

# COMPARACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN OBTENIDA POR EL MÉTODO DE *EDDY COVARIANCE* Y MÉTODOS SEMIEMPÍRICOS EN UNA ZONA SEMIÁRIDA

---

Comparison of the Evapotranspiration Estimated by the Eddy Covariance  
Method and Semiempirical Methods in a Semiarid Zone

Elvia Olivia Pérez Hernández<sup>1\*</sup>, Enrique González Sosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia  
\*elvia.ph@hotmail.com

## RESUMEN

Esta investigación estudia la evapotranspiración real (ET), medida con una estación *Eddy Covariance* (EC), la cual obtiene datos que son necesarios, para el cálculo de la evapotranspiración por medio de metodologías micrometeorológicas. Este tipo de estaciones se caracterizan por que la inversión en ellas es alta y la colocación debe hacerse en un lugar seguro para que lleve a cabo registros continuos cada 30 minutos en el periodo de interés. La evapotranspiración observada con EC es comparada con los métodos que estiman la ET por medio de una correlación. Los métodos a su vez se dividen en dos tipos por la forma en que calculan la ET: ya sea potencial ( $ET_p$ ) o de referencia ( $ET_0$ ). Los métodos semiempíricos utilizados en el estudio para calcular la  $ET_p$  diariamente fueron Makkink, Hargreaves, Hamon; mientras que el cálculo mensual se hizo a través del método de Turc. Para la evapotranspiración de referencia  $ET_0$  se empleó el método de la FAO-56 Penman-Monteith para cálculos diarios; adicionalmente, fue comparada la ET mensual que generan los productos de MODIS mediante percepción remota. Las correlaciones 1:1 entre EC y los métodos semiempíricos en general mostraron una correlación  $R^2$  de 0.6, sin embargo, se pone en evidencia que los métodos teóricos subestiman la evapotranspiración y que su respuesta no es pertinente para zonas semiáridas, incluso si modulan los datos para condiciones secas (estiaje) y húmedas (estación de lluvias), debido a que la respuesta de los sistemas semiáridos es muy sensible a la disponibilidad del agua para su desarrollo y equilibrio.

**Palabras clave:** Evapotranspiration, *Eddy Covariance*, FAO 56 Penman-Monteith, Hargreaves, Hamon, Sensores remotos.

## ABSTRACT

This research studies the actual evaporation, measured with an Eddy Covariance sta-

tion (EC), which, through micrometeorological methodologies obtains data that is necessary but difficult to measure for the calculation of evapotranspiration (ET). These types of stations are characterized by the fact that the investment in them is high and the placement must be planned carefully to carry out their activities. The real data of evapotranspiration from EC will be compared with other methods that estimate ET by correlation. The methods in turn are divided in two types by the way they calculate either potential ET ( $ET_p$ ) or reference ET ( $ET_0$ ). The theoretical-semi-empirical methods that handled ETP daily were Makkink, Hargreaves, Hamon, and the Turc method was used for monthly calculations. The FAO-56 Penman-Monteith method was used for daily calculations of the  $ET_0$ ; this work also includes the monthly ET downloaded from MODIS which is part of estimates through remote perception. The 1:1 correlation between EC and the semiempirical methods usually show a correlation  $R^2 = 0.6$ , however, it is shown that the theoretical and semiempirical methods underestimate the evapotranspiration and that their answer is not adequate for the semiarid zone, even when modulated for dry (runoff) and wet (flood) conditions for the data base, since the answer of the semiarid systems is very sensible to the availability of water for their essential development and balance.

**Keywords:** Evapotranspiration, Eddy Covariance, FAO 56 Penman-Monteith, Hargreaves, Hamon, remoting sensors.

## INTRODUCCIÓN

A pesar de todas las alternativas que actualmente se manejan para distribuir agua, en muchos rincones del planeta no hay disponibilidad para satisfacer la demanda de la población, por lo cual ésta se vuelve un elemento significativo y vital para el ser humano y, a su vez, condiciona sus actividades agropecuarias, forestales y pesqueras. Conocer cuánta lluvia se ha presentado, cuánta



agua se tiene disponible y las condiciones de evaporación es básico para hacer una planeación de la actividad productiva agroalimentaria [1].

Para una mejor gestión de los recursos hídricos y manejo de riesgos potenciales causados por los fenómenos hidrometeorológicos extremos, es necesario evaluar y analizar todos los componentes del balance hídrico. Uno de los principales retos es la cuantificación de la evaporación total, cuya mayor parte la integran la evaporación del suelo y la transpiración, denominada evapotranspiración (ET) [2].

En climas semiáridos, las pérdidas de agua por evaporación pueden ser elevadas, lo que reduce su disponibilidad, el nivel de eficiencia de los sistemas de riego y el uso eficiente por parte de la vegetación —a pesar de que se ha alcanzado mejorar la eficiencia mediante técnicas como la presurización de los sistemas tradicionales de transporte y distribución—, por lo que pueden tener un impacto significativo en el desarrollo y economía de una región o país [3].

La estimación de la evaporación a partir de superficies de agua libre y suelo, así como de la evapotranspiración a partir de superficies cubiertas por vegetación, y la relevancia de su medición, ejercen un papel de gran importancia en la modelación hidrológica, en los estudios hidrometeorológicos de sistemas agrícolas y en lo que respecta al diseño y a la explotación de los embalses y de las redes de riego y drenaje [4].

El problema radica en que tanto los ecosistemas semiáridos como el desarrollo y producción de cultivo se ven afectados por el estrés hídrico, el cual tiene una relación lineal entre la producción y la evapotranspiración del cultivo.

La evapotranspiración representa entre 7 % y 80 % de la precipitación en varios ecosistemas áridos y semiáridos de la región de Norte América [5].

