



Evaluación de dos modelos para la estimación de la evapotranspiración de referencia con datos CERES

Carmona, F.^{1,3}, Holzman, M.^{2,3}, Rivas, R.^{1,4}, Degano, M.F.^{1,4}, Kruse, E.³, Bayala, M.^{1,4}

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras 'Dr. Eduardo J. Usunoff', Paraje Arroyo Seco s/n, Campus Universitario Tandil, Argentina.

² Instituto de Hidrología de Llanuras 'Dr. Eduardo J. Usunoff', República de Italia 780, Azul, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina.

⁴ Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), La Plata, prov. de Buenos Aires, Argentina.

Resumen: La evapotranspiración es la variable hidrológica de mayor relevancia en la llanura pampeana. La información provista por sensores a bordo de satélites permite representar la variabilidad espacio-temporal de la evapotranspiración, lo cual no es posible lograr utilizando únicamente datos de sitios puntuales de medida. En este trabajo se adaptaron las ecuaciones de Priestley y Taylor (PT) y FAO Penman-Monteith (FAO PM) para obtener la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_0 , utilizando únicamente datos de los productos de satélite CERES (SYN1 y CldTypHist). Los resultados obtenidos con los datos CERES se compararon con valores de ET_0 provistos por la Oficina de Riesgo Agropecuario de Argentina, a partir de información de 24 estaciones agro-meteorológicas distribuidas en la Región Pampeana de Argentina (2001-2016). Los resultados mostraron muy buena concordancia entre los valores generados con los métodos propuestos y aquellos obtenidos *in situ*, con errores de entre $\pm 0,8$ y $\pm 1,1$ mm d⁻¹ y r^2 superiores a 0,75 a escala diaria, y errores de entre ± 14 y ± 19 mm mes⁻¹ y r^2 superiores a 0,9, a escala mensual, siendo en general mejores los resultados con el método adaptado de FAO PM respecto al de PT. Finalmente, se elaboraron los mapas promedio mensual de la ET_0 para la Región Pampeana de Argentina, los cuales permitieron conocer la variación espacio temporal en el área de validación. En conclusión, los métodos que aquí se presentan constituyen una buena alternativa para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, sin necesidad de contar con medidas de terreno.

Palabras clave: CERES, teledetección, evapotranspiración del cultivo de referencia.

Evaluation of two models using CERES data for reference evapotranspiration estimation

Abstract: Evapotranspiration is the most important variable in the Pampas plain. Information provided by sensors onboard satellite missions allows represent the spatial and temporal variability of evapotranspiration, which cannot be achieved using only measurements of weather stations. In this work, the Priestley and Taylor (PT) and FAO Penman Monteith (FAO PM) equations were adapted to estimate the reference evapotranspiration, ET_0 , using only CERES satellite products (SYN1 and CldTypHist). In order to evaluate the reference evapotranspiration from CERES, a comparison with *in situ* measurements was conducted. We used ET data provided by the Oficina de Riesgo Agropecuario, corresponding to 24 stations placed in the Pampean Region of Argentina (2001-2016). Results showed very good agreement between the estimates with CERES products and *in situ* values, with errors between ± 0.8 and ± 1.1 mm d⁻¹ and r^2 greater than

To cite this article: Carmona, F., Holzman, M., Rivas, R., Degano, F., Kruse, E., Bayala, M. 2018. Evaluation of two models using CERES data for reference evapotranspiration estimation. *Revista de Teledetección*, 51, 1-16. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.9259>

* Corresponding author: facundo.carmona@rec.unicen.edu.ar

0.75 at daily scale, and errors between ± 14 and ± 19 mm month⁻¹ and r^2 greater than 0.9, at monthly scale better results were obtained with adapted model FAO PM than PT. Finally, ET_0 monthly maps for the Pampean Region of Argentina were elaborated, which allowed knowing the temporal-spatial variation in the validation area. In conclusion, the methods presented here are a suitable alternative to estimate the reference evapotranspiration without requiring ground measurements.

Key words: CERES, remote sensing, reference evapotranspiration.

1. Introducción

La evapotranspiración (ET) es la variable hidrológica de mayor peso en la llanura pampeana. En un sentido más amplio, este término hidrológico cobra mayor relevancia si se tiene en cuenta que la productividad primaria de la región es función del agua disponible para evaporar. Desde principios del siglo pasado, muchos estudios se han llevado a cabo para estimar la ET. Las primeras formulaciones se basaron en relaciones empíricas, logrando un salto cualitativo importante a partir de que (Penman, 1948) presentó una ecuación incorporando todas las variables meteorológicas con relación directa sobre el proceso de ET. Hoy en día, existe una diversa gama de métodos para estimar la ET a diferentes escalas; a escala puntual por medio de porómetros, medidores de flujo de sabia en la planta y lisímetros; a escala de parcela por medio de balances de agua, relación de Bowen, sistemas Eddy covariance, centilómetros, entre otros; y a escala regional incorporando, principalmente, datos de satélite (Soegaard y Boegh, 1995; Carmona *et al.*, 2011; Ocampo y Rivas, 2013; Rivas y Carmona, 2013).

Los factores que intervienen en el proceso de evapotranspiración son diversos, variables en el tiempo y en el espacio, y se pueden agrupar en aquellos de orden climático, los relativos a la planta y los asociados al suelo (Jensen *et al.*, 1990). La diversidad de factores, por un lado, dio lugar a diferentes visiones para el abordaje del estudio de la ET, y diferentes respuestas según los conceptos y problemas a analizar. Entre ellos, un concepto de gran relevancia es la denominada *evapotranspiración de referencia* o *evapotranspiración del cultivo de referencia*, ET_0 . Este concepto se introdujo para reducir ambigüedades de interpretación en el proceso de ET, calculando los requerimientos de agua de una superficie de referencia a partir

de la cual, mediante ciertas relaciones básicas, se pueda conocer los requerimientos de agua de diferentes cultivos sobre las mismas condiciones ambientales.

En la actualidad, el método combinado de FAO Penman-Monteith (FAO PM) es el modelo globalmente recomendado para obtener la ET_0 a escala local (Allen *et al.*, 1998; ASCE - EWRI, 2005). Este método se desarrolló haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 s m⁻¹, una emisividad de 0,98, un albedo de 0,23, representando la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, con crecimiento activo y adecuadamente regado (lo cual hace suponer que las temperaturas del aire y superficie son próximas). El método FAO PM reduce las imprecisiones de métodos previos y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos. Para su aplicación, es necesario contar con, mínimamente, datos de temperatura y humedad relativa del aire, velocidad de viento y radiación solar (o datos para su cálculo), por lo tanto se necesita información de estaciones meteorológicas de terreno.

