



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales

COMPARACIÓN ENTRE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DERIVADA DE SATÉLITES Y DATOS DE FLUJOS TURBULENTOS EN UN ECOSISTEMA SEMIÁRIDO

Tesis Individual

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Licenciado en Biología

Presenta:

Ingrid Reséndiz Palacios

Dirigido por:

Mónica Cervantes Jimenez

Mónica Cervantes Jimenez
Directora

Firma

Israel Gustavo Carrillo Angeles
Sinodal

Firma

Monica Elisa Queijeiro Bolaños
Sinodal

Firma

Samuel Villareal Rodriguez
Sinodal

Firma

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
12 de Noviembre de 2024
México

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

COMPARACIÓN ENTRE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DERIVADA DE SATÉLITES Y DATOS DE FLUJOS TURBULENTOS EN UN ECOSISTEMA SEMIÁRIDO

Ingrid Reséndiz Palacios, Mónica Cervantes Jimenez, Israel Gustavo Carrillo Angeles, Mónica Elisa Quejeiro Bolaños, Samuel Villarreal Rodríguez.

Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro

Resumen

La evapotranspiración es un proceso físico-biológico que ocurre como conjunto de dos etapas en el ciclo hidrológico ocurriendo de manera simultánea (evaporación del agua desde el suelo y las superficies foliares; y la transpiración de la vegetación). Este proceso ha permitido evaluar la pérdida de agua principalmente en cultivos, para estandarizar el riego en terrenos agrícolas. Sin embargo, la dinámica de flujo de agua ha sido poco explorada en ecosistemas áridos y semiáridos, vulnerables ante factores como el cambio climático, el cambio de uso de suelo y la desertificación. Una de las formas que existen de medir los valores de evapotranspiración a nivel ecosistema es mediante las estaciones micro meteorológicas de flujos turbulentos, estos observatorios de monitoreo permiten medir variables climatológicas y biofísicas, y se consideran observaciones de la evapotranspiración real. A su vez, existen productos satelitales como MODIS y GLEAM capaces de estimar algunas de éstas variables de manera remota, con una amplia gama de variabilidad espacio temporal. En este estudio se busca analizar la capacidad de dos productos satelitales para estimar valores de evapotranspiración en un ecosistema semiárido en comparación con observaciones de una torre de flujos turbulentos.

Palabras clave: ciclo hidrológico, semiárido, MODIS, GLEAM, sequía.

Summary

Evapotranspiration is a physical–biological process that occurs as a combination of two simultaneous stages within the hydrological cycle: the evaporation of water from the soil and leaf surfaces, and the transpiration of vegetation. This process has been widely used to assess water loss, mainly in crops, in order to standardize irrigation in agricultural lands. However, the dynamics of water flux have been less explored in arid and semi-arid ecosystems, which are particularly vulnerable to factors such as climate change, land-use change, and desertification. One of the ways to measure evapotranspiration values at the ecosystem level is through micrometeorological stations based on turbulent fluxes. These monitoring observatories allow for the measurement of climatological and biophysical variables and are considered direct observations of actual evapotranspiration. Additionally, there are satellite products such as MODIS and GLEAM, which are capable of remotely estimating some of these variables across a wide range of spatial and temporal scales. This study aims to analyze the ability of two satellite products to estimate evapotranspiration values in a semi-arid ecosystem, in comparison with observations from a turbulent flux tower.

Keywords: hydrological cycle, semiarid, MODIS, GLEAM, drought

ÍNDICE

DEDICATORIAS	5
AGRADECIMIENTOS	6
INTRODUCCIÓN	7
ANTECEDENTES.....	15
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	17
OBJETIVO GENERAL	18
OBJETIVOS PARTICULARES.....	18
MÉTODOS	18
DISCUSIÓN.....	27
CONCLUSIÓN.....	31
BIBLIOGRAFÍA	33

