

Evaluación del efecto de distintas aproximaciones de la radiación en la estimación de la evapotranspiración usando el modelo FAO Penman-Monteith

Evaluation of the effect of different radiation approaches on the estimation of evapotranspiration using the FAO Penman-Monteith model

Ismael Orozco Medina^{1*}, Ma. Susana Alvarado Barrientos², Jesús López-de la Cruz³, Aldo Iván Ramírez Orozco⁴

¹ Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez 77, Zona Centro, Guanajuato, Gto., México. C.P. 36000. *Correo electrónico: i.orozco@ugto.mx

² Red Ecología Funcional, Instituto de Ecología, A.C., Inecol.

³ Facultad de Ingeniería Civil, Coquimatlán, Universidad de Colima.

⁴ Centro del Agua para América Latina y el Caribe, Tecnológico de Monterrey.

*Autor de correspondencia

Resumen

La evapotranspiración es uno de los procesos que mayor importancia tienen en la correcta cuantificación de la disponibilidad hídrica, pero es de los más difíciles de estimar del ciclo hidrológico en regiones con escasa información meteorológica. Una alternativa que se ha popularizado para resolver la problemática anterior es el uso de productos de satélite con estimaciones de la evapotranspiración a escala regional. Sin embargo, estos deben ser validados con información de campo adecuada antes de su aplicación regional, la cual es casi inexistente en latitudes tropicales. Por ello, esta investigación propone una mejora a la ecuación de la FAO Penman-Monteith, al introducir variabilidad espacial y temporal de la radiación neta (R_n) a través del algoritmo *Viewshed*. Los resultados muestran una mejora del 1.1% al comparar los resultados de la evapotranspiración de referencia con las estimaciones provenientes del producto satelital MOD16A3 y usando la forma tradicional de calcular la R_n .

Palabras clave: Evapotranspiración de referencia; FAO Penman-Monteith; algoritmo *Viewshed*; radiación; MODIS.

Abstract

Evapotranspiration is a very important process in the correct calculation of water availability, but it is one of the most difficult to estimate the hydrological cycle in regions with limited meteorological information. An alternative recently used to solve this problem is the use of satellite products with evapotranspiration at a regional scale. However, these products must be validated with information observed for their regional application, but the information is difficult to obtain in tropical latitudes. To solve this, an improvement to the FAO Penman-Monteith equation is proposed by including the spatial and temporal variability of the net radiation (R_n) with the *Viewshed* algorithm. The results show an improvement of 1.1% when comparing the results of the reference evapotranspiration against the estimates coming from the satellite product MOD16A3 and using the traditional calculation form of R_n .

Keywords: Reference evapotranspiration; FAO Penman-Monteith; viewshed algorithm; radiation; MODIS.

Recibido: 17 de enero de 2019

Aceptado: 23 de septiembre de 2019

Publicado: 27 de noviembre de 2019

Como citar: Orozco-Medina, I., Alvarado-Barrientos, M. S., López-de la Cruz, J., & Ramírez-Orozco, A. I. (2019). Evaluación del efecto de distintas aproximaciones de la radiación en la estimación de la evapotranspiración usando el modelo FAO Penman-Monteith. *Acta Universitaria* 29, e2481. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2019.2481>

Introducción

En la cuantificación de la disponibilidad hídrica de una región a través de balances hídricos, es fundamental calcular correctamente cada uno de los procesos del ciclo hidrológico que intervienen en un sistema. Uno de los más importantes en la correcta estimación de la disponibilidad hídrica es la evapotranspiración. Lo anterior se debe a que la evapotranspiración real representa un alto porcentaje de agua que es devuelta a la atmósfera por la combinación de los procesos de evaporación y transpiración. De hecho, se ha estimado que la evapotranspiración es el 66% del total de precipitación a nivel global (Fisher *et al.*, 2017). Por otro lado, es uno de los procesos más difíciles de cuantificar en regiones con escasa información meteorológica. Un ejemplo de ello es la Península de Yucatán donde, según García & Espinosa (2011), la evapotranspiración de referencia puede llegar a representar hasta un 80% de la precipitación acumulada media anual del estado. Otros estudios, como el realizado por González-Herrera, Sánchez-y-Pinto & Gamboa-Vargas (2002), reportan que la evapotranspiración de referencia para esta zona puede representar una pérdida del 75% al 90% de la precipitación acumulada media anual. En los ejemplos anteriores se pueden observar diferencias importantes en la estimación de la evapotranspiración para una misma región. Lo anterior está condicionado totalmente por la información disponible, la metodología y las herramientas empleadas en el cálculo de la evapotranspiración. En un sistema real, la evapotranspiración presenta una alta heterogeneidad influenciada por las características hidromorfológicas de la región, condiciones meteorológicas como la precipitación, la temperatura y la velocidad del viento, condiciones de humedad del suelo y los tipos de vegetación difíciles de representar conceptualmente, y a la escala adecuada (Dunn & Mackay, 1995). Por ello, se han realizado varios esfuerzos para resolver lo anterior, aplicando diferentes técnicas, métodos y herramientas para estimar la evapotranspiración de referencia, por ejemplo, en disciplinas como la ecología, la hidrología y la meteorología (Wilson, Hanson, Mulholland, Baldocchi & Wullschleger, 2001). Estos métodos se han enfocado en estimar la transpiración, la evaporación del suelo y la intercepción a escala de planta (Allen & Grime, 1995; Jaeger & Kessler, 1997; Smith & Allen, 1996; Whitehead, Kelliher, Lane & Pollock, 2008) a escala de perfil de suelo (Cuenca, Stangel & Kelly, 1997) y a escala de cuenca (García-Arias *et al.*, 2014); sin embargo, en la cuantificación de la disponibilidad hídrica de una región, estos métodos son difíciles de aplicar debido a que se requiere de mediciones en campo que en grandes áreas resulta prácticamente imposible obtener.

El modelo más apegado a la física del proceso de la evapotranspiración es la ecuación de Penman-Monteith, debido a que considera la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la radiación, así como las resistencias a la difusión del vapor de agua hacia la atmósfera impuestas por características aerodinámicas y fisiológicas de la superficie (Monteith, 1965). Para el caso de la evapotranspiración de referencia, la superficie es idealizada como cubierta por pasto sin limitación de agua disponible en el suelo y con resistencia aerodinámica y estomática constantes (Allen, Pereira, Raes & Smith, 1998). Esta formulación se ha aplicado en diferentes regiones del mundo, proporcionando resultados aceptables (Allen *et al.*, 1998; Bautista, Bautista & Delgado, 2009; Dunn & Mackay, 1995; Gong, Xu, Chen, Halldin & Chen, 2006) y es considerada la más apropiada para describir el proceso (Fisher *et al.*, 2017). Una desventaja de la ecuación es que requiere de información detallada que es muy difícil obtener para la mayoría de los casos, por lo cual se han propuesto distintas maneras de aproximar las variables meteorológicas y demás parámetros, como las publicadas por la FAO (Allen *et al.*, 1998). Por otro lado, para estimar la evapotranspiración de referencia existen formulaciones empíricas que se han venido usando, como las ecuaciones de Thornthwaite y Blaney-Criddle consideradas parsimoniosas debido a que solo consideran la temperatura del aire en la estimación (Dunn & Mackay, 1995).