En México son mayormente para usos agrícolas y abastecimiento público, y forman el 90.9 % del uso consultivo nacional, según cifras publicadas en el Atlas del Agua en México de 2015 [6]. La publicación de Estadísticas del Agua en México (EAM) 2016, menciona que anualmente 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua provienen de la precipitación y se estima que el 72.5 % se evapotranspira y regresa a la atmósfera [7].

Encontrar la forma de emplear los métodos empíricos y semiempíricos que no fueron diseñados para ambientes semiáridos es de gran relevancia en el establecimiento de los volúmenes disponibles para satisfacer la demanda de los usos del agua en nuestro país, ya que su superficie representa el 60 % del territorio nacional.

Este trabajo no sólo pretende obtener la bondad de los métodos que calculan la evapotranspiración potencial y de referencia respecto a la ET real observada en una torre de *Eddy Covariance*, sino también tener otras opciones que permitan monitorear la evapotranspiración en regiones semiáridas del país.

## **MONITOREO DE LA EVAPORACIÓN CON EL SISTEMA EDDY COVARIANCE (EC)**

Aunque existen diversos métodos, como los directos e indirectos para estimar la evapotranspiración, suele recurrirse a los métodos indirectos porque son ampliamente utilizados: isotopía, *Eddy Covariance*, Bowen y sapflow, entre otros.

Entre los métodos semiempíricos podemos destacar los métodos de Thornthwaite [9], Makkink [10], Priestley-Taylor [11], y la fórmula establecida por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA), más conocida como FAO-56 Penman-Monteith [2], [12].



**Figura 1.** Estación Bernal y sus sensores.

Dentro de los métodos indirectos destacan los denominados de gradiente y turbulencia, éstos se sustentan en la medición de las tres componentes de la velocidad del viento,

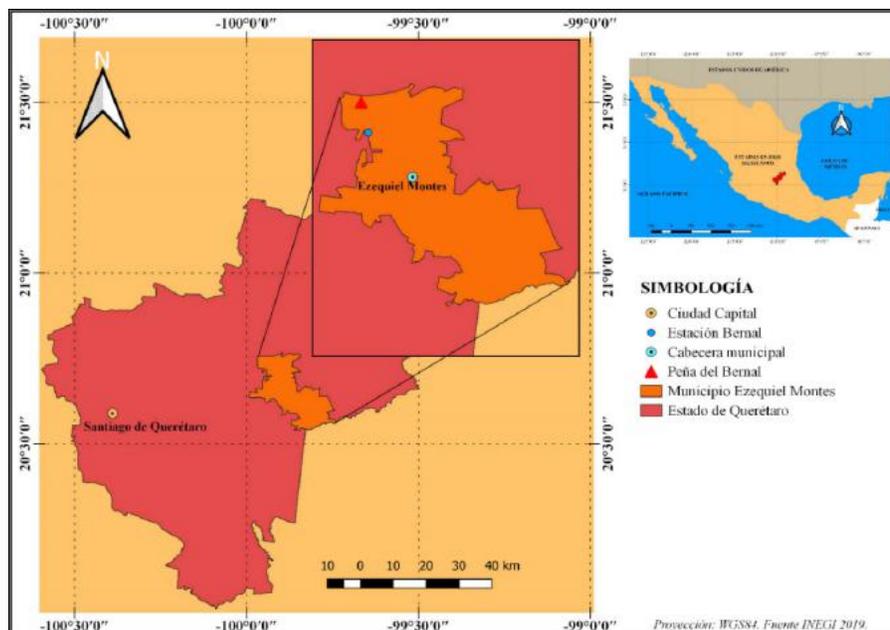
temperatura del aire, estimación del flujo de calor latente (LE) y el flujo de calor sensible (H). En su caso, como el residuo del balance de energía de superficie, método de las covarianzas o *Eddy Covariance* (en Inglés).

Por el contrario, el método directo del lisímetro, a pesar que suele ser costoso, es un método que requiere de una buena instrumentación para estimar la evaporación sobre el principio de balance de masa [3].

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de estudio

El sitio experimental se encuentra dentro del municipio de Ezequiel Montes en el estado de Querétaro, denominado como la estación Bernal. Se encuentra entre las coordenadas: LAT: 20.7168617, LONG: -99.941391, con una elevación de 2,053 msnm. El paisaje de la zona es típicamente volcánico (Fig. 1), presenta contrastes geomorfológicos asociados con la variada composición de las rocas. Las más antiguas, de composición riolítica y andesítica, constituyen las montañas escarpadas y mesetas.



**Figura 2.** Mapa de localización de la Estación Bernal.



El tipo de clima es semiárido, por lo cual es de importancia el monitoreo de la evaporación, ya que se llevan a cabo actividades primarias ganadería y agricultura, actividad que más demanda agua en el país [1]. La Fig. 2 muestra la ubicación de la estación Bernal y, como se puede observar, se encuentra en el centro del estado de Querétaro.

### Eddy Covariance

*Eddy Covariance* (EC) es un método de medición que usa aparatos con funciones micrometeorológicas, para obtener la evaporación. El método de EC arroja mediciones de emisiones de gas de agua (vapor) y CO<sub>2</sub>, la cual permite establecer el balance de energía de superficie ya que también permite estimar los flujos de calor sensible (H) y el calor latente (LE), integrados a partir de áreas representativas de varios tamaños [13].

En general, el principio de las mediciones de EC se establece a partir de las covarianzas entre la concentración de partículas de interés dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O) y las tres componentes de velocidad del viento (Ecs. 2 y 3). En otras palabras, este método trabaja con las mediciones de turbulencias verticales que transportan los gases en la superficie.

Los registros de gases y energía son cada 30 minutos, los cuales son el promedio de las mediciones tomadas a los flujos de gases a una frecuencia de 10 Hz. Por esto los datos de esta estación son tomados directamente del ambiente como reales.

Estos datos reales de ET caracterizan la zona y permiten un entendimiento cuando se observan las diferencias con los métodos empíricos que también para calcular la evaporación.

