>5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$, mientras que, para valores más bajos, la sobrestima. Con valores de ET_o diaria se obtuvo una RMSE de 0.75 a 1.06 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, mientras que con promedios decenales se encontraron valores de 0.46 a 0.69 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (Cuadro 8). Estos valores son más bajos a los encontrados en el C1; sin embargo, con valores diarios el C1 muestra R^2 más altas.

El C3 muestra valores similares de los parámetros de error que el C2 debido a la alta precisión que tienen los datos de temperatura de NP. Los valores de RMSE y SDE en C3 son menores que en el C1 para la ET_o diaria y la decenal. Najmaddin et al. (2017) señalan que cuando se usan datos de reanálisis en una zona árida se tienen valores de RMSE más bajos con el método de HS que con el de FAO-56 PM; esto se puede deber a la precisión de la u_2 de NP y la alta sensibilidad de la ET_o a esta variable. Por tanto, para la zona de estudio, cuando no se tengan datos medidos, se recomienda utilizar los datos de NP con el método de HS (C3), y no con el de PM (C1), y de preferencia estimar los valores de la ET_o promedio decenal.

These cases are valid when measured variables are available in the area of interest. When measured data are not available, it is convenient to estimate ET_0 with HS equation and temperature data from the NP system, as discussed in C3.

Results indicate that the NP system data (except for wind speed) can be used as an option to complete missing data for ET_0 estimation, or in other applications, such as estimating growing degree days, due to high R^2 values obtained in the evaluation of temperature.

End of English version

References / Referencias

- Aboelkhair, H., Morsy, M., & El Afandi, G. (2019). Assessment of agroclimatology NASA POWER reanalysis datasets for temperature types and relative humidity at 2 m against ground observations over Egypt. *Advances in Space Research*, 64(1), 129-142. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.032>
- Allen, R. G. (1996). Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(2), 97-106. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(1996\)122:2\(97\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(1996)122:2(97))
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Allen, R. G., Smith, M., Pereira, L. S., Raes, D., & Wright, J. L. (2000). Revised FAO procedures for calculating evapotranspiration: irrigation and drainage paper no. 56 with testing in Idaho. *Watershed Management and Operations Management*, 2000, 1-10. [https://doi.org/10.1061/40499\(2000\)125](https://doi.org/10.1061/40499(2000)125)
- Bai, J., Chen, X., Dobermann, A., Yang, H., Cassman, K. G., & Zhang, F. (2010). Evaluation of NASA satellite- and Model-Derived weather data for simulation of maize yield potential in China. *Agronomy Journal*, 102(1), 9-16. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0085>
- Biazar, S. M., Dinpashoh, Y., & Singh, V. P. (2019). Sensitivity analysis of the reference crop evapotranspiration in a humid region. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(31), 32517-32544. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06419-w>
- Blankenau, P. A., Kilic, A., & Allen, R. (2020). An evaluation of gridded weather data sets for the purpose of estimating reference evapotranspiration in the United States. *Agricultural Water Management*, 242, 109376. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106376>
- Camargo-Rodriguez, A. V., & Ober, E. S. (2019). AquaCropR: Crop growth model for R. *Agronomy*, 9(7), 378. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070378>

Los valores de R^2 más altos y las RMSE más bajas se obtuvieron en los casos C4 y C5, tanto para ET_0 diaria como para la decenal. Esto indica que los datos de NP, a excepción de la u_2 , se pueden usar como una opción para llenar los vacíos geoespaciales en los datos meteorológicos para estimar la ET_0 . Al comparar ambos casos, en el C5 se obtuvieron $R^2 > 0.95$, y valores de la $RMSE < 0.43 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ para la ET_0 diaria y $< 0.38 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ para la ET_0 promedio decenal. Por su parte, en el C4 se encontraron $R^2 > 0.91$ y $RMSE < 0.53 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ para la ET_0 diaria, y $R^2 > 0.93$ y $RMSE < 0.40 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ para la ET_0 promedio decenal (Cuadro 8). Lo anterior indica que se obtiene mayor precisión con el C5, donde sólo se emplearon datos de Rs de NP. Esto tiene sentido, ya que en el C4 se emplean más variables de NP, incluyendo Rs, que muestran cierto error con respecto a datos medidos. La diferencia de la RMSE del C4, con respecto al C1, muestra el efecto que tiene la u_2 sobre la de la ET_0 .