En los últimos años se ha popularizado la teledetección como una opción para estimar la evapotranspiración en regiones con escasa información meteorológica (Gondwe, 2010; Gondwe *et al.*, 2010; Jiang & Islam, 2001). Un ejemplo de ello son las aplicaciones que utilizan imágenes y productos de

MODIS con una resolución espacial de un kilómetro (Gondwe *et al.*, 2010; Uuh-Sonda, Gutiérrez-Jurado, Figueroa-Espinoza & Méndez-Barroso, 2018). A pesar de las obvias ventajas de los productos satelitales, estos deben ser evaluados contra mediciones en campo, es decir, contra datos que provean realidad sobre el terreno, para determinar los rangos de incertidumbre y aplicabilidad a distintas regiones, ya que fueron generados para aplicaciones globales (Aguilar *et al.*, 2018; Alvarado-Barrientos & Orozco, 2017; Fisher *et al.*, 2017). Sin embargo, las fuentes de información de campo adecuadas para realizar estas evaluaciones son muy escasas en latitudes tropicales y subtropicales (Aguilar *et al.*, 2018; Salazar, 2018).

En el contexto anterior, y considerando la problemática de escasas de información en regiones tropicales, los productos de satélite pretenden ser una solución a la falta de información. Sin embargo, estos productos deben ser evaluados usando la mejor información del terreno posible. Dada la importancia de una correcta estimación de la evapotranspiración en la evaluación de la disponibilidad hídrica de una región, esta investigación propone una mejora al cálculo de la evapotranspiración de referencia con datos provenientes de estaciones meteorológicas básicas como lo es la ecuación de la FAO Penman-Monteith. Esta mejora se basa en introducir variabilidad espacial y temporal a la radiación neta a través del algoritmo *Viewshed*. Se ha decidido utilizar la ecuación de la FAO Penman-Monteith, ya que sigue siendo una opción válida en el cálculo de la evapotranspiración utilizando datos de estaciones meteorológicas y porque, según Allen, Pereira, Raes & Smith (2006) y Coronel *et al.* (2008), la ecuación de la FAO-PM es la que mejores resultados ha obtenido a nivel global en climas húmedos, como es el caso del estado de Quintana Roo. A diferencia de los trabajos encontrados en la literatura consultada en esta investigación, se espera mejorar la eficiencia de FAO Penman-Monteith en el cálculo de la evapotranspiración de referencia al introducir variabilidad espacial y temporal de la radiación neta con el algoritmo *Viewshed*, considerando la radiación solar como la variable más importante, puesto que es la fuente de energía que se utiliza en el proceso (Allen *et al.*, 1998; Quej, Almorox, Ibrakhimov & Saito, 2016).

Área de estudio

El área de estudio seleccionada es el estado de Quintana Roo, que se ubica en la porción oriental de la Península de Yucatán, México (figura 1), cuenta con un área de 43 216 km². Es el estado más joven de México, con un desarrollo turístico desde hace 30 años y una población aproximada de 1 574 824 de habitantes, lo cual se traduce en una mayor demanda de agua en una zona donde el abastecimiento proviene únicamente del acuífero cárstico de la región (Villasuso & Ramos, 2000). Es un acuífero costero con una alta vulnerabilidad a la intrusión marina y a la contaminación antropogénica por la elevada permeabilidad de las rocas caliza, dolomita y evaporita, material del que está constituido este acuífero (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011; Beddows, Smart, Whitaker & Smith, 2007).

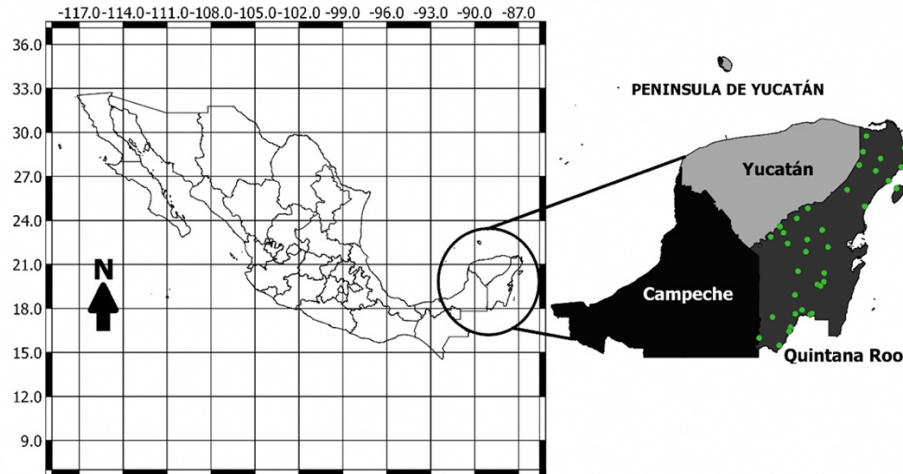


Figura 1. Delimitación del estado de Quintana Roo y ubicación geográfica de las estaciones Meteorológicas utilizadas en el presente estudio.
Fuente: Elaboración propia.

El clima es cálido subhúmedo y predomina en el estado la selva mediana subperennifolia y abundantes zonas de manglar a lo largo de la costa en áreas donde la temperatura media no es menor a los 20 °C. La época de lluvias comprende de mayo a octubre, con precipitaciones puntuales en noviembre y diciembre (Gondwe *et al.*, 2010).

Al analizar la información disponible, se ha obtenido que la precipitación acumulada media anual en el estado presenta una alta variabilidad espacial respecto de la media de 1169 mm, con una desviación estándar de 154 mm. En la figura 2 se puede observar el rango de variación espacial de la precipitación media anual que se ha obtenido y que es del orden de 820 mm a 1460 mm reportada en estudios como Villasuso & Ramos (2000), Gondwe *et al.* (2010), Bauer-Gottwein *et al.* (2011) y Carballo, Orozco-Medina & Leal (2015). La evaporación anual varía en un rango de 839 mm a 1676 mm al año, con una media de 1358 mm y una desviación estándar de 165 mm. Las temperaturas muestran una baja variabilidad espacial con valores en la desviación estándar de 1.7 °C y 1.09 °C (mínimas y máximas, respectivamente). Las mínimas varían en un rango de 16 °C a 23 °C, mientras que las máximas oscilan entre 29 °C y 35 °C.