Como se menciona EC permite estimar los flujos de dióxido de carbono y de vapor en combinación con la ecuación de balance energético Ec. (1) [14].

$$Rn + H + LE + G \approx 0 \quad (1)$$

donde  $Rn$  representa a la radiación neta,  $H$  es el flujo de calor sensible,  $LE$  es el flujo de calor latente y  $G$  es flujo de calor acumulado en el suelo, todo en  $Wm^{-2}$ .

El calor sensible, que es el calor del aire que se encuentra en la superficie de la Tierra, puede ser determinado con la Ec. (2), donde  $\rho$  es la densidad del aire  $kgm^{-3}$ ,  $C_p$  es el calor específico del aire seco en  $MJkg^{-1}K^{-1}$ , la multiplicación de la covarianza de  $w'$  que es la desviación instantánea de la velocidad vertical del viento y la covarianza de  $T'$  la temperatura en grados Kelvin.

$$H = \bar{\rho} C_p \overline{w'T'} \quad (2)$$

El flujo de calor latente LE Ec. (3), considerado como la energía disponible para generar evapotranspiración y la fotosíntesis,

$$LE = \lambda E = \lambda(1 + \mu \cdot \sigma) \cdot \left( \overline{w'\rho'_v} + \bar{\rho}_v \frac{\overline{w'T'}}{\bar{T}} \right) \quad (3)$$

donde  $\lambda$  es el calor latente de vaporización del agua  $Jkg^{-1}$ .

El flujo de calor en el suelo  $G$  Ec (4), es el que se almacena y desprende del suelo, calculado con:

$$G = c_z d_s \left( \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta t} \right) \quad (4)$$

Donde  $c_z$  es el calor específico en  $MJm^{-3} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ;  $d_s$  profundidad del suelo efectivo en metros;  $T_n$  temperatura en el día y  $T_{n-1}$  temperatura del día precedente en  $^\circ C$  [13].

La base de datos en este estudio consta de 24736 registros, los cuales fueron preprocesados, para identificar datos anómalos y nulos, que queden fuera de los rangos en comparación con otros sitios similares y de orden de magnitud. Después de esta depuración se obtuvo un total de 20 894 registros, que corresponden al periodo del 18 de mayo del 2017 al 25 de diciembre del 2018. La serie de datos contiene espacios en blanco: en el

año 2017 faltan los meses de agosto y septiembre, en el año 2018 hay una ausencia de datos del mes de marzo, y también los meses de junio, julio, noviembre y diciembre, esto debido a que no había registros de ET.

Para un buen manejo de ET, se asumió que todos los datos nocturnos de flujo de calor latente (LE) tuvieran el valor de  $0 \text{ Wm}^{-2}$  y se dejaron sólo los valores de los datos diurnos en un filtro donde se presentara una radiación neta mínima de  $10 \text{ Wm}^{-2}$ .

En total, los datos diurnos evaluados para este estudio fueron 7118, de mediciones cada 30 minutos, estos datos primero se sometieron a una correlación de las variables del balance energético, el cual se presentará en la sección de resultados, esto para comprobar que los datos presentados tienen una buena calidad en sus mediciones, reflejo de una adecuada calibración en los equipos.

Otro caso con la base de datos final de ET, fue que para realizar el cierre de balance energético (CEB) se filtraron los datos solo con calidad 0 y 1, según arrojó la base de datos procesada de EC, pero al hacer esto se perdían cerca de dos mil datos, por lo cual en una nueva base de datos se rellenaron primero estos huecos con NaN y posteriormente se rellenaron con una interpolación lineal.

Con esta base de datos rellenada fue que se trabajó las correlaciones con los métodos que se mencionarán a continuación.

## Métodos de evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial ( $ET_p$ ) es la ET máxima que se produce si la humedad de un suelo y su cobertura vegetal se encuentran en condiciones óptimas, es decir, totalmente cubierto de vegetación y con suministro ilimitado de agua [9].

A continuación, se presenta el primer método de  $ET_p$ , que es Makkink Ec. (5), el cual se basa en la radiación solar y fue desarrollada para climas húmedos.

$$ET_p = \alpha \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left( \frac{R_s}{2.45} \right) - 0.012 \quad (5)$$

donde  $ET_p$  es la evapotranspiración potencial en  $\text{mm día}^{-1}$ ,  $R_s$  es la radiación solar total diaria en  $\text{MJm}^2\text{día}^{-1}$ ,  $\gamma$  es la constante psicrométrica,  $\Delta$  la pendiente de la curva de vapor, ambas en  $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\alpha$  es 0.61 y  $\beta$  es 0.012.

El siguiente método fue el de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) Ec. (6), que toma en cuenta la temperatura [15].

$$ET_p = 0.408 \cdot 0.0023(T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} \cdot R_a \quad (6)$$

siendo  $T_{max}$  la temperatura máxima a dos metros de altura,  $T_{min}$  es la temperatura mínima a dos metros de altura en  $^\circ\text{C}$ ,  $R_a$  es la radiación extraterrestre en  $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ .

También, fue incluida la ecuación de Hamon Ec. (7), que incluye el coeficiente de corrección KPEC, el cual se establece para todos los sitios. La presión de vapor a saturación es hPa y N Ec. (8) el número de horas en el día en múltiplos de 12 horas, y  $ws$  es el ángulo de la hora de puesta de sol en radianes [16].

$$ET_p = KPEC \cdot 0.165 \cdot 216.7 \cdot N \cdot \left( \frac{e_s}{T+273} \right) \quad (7)$$

$$N = \frac{\left( \frac{24}{\pi} \right) \cdot ws}{12} \quad (8)$$

Por último, se utilizó la ecuación de Turc [17], este método es uno de los más utilizados para estimar la  $ET_p$  en climas húmedos [18], y está basado en mediciones de temperatura máxima, mínima y radiación solar.