Por otro lado, existe una variada gama de modelos para obtener productos de evapotranspiración con el uso de datos de satélite, representando así la variación espacio-temporal de la pérdida de agua en el suelo (Rivas y Caselles, 2004). Entre los métodos basados en datos de satélite se encuentran (a) los métodos de *balance de energía en superficie* (Anderson *et al.*, 1997; Bastiaanssen *et al.*, 1998; Allen *et al.*, 2007; Sánchez-Tomas *et al.*, 2008), (b) los métodos basados en la relación *Índice de vegetación-Temperatura de superficie* (Jiang e Islam, 2001; Nishida *et al.*, 2003; Tang *et al.*, 2009), (c) métodos basados en la *ecuación de Penman-Monteith* (Mu *et al.*, 2007, 2011; Zhang

et al., 2009), (d) métodos basados en la ecuación de Priestley-Taylor (Fisher et al., 2008; Miralles et al., 2011), (e) métodos empíricos (Wang et al., 2007), y (f) métodos basados en el balance de agua (Zeng et al., 2012; Long et al., 2014; Wan et al., 2015), entre otros.

Pese a la numerosa existencia de modelos para estimar la evapotranspiración a escala regional, en general éstos cuentan con limitaciones relacionadas con la disponibilidad de medidas de terreno, uso restringido de ciertos modelos a condiciones de cielo despejado (especialmente los modelos basados en el balance de energía), requerimiento de imágenes de satélite para periodo de cálculo en particular, requerimiento de calibraciones para el área de aplicación (los modelos empíricos por ejemplo), escalado de valores instantáneos a diarios, entre otros problemas y/o requisitos que limitan el rango de aplicación de los modelos y contribuyen en los errores de los resultados (Zhang et al., 2016). Por lo tanto, aún hoy en día el estudio de la evapotranspiración y el desarrollo de modelos resultan clave para lograr una mayor comprensión y simulación de la pérdida de agua de una región. En este contexto, recientemente hemos comenzado a evaluar los diferentes modelos de ET disponibles en Región Pampeana de Argentina (RPA). Por ejemplo, se evaluó el producto de satélite MOD16 (Mu et al., 2007, 2011) para obtener la ET_0 , y se encontró que la sobreestima por encima de un 50% (Degano, 2017; Degano et al., 2018).

En el presente trabajo, se plantea como objetivo principal la adaptación y validación de dos métodos, ampliamente conocidos, para estimar la evapotranspiración del cultivo de referencia con, únicamente, datos de productos de satélite. Los métodos se aplicaron en la RPA con datos de los productos de satélite CERES-SYN1 y CERES-CldTypHist. Para la validación de los métodos se utilizaron datos de ET_0 (2000-2016) que se obtuvieron con registros de 24 estaciones meteorológicas ubicadas dentro de RPA, provistos por la Oficina de Riesgo Agropecuario de Argentina. Los métodos que aquí se presentan servirán de base para un modelo más complejo que estime la ET real incorporando datos de otras misiones de satélite.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio y datos de terreno

La Región Pampeana de Argentina es una extensa y fértil llanura de aproximadamente unos 520.000 km² que abarca las provincias argentinas de Buenos Aires, parte de San Luis, noreste de La Pampa, sureste de Córdoba, sur de Santa Fe y gran parte de Entre Ríos (Aliaga et al., 2017). La economía de la región se basa, principalmente, en la agricultura y la industrialización ganadera, representando el área más productiva del país (Kitoh et al., 2011; Martínez et al., 2016). La llanura pampeana se encuentra en la faja de climas subtropicales, donde predominan los ambientes esteparios o semidesérticos, caracterizándose por la existencia de largos períodos de sequía e inundaciones que afectan la disponibilidad de agua, la productividad de los sistemas agrícolas y otras actividades humanas (Aliaga et al., 2017). El clima pampeano está determinado por dos centros permanentes de alta presión: el anticiclón subtropical Atlántico, que emite vientos cálidos y húmedos que ingresan por el norte y noreste; y el anticiclón subtropical Pacífico con vientos fríos y secos, que llegan por el oeste y sudoeste (conocido como el Pampero). Otro sistema que contribuye es la Sudestada, con vientos fríos y húmedos originados en el Atlántico frente a la Patagonia. La precipitación disminuye de noreste a sudoeste y determina el paso del clima cálido y húmedo a uno semiárido (Scian et al., 2006). La zona oriental es subtropical húmeda y subhúmeda, mientras que el noroeste es una estepa seca-caliente. La zona oeste es seca y fría, y la región suroeste de la llanura Pampeana es árida y fría. Las temperaturas medias anuales disminuyen de norte a sur, mientras que el clima continental predomina de este a oeste, causando variaciones en los regímenes térmicos (Aliaga et al., 2017).

La RPA se subdivide en 12 ecorregiones; las Planicies poligenéticas de Entre Ríos (D25), la Pampa pedemontana cordobesa (D26), la Pampa arenosa (D27), la Pampa endorreica (D28), el Delta del Paraná (D29), la Pampa Ondulada (D30), la Pampa Deprimida (D31), las Planicies litorales pampeanas (D32), las Sierras Septentrionales bonaerenses (D33), la Pampa Interserrana (D34), las Sierras Australes bonaerenses (D35) y las Planicies poligenéticas de La Pampa (D36)

(Pereyra, 2003). Valores calculados de ET_{0-PM} con información de 24 estaciones meteorológicas distribuidas en las diferentes ecorregiones fueron provistos por la Oficina de Riesgo Agropecuario de Argentina (<http://www.ora.gob.ar/>) para desarrollar este trabajo.

En la Figura 1 se muestra el área de estudio, indicando las diferentes ecorregiones de la RPA, según (Pereyra, 2003), y la ubicación de las 24 estaciones que se utilizaron. En la Tabla 1 se detallan las estaciones de medida, con sus coordenadas geográficas y la ecorregión a la que pertenece cada una de ellas.