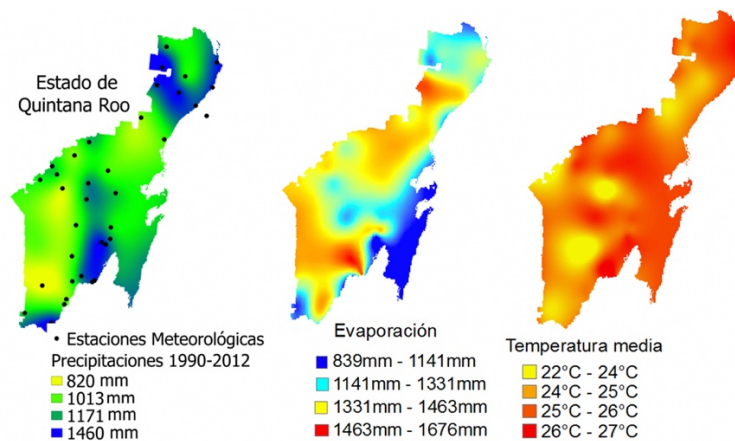


Figura 2. Distribución de la precipitación acumulada media anual, la evaporación media anual medida en tanque y las temperaturas medias anuales.
Fuente: Elaboración propia.

Por último, los principales usos de suelo observados en el estado son áreas urbanas, pastizales y zonas agrícolas.

Materiales y Métodos

En la presente investigación se usa la ecuación FAO Penman-Monteith (FAO-PM) para cuantificar la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.*, 1998; Gong *et al.*, 2006), proponiendo un nuevo método para el cálculo de la radiación neta que usa dicha ecuación (ecuación 1):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T_{med} + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

donde ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{k Pa}^\circ\text{C}^{-1}$), R_n es la radiación neta en la superficie ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), G es el flujo del calor del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), γ es la constante psicrométrica ($\text{k Pa}^\circ\text{C}^{-1}$), T_{med} es la temperatura media del aire a dos metros de altura ($^\circ\text{C}$), u_2 es la velocidad del viento a dos metros de altura (m s^{-1}), e_s es la presión de vapor de saturación (k Pa), e_a es la presión real de vapor (k Pa) y $e_s - e_a$ es el déficit de presión de vapor (k Pa). En la estimación de T_{med} se han utilizado datos de temperatura mínima y máxima diarios de 36 estaciones meteorológicas para el periodo comprendido de 1990 al 2012 (figura 1 y tabla 1). El periodo anterior estuvo condicionado por la calidad y la cantidad de datos en común entre las 36 estaciones seleccionadas. Los datos se pueden descargar libremente de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional de Agua (Conagua) en el siguiente acceso: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>.

Tabla 1. Precipitación, temperaturas y evaporaciones medias anuales de cada estación meteorológica para el periodo de 1990 al 2012.

Nombre de la estación Meteorológica	Clave	Precipitación acumulada (mm)	Temperatura mínima ($^\circ\text{C}$)	Temperatura máxima ($^\circ\text{C}$)	Evaporación de tanque (mm)
Adolfo López Mateos	1	1059.2	18.3	32.2	1141.1
Agua Blanca	2	1355.2	18.5	31.6	1444.2
Álvaro Obregón	3	1155.0	19.3	31.7	1244.7
Andrés Q. Roo	4	1304.1	20.2	31.9	1268.0
Cancún	5	1266.2	22.5	31.7	1276.2
Candelaria	6	1061.7	16.8	31.2	1222.7
Chacchoben	7	1348.0	20.3	31.0	1440.1
Chetumal	8	1302.6	22.9	32.4	1718.5
Cobá	9	1065.5	18.0	30.3	1435.4
Cozumel	10	1186.4	22.8	31.8	1053.9
Dos Aguadas	11	1050.3	17.2	31.9	1066.3
Dziuché	12	1120.1	17.8	32.0	1352.4
FCP	13	1260.2	20.5	31.7	1228.2
Ideal	14	1342.4	20.0	31.3	1575.1
ITCH	15	1298.1	20.2	32.8	1545.9
INI Arroyo Caechet	16	1321.7	22.8	31.3	1429.1
Kantunilkín	17	1374.9	18.0	31.6	1017.4
La Presumida	18	1180.4	18.5	34.3	1489.3
Laguna Kaná	19	1171.9	16.5	29.4	1179.5
Leona Vicario	20	1015.6	19.5	32.1	1105.6

Limones	21	1303.9	20.2	31.0	1462.6
Nicolás Bravo	22	997.0	20.1	32.1	1057.1
Pedro A. Santos	23	847.7	21.9	31.1	1195.1
Playa del Carmen	24	1255.4	21.2	30.6	1362.7
Puerto Morelos	25	1460.5	20.4	32.0	1255.0
Pucté	26	1327.3	19.9	30.5	1570.2
Reforma	27	969.1	16.6	30.1	1485.2
Sabán	28	1012.6	18.7	32.6	1239.5
Señor	29	1098.9	19.6	33.6	1372.0
Sergio B. Casas	30	820.9	19.9	31.1	1258.3
Solferino	31	1168.8	18.1	32.1	1172.3
Tihosuco	32	1166.8	18.4	33.1	1265.3
Tulum	33	919.9	19.8	31.0	1055.8
Valle Hermoso	34	1103.0	19.9	33.4	1103.0
Victoria	35	1395.4	18.6	30.4	1516.6
Xpichil	36	1131.2	19.7	32.1	1359.2

Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de otros trabajos anteriores (Alvarado-Barrientos & Orozco, 2017), en esta investigación se propone calcular la radiación neta (R_n), usando el algoritmo de cuenca visual *Viewshed* desarrollado por Rich, Dubayah & Hetrick Saving (1994) y ampliado por Fu & Rich (2000; 2002). Es la primera vez que *Viewshed* se utiliza como *input* de la ecuación FAO-PM para calcular la ETo. Sin embargo, se ha partido de la hipótesis que el uso del algoritmo *Viewshed* mejora la representación de la R_n y, por consiguiente, la cuantificación de la ETo. Lo anterior se debe a que este algoritmo considera las características del terreno, la época del año y la sombra del relieve. El algoritmo *Viewshed* utiliza como única información de entrada un modelo digital de elevación (MDE), a través del cual introduce los efectos topográficos que, junto con la posición del sol, determinan la cantidad de R_n en una superficie determinada. En este caso se ha decidido usar un MDE con una resolución de 30 m x 30 m obtenido del Servicio Geológico de Estados Unidos (figura 3).