La ecuación para Turc que se utilizó en este cálculo es la modificada, la cual tiene dos formas, la primera es para aquellos meses que tienen una humedad relativa media mensual superior al 50 % Ec. (9).

$$ET_p = K \left( \frac{T}{T+15} \right) (Rg + 50) \quad (9)$$

Y para humedad relativa media mensual inferior a 50% Ec. (10)



$$ET_p = K \left( \frac{T}{T+15} \right) (Rg + 50) \left( 1 + \frac{50-HR}{70} \right) \quad (10)$$

En este caso  $ET_p$  es la evapotranspiración potencial en  $\text{mm mes}^{-1}$ ,  $K$  es una constante igual a 0.40 para meses de 30 y 31 días, 0.37 para febrero,  $T$  es la temperatura media mensual en  $^{\circ}\text{C}$  y  $Rg$  es la radiación solar global incidente del mes en  $\text{calcm}^{-2}\text{día}^{-1}$ .

### Método de evapotranspiración de referencia

El concepto de una superficie de referencia fue introducido con el fin de obviar la necesidad de definir los parámetros únicos de evaporación para cada cultivo y etapa de crecimiento [2].

En este trabajo se muestra la ecuación FAO-56 Penman-Monteith Ec. (11), en este caso la ecuación considera un cultivo hipotético, el cual conserva ciertas características como lo son, una altura de 12 cm con una resistencia superficial fija de  $70 \text{ sm}^{-1}$  y un albedo de 0.23, este cultivo se trata de un pasto verde bien regado, como lo menciona el documento de la FAO de Evaporación de cultivo.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (11)$$

donde  $ET_0$  es la evapotranspiración de referencia en  $\text{mm día}^{-1}$ ,  $Rn$  es la radiación neta,  $G$  es el flujo de calor en el suelo, ambos valores en  $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ,  $T$  es la temperatura media del aire a dos metros de altura en  $\text{ms}^{-1}$ ,  $e_s - e_a$  es el déficit de presión de vapor en  $\text{kPa}$ ,  $\Delta$  la pendiente de la curva de la presión de vapor y finalmente  $\gamma$  es la constante psicrométrica ambos valores en  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}$ .

### Sensores Remotos

La evaporación actual puede ser estimada en forma indirecta por medio de datos de sensores remotos usando el modelo de ba-

lance de energía de la Tierra y modelos para estimación de la evapotranspiración. Sin embargo, la mayoría de estos métodos requieren muchos parámetros y variables como entrada, incluyendo velocidad del viento y resistencia aerodinámica [19].

En esta ocasión se utilizaron datos del satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) que corresponden a dos instrumentos lanzados por la NASA.

Se trata de imágenes satelitales de diferentes propiedades. Las imágenes MODIS son generadas con frecuencia diaria por cada uno de estos satélites, pero desfasados entre ellas por 12 horas (TERRA obtiene imágenes durante el día y AQUA durante la noche). Dichas imágenes de resolución moderada son generadas a través de espectrometrías, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales, desde longitudes de onda de  $0.4 \mu\text{m}$  hasta  $14.4 \mu\text{m}$ .

Esta información se traduce en diferentes características de la superficie de la tierra, tales como, reflectividad de la superficie, manto de nieve y mares de hielo, cobertura de la superficie, dinámica, índice de vegetación, índice foliar, anomalías térmicas y/o incendios, productividad primaria bruta, albedo, campo continuo de vegetación, área quemada y finalmente, temperatura de la superficie terrestre (LST) [20].

El producto temperatura de la superficie terrestre es obtenido en pixeles de 500 metros, generado por un algoritmo de ventanas separadas (*Split-window*) y una malla de 6 km para el algoritmo día-noche. En el algoritmo de ventanas separadas, la emisividad en las bandas 31 y 32 son estimadas desde los diferentes tipos de cobertura terrestre, donde el vapor de agua en la columna atmosférica y la temperatura límite inferior de la columna de aire son separados en subrangos, para una mejor obtención de información.

En el algoritmo día-noche, durante el día y la noche la LST y la emisividad de la superficie terrestre son extraídas a partir del par

de imágenes día y noche de las capturas de MODIS en siete bandas Termal Infrarrojas (TIR). Para la obtención de la evapotranspiración con las imágenes de MODIS, la NASA utiliza la ecuación de balance energético (Ec. 1), mediante el despeje de la variable LE se puede obtener el valor de la evapotranspiración. Esto ya que todos los valores del balance energético tienen la misma escala de medición.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Depuración de datos de *Eddy Covariance*

El total de datos registrados en la base de datos de la torre EC fue de 24736, al hacer una depuración de estos, estuvieron disponibles 20894. La serie de tiempo de los datos que se calificaron con buena calidad fueron de mayo en 2017 hasta el mes de octubre del año 2018. LI-COR sugiere una depuración primaria mediante su barra de control de calidad de los datos, o también llamado *Quality Control (QC)* [13].

Estas llamadas QC son calculadas para todos los flujos (calor sensible y latente, flujos de gases y momento). El indicador final, completamente descrito por Foken y Whichura en 1996 y ampliamente adoptado, muestra la salida de archivos que están basados en una combinación de estos indicadores calculados como resultados de dos pruebas.

Los indicadores o banderas de calidad se enumeran del 0 al 9 dependiendo de qué tan confiable es el dato, siendo 0 un dato dentro del rango aceptable y 9 un dato con muy baja aceptación. En estas bases de datos encontramos sólo 3 valores de la escala que van del 0 al 2, para tener datos buenos se determinó continuar con aquellos datos que en su celda QC hubiese 0 o 1, después también se rellenaron datos y obtuvo una correlación entre las variables del balance energético.