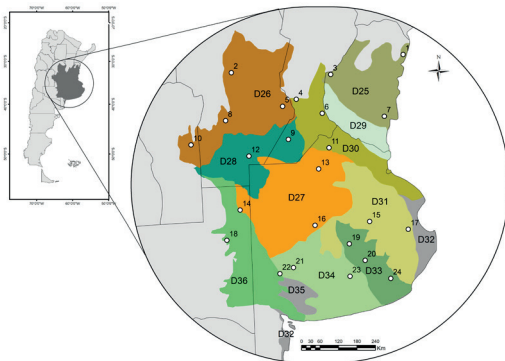


Figura 1. Región Pampeana de Argentina, ecorregiones y ubicación de las estaciones meteorológicas que se utilizaron en este estudio.

2.2. Datos CERES

El CERES (del término en inglés *Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) es uno de los instrumentos científicos de satélite de mayor importancia del Sistema de Observación de la Tierra (EOS) de la NASA. El primer instrumento CERES fue lanzado en diciembre de 1997 a bordo de la plataforma TRMM de la NASA (*Tropical Rainfall Measurement Mission*, sensor PFM). Actualmente los instrumentos CERES están recolectando información a bordo de tres misiones de satélite, que corresponden a las plataformas Terra (sensores FM1 y FM2), Aqua (sensores FM3 y FM4) y S-NPP (*Suomi National Polar-orbiting Partnership*, sensor FM5). Recientemente, se lanzó el sensor CERES FM6 a bordo de la plataforma JPSS-1 (del *Joint Polar Satellite System*,

Tabla 1. Detalle de las estaciones de terreno utilizadas para el cálculo de la ET_{0-PM} local, ubicación y ecorregión a la que pertenecen.

No.	Estación	Latitud	Longitud	Ecorregión
1	Concordia	-31,18	-58,01	D25
2	Pilar	-31,67	-63,88	D26
3	Paraná	-31,78	-60,48	D25
4	El Trébol	-32,50	-61,67	D30
5	Marcos Juárez	-32,70	-62,15	D26
6	Rosario	-32,92	-60,78	D30
7	Gualectuaychú	-33,00	-58,62	D25
8	Río Cuarto	-33,07	-64,14	D26
9	Venado Tuerto	-33,67	-61,97	D28
10	Villa Reynolds	-33,73	-65,38	D26
11	Pergamino	-33,93	-60,55	D30
12	Laboulaye	-34,13	-63,37	D28
13	Junín	-34,55	-60,92	D27
14	General Pico	-35,70	-63,75	D36
15	Las Flores	-36,09	-59,10	D31
16	Bolívar	-36,20	-61,07	D27
17	Dolores	-36,30	-57,70	D31
18	Santa Rosa	-36,57	-64,27	D36
19	Azul	-36,75	-59,83	D33
20	Tandil	-37,23	-59,25	D33
21	Coronel Suárez	-37,43	-61,88	D34
22	Pigüé	-37,60	-62,38	D34
23	Benito Juárez	-37,70	-59,80	D34
24	Balcarce	-37,75	-58,30	D33

una asociación entre la NASA y la NOAA), que contribuirá a continuar la observación y el estudio de los sistemas naturales interconectados de la Tierra con registros de datos a largo plazo. Los datos que registran los instrumentos CERES se combinan con observaciones de múltiples fuentes de datos (como de los sensores MODIS, VIIRS y de satélites geoestacionarios) para generar una serie de productos de satélite de gran utilidad para la comunidad científica.

En este trabajo, se utilizaron los productos CERES-SYN1 y CERES-CldTypHist (<http://ceres.larc.nasa.gov/>). Estos productos de satélite proporcionan datos de radiación en condiciones de cielo despejado y nublado, otros tipos de información como lo son la temperatura radiativa de superficie, el espesor de la capa de ozono, el índice UV, las propiedades de las nubes e información meteorológica auxiliar utilizando mediciones simultáneas de otras fuentes (Carmona et al., 2017; Jiang et al., 2016; Smith et al., 2011). Poseen una

resolución espacial de 1 grado de latitud/longitud, y una resolución temporal promedio horaria, diaria y mensual.

2.3. Métodos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia con CERES

Para obtener la evapotranspiración del cultivo de referencia por medio de datos CERES se utilizaron los productos de radiación solar global ($R_{s\downarrow}$), radiación de onda larga proveniente de la atmósfera ($R_{l\downarrow}$), presión atmosférica (P_{atm}) y temperatura radiativa de superficie (T_{skin}), que integran el producto CERES-SYN1, como así también el producto CERES-CldTypHist de velocidad de viento a 10 m de altura, u_{10} (a partir del cual se derivó el valor de velocidad de viento a 2 m de altura).

Se evaluaron dos métodos, que se definen a partir de las siguientes dos ecuaciones:

$$ET_{0-PT\ CERES} = \alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (Rn_{ref} - G) f_c^{-1} \quad (1)$$

y

$$ET_{0-FAO\ PM\ CERES} = \frac{1}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \times \left[\Delta(Rn_{ref} - G) f_c^{-1} + \gamma \frac{900}{T_{skin} + 273} u_2 DPV \right] \quad (2)$$

donde $ET_{0-PT\ CERES}$ y $ET_{0-FAO\ PM\ CERES}$ son la evapotranspiración de referencia en $mm\ d^{-1}$, considerando la ecuación de Priestley y Taylor (1972) (PT) y el método FAO PM (Allen *et al.*, 1998), respectivamente, que se adaptan para su uso con datos de los productos de satélite. En la Ecuación (1) α es el parámetro de Priestley y Taylor (1972), mientras que en ambos modelos Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor saturado como función de la temperatura media del aire ($kPa^{\circ}C^{-1}$), Rn_{ref} la radiación neta en $W\ m^{-2}$, G el flujo de calor en el suelo ($W\ m^{-2}$), $f_c = 28,36$ un factor de conversión de unidades de $W\ m^{-2}$ a $mm\ d^{-1}$, γ la constante psicrométrica (kPa), T_{skin} ($^{\circ}C$) reemplaza a la temperatura del aire en la ecuación original de FAO PM, u_2 es la velocidad del viento a 2 m sobre la superficie ($m\ s^{-1}$), y en la Ecuación (2) el término $DPV = (e_s - e_a)$ es el déficit de presión de

vapor del aire (kPa), donde e_s representa la presión de vapor saturado y e_a la presión de vapor real. El término G puede ser un término importante a lo largo del día pero a escala diaria o mayor es despreciable (Sánchez *et al.*, 2008), por lo tanto en este trabajo se considera cero. Como es posible observar en las Ecuaciones (1) y (2), el modelo de FAO PM presenta un *término radiativo* y un *término aerodinámico* (primer y segundo término entre corchetes), mientras que en el modelo de PT el término aerodinámico se considera implícitamente como función del *término radiativo*, incorporando el parámetro α .