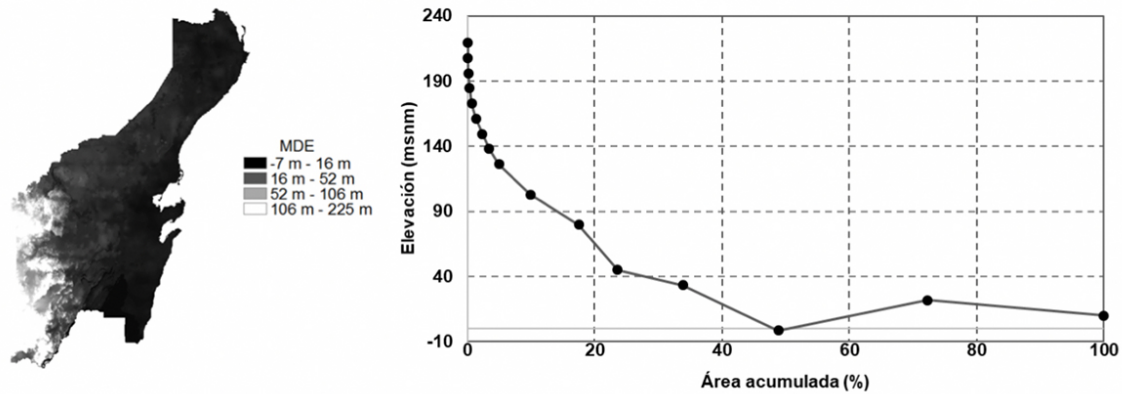


Figura 3. Muestra el Modelo digital de elevación con una resolución de 30 metros y la curva hipsométrica del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo *Viewshed* calcula la R_n sumando la radiación directa (R_{Dview}) y la radiación difusa ($R_{Difview}$), el resultado es la radiación neta *Viewshed* (R_{nview}). En la estimación de la R_{Dview} el algoritmo considera la posición del sol durante el día y la época del año, usando la ecuación siguiente:

$$R_{Dview} = S_{const} * \rho_1^{m(\theta)} * SunDur_{\theta,\alpha} * SunGap_{\theta,\alpha} * \cos(angIn_{\theta,\alpha}) \quad (2)$$

donde S_{Const} es la constante solar (1367 Wm^{-2}), β_1 es la transmisividad de la atmósfera, $SunDur_{\theta,\alpha}$ es la duración de tiempo representada por el sector del cielo, que en la mayoría de los sectores es igual al intervalo diario, $SunGap_{\theta,\alpha}$ es la fracción del espacio para el sector del mapa solar y $angIn_{\theta,\alpha}$ es el ángulo de incidencia. En el caso de la longitud de ruta óptica relativa $m(\theta)$, se calcula como una proporción de la longitud de ruta del cenit (θ) a través de la ecuación siguiente:

$$m(\theta) = \frac{\text{Exp}(-0.000118 * \text{Elev} - 1.638 * 10^{-9} * \text{Elev}^2)}{\cos(\theta)} \quad (3)$$

donde Elev es la elevación obtenida directamente del MDE.

Por otro lado, el $angIn_{\theta,\alpha}$ es calculado utilizando el ángulo del cenit (G_z) y el ángulo acimutal de la superficie (G_a), empleando la ecuación siguiente:

$$angIn_{\theta,\alpha} = \text{acos}[\cos(\theta) * \cos(G_z) + \sin(\theta) * \sin(G_z) * \cos(\alpha - G_a)] \quad (4)$$

En el caso de la radiación $R_{Difview}$, el algoritmo la calcula como la suma de las radiaciones difusas en todas las direcciones utilizando la ecuación siguiente:

$$R_{Difview} = R_{glb} * P_{dif} * Dur * SkyG_{ap\theta,\alpha} * Weight_{\theta,\alpha} * \cos(angIn_{\theta,\alpha}) \quad (5)$$

donde R_{glb} es la radiación global normal, P_{dif} es la porción del flujo de radiación global normal difundido (por las características del área de estudio se ha utilizado 0.3 para condiciones de cielo claro), Dur es el intervalo de tiempo usado en el cálculo, $SkyGap_{\theta,\alpha}$ es la fracción de espacio para el sector del cielo, $Weight_{\theta,\alpha}$ es la porción de radiación difusa que se origina en cielo uniforme y parcialmente cubierto.

Finalmente, con el objetivo de evaluar el efecto de la R_{nview} que calcula el algoritmo *Viewshed* sobre la cuantificación de la ETo con la ecuación de la FAO-PM, se compara los resultados obtenidos contra dos estimaciones de ETo. El primer método considera la misma ecuación 1, pero usando la forma tradicional de calcular la R_n , la cual considera únicamente la radiación extraterrestre (R_{next}) calculada con la ecuación siguiente:

$$R_{next} = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)] \quad (6)$$

donde G_{sc} es la constante solar ($0.082 \text{ MJm}^{-2} \text{ min}^{-1}$), d_r es la distancia relativa inversa Tierra-Sol, ω_s es el ángulo de radiación a la puesta del sol, φ es la latitud en radianes y δ es la declinación solar en radianes.

El segundo método empleado para comparar los resultados que se obtienen cuando se usa la R_{nview} ha sido la ETo del producto *Global Evapotranspiration Project-MOD16*, que combina datos de satélite MODIS con datos de reanálisis meteorológicos global (Mu, Zhao & Running, 2011). Este producto está disponible de manera libre en el siguiente enlace: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod16.php>. Tiene una resolución espacial de un kilómetro cuadrado y tres resoluciones temporales: ocho días, mensual y anual. En este caso, la evapotranspiración del MOD16A3 usada ha sido la anual (figura 4).

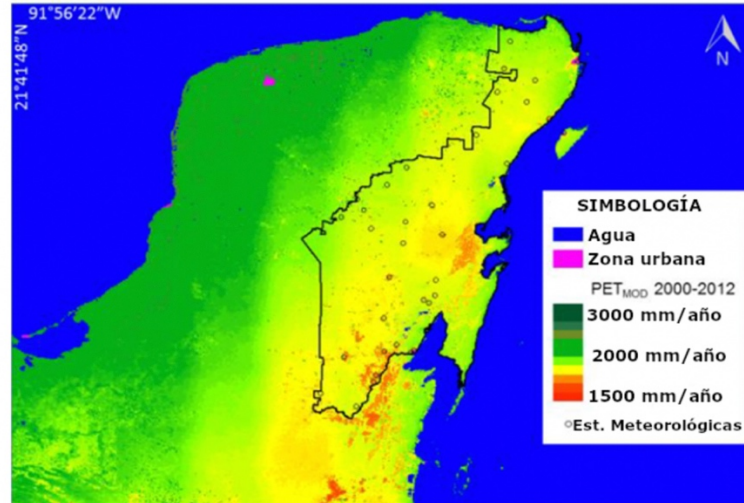


Figura 4. Evapotranspiración potencial (ETp) media anual del producto satelital MOD16A3 para la Península de Yucatán y el periodo 2000-2012. Fuente: Alvarado-Barrientos & Orozco (2017).