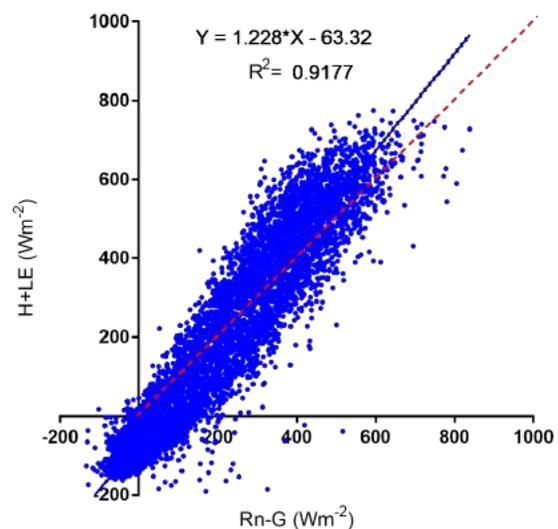
Como se observa en la Fig. 3, la correlación  $R^2$  fue de 0.9177, lo que es aceptable, e indica que las variables tienen una buena calidad. Este indicador, está asociado con la energía que llega a la Tierra y es aprovechable en términos del balance de energía de superficie.

Otro dato que arroja este cierre de balance es que la instrumentación está calibrada y trabajando correctamente.

### Correlación con los métodos de evapotranspiración potencial

El primer método evaluado fue Makkink Ec. (5), la cual muestra una correlación general con los datos de EC que se muestran a continuación.

Como se observa en la Fig. 4 la  $R^2 = 0.479$ , lo cual indica que este método tiene una relación aceptable entre la ET real y la potencial, aun cuando este método en unos casos sobreestima y otros subestima. Por lo cual toda la serie se separó en dos partes, y se clasificó en dos estaciones: húmeda y seca, como se muestra a continuación.



**Figura 3.** Cierre de balance energético para el período 2017-2018.

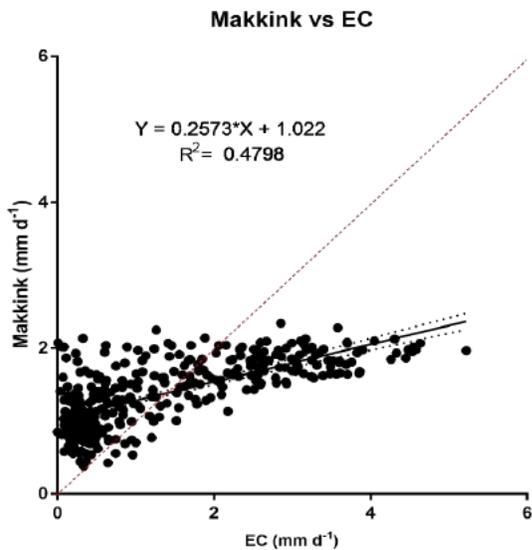


Figura 4. Correlación de Makkink contra EC.

En la Fig. 5 se observan las dos estaciones antes mencionadas, aunque en este caso la mejor correlación se encuentra en la estación húmeda, mientras la estación seca tiene una correlación baja y, en este caso, el rango entre 0 y 1 no tiene una correlación, por lo cual esta sólo se puede observar en una ET mayor a 1 mm por día

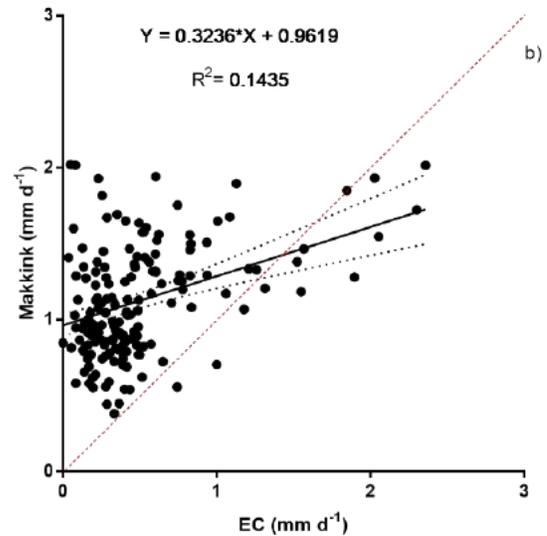
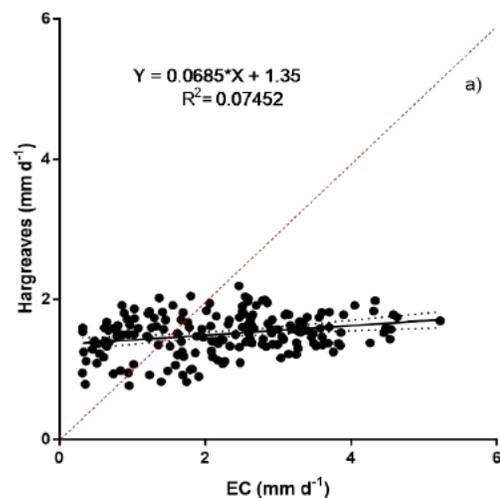
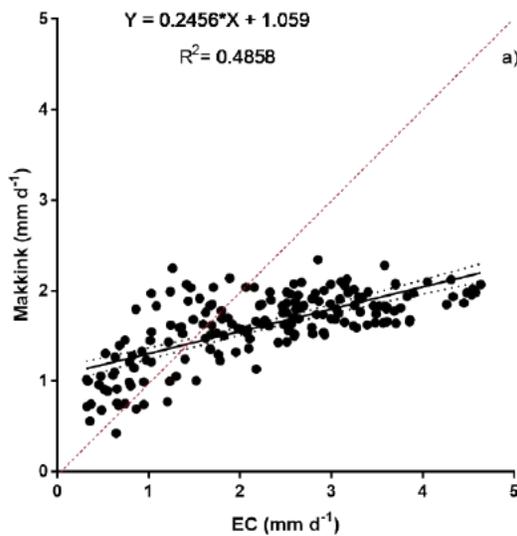
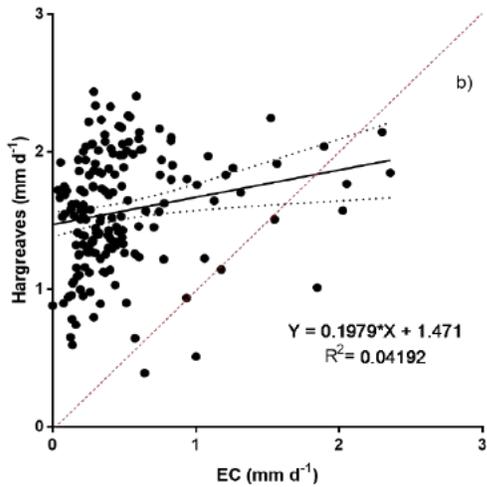


Figura 5. Correlaciones de Makkink contra EC, a) estación húmeda y b) estación seca.