Para estimar la $ET_{0-PT\ CERES}$, Ecuación (1), se tuvieron en cuenta dos valores diferentes para el parámetro de Priestley y Taylor (1972); los cuales fueron $\alpha = 1,26$, según el trabajo original, y $\alpha = 1,41$, de acuerdo a un estudio previo que se llevó a cabo en una parcela experimental del campus universitario Tandil – RPA (Carmona *et al.*, 2013). En cuanto a la estimación de la $ET_{0-PM\ CERES}$, Ecuación (2), se implementó una regresión lineal para obtener el DPV (tal como se describe más adelante), dado que los productos CERES no cuentan con datos auxiliares de humedad relativa del aire, necesarios (junto con la temperatura del aire) para obtener la presión de vapor real del aire, e_a .

Para aplicar las Ecuaciones (1) y (2), en primer lugar se calculó la Δ por medio de:

$$\Delta = \frac{4098\ e_s}{(T_{skin} + 273,3)^2} \quad (3)$$

siendo

$$e_s = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27\ T_{skin}}{T_{skin} + 273,3} \right) \quad (4)$$

y donde se propone utilizar T_{skin} ($^{\circ}C$) en lugar de la temperatura del aire.

La constante psicrométrica se obtuvo utilizando la presión atmosférica, P_{atm} (kPa), por medio de:

$$\gamma = \frac{c_p\ P_{atm}}{0,622\ \lambda} \quad (5)$$

siendo

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \times 10^{-3})\ T_{skin} \quad (6)$$

donde C_p es el calor específico del aire ($1,013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), λ es el calor latente de vaporización (MJ kg^{-1} , donde T_{skin} ($^\circ\text{C}$) reemplaza a la temperatura del aire) y 0,622 es el cociente del peso molecular del vapor de agua y el aire seco.

La radiación neta del cultivo de referencia se obtuvo a partir de (Carmona et al., 2017):

$$Rn_{ref} = (1 - 0,23) R_{s\downarrow} + 0,98(R_{l\downarrow} - \sigma T_{skin}^4) \quad (7)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), Rn_{ref} , $R_{s\downarrow}$ y $R_{l\downarrow}$ se expresan en W m^{-2} y la T_{skin} en kelvin para esta ecuación.

Finalmente, para calcular el DPV , que se necesita para obtener el producto de $ET_{0-PM \text{ CERES}}$, se propone utilizar una ecuación lineal como función de la e_s , siguiendo los lineamientos de (Hashimoto et al., 2008). Para ello, utilizamos la base de datos CAVE (<https://www-cave.larc.nasa.gov/>), considerando un conjunto de datos de 2571 promedios mensuales correspondiente a 13 estaciones en áreas de cultivos y pastizales de Estados Unidos, que se detallan en la Tabla 2, se encontró la siguiente relación:

$$DPV = 0,3081 e_s - 0,0126 \quad (8)$$

donde el DPV (kPa) se obtuvo por medio de la temperatura y humedad relativa del aire, y el e_s (kPa) por medio de la T_{skin} del producto CERES (Ecuación (4)). En la Figura 2 se muestra la regresión lineal obtenida para el cálculo del DPV con datos CERES.

Tabla 2. Detalle de las estaciones utilizadas para el ajuste del DPV , Ecuación (8).

Estación	Entorno de ubicación	Latitud	Longitud
FPK	Rural - cultivos	48,31	-105,10
SXF	Rural - cultivos	43,73	-96,62
PSU	Rural - montañoso	40,72	-77,93
BON	Rural - cultivos	40,05	-88,37
E09	Grandes llanuras	37,13	-97,27
E11	Grandes llanuras	36,88	-98,28
E12	Grandes llanuras	36,84	-96,43
BEF	Grandes llanuras	36,61	-97,48
C01	Grandes llanuras	36,61	-97,48
E13	Grandes llanuras	36,61	-97,48
E15	Grandes llanuras	36,43	-98,28
E20	Grandes llanuras	35,56	-96,99
GCR	Rural - cultivos	34,25	-89,87

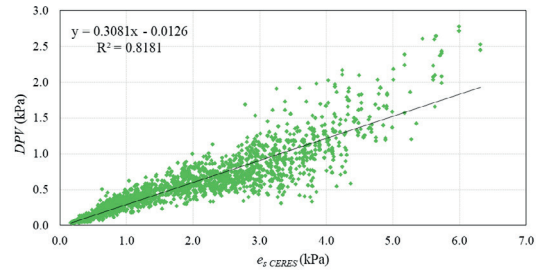


Figura 2. DPV (kPa) de terreno versus e_s (kPa) a partir de datos de T_{skin} CERES, considerando 13 estaciones de la base CAVE.

2.4. Datos de terreno

Los datos *in situ* diarios de la evapotranspiración de referencia, ET_{0-PM} , se obtuvieron por intermedio de la Oficina de Riesgo Agropecuario de Argentina (ORA), quienes utilizan información de las estaciones meteorológicas (que se detallan en la Tabla 1) y la ecuación de FAO Penman-Monteith (1990) para su cálculo.

2.5. Validación y análisis de errores

A partir de la Ecuaciones (1)-(8) se obtuvieron en la ubicación exacta de cada sitio de medida los valores promedio diario y mensual (como suma de los valores diarios) de la evapotranspiración del cultivo de referencia con datos de satélite, $ET_{0-PT \text{ CERES}}$ y $ET_{0-PM \text{ CERES}}$, y se los compararon con aquellos valores *in situ* obtenidos a partir de medidas de 24 estaciones, ET_{0-PM} . En total se obtuvieron 4656 pares de datos mensuales y 133 082 pares de datos diarios para las comparaciones entre datos de terreno y los productos de satélite de ET_0 que se generaron (periodo 2000-2016).

Para establecer una medida de error, se utilizaron los siguientes estadísticos básicos: la desviación de la raíz cuadrada media ($RMSE$), la desviación media o sesgo ($BIAS$), el error absoluto medio (MAE) y el coeficiente de determinación (r^2) con la pendiente (b) y ordenada al origen (a) de la regresión lineal. También se calculó la pendiente de la regresión lineal forzada a pasar por el origen de coordenadas, b^* , como medida de la sobre o subestimación de los métodos propuestos.