Conclusiones

Los datos de reanálisis pueden ser una herramienta importante para zonas donde no se cuenta con información para estimar la ET_0 o cuando esta información es incompleta, ya que facilita el acceso a valores de diversas variables meteorológica de interés, como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad de viento y la radiación solar. No obstante, antes de utilizar los datos, se deben validar usando valores medidos en la zona, de esta manera se podrá cuantificar la precisión que brinda el conjunto de datos y se podrán buscar alternativas de corrección de sesgos. Con frecuencia, no se cuenta con datos medidos para realizar una evaluación; por ello, una alternativa es comparar varios conjuntos de datos de reanálisis y seleccionar los que tengan los mismos comportamientos, aunque no hay muchos estudios bien documentados disponibles en la literatura sobre este tema.

De los cinco casos analizados, los que combinan datos medidos y datos del sistema NP con el método de FAO-56 PM (C4 y C5) tuvieron los valores de RMSE más bajos y R^2 más altos. Esto indica que ambos casos se pueden emplear para la zona de estudio y estimar la ET_0 con alta precisión. Dichos casos son válidos cuando se cuenta con variables medidas en la zona de interés. Cuando no se tengan datos medidos, lo conveniente es estimar la ET_0 con la ecuación de HS y datos de temperatura del sistema NP, como se analizó en el C3.

Los resultados indican que los datos del sistema NP (a excepción de la velocidad de viento) se pueden usar como una opción para completar datos faltantes para la estimación de la ET_0 , o en otras aplicaciones, como estimar los grados días desarrollo, debido a los altos valores de R^2 que se obtuvieron en la evaluación de la temperatura.

Fin de la versión en español

- Chávez-Ramírez, E., González-Cervantes, G., González-Barrios, J. L., Dzúl-López, E., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., & Chávez-Simental, J. A. (2013). Uso de estaciones climatológicas automáticas y modelos matemáticos para determinar la evapotranspiración. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 4(4), 115-126. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v4n4/v4n4a7.pdf>
- Cobaner, M., Citako-lu, H., Haktanir, T., & Kisi, O. (2017). Modifying Hargreaves-Samani equation with meteorological variables for estimation of reference evapotranspiration in Turkey. *Hydrology Research*, 48(2), 480-497. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.217>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero principal-región lagunera (0523), estado de Coahuila*. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/coahuila/DR_0523.pdf
- de Ponca, M. S. F., Manikin, G. S., Dimego, G., Benjamin, S. G., Parrish, D. F., Purser, R. J., Wu, W. S., Horel, J. D., Myrick, D. T., Lin, Y., Aune, R. M., Keyser, D., Colman, B., Mann, G., & Vavra, J. (2011). The real-time mesoscale analysis at NOAA's national centers for environmental prediction: Current status and development. *Weather and Forecasting*, 26(5), 593-612. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-10-05037.1>
- Debnath, S., Adamala, S., & Raghuwanshi, N. S. (2015). Sensitivity analysis of FAO-56 Penman-Monteith method for different agro-ecological regions of India. *Environmental Processes*, 2(4), 689-704. <https://doi.org/10.1007/S40710-015-0107-1>
- Duarte, Y. C., & Sentelhas, P. C. (2020). NASA/POWER and DailyGridded weather datasets-how good they are for estimating maize yields in Brazil? *International Journal of Biometeorology*, 64(3), 319-329. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01810-1>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación Köppen*. Instituto de Geografía- Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 1-13. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Huang, G., Wu, L., Ma, X., Zhang, W., Fan, J., Yu, X., Zeng, W., & Zhou, H. (2019). Evaluation of CatBoost method for prediction of reference evapotranspiration in humid regions. *Journal of Hydrology*, 574, 1029-1041. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.085>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2020, July 26). *Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas*. <http://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Estaciones>
- Jabloun, M., & Sahli, A. (2008). Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data. Application to Tunisia. *Agricultural Water Management*, 95(6), 707-715. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.01.009>
- Maldonado, W., Borges-Valeriano, T. T., & de Souza-Rolim, G. (2019). EVAPO: A smartphone application to estimate potential evapotranspiration using cloud gridded meteorological data from NASA-POWER system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 187-192. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.032>
- Martins, D. S., Paredes, P., Razei, T., Pires, C., Cadima, J., & Pereira, L. S. (2017). Assessing reference evapotranspiration estimation from reanalysis weather products. An application to the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2378-2397. <https://doi.org/10.1002/joc.4852>
- Marzouk, O. A. (2021). Assessment of global warming in Al Buraimi, sultanate of Oman based on statistical analysis of NASA POWER data over 39 years, and testing the reliability of NASA POWER against meteorological measurements. *Heliyon*, 7(3), e06625. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06625>
- Mattar, M. A. (2018). Using gene expression programming in monthly reference evapotranspiration modeling: A case study in Egypt. *Agricultural Water Management*, 198, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.017>
- Monteiro, L. A., Sentelhas, P. C., & Pedra, G. U. (2018). Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. *International Journal of Climatology*, 38(3), 1571-1581. <https://doi.org/10.1002/joc.5282>
- Najmaddin, P., Whelan, M. J., & Balzter, H. (2017). Estimating daily reference evapotranspiration in a semi-arid region using remote sensing data. *Remote Sensing*, 9(8), 779. <https://doi.org/10.3390/RS9080779>
- Ndiaye, P., Bodian, A., Diop, L., Deme, A., Dezetter, A., Djaman, K., & Ogilvie, A. (2020). Trend and sensitivity analysis of reference evapotranspiration in the senegal river basin using NASA meteorological data. *Water*, 12(7), 1-19. <https://doi.org/10.3390/w12071957>
- Ndiaye, P., Bodian, A., Diop, L., & Djaman, K. (2017). Sensitivity analysis of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to climatic variables: Case of Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, 9(12), 1364-1376. <https://doi.org/10.4236/JWARP.2017.912087>
- Negm, A., Jabro, J., & Provenzano, G. (2017). Assessing the suitability of American National Aeronautics and Space Administration (NASA) agro-climatology archive to predict daily meteorological variables and reference evapotranspiration in Sicily, Italy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 244-245, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.05.022>
- Negm, A., Minacapilli, M., & Provenzano, G. (2018). Downscaling of American National Aeronautics and Space Administration (NASA) daily air temperature in Sicily, Italy, and effects on crop reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 209, 151-162. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.016>
- Paredes, P., Martins, D. S., Pereira, L. S., Cadima, J., & Pires, C. (2018). Accuracy of daily estimation of grass