En el caso de la ecuación de Hargreaves, no se encontró una correlación general con el método de EC, sin embargo, separando por estación como se muestra en la Fig. 6. es baja la correlación Makkink Hargreaves, al igual que en la estación seca. En la estación húmeda, aunque hay una correlación más alta, tampoco existe un valor suficiente para señalar que es una ecuación aplicable al sitio.

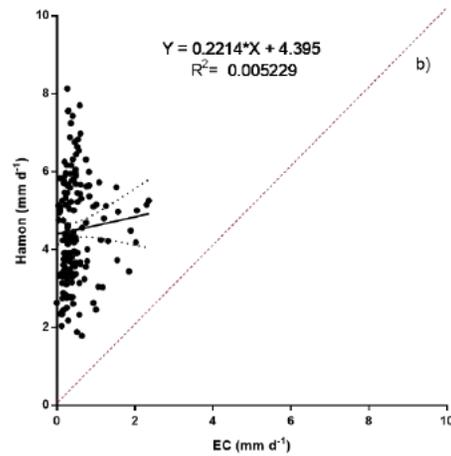
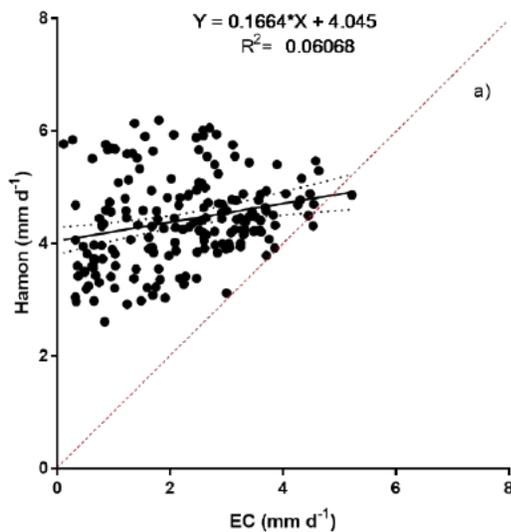




**Figura 6.** Correlación entre Hargreaves y Eddy covariance, a) estación húmeda y b) estación seca.

La siguiente correlación analizada fue la de Hamon contra EC, solo se muestran las correlaciones estacionales Fig. 7.

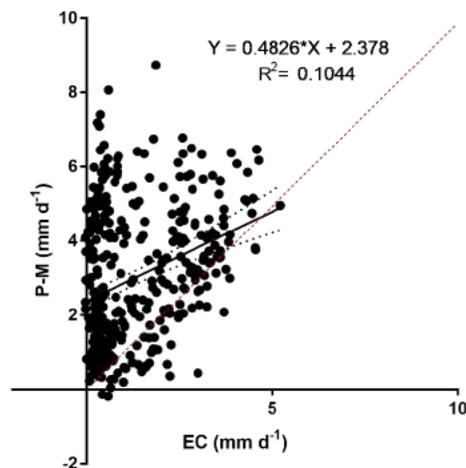
Al igual que en los casos anteriores casos la estación húmeda presenta una mayor correlación, como se puede observar en los rangos comparados con el método de Hamon la ET también es sobreestimada.



**Figura 7.** Correlación entre Hamon contra EC, a) estación húmeda y b) estación seca.

En el caso de la estación seca, la situación es similar que en el método anterior, pero la correlación es casi nula

Para la situación del método de Turc, el cual estima la ET en mm por mes, la evapotranspiración es la total que se puede presentar en el mes, ya que se refiere a la ET potencial. La Fig. 8 muestra las correlaciones de los datos mensuales de la estación húmeda y seca. Y aunque la  $R^2$  es alta, los rangos que se muestran de ET en caso de Turc son altos y la suma mensual de EC es baja, en este sentido cabe destacar que la correlación alta se debe a la escasez de datos.



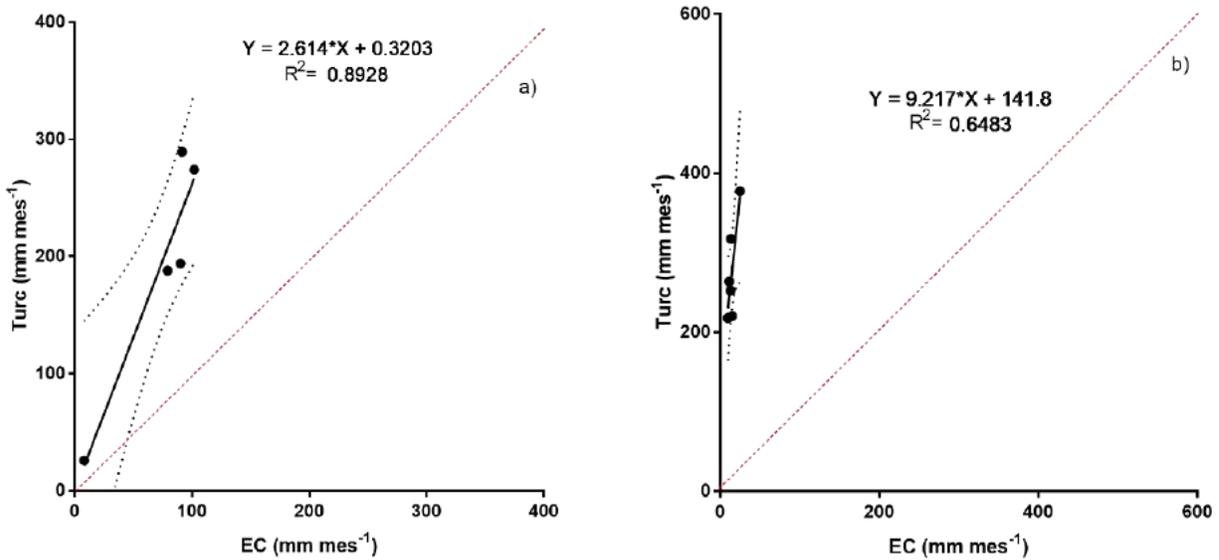
**Figura 8.** Grafica de correlación entre Turc y Eddy covariance, a) estación húmeda y b) estación seca.