Para el tratamiento de los datos de satélite se utilizaron los programas Panoply 4.8.2

(<http://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>) y ENVI 5.3, donde a partir de este último se elaboraron mapas de ET_0 para la RPA.

3. Resultados y Discusión

De acuerdo con la metodología propuesta, en primer lugar se obtuvieron los valores de $ET_{0-PT\ CERES}$ y $ET_{0-PM\ CERES}$ y se compararon con aquellos valores de ET_0 de terreno, promedio diario y mensual, para 24 sitios de la RPA. En la Tabla 3 se presenta el resumen de los estadísticos básicos de la evaluación de los métodos propuestos.

En general, se obtuvieron muy buenos resultados en relación a las comparaciones entre los valores de ET_0 estimados con CERES y aquellos obtenidos en terreno, tanto a escala diaria como mensual. A escala diaria, el método derivado del modelo de Priestley y Taylor (1972), Ecuación (1), presenta un RMSE de $\pm 1,1\text{ mm d}^{-1}$, un MAE de $0,8\text{ mm d}^{-1}$ y un coeficiente de determinación de 0,769 tanto utilizando el valor del parámetro α de 1,26 como así también el de 1,41. Una ligera diferencia se distingue a favor del uso de $\alpha=1,41$ al observar que se obtiene una menor desviación, MBE de $-0,1$ frente a $-0,4\text{ mm d}^{-1}$, con una pendiente forzada al origen casi sobre la recta 1:1 ($b^*=0,99$) frente a una subestimación del orden del 10% utilizando $\alpha=1,26$ de acuerdo al trabajo original. No obstante, nosotros observamos que si bien en general se obtienen buenos resultados considerando un único valor del parámetro α durante todo el año, es importante hacer notar que varía durante el año para un lugar determinado, y además varía de acuerdo a la región de estudio, tomando mayores valores en regiones áridas y menores en regiones húmedas (Carmona *et al.*, 2013).

Por otro lado, al utilizar el método derivado del modelo de FAO PM con CERES, Ecuación (2), se presentan mejores resultados en general, con un RMSE de apenas $\pm 0,8\text{ mm d}^{-1}$, un MAE de $0,6\text{ mm d}^{-1}$, una mejor concordancia entre los datos derivados de CERES y terreno ($r^2=0,783$) y sin desviación (MBE=0). Este mejor funcionamiento se debe al uso del producto CERES de velocidad de viento y, también, del método propuesto para estimar el DPV , Ecuación (8), lo cual permite modelar adecuadamente el *término aerodinámico* de la ecuación de FAO PM y no simplemente como función del *término radiativo*, lo cual en cierta forma propone Priestley y Taylor (1972) incorporando el parámetro α .

Además de los estadísticos de las comparaciones a escala diaria, en la Tabla 3 se presentan los resultados de las comparaciones mensuales de la ET_0 , donde en este caso se considera el número de días de cada mes para mostrar los valores de evapotranspiración de referencia en unidades de mm mes^{-1} (valores acumulados mensuales de ET_0). Como era de esperarse, se observan resultados similares a los obtenidos a escala diaria, pero con una mejor concordancia entre los valores de ET_0 modelados con CERES y los obtenidos en terreno, con coeficientes de determinación por encima de 0,9, valores de RMSE de entre ± 14 y $\pm 19\text{ mm mes}^{-1}$, MAE de entre 11 y 16 mm mes^{-1} , y MBE de entre 1 y -14 mm mes^{-1} , obteniéndose mejores resultados en general con el modelo FAO PM CERES, seguido del modelo de PT CERES con $\alpha=1,41$ y por último considerando $\alpha=1,26$ (igual orden que a escala diaria).

En la Figura 3 se presentan las comparaciones (producto de satélite versus terreno) de los valores

Tabla 3. Estadísticos de las comparaciones de la ET_0 entre los valores de terreno y los generados con los productos de satélite CERES. N corresponde al número de pares de datos.

Modelo (parámetro α)	MBE	MAE	RMSE	a	b	r^2	b^*
N=133082 (ET_0 diario)							
	(mm d ⁻¹)	(mm d ⁻¹)	(mm d ⁻¹)	(mm d ⁻¹)			
PT CERES ($\alpha=1,26$)	-0,4	0,8	$\pm 1,1$	-0,4	0,99	0,769	0,89
PT CERES ($\alpha=1,41$)	-0,1	0,8	$\pm 1,1$	-0,5	1,10	0,769	0,99
FAO PM CERES	0,0	0,6	$\pm 0,8$	0,7	0,77	0,783	0,95
N=4656 (ET_0 mensual)							
	(mm mes ⁻¹)	(mm mes ⁻¹)	(mm mes ⁻¹)	(mm mes ⁻¹)			
PT CERES ($\alpha=1,26$)	-14	16	± 19	-19	1,06	0,936	0,90
PT CERES ($\alpha=1,41$)	-4	15	± 18	-22	1,19	0,936	1,00
FAO PM CERES	1	11	± 14	14	0,84	0,916	0,97

acumulados mensuales de la ET_0 , identificando en cada caso los diferentes pares de datos correspondientes a cada una de las 9 ecorregiones de la RPA (de un total de 12) que se toman en cuenta de acuerdo a la ubicación de los 24 sitios de validación.

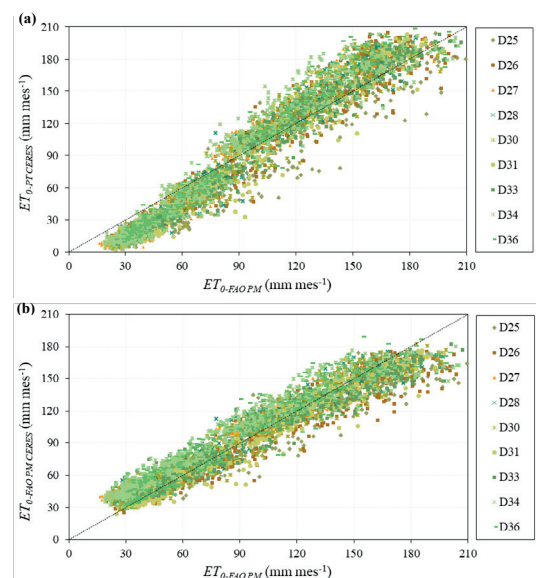


Figura 3. ET_0 mensual con satélite vs. obtenidos con datos de estaciones de terreno, $ET_{0-FAO PM}$ (a) $ET_{0-PT CERES}$ (con $\alpha=1,41$) vs. $ET_{0-FAO PM}$ y (b) $ET_{0-PM CERES}$ vs. $ET_{0-FAO PM}$. La línea discontinua indica la recta 1:1 en cada gráfica.