Desde su publicación, el MOD16A3 ha sido objeto de evaluaciones con datos de campo. Sin embargo, estas han sido limitadas a zonas templadas y semiáridas (Aguilar *et al.*, 2018; Matin & Bourque, 2013; Ramoelo *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2007; Velpuri, Senay, Singh, Bohms & Verdin 2013). En el caso del área de estudio, los autores Alvarado-Barrientos & Orozco (2017) realizaron una evaluación del MOD16A3 con datos similares a los presentados en este estudio, solamente que con la formulación original de la FAO-PM para calcular la ETp.

Resultados y Discusión

Al comparar los valores de las radiaciones netas (R_{next} y R_{nview}) a través de la media y la desviación estándar, se puede observar que es precisamente en los meses de verano e invierno donde se presentan las diferencias más significativas, principalmente en los valores máximos (tabla 2); es decir, se observan valores más acordes con la época del año cuando se emplea el algoritmo *Viewshed*.

En términos generales, se obtiene una sobreestimación media de $1.17 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ en la R_{next} respecto de la R_{nview} calculada por el algoritmo *Viewshed*. A diferencia de lo esperado, la R_{next} presenta una mayor variabilidad espacial con una desviación estándar de $1.7 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ a $2.8 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$. En ambos casos los valores presentados en la tabla 2 son del orden de los reportados por Bermudez-Contreras, Thomson & Infield (2008) y Rivas, Saleme-Vila, Ortega-Izaguirre, Chalé-Lara & Caballero-Briones (2013). Los autores anteriores realizaron estudios en regiones costeras del país obteniendo una variación de la radiación entre $18 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ y $25 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$.

Tabla 2. R_{nview} media mensual obtenida con el algoritmo *Viewshed* y la R_{next} media mensual para el periodo de 1990 al 2012 (*desviación estándar).

Mes	$R_{nview} (\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1})$					$R_{next} (\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1})$				
	Mín.	Med.	Máx.	σ^*	Mín.	Med.	Máx.	σ^*		
Ene	6.8	6.9	7.0	1.1	7.5	8.3	9.1	1.7		
Feb	8.6	8.7	8.9	1.5	9.2	10.3	11.2	2.1		

Mar	11.2	11.2	11.4	1.9	11.0	12.4	13.7	2.5
Abr	13.0	13.1	13.2	2.2	12.2	13.9	15.4	2.8
May	13.8	14.0	14.1	2.3	12.6	14.2	15.9	2.8
Jun	13.9	14.0	14.2	2.3	12.1	13.7	15.3	2.6
Jul	13.8	14.0	14.1	2.3	12.0	13.7	15.2	2.6
Agos	13.4	13.4	13.6	2.2	11.8	13.4	14.9	2.5
Sep	11.7	11.8	12.0	2.0	10.6	12.1	13.4	2.3
Oct	9.4	9.5	9.6	1.6	9.0	10.2	11.3	1.9
Nov	7.1	7.2	7.3	1.2	7.5	8.4	9.3	1.6
Dic	6.2	6.3	6.4	1.1	6.8	7.6	8.4	1.5

Fuente: Elaboración propia.

Hernández-Escobedo, Fernández-García & Manzano-Agugliaro (2017) realizaron la estimación de la radiación incidente usando las mediciones realizadas en siete estaciones meteorológicas ubicadas en la Península de Yucatán, incluyendo el estado de Quintana Roo. Los valores medios mensuales calculados por los autores son mayores a los cuantificados usando las metodologías implementadas en la presente investigación (figura 5). Lo anterior, debido a que se está comparando la radiación total incidente contra las radiaciones netas que requiere la ecuación 1. Además, se puede observar que la R_{nview} máxima se presenta en los meses de mayo, junio y julio, a diferencia de las otras dos radiaciones cuyos valores máximos de presentan en abril y mayo (figura 5).

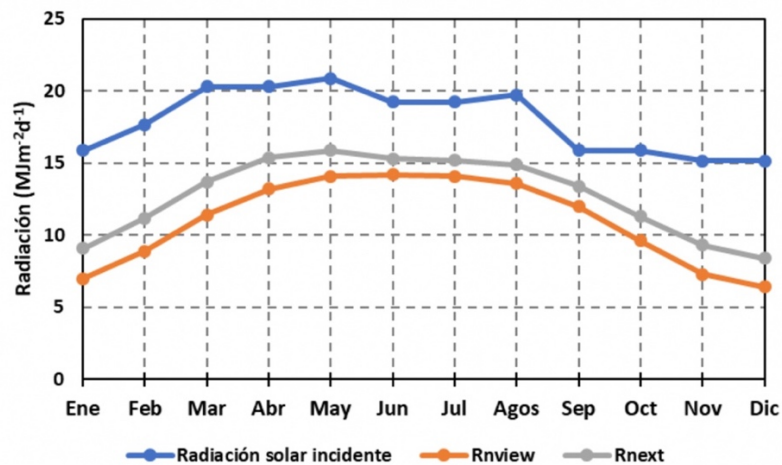


Figura 5. Comparación de la radiación solar obtenida por Hernández-Escobedo et al. (2017) vs. las radiaciones netas obtenidas con el algoritmo Viewshed (R_{nview}) y la radiación extraterrestre (R_{next}).

Fuente: Elaboración propia.

También, al utilizar los valores de R_{next} y R_{nview} en la ecuación de la FAO-PM, se han obtenido valores distintos de la ETo. Se observa una disminución de la ETo calculada usando la R_{nview} (figura 6). En este caso, la ETo anual varía en un rango de 100 mm a 2470 mm, con un valor medio anual de 1600 mm, mientras que cuando se usa la R_{nex} , el rango obtenido varía de 500 mm a 2942 mm, con un valor medio de 1756 mm.