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Evaporación para la torre de Flujos Turbulentos (ET_FT) y del producto satelital MODIS (ET_MOD16A2) para los años 2017 y 2018 cada 8 días.....	22
FIGURA 2. Datos de evapotranspiración acumulada mensual del producto satelital MOD16A2 de MODIS (ET_MOD16A2) y de la Torre de Flujos Turbulentos (ET_FT) para los años 2017-2018.....	23
FIGURA 3. Regresión RMA de evapotranspiración (ET_MOD16A2) y de Flujos Turbulentos (ET_FT) para A) Datos Mensuales y B) Datos Acumulados cada 8 días.....	24
FIGURA 4. Datos de evapotranspiración mensuales para el producto satelital GLEAM en los años 2017-2018.....	25
FIGURA 5. Evapotranspiración diaria de la Torre de Flujos Turbulentos vs el Producto Satelital GLEAM para los años 2017-2018	25
FIGURA 6. Regresión RMA de evapotranspiración estimada por GLEAM y la Torre de Flujos Turbulentos (ET_FT) para A) Datos Mensuales y B) Datos Acumulados diarios	26

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a las personas que han estado conmigo en cada paso del camino, por que sin ellas, esto no hubiera sido posible. A mis pilares más grandes, mi hermana, mi tía, mi abuela, mi mamá, y el amor de mi vida, Gerson. De ti mamá, he aprendido que la fuerza no nace, se crea. Que no importa lo que esté enfrente, que si un huracán se avecina, siempre se mantiene uno en pie, que incluso en los días mas oscuros, hay luz. De ti abuela, he tenido un ejemplo de templanza, bondad y terquedad, que si bien no siempre es positiva, me a ayudado a aferrarme a mis sueños, a mis objetivos y a ser la persona que soy hoy.

Tía, gracias por nunca dejarme sola, no importa las veces que estuviste en desacuerdo, no importa la cantidad de veces que me sabias equivocada, nunca me desalentaste, siempre creiste en mí y lo sigues haciendo, aún cuando yo no lo hago.

Sisterna, no cabe tanto que quisiera decirte, y tanto que agradecerte, por que aunque eres menor que yo, muchas veces yo recibí los regaños de ti, gracias por ser siempre mi mayor fan. La que siempre está, la primera en decirme “si tu saltas, yo salto”, mi persona, por que no solo eres mi hermana, eres mi mejor amiga. Gracias por que ante cada caída, me abrazas, me cantas, y me avientas de nuevo al mundo.

Ger, hoy quiero que sepas, que ésta tesis, y mi carrera, hoy no serian posibles sin ti. Tu me enseñaste que aunque no me quiera levantar, se sigue, que aunque duela, se avanza, que aunque sea difícil, se hace, que rendirse nunca es una opción, que si ya di mi 100%, siempre puedo dar más. Que para ser mejor, solo necesito hacerlo y creer en mí. Gracias por siempre creer en mí, por siempre impulsarme a ser la mejor versión de mi, y esa versión de mi, es la que escribió esta tesis, a base de fallar, rendirme y levantarme, de ser mejor, de hacerlo mejor. Gracias.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a la Dra. Monica Cervantes Jimenez, por aceptar ser mi tutora en el camino académico y por aceptar dirigir mi tesis, gracias por ser la primera en creer en mi y siempre decirme “Tu puedes”.

Dr. Israel Gustavo Carrillo Angeles, gracias por enseñarme que no hay pregunta tonta, que cada duda, me acerca más al conocimiento, gracias por ser pilar de mi educación y por aceptar también asesorar mi trabajo.

Gracias Dra. Monica Elisa Queijeiro Bolaños, por enseñarme que aprender no tiene por qué ser aburrido, por las mejores prácticas de campo y por la forma más bonita de aprender que pude conocer, gracias infinitas por las aportaciones a mi trabajo y por aceptar asesorarlo.

Al doctor Samuel Villareal Rodriguez, agradezco la perspectiva de alguien con una increíble experiencia en el tema de estudio de mi tesis, por aceptar asesorarlo, y por sus invaluable aportaciones.

Dr. Jesus Luna Cozar, un millón de gracias se quedarían cortas, hoy este trabajo no existiría si no hubiera creído en mí, si no me hubiera dado esa oportunidad, si no me hubiera obligado a despertar y recordar que estoy en éste camino de ciencia por una razón. Simplemente, gracias.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por formarme desde el Bachillerato y siempre ser mi segundo hogar.