En la Figura 3-a se observa que el método PT CERES propuesto presenta buenos resultados en general, sin embargo subestima la ET_0 para valores inferiores a 90 mm mes^{-1} . Esto se debe a que se refieren a datos con baja radiación solar, correspondientes a meses de invierno, donde el parámetro α no llega a compensar el término aerodinámico del proceso de evapotranspiración que se considera como una proporción del término radiativo en el modelo de PT. En la Figura 3-b se presenta la comparación del método FAO PM CERES con los valores de ET_0 obtenidos en terreno, donde se puede observar que se corrige la subestimación para valores bajos que se observan con el método de PT CERES, gracias a la incorporación del DPV y la velocidad del viento que permiten modelar adecuadamente el término aerodinámico.

En cuanto a un análisis de las diferentes ecorregiones de la RPA en particular, no se observaron diferencias significativas en los resultados estadísticos de cada una de ellas, en general se observan resultados similares en las diferentes ecorregiones con r^2 por encima de 0,85 en todos los casos (a escala mensual) y errores por debajo del 20%. En este sentido, en la Figura 4 se presentan los estadísticos MBE , MAE y $RMSE$ para los modelos propuestos en cada ecorregión (considerando aquellas ecorregiones en las cuales hay estaciones de medida). En general se observan resultados similares en las diferentes ecorregiones, aunque en particular se distinguen mayores errores en el sudoeste de la RPA (D36), y menores errores

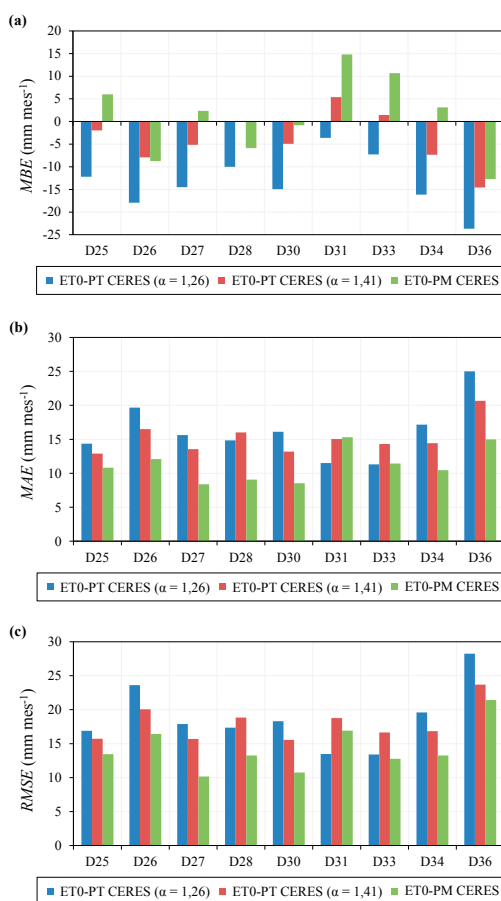


Figura 4. Estadísticos básicos (para las diferentes ecorregiones) de las comparaciones entre la ET_0 promedio mensual de terreno y los valores generados con datos CERES. (a) MBE (mm mes^{-1}), (b) MAE (mm mes^{-1}), y (c) $RMSE$ (mm mes^{-1}).

el en noreste (D25). Salvo algunas excepciones, desde el punto de vista estadístico, el modelo FAO PM CERES muestra un mejor funcionamiento respecto al modelo de PT CERES en casi todas las ecorregiones.

Por otro lado, como se muestra en la Figura 5, a partir de la Ecuación (2) (modelo FAO PM) se obtuvieron mapas promedio mensuales de la evapotranspiración de referencia para la RPA, periodo 2001-2015. En estos mapas se observa tanto la variación espacial como temporal de la ET_0 .

Los mapas mensuales que se elaboraron muestran valores de ET_0 de entre 140 y 170 mm mes^{-1} para la RPA en meses de enero y diciembre (verano en el hemisferio sur), con un valor promedio de 160 mm mes^{-1} , y valores mínimos en los meses de junio y julio (invierno) de entre 30 y 60 mm mes^{-1} con un promedio de 40 mm/mes para toda la RPA.

En cuanto a los valores de ET_0 para los meses individuales de cada año, periodo 2001-2015, se observan desviaciones del orden de 5-10%, indicando que los mapas promedio mensual son próximos a los que pueden elaborarse para cada mes en particular en la RPA de cualquier año en particular.

En cuanto a los valores de ET_0 anuales, tanto los datos de terreno como aquellos generados de satélite, se observaron valores máximos en el norte y el oeste de la RPA (aprox. 1200 mm $año^{-1}$), valores intermedios en el región central (aprox. 1100 mm $año^{-1}$), y mínimos en la región sureste (aprox. 950 mm $año^{-1}$). Las variaciones no tan pronunciadas entre las diferentes zonas de la RPA se deben a que en este trabajo se estima la evapotranspiración en condiciones de óptima humedad y para una superficie de referencia. Sin embargo, es