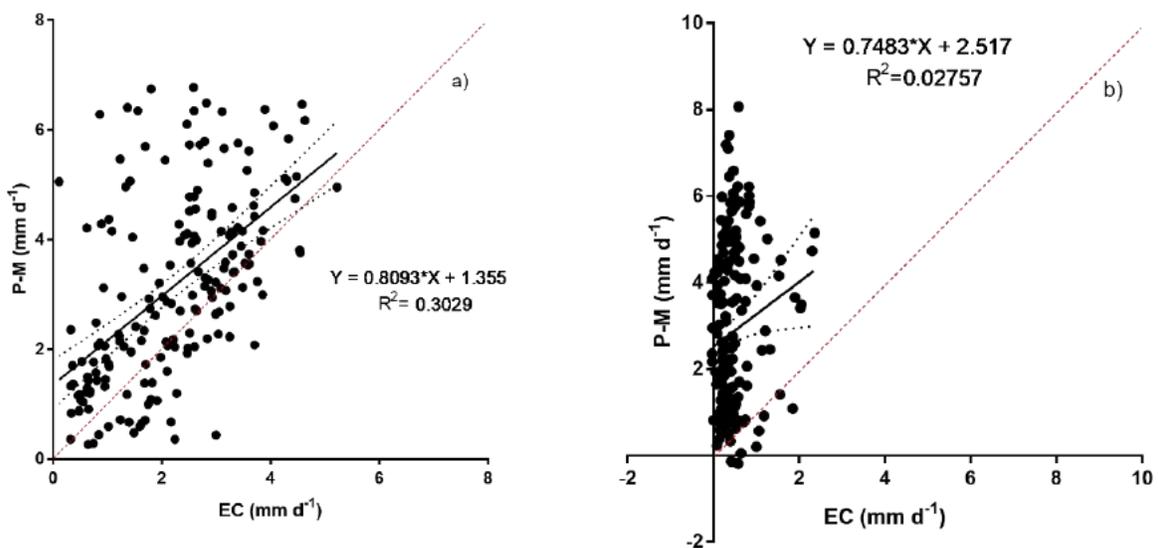
## Correlación con los métodos de referencia

El método de referencia, como ya se mencionó anteriormente, es el de la FAO 56; la correlación entre éste y los datos de *Eddy covariance* se presentan en la Fig. 9. La  $R^2 = 0.10$ , es baja, por lo cual también se llevaron a cabo comparaciones estacionales.

La estación que se observa en la Fig. 10 corresponde a la correlación en la estación húmeda, pero en la estación seca la correlación disminuyó de forma importante.



**Figura 9.** Correlación entre el método de la FAO-56 Penman-Monteith y los datos de *Eddy Covariance*.



**Figura 10.** Correlación entre ET de referencia (Penman-Monteith) y EC, a) estación húmeda y b) estación seca.

## Correlación con los Sensores Remotos

En el caso de la comparación entre la evaporación reportada por MODIS a la determinada con EC se muestra en la Fig. 11. En este caso se tomaron los 4 datos por mes de MODIS, se promediaron y se multiplicaron por el número de días del mes para obtener el total de ET mensual; las correlaciones se obtuvieron estacionalmente. Para la estación húmeda la correlación resultó con un  $R^2$  de 0.627, valor similar al caso del método de Turc, y con valores muy altos respecto a la estimación con MODIS, mientras que la evaporación con EC es menor. Claramente, el producto de MODIS sobreestima la ET.

## CONCLUSIONES

Los métodos semiempíricos que se conocen actualmente para estimar la evapotranspiración no siempre actúan con precisión para ambientes semiáridos: son muy pocos los que consiguen acercarse al valor real de ET, ya que las dinámicas y las características climáticas, morfológicas y fisiológicas de cada sitio son fundamentales. Además, cada sitio

tiene condiciones particulares que influyen la cantidad de agua necesaria para satisfacer la demanda evaporativa de la atmósfera.

Se puede concluir que en este sitio la humedad relativa es sensible en las ecuaciones que estiman la ET, y esta se vuelve una variable de control para los modelos más integrales.

La precipitación que se registró dentro de la serie de tiempo que se tomó en cuenta para este estudio fue de 255 milímetros para el año de 2017, y 423 milímetros para el año 2018, esta situación se observa en las correlaciones de las estaciones secas, cuando los datos parecen no tener una relación en cierto rango.

Debido a la sensibilidad de la respuesta de los ecosistemas semiáridos, evidenciado en este estudio para el sitio de Bernal, es recomendable que los modelos que solo toman en cuenta la temperatura del lugar sean utilizados con discreción para estimaciones en sitios similares, ya que la sensibilidad es muy alta y los valores muy alejados de los de ET real.