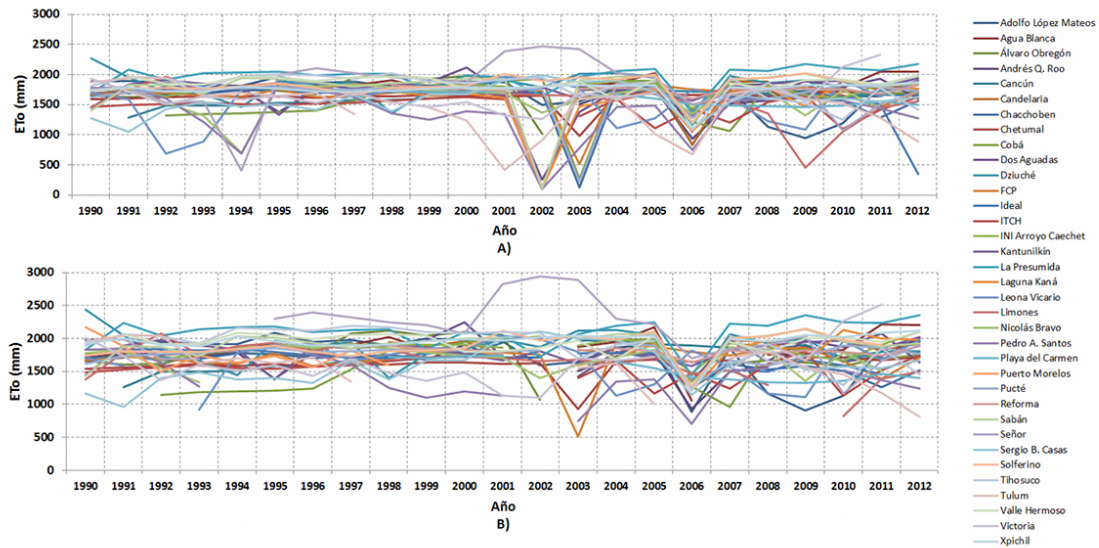


Figura 6. A) ET_0 obtenida usando FAO-PM con la radiación R_{nview} y B) ET_0 obtenida usando FAO-PM con la radiación R_{next} .
Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos de ET_0 anuales mostrados anteriormente son del orden a los reportados en otros estudios. Por ejemplo, Bauer-Gottwein et al. (2011) reportaron una variación de 850 mm a 1600 mm. Según Gondwe (2010), la ET_0 varía de 350 mm a 2500 mm al año. Graniel, Morris & Carrillo-Rivera (1999) reportaron una ET_0 anual de 1700 mm en la costa y de 2400 mm al interior de Yucatán. Roa-Fuentes, Hidalgo, Etchevers & Campo (2013) obtuvieron una ET_0 con un rango de 1457 mm a 2023 mm al año.

Los coeficientes de correlación que se obtienen al comparar los datos de ET_0 obtenidos con FAO-PM y los datos de evaporación de las estaciones son 0.19, cuando se usa la R_{nview} , y 0.04, cuando se emplea R_{next} (figura 7). Aunque los coeficientes de correlación son bajos, producto de que el comparativo es contra el dato observado medido con el tanque de evaporación que no incluye la transpiración, y que representa la evaporación de una superficie de agua libre, hay una tendencia de mejora cuando se usa la R_{nview} . Además, con la R_{nview} se mejora el error estándar (164.17) y el error absoluto medio (132) respecto del error estándar (167.36) y error absoluto medio (133) de la R_{next} . Sin embargo, se tendrá que realizar un análisis más detallado incluyendo una evaluación de la calidad de los datos de evaporación reportados en las estaciones de Conagua.

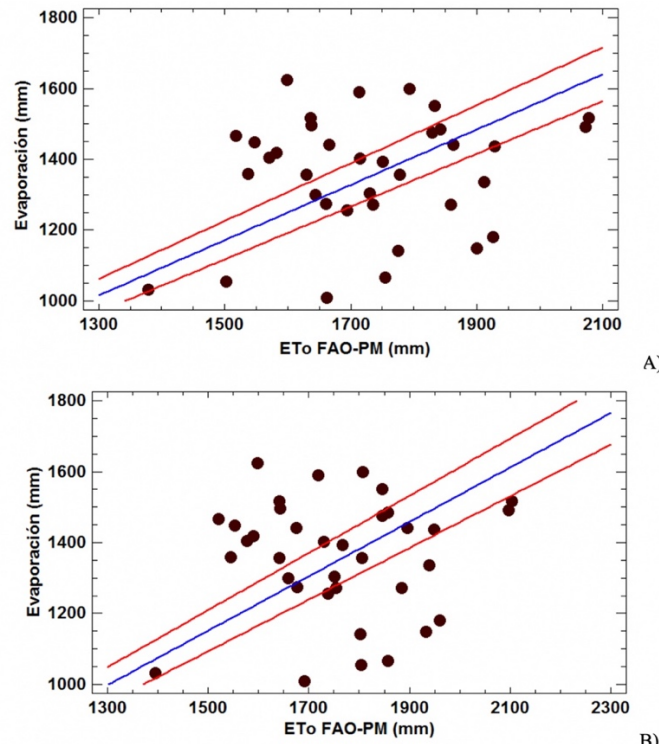


Figura 7. Correlación lineal y límites de confianza de 95% entre la evaporación de tanque observada y la ET₀ con FAO-PM obtenida usando R_{view} (A) y R_{next} (B).
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar el comparativo con los valores anuales de ET₀ obtenidos del producto satelital MOD16A3, se puede observar que existe una sobreestimación por parte del producto satelital en todos los puntos donde se ubican las estaciones meteorológicas seleccionadas (figura 8). Sin embargo, están dentro de los rangos reportados en los estudios citados anteriormente. Se puede observar también que, en términos generales, usando la R_{view} , los valores de ET₀ se reducen un 1.1% al comparar los resultados de la evapotranspiración de referencia contra las estimaciones provenientes del producto satelital MOD16A3 y usando la forma tradicional de calcular la R_n . Esto parece indicar, como se ha concluido en trabajos anteriores (Aguilar *et al.*, 2018; Alvarado-Barrientos & Orozco, 2017; Salazar, 2018), que el algoritmo utilizado para producir el producto satelital mejoraría si se parametriza con información meteorológica local en vez de reanálisis global, así como con información de las características de la superficie también localmente derivadas.

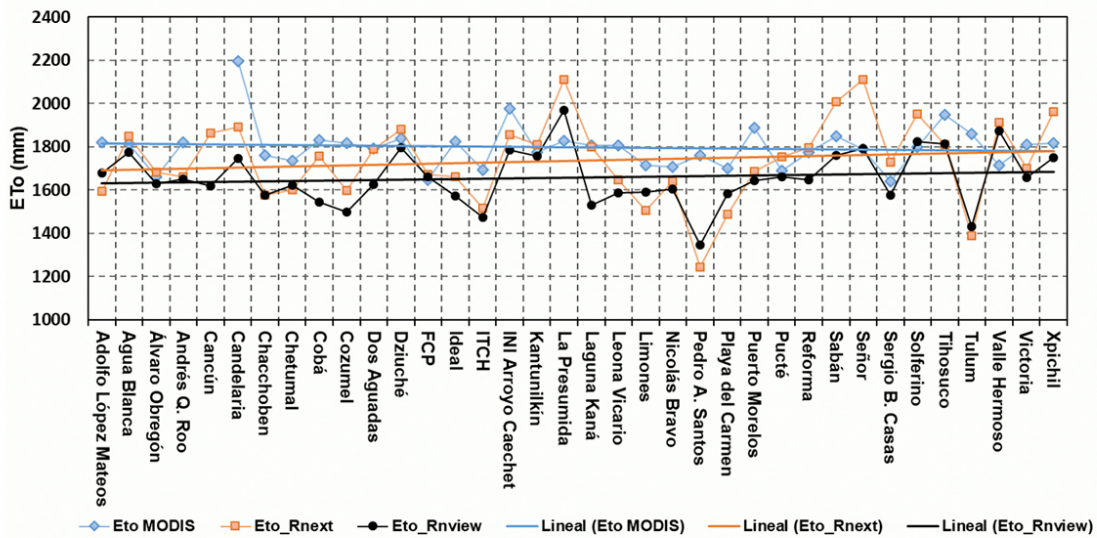


Figura 8. Valores medios de ETo obtenidos con el producto satelital MOD16A3, usando la R_{next} y la R_{nview} del algoritmo *Viewshed*.
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la distribución espacial de la ETo media anual con el método de interpolación *spline*, los resultados presentan diferencias significativas en magnitud (figura 9). Además, la distribución sigue la misma tendencia influenciada por la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en la estimación de la ETo.