- reference evapotranspiration using ERA-Interim reanalysis products with assessment of alternative bias correction schemes. *Agricultural Water Management*, 210, 340-353. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.003>
- Pelosi, A., Terribile, F., D'Urso, G., & Battista-Chirico, G. (2020). Comparison of ERA5-Land and UERRA MESCAN-SURFEX reanalysis data with spatially interpolated weather observations for the regional assessment of reference evapotranspiration. *Water (Switzerland)*, 12(6), 1669. <https://doi.org/10.3390/W12061669>
- Rodrigues, G. C., & Braga, R. P. (2021). Evaluation of NASA POWER reanalysis products to estimate daily weather variables in a hot summer mediterranean climate. *Agronomy*, 11(6), 1-17. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11061207>
- Sayago, S., Ovando, G., Almorox, J., & Bocco, M. (2020). Daily solar radiation from NASA-POWER product: assessing its accuracy considering atmospheric transparency. *International Journal of Remote Sensing*, 41(3), 897-910. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1650986>
- Srivastava, P. K., Singh, P., Mall, R. K., Pradhan, R. K., Bray, M., & Gupta, A. (2020). Performance assessment of evapotranspiration estimated from different data sources over agricultural landscape in Northern India. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 145-156. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03076-4>
- Stackhouse, P. W., Westberg, D., Hoell, J. M., Chandler, W. S., & Zhang, T. (2019). *Prediction of worldwide energy resource (POWER) - agroclimatology methodology - (0.5 latitude by 0.5 longitude spatial resolution): Technical report of NASA*. <https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/meteorology/summary/>
- Starr, M., Deng, B., & Helenius, J. (2020). Aquacrop-simulated response of sorghum biomass and grain yield to biochar amendment in South Sudan. *Agronomy*, 10(1), 67. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010067>
- Tabari, H., & Hosseinzadeh, P. (2014). Sensitivity of evapotranspiration to climatic change in different climates. *Global and Planetary Change*, 115, 16-23. <https://doi.org/10.1016/J.GLOPLACHA.2014.01.006>
- Tyagi, S., Singh, N., Sonkar, G., & Mall, R. K. (2019). Sensitivity of evapotranspiration to climate change using DSSAT model in sub humid climate region of Eastern Uttar Pradesh. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0513-2>
- White, J. W., Hoogenboom, G., Stackhouse, P. W., & Hoell, J. M. (2008). Evaluation of NASA satellite- and assimilation model-derived long-term daily temperature data over the continental US. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(10), 1574-1584. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.05.017>
- White, J. W., Hoogenboom, G., Wilkens, P. W., Stackhouse, P. W., & Hoel, J. M. (2011). Evaluation of satellite-based, modeled-derived daily solar radiation data for the continental United States. *Agronomy Journal*, 103(4), 1242-1251. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0038>