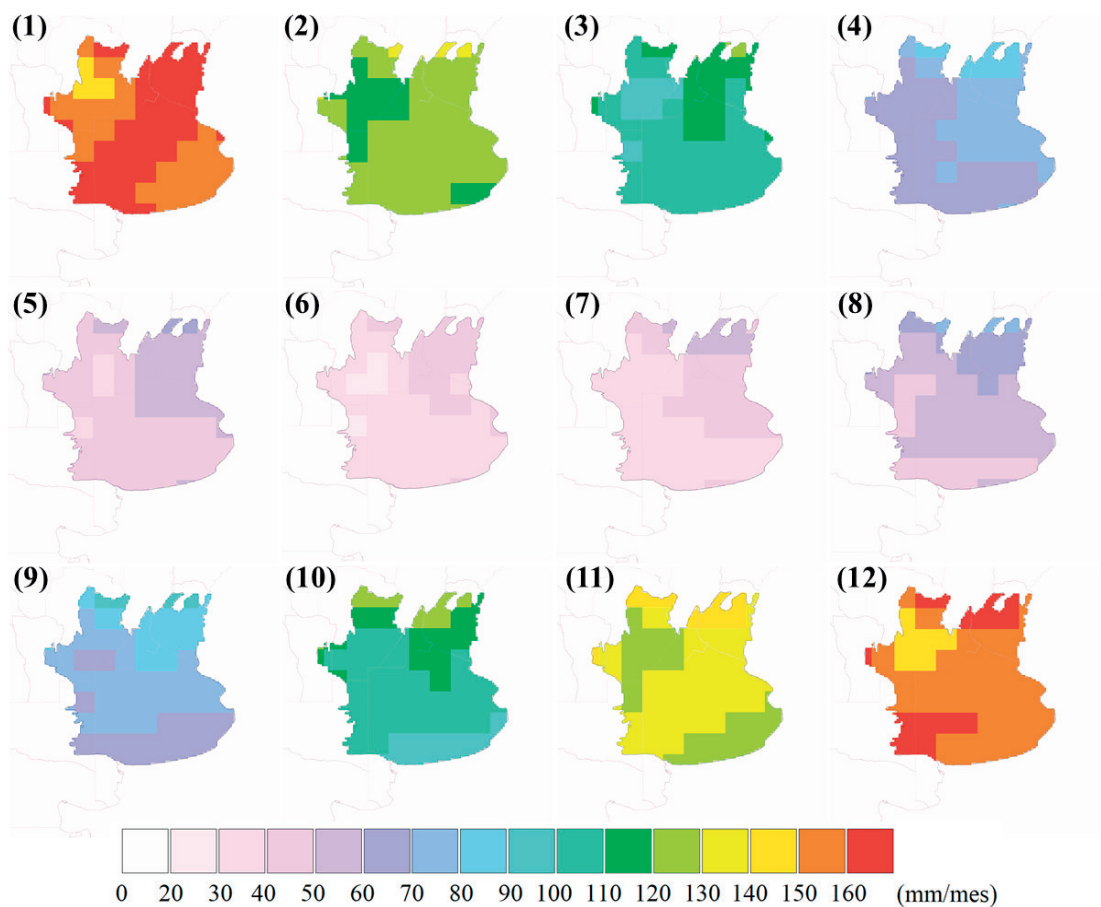


Figura 5. Mapas promedio mensual (2001 -2015) de la ET_0 (FAO PM CERES) para los meses de (1) enero, (2) febrero, (3) marzo, (4) abril, (5) mayo, (6) junio, (7) julio, (8) agosto, (9) septiembre, (10) octubre, (11) noviembre y (12) diciembre.

importante remarcar que para un próximo estudio se espera obtener un nuevo modelo que represente la ET en condiciones reales de humedad de suelo y considerando las diferentes coberturas, donde la metodología aquí descrita se utilizará como base del modelo.

4. Conclusiones

En este trabajo se adaptaron los modelos de Priestley y Taylor (1972) (PT) y FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) para obtener la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_0 , utilizando únicamente datos de los productos de satélite CERES-SYN1 y CERES-CldTypHist. Los métodos propuestos se validaron utilizando 16 años de datos de 24 estaciones agro meteorológicas distribuidas en la Región Pampeana de Argentina. En general, los resultados mostraron buena concordancia entre los valores generados de la evapotranspiración de referencia con los métodos propuestos y aquellos obtenidos *in situ*, con errores de entre $\pm 0,8$ y $\pm 1,1$ mm d⁻¹ y r^2 superiores a 0,75, mientras que mejores resultados se observan a escala mensual, con r^2 superiores a 0,9 y errores de entre ± 14 y ± 19 mm mes⁻¹ (lo que representa 0,5-0,6 en unidades de mm d⁻¹). A partir del método FAO PM se elaboraron los mapas promedio mensual (2001-2015) para la Región Pampeana de Argentina, representando la variación espacio-temporal de la evapotranspiración de referencia. Los datos CERES demostraron ser aptos para obtener la pérdida de agua en el suelo, sin necesidad de contar con datos de terreno, y la metodología descrita servirá como base para en un próximo estudio, mediante la incorporación de datos de otras misiones de satélite, representar la pérdida real de agua en superficie con una mejor resolución espacial.

Agradecimientos

El trabajo se realizó gracias a fondos otorgados por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina, PICT 2016-1486 - *Estudio de la evapotranspiración en la llanura pampeana argentina a partir de datos de satélite* (EVAPAMPAS), y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Los autores además desean agradecer a la Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires, la

Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, a la Oficina de Riesgo Agropecuario de Argentina, y al *Atmospheric Science Data Center* de la *NASA Langley Research Center* por proveer los datos CERES. Además, se agradece a los revisores anónimos que contribuyeron para mejorar el documento.

Referencias

- Aliaga, V.S., Ferrelli, F., Piccolo, M.C. 2017. Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International Journal of Climatology*, 37, 1237-1247. <https://doi.org/10.1002/joc.5079>
- Allen R.G., Tasumi M., Trezza R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - model. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, 133, 380-394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56: Crop Evapotranspiration. (F.W. Resources, Ed.), Irrigation and Drainage. Fao. Retrieved from <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>
- Anderson M.C., Norman J.M., Diak G.R., Kustas W.P., Mecikalski J.R. 1997. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. *Remote Sens Environ*, 60, 195-216. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00215-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00215-5)
- ASCE - EWRI. 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Comm. Report, January, 2005. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/asceewri/ascestdetmain2005.pdf>.
- Bastiaanssen W.G.M., Menenti M., Feddes R.A., Holtslag A.A.M. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *J. Hydrol*, 212-213, 198-212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Carmona, F., Rivas, R., Ocampo, D., Schirmbeck, J., Holzman, M. 2011. Sensores para la medición y validación de variables hidrológicas a escalas local y regional a partir del balance de energía. *Aqua-LAC, Revista del programa hidrológico internacional para América Latina y el Caribe*, 3, 26-36.
- Carmona, F., Rivas, R., Caselles, V. 2013. Estimate of the alpha parameter in an oat crop under rain-fed conditions. *Hydrological Processes*, 27(19), 2834-2839. <https://doi.org/10.1002/hyp.9415>