En este contexto la correlación entre las mediciones de EC y la estimada con la relación de Makkink, resultó aceptable. De la

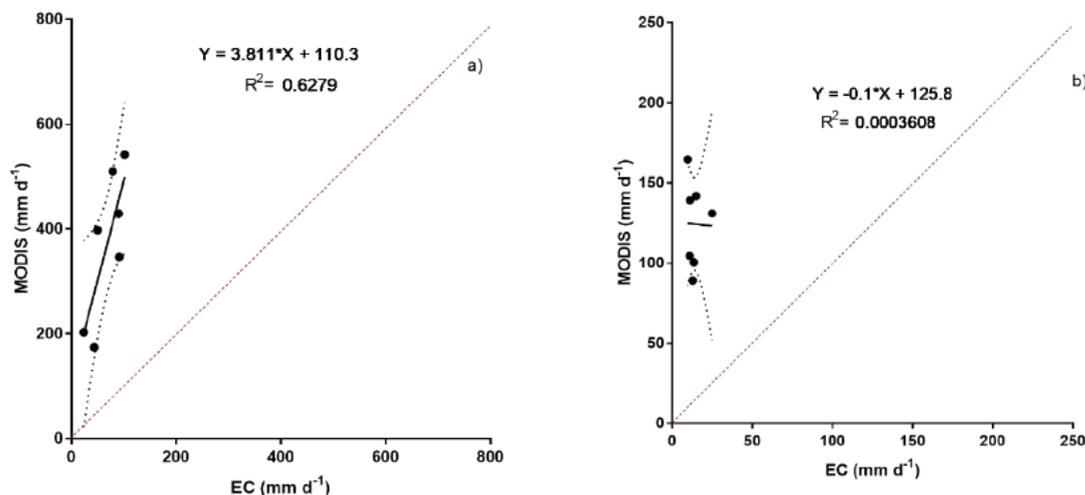


Figura 11. Grafica de correlación entre MODIS y Eddy covariance.



misma forma aconteció con los datos MODIS. Sin embargo, en ambos casos la ET, es necesario ajustar la evaporación en forma proporcional entre los métodos comparados, para ajustar la evaporación estimada con criterios semiempíricos. Por otra parte, las estaciones *Eddy Covariance* permiten tener una valoración del grado de incertidumbre de las relaciones empíricas cuando son aplicadas a climas semiáridos, y de esta manera mejorar las estimaciones de los recursos hídricos para este tipo de ecosistemas semiáridos.

## REFERENCIAS

[1] SEDEA, *Anuario Estadístico del Sector Rural*, Secretaría. Querétaro, 2016.

[2] R. G. Allen, *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Food & Agriculture Org, 2006.

[3] D. Martínez Granados, *Economic valuation of water use for irrigation in the Segura river basin. Assessment of economic instruments for aquifer management*, Universidad. Cartagena, 2015.

[4] O. M. M. OMM, *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos OMM N°8\_ actualizado 2010*. 2017.

[5] J. F. Reynolds, P. R. Kemp, and J. D. Tenhunen, "Effects of long-term rainfall variability on evapotranspiration and soil water distribution in the Chihuahuan Desert: A modeling analysis," *Plant Ecol.*, vol. 150, no. 3, pp. 145–159, 2000.

[6] CONAGUA, "Atlas," *Atlas*, vol. 119, no. 3, pp. 859–867, 2015.

[7] CONAGUA, "Estadísticas del Agua en México, Edición 2016", p. 282, 2016.

[8] F. Marini, M. Santamaría, P. Oricchio, C. M. Di Bella, and A. Basualdo, "Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS," *Rev. Teledetec.*, vol. 2017, no. 48, pp. 29–41, 2017.

[9] C. W. Thornthwaite, "An Approach toward a Rational Classification of Climate," *Geogr. Rev.*, vol. 38, no. 1, p. 55, 1948.

[10] G. F. Makkink, "Testing the Penman

formula by means of lysimeters.pdf," *J. Inst. Water Eng.*, vol. 11, pp. 277–288, 1957.

[11] E. M. Douglas, J. M. Jacobs, D. M. Sumner, and R. L. Ray, "A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types," *J. Hydrol.*, vol. 373, no. 3–4, pp. 366–376, 2009.

[12] S. Čadro, M. Uzunović, J. Žurovec, and O. Žurovec, "Validation and calibration of various reference evapotranspiration alternative methods under the climate conditions of Bosnia and Herzegovina," *Int. Soil Water Conserv. Res.*, vol. 5, no. 4, pp. 309–324, 2017.

[13] G. Burba, *Eddy Covariance Method*. Lincoln, Nebraska: LI-COR, Inc., 2013.

[14] N. An, S. Hemmati, and Y. Cui, "Assessment of the methods for determining net radiation at different time-scales of meteorological variables," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 9, pp. 239–246, 2017.

[15] M. Córdova, G. Carrillo-rojas, P. Crespo, B. Wilcox, and R. Céleri, "Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data," vol. 35, no. 3, pp. 230–239.

[16] J. Delgado-balbuena et al., "DE CARBONO EN ECOSISTEMAS TERRESTRES Y DATABASE OF VERTICAL CARBON DIOXIDE FLUXES AT TERRESTRIAL AND COASTAL ECOSYSTEMS IN MEXICO," pp. 93–108, 2018.

[17] M. E. Jensen, R. D. Burman, and R. G. Allen, "Evapotranspiration and irrigation water requirements, ASCE Manuals and Reports an Engineering Practice, No. 70," 1990.

[18] S. Trajkovic and S. Kolakovic, "Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations Under Humid Conditions," pp. 3057–3067, 2009.

[19] W. G. M. Bastiaanssen, M. Ahmad, and Y. Chemin, "Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin," vol. 38, no. 12, pp. 1–9, 2002.

[20] J. T. Yarad Zaror, "Estimación de la distribución espacial de evapotranspiración usando imágenes satelitales de temperatura de suelo. validación en la cuenca alta del río elqui," Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018.