A la Facultad de Ciencias Naturales, por servir como medio para mi aprendizaje y conocimiento.

Gracias

INTRODUCCIÓN

El ciclo hidrológico es un proceso que ocurre en la tierra, donde el agua interacciona de manera física y biológica con los ecosistemas. Los ecosistemas son el conjunto de interacciones entre las diferentes especies que existen en la Tierra y las condiciones abióticas que determinan su funcionamiento y relaciones entre las especies y el entorno. La función de los ecosistemas depende de procesos biológicos como: el ciclo del agua, los ciclos biogeoquímicos, el flujo de energía y la dinámica entre las comunidades (CONABIO, 2025).

En los ecosistemas, el agua pasa de líquido a estado gaseoso, en su movimiento entre la biósfera y la atmósfera. El movimiento desde la biósfera hasta la atmósfera pasando por la vegetación, se llama evapotranspiración. La evapotranspiración (ET) es un proceso crucial en los ecosistemas que involucra tanto la evaporación del agua desde las superficies del suelo y distintos cuerpos superficiales de agua (ríos, lagos, océano), así como por la transpiración de las plantas. Juntas, estas dos formas de pérdida de agua del sistema terrestre desempeñan un papel fundamental en los ciclos hídricos y en la regulación de la temperatura (Allen et al., 2006).

La ET es un proceso ecosistémico que se presenta gracias al continuo entre el suelo-planta-atmósfera (Maderrey et al., 2001), involucrando una serie de interacciones entre los componentes del sistema terrestre: el suelo, las plantas y la atmósfera. La primera etapa del proceso de evapotranspiración ocurre en el suelo, donde el agua presente en la superficie se evapora directamente hacia la atmósfera debido a la energía solar (Brutsaert, 1982). La tasa de esta evaporación depende de varios factores, como la humedad del suelo, la temperatura del aire, la humedad relativa de la atmósfera, el déficit de vapor de presión, la turbulencia del viento, la radiación solar y la presencia de vegetación que pueda afectar la cantidad de agua que llega a la atmósfera. El siguiente paso en el movimiento de agua por el continuo, es la transpiración de las plantas, mediante la cual liberan agua hacia la atmósfera a través de sus estomas. El agua se mueve desde las raíces de la planta (donde se absorbe del suelo) hacia los tejidos vasculares, y luego es liberada en forma de vapor de agua a través de los estomas en las hojas (McNaughton y Jarvis, 1991). La transpiración está influenciada por varios factores, como la cantidad de agua disponible en el suelo, la apertura de

los estomas, las condiciones ambientales (temperatura, déficit de presión de vapor, velocidad del viento, etc.) y la regulación fisiológica de las plantas (Allen *et al.*, 2006). El agua que es transpirada desde las plantas y evaporada desde el suelo se mezcla con el aire circundante y contribuye a la humedad atmosférica. Este vapor de agua se eleva en la atmósfera y puede formar nubes si las condiciones son favorables, contribuyendo a la precipitación (Ehleringer *et al.*, 1997).

A nivel de ecosistema, la ET es determinante para entender el balance hídrico, la productividad primaria y la dinámica de los nutrientes en los suelos. De manera general en los ecosistemas, el porcentaje de agua que regresa a la atmósfera es cerca del 57% (Ramirez, et al. 2024), pero cada ecosistema se comporta de forma distinta. En ecosistemas áridos y semiáridos, donde las precipitaciones son escasas y la disponibilidad de agua subterránea es limitada, aún hay interrogantes sobre los factores ambientales que controlan la evapotranspiración cuando se presentan condiciones desfasadas de las limitantes de energía y de agua.(Villarreal et al., 2016). En los ecosistemas áridos y semiáridos, la radiación solar y la temperatura alcanzan niveles muy altos, esto incrementa el potencial de evaporación en comparación con otros ecosistemas. Sin embargo, aunque la energía disponible es abundante, la evapotranspiración está fuertemente limitada por la cantidad de agua en la región. Durante la temporada de lluvias, cuando el suelo se humedece, las plantas son capaces de absorber y transpirar el agua disponible, lo que eleva temporalmente la ET. Sin embargo, una vez que la temporada de precipitaciones termina, el suelo se seca, y tanto la evaporación como la transpiración disminuyen, reduciendo así la ET del ecosistema .(Villarreal et al., 2016).