- Carmona, F., Rivas, R., Kruse, E. 2017. Estimating daily net radiation in the FAO Penman-Monteith method. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(1-2), 89-95. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1761-6>
- Carmona, F., Orte, P.F., Rivas, R., Wolfram, E., Kruse, E. 2017. Development and Analysis of a New Solar Radiation Atlas for Argentina from Ground-Based Measurements and CERES_SYN1deg data. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. (In press). <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.11.003>
- Degano, M.F. 2017. *Evaluación del producto de evapotranspiración global MOD16 con medidas in situ en la región de la Pampa Húmeda, Argentina*. Tesis de Maestría. Repositorio Digital-CIC. Facultad de Física, Universidad de Valencia. Disponible en <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/7085>
- Degano F., Rivas R., Sánchez Tomás J.M., Carmona F., Niclós R. 2018. Assessment of the Potential Evapotranspiration MODIS Product Using Ground Measurements in the Pampas. *Proceedings of the 2018 IEEE ARGENCON conference*.
- Fisher J.B., Tu K.P., Baldocchi D.D. 2008. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUX- NET sites. *Remote Sens. Environ.*, 112, 901-919. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.025>
- Hashimoto, H., Dungan, J.L., White, M.A., Yang, F., Michaelis, A.R., Running, S.W., Nemani, R.R. 2008. Satellite-based estimation of surface vapor pressure deficits using MODIS land surface temperature data. *Remote Sensing of Environment*, 112(1), 142-155. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.016>
- Jensen, M., Burman, R., Allen, R. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. *Am Soc Civ Eng (ASCE) Manual* 70, 332.
- Jiang L., Islam S. 2001. Estimation of surface evaporation map over southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resour. Res.*, 37, 329-340. <https://doi.org/10.1029/2000WR900255>
- Jiang, B., Liang, S., Ma, H., Zhang, X., Xiao, Z., Zhao, X., Jia, K., Yao, Y., Jia, A. 2016. GLASS daytime all-wave net radiation product: Algorithm development and preliminary validation. *Remote Sensing*, 8(3), 222. <https://doi.org/10.3390/rs8030222>
- Kitoh, A., Kusunoki, S., Nakaegawa, T. 2011. Climate change projections over South America in the late 21st century with the 20 and 60 km mesh Meteorological Research Institute atmospheric general circulation model (MRI-AGCM). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116(6), 1-21. <https://doi.org/10.1029/2010JD014920>
- Long D., Longuevergne L., Scanlon B.R. 2014. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. *Water Resour. Res.*, 50, 1131-1151. <https://doi.org/10.1002/2013WR014581>
- Martínez, G., Gutiérrez, M.A., Messineo, P.G., Kaufmann, C.A., Rafuse, D.J. 2016. Subsistence strategies in Argentina during the late Pleistocene and early Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 144, 51-65. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.05.014>
- Miralles D.G., Holmes T.R.H., De Jeu R.A.M., Gash J.H., Meesters A.G.C.A., Dolman A.J. 2011. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol. Earth Syst Sci.*, 15, 453-469. <https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>
- Mu Q., Heinsch F.A., Zhao M., Running S.W. 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote. Sens. Environ.*, 111, 519-536. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.015>
- Mu Q.Z., Zhao M.S., Running S.W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens Environ*, 115, 1781-1800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>
- Nishida K., Nemani R.R., Glassy JM, Running S.W. 2003. Development of an evapotranspiration index from aqua/MODIS for monitoring surface moisture status. *IEEE Trans Geosci. Remote Sens.*, 41, 493-501. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.811744>
- Ocampo, D., Rivas, R. 2013. Estimación de la radiación neta diaria a partir de Modelos de Regresión Lineal Múltiple. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2), 263-271. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.04.031>
- Penman, H.L. 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 193(1032), 120-145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Pereyra, F. 2003. Ecorregiones de la Argentina. SEGEMAR. ISSN 0328-2325.
- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2)
- Rivas, R.E., Carmona, F. 2013. Evapotranspiration in the Pampean Region using field measurements and satellite data. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 55-57, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.002>

- Rivas, R., Caselles, V. 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 93, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.021>
- Sánchez, J.M., Scavone, G., Caselles, V., Valor, E., Copertino, V.A., Telesca, V. 2008. Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM+ data: Application to the Basilicata region. *Journal of Hydrology*, 351(1-2), 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.041>
- Scian, B., Labraga, J.C., Reimers, W., Frumento, O. 2006. Characteristics of large-scale atmospheric circulation related to extreme monthly rainfall anomalies in the Pampa region, Argentina, under non-ENSO conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 85(1-2), 89-106. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0182-8>
- Smith, G.L., Priestley, K.J., Loeb, N.G., Wielicki, B.A., Charlock, T.P., Minnis, P., Doelling, D.R., Rutan, D.A. 2011. Clouds and Earth Radiant Energy System (CERES), a review: Past, present and future. *Advances in Space Research*, 48(2), 254-263. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.03.009>
- Soegaard, H., Boegh, E. 1995. Estimation of evapotranspiration from a millet crop in the Sahel combining sap flow, leaf area index and eddy correlation technique. *Journal of Hydrology*, 166(3-4), 265-282. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)05094-E](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)05094-E)
- Tang Q.H., Peterson S., Cuenca R.H., Hagimoto Y., Lettenmaier D.P. 2009. Satellite-based near-real-time estimation of irrigated crop water consumption. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 114, D05114. <https://doi.org/10.1029/2008JD010854>
- Wan Z., Zhang K., Xue X.W., Hong Z., Hong Y., Gourley J.J. 2015. Water balance based actual evapotranspiration reconstruction from ground and satellite observations over the Conterminous United States. *Water Resour. Res.*, 51, 6485-6499. <https://doi.org/10.1002/2015WR017311>
- Wang K.C., Wang P., Li Z.Q., Cribb M., Sparrow M. 2007. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 112, D15107. <https://doi.org/10.1029/2006JD008351>
- Zeng Z.Z., Piao S.L., Lin X., Yin G.D., Peng S.S., Ciais P., Myneni R.B. 2012. Global evapotranspiration over the past three decades: estimation based on the water balance equation combined with empirical models. *Environ. Res. Lett.*, 7, 014026. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014026>
- Zhang K., Kimball J.S., Mu Q., Jones L.A., Goetz S.J., Running S.W. 2009. Satellite based analysis of northern ET trends and associated changes in the regional water balance from 1983 to 2005. *J. Hydrol.*, 379, 92-110. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.047>
- Zhang, K., Kimball, J.S., Running, S.W. 2016. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *WIREs Water*, 3, 834-853. <https://doi.org/10.1002/wat2.1168>