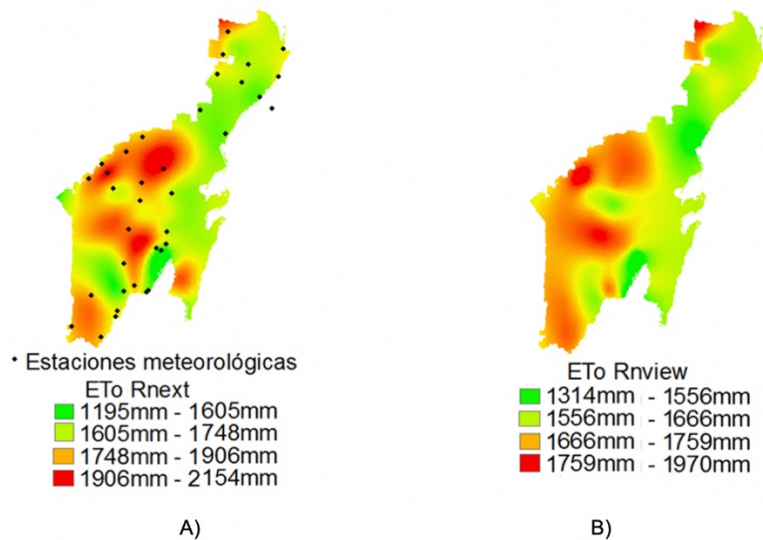


Figura 9. Distribución espacial de la ETo media anual con R_{next} (A) y R_{nview} (B).
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados anteriores muestran que el cálculo de la R_n a través de diferentes metodologías influye de manera significativa en la cuantificación de la ETo cuando se usa la ecuación de la FAO-PM. Por esto, la exactitud en la evaluación de la disponibilidad hídrica del área de estudio estará condicionada por la correcta cuantificación de la R_n .

Conclusiones

En términos del balance de energía, se observaron diferencias significativas entre los métodos indirectos implementados en la estimación de la radiación neta, la cual influye de manera positiva en la estimación de la evapotranspiración de referencia cuando se combina la ecuación de la FAO Penman-Monteith y el algoritmo *Viewshed*. Los resultados mostraron una tendencia de mejora para el estado de Quintana Roo cuando se introducen los efectos topográficos y la posición del sol a través del modelo digital de elevación y el algoritmo *Viewshed*. Esto proporciona indicios de que, para zonas con escasa información observada, no basta con mejorar o hacer más complejas las ecuaciones que se usan en la estimación de la evapotranspiración de referencia, sino proponer, como en este caso, alternativas del cálculo de las variables más importantes de la ecuación FAO Penman-Monteith. A pesar de lo anterior, es importante comentar que el algoritmo *Viewshed* no considera los efectos de la cubierta vegetal, que tiene implicaciones en la resistencia aerodinámica y el albedo, factores que influyen fuertemente en el balance de energía. Además, se cree que las predicciones de la evapotranspiración se mejorarían al incluir la resistencia de dosel y el flujo del calor del suelo, calculados de manera empírica o con algún producto de satélite a escala regional.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido apoyada por la Dirección General de Educación Superior Universitaria (DGESU) de la Secretaría de Educación Pública a través de su Programa para el Desarrollo Profesional Docente (Folio Prodep: UGTO-PTC 613), y la División de Ingenierías de la Universidad de Guanajuato.

Referencias

- Aguilar, A. L., Flores, H., Crespo, G., Marín, M. I., Campos, I., & Calera, A. (2018). Performance Assessment of MOD16 in Evapotranspiration Evaluation in Northwestern Mexico. *Water*, *10*(7), 1-14. doi: <https://doi.org/10.3390/w10070901>
- Alvarado-Barrientos, M. S., & Orozco-Medina, I. (Diciembre de 2016). Comparison of satellite-derived potential evapotranspiration (MOD16A3) with in situ measurements from Quintana Roo, Mexico. *2016 IEEE 1er Congreso Nacional de Ciencias Geoespaciales (CNCG)*. Ciudad de México. doi: <https://doi.org/10.1109/CNCG.2016.7985078>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, D. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Roma: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, D. (2006). *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Allen, S. J., & Grime, V. L. (1995). Measurements of transpiration from savannah shrubs using sap flow gauges. *Agricultural and Forest Meteorology*, *75*(1-3), 23-41. doi: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02201-T](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02201-T)
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R. N., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M., & Merediz-Alonso, G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, *19*(3), 507-524. doi: <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0699-5>
- Bautista, F., Bautista, D., & Delgado Carranza, C. (2009). Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmosfera*, *22*(4), 331-348.
- Beddows, P. A., Smart, P. L., Whitaker, F. F., & Smith, S. L. (2007). Decoupled fresh-saline groundwater circulation of a coastal carbonate aquifer: Spatial patterns of temperature and specific electrical conductivity. *Journal of Hydrology*, *346*(1-2), 8-32. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.013>