En este contexto, el tipo de vegetación juega un papel fundamental en la regulación del proceso de evapotranspiración. Las especies que habitan en estos entornos, donde el agua es un recurso limitante, han desarrollado diversas adaptaciones para conservarla. Entre ellas destacan la reducción de la transpiración mediante el cierre estomático durante los periodos de calor extremo, la presencia de hojas pequeñas y la formación de raíces profundas que facilitan el acceso a reservas hídricas subterráneas. Estas estrategias permiten optimizar el uso del agua y mantener el equilibrio ecológico del sistema. Además, gracias al avance de las tecnologías para medir la ET, hoy es posible evaluar con mayor precisión la eficiencia en el uso del

agua de estas plantas. Éstas relacionan la cantidad de carbono fijado por la vegetación y la cantidad de agua que retorna a la atmosfera, siendo este un dato relevante para la gestión de la agricultura en zonas semiáridas y permiten comprender mejor cómo responden ante la escasez hídrica (Zhang *et al.*, 2010). Este conocimiento permite la gestión integral del recurso hídrico, ya que la ET influye directamente en la disponibilidad de agua para los ecosistemas, la agricultura, la industria y el consumo humano.

Para poder gestionar los recursos naturales, es indispensable comprender el funcionamiento del ecosistema, sus recursos, ciclos y como la sociedad se relaciona con él (Ramírez *et al.*, 2024). En este sentido, la dinámica hidrosocial, entendida como el conjunto de relaciones entre la sociedad, el agua y el ambiente, permite analizar cómo las actividades humanas afectan la distribución y el uso del recurso hídrico. Por ejemplo, en el Desierto de Atacama, los altos niveles de evapotranspiración, combinados con la baja infiltración de agua, pueden contribuir a procesos de desertificación, alterando el equilibrio ecológico y la dinámica hidrosocial de la región (Sellers *et al.*, 1997). Por ello, la cuantificación precisa de la ET es esencial para la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos, la agricultura y la restauración de hábitats naturales (Schulze, 2000).

Existen diferentes métodos para estimar y medir la ET. Los más tradicionales involucran lisímetros y el balance hídrico. El uso de tecnologías avanzadas como los sensores remotos y los sistemas Eddy Covariance, facilita la toma de decisiones en términos de políticas de conservación, manejo del agua y prevención de la desertificación. Sin embargo, aunque la información generada por algunos sensores remotos son de acceso libre, tienen una amplia incertidumbre debido a la resolución de los instrumentos o la precisión de las variables que alimentan los modelos. Aún así, estos avances son especialmente importantes en contextos de cambio climático, donde las alteraciones en los patrones de precipitación pueden modificar el equilibrio hídrico en los ecosistemas (Pérez *et al.*, 2016).

Métodos para medir evapotranspiración

Dado lo complejo de las variables requeridas para medir ET, existen diferentes métodos que permiten estimarla: 1) De forma indirecta, mediante modelos y estimaciones basadas en datos satelitales o meteorológicos y 2) Por medio de mediciones directas in situ (Domingo et al., 2002)

1) Directos

a. Gravimétrico

Dentro de los métodos reales o directos para medir la evapotranspiración (ET) se encuentran los sistemas de medición físicos, los cuales buscan cuantificar de forma tangible el flujo de agua que se transfiere desde el suelo y las plantas hacia la atmósfera. Uno de los más utilizados es el método gravimétrico o gravitatorio, que consiste en determinar la humedad del suelo a través del pesado de muestras húmedas y secas. Para ello, se toman varias muestras de suelo en diferentes puntos y profundidades dentro de una parcela, las cuales se pesan antes y después del secado en horno, calculando así el contenido de agua a partir de la diferencia de masa. La comparación entre mediciones permite estimar la cantidad de agua que se ha perdido por evapotranspiración. Sin embargo, debido a la gran variabilidad espacial de los suelos en los ecosistemas áridos y semiáridos, este método requiere un alto número de muestras y un trabajo de campo exhaustivo, lo que lo convierte en una técnica tardada, costosa y poco viable para estimar la ET a escala de ecosistema (Palacios-Vélez *et al.*, 2011).

b. Flujos turbulentos

El sistema de flujos turbulentos (FT, Eddy Covariance), consiste en una estación micro-meteorológica de alta precisión capaz de medir de manera directa los flujos turbulentos para calor, humedad, y CO₂ entre la superficie de la biósfera y la atmósfera. Es a partir del balance de energía que se calcula la tasa de ET, en particular, se deriva de los valores horarios o de la integración de mediciones del flujo de calor latente (LE). Este flujo describe la energía usada en el proceso de evaporación, transpiración o ET (Burba, 2013).

Las variables meteorológicas que se ven involucradas en la medición de los flujos son: velocidad del viento, temperatura, humedad y radiación solar, medidas en un

punto fijo. Estas fluctuaciones se relacionan con los flujos verticales de calor, humedad y CO₂, y para obtener el flujo turbulento de la variable de interés, se multiplica la covarianza entre las fluctuaciones de la velocidad del viento contra las de la variable a medir. Para la medición de variables se hace uso de sensores de alta frecuencia como lo son el anemómetro sónico y el analizador de gases infrarrojo; con el cálculo de la covarianza entre la velocidad del viento (medida en tres direcciones), la humedad específica, la temperatura del aire, y la concentración de CO₂. La medición final pasa por un proceso de ajuste debido a que la instrumentación y turbulencia no estacionaria pueden generar sesgos (Burba, 2013).

c. Bowen-Ratio

Este método se basa en el balance de energía superficial para estimar la ET a partir de la relación entre el flujo de calor sensible, que se refiere a la energía transferida a un objeto donde este aumenta su temperatura, pero sin afectar su estructura; y el flujo de calor latente, donde se cambiará la fase de la sustancia, dependiendo de la energía que se le aplica (Bowen, 1926). Este método utiliza sensores para medir la diferencia de temperatura y humedad en dos niveles de altura sobre la superficie, lo que permite calcular la relación de Bowen (β), definida como la relación entre el flujo de calor sensible y de calor latente. Con esta relación y el balance de energía superficial, se puede estimar la ET mediante la ecuación (Ohmura, 1982):

$$ET = \frac{Rn - G}{1 + \beta}$$

Donde Rn es la radiación neta, es decir, la energía que entra al sistema terrestre en forma de radiación solar y la que sale en forma de radiación térmica o calor, emitido por la superficie, G es el flujo de calor del suelo que corresponde a la energía térmica que se transfiere a través del suelo por unidad de tiempo, generando una diferencia de temperatura entre la superficie y el interior del suelo, β es la relación Bowen, que expresa la proporción entre el flujo de calor sensible y el latente. De esta manera es posible estimar como se distribuye la energía disponible entre el calentamiento del aire y la evaporación del agua.

Debido a su simplicidad y a que no requiere medición directa del flujo de vapor, este método es ampliamente utilizado en estudios de ecosistemas y agricultura para monitorear la pérdida de agua a nivel de paisaje bajo diferentes condiciones climáticas.

2) Indirectos (Modelos y estimaciones)

Los métodos indirectos utilizan datos meteorológicos o satelitales para estimar la ET. Algunos de los modelos tradicionales son los semiempíricos, que son aquellos que combinan principios físicos y teóricos y relaciones empíricas derivadas de observaciones experimentales y ajustes estadísticos: Thornthwaite (Thornthwaite, 1951), Makkink (Makkink, 1957), Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972) y Penman-Monteith (Monteith, 1965). Todos estos métodos usan diferentes variables meteorológicas, que es la principal diferencia entre ellos. Thornthwaite no considera la radiación, el viento o la humedad, Makkink no incluye viento ni humedad por lo que subestima la ET en regiones secas, Priestley-Taylor requiere un ajuste del coeficiente α . Y por último Penman-Monteith usa una alta variedad de datos meteorológicos explicados en los párrafos siguientes.

a) Penman-Monteith

El modelo de Penman-Monteith es uno de los métodos más