- Bermudez-Contreras, A., Thomson, M., & Infield, D. G. (2008). Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, Mexico. *Desalination*, 220(1-3), 431–440. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.046>
- Carballo, R. M., Orozco-Medina, I., & Leal, R. M. (2015). Estimación de la recarga del acuífero de Quintana Roo mediante un balance hídrico para cuantificar su eficiencia en el abastecimiento de agua. En: X. Delgado-Galván, J. Mora, & J. Ortiz Medel (Coords.). *Los servicios de agua y drenaje con una visión integral*. (pp. 489-501). Guanajuato, Gto. México: Universidad de Guanajuato.
- Coronel, C., Rosales, E., Mora, F., López-Caloca, A. A., Tapia-Silva, F. O., & Hernández, G. (2008). Monitoring evapotranspiration at landscape scale in Mexico: applying the energy balance model using remotely sensed data. *Proceedings of SPIE*, 7104, 1-12. doi: <https://doi.org/10.1117/12.800420>
- Cuenca, R. H., Stangel, D. E., & Kelly, S. F. (1997). Soil water balance in boreal forest. *Journal of Geophysical Research*, 102(97), 29355-29365. doi: <https://doi.org/10.1029/97JD02312>
- Dunn, S. M., & Mackay, R. (1995). Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology. *Journal of Hydrology*, 171(1-2), pp. 49-73. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02733-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02733-6)
- Fisher, J. B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen R., McCabe, M. F., Hook, S., Baldocchi, D., Townsend, P. A., Kilic, A., Tu, K., Miralles, D. D., Perret, J., Lagouarde J. P., Waliser, D., Purdy, A. J., French, A., Schimel, D., Famiglietti, J. S., Stephens, G., & Wood, E. F. (2017). The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resources Research*, 53(4), 2618-2626. doi: <https://doi.org/10.1002/2016WR020175>
- Fu, P., & Rich, P. (2002). A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1-3), 25-35. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00115-1)
- Fu, P. & Rich, P.M. (Enero de 2000). A Geometric Solar Radiation Model and its Applications in Agriculture and Forestry. *Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry*. Lake Buena Vista, Florida, USA.
- Granier, C. E., Morris, L. B., & Carrillo-Rivera, J. J. (1999). Effects of urbanization on groundwater resources of Merida, Yucatan, Mexico. *Environmental Geology*, 37(4), 303-312. doi: <https://doi.org/10.1007/s002540050388>
- García, N. H., & Espinosa, M. (2011). *Plan rector en materia de agua para la protección, conservación y recuperación ambiental de la península de Yucatán*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- García-Arias, A., Francés, F., Morales-de la Cruz, M., Real, J., Vallés-Morán, F., Garófano-Gómez, V., & Martínez-Capel, F. (2014). Riparian evapotranspiration modelling: Model description and implementation for predicting vegetation spatial distribution in semi-arid environments. *Ecohydrology*, 7(2), 659–677. doi: <https://doi.org/10.1002/eco.1387>
- Gondwe, B. R. N. (2010). *Exploration, Modelling and Management of Groundwater-dependent Ecosystems in Karst - the Sian Ka'an Case Study, Yucatan, Mexico* (Tesis Doctoral). Technical University of Denmark, Kongens Lyngby.
- Gondwe, B. R. N., Lerer, S., Stisen, S., Marín, L., Rebollo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G., & Bauer-Gottwein, P. (2010). Hydrogeology of the south-eastern Yucatan Peninsula: New insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing. *Journal of Hydrology*, 389(1-2), 1-17. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.04.044>
- Gong, L., Xu, C., Chen, D., Halldin, S., & Chen, Y. D. (2006). Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 620-629. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.027>
- González-Herrera, R., Sánchez-y-Pinto, I., & Gamboa-Vargas, J. (2002). Groundwater-flow modeling in the Yucatan karstic aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 10(5), 539–552. doi: <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0216-6>
- Hernández-Escobedo, Q., Fernández-García, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2017). Solar resource assessment for rural electrification and industrial development in the Yucatan Peninsula (Mexico). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 1550-1561. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.200>
- Jaeger, L., & Kessler, A. (1997). Twenty years of heat and water balance climatology at the Hartheim pine forest, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 84(1-2), 25-36. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(96\)02372-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(96)02372-6)

- Jiang, L., & Islam, S. (2001). Estimation of surface evaporation map over Southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resources Research*, 37(2), 329-340. doi: <https://doi.org/10.1029/2000WR900255>
- Matin, M. A., & Bourque, C. P. A. (2013). Assessing spatiotemporal variation in actual evapotranspiration for semi-arid watersheds in northwest China: Evaluation of two complementary-based methods. *Journal of Hydrology*, 486, 455-465. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.014>
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234.
- Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2011). Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 115(8), 1781-1800. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>
- Quej, V. H., Almorox, J., Ibrakhimov, M., & Saito, L. (2016). Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatan Peninsula, Mexico. *Energy Conversion and Management*, 110, 448-456. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.050>
- Ramoelo, A., Majazi, N., Mathieu, R., Jovanovic, N., Nickless, A., & Dzikiti, S. (2014). Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African savanna, South Africa. *Remote Sensing*, 6(8), 7406-7423. doi: <https://doi.org/10.3390/rs6087406>
- Rich, P. M., Dubayah, R., Hetrick, W. A., & Saving, S. C. (1994). Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, 524-529.
- Rivas, D., Saleme-Vila, S., Ortega-Izaguirre, R., Chalé-Lara, R., & Caballero-Briones, F. (2013). A climatological estimate of incident solar energy in Tamaulipas, northeastern Mexico. *Renew Energy*, 60, 293-301. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.05.022>
- Roa-Fuentes, L. L., Hidalgo, C., Etchevers, J. D., & Campo, J. (2013). The effects of precipitation regime on soil carbon pools on the Yucatan Peninsula. *Journal of Tropical Ecology*, 29(5), 463-466. doi: <https://doi.org/10.1017/S0266467413000552>
- Salazar M. D. (2018). *Evaluación del producto MOD16 de evapotranspiración global a partir de flujos eddy covarianza en un cafetal de la región de montaña del centro de Veracruz* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 44.
- Smith, D. M., & Allen, S. J. (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, 47(12), 1833-1844. doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/47.12.1833>
- Sun, Z., Wang, Q., Ouyang, Z., Watanabe, M., Matsushita, B., & Fukushima, T. (2007). Evaluation of MOD16 algorithm using MODIS and ground observational data in winter wheat field in North China Plain. *Hydrological processes*, 21(9), 1196-1206. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.6679>
- Uuh-Sonda, J. M., Gutiérrez-Jurado, H. A., Figueroa-Espinoza, B., & Méndez-Barroso, L. A. (2018). On the ecohydrology of the Yucatan Peninsula: Evapotranspiration and carbon intake dynamics across an eco-climatic gradient. *Hydrological Processes*, 32(18), 2806-2828. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.13230>
- Velpuri, N. M., Senay, G.B., Singh, R. K., Bohms, S., & Verdin, J. P. (2013). A comprehensive evaluation of two MODIS evapotranspiration products over the conterminous United States: Using point and gridded FLUXNET and water balance ET. *Remote Sensing of Environment*, 139, 35-49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.013>
- Villasuso, M. J., & Ramos, R. M. (2000). A conceptual model of the aquifer of the Yucatán Peninsula. *International Institute for Applied Systems Analysis Iiasa RR*, 14, 120-139.
- Whitehead, D., Kelliher, F. M., Lane, P. M., & Pollock, D. S. (2008). Seasonal Partitioning of Evaporation Between Trees and Understorey in a Widely Spaced Pinus radiata Stand. *Journal of Applied Ecology*, 31(3), 528-542.
- Wilson, K. B., Hanson, P. J., Mulholland, P. J., Baldocchi, D. D., & Wullschleger, S. D. (2001). A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: Sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106(2), 153-168. doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00199-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00199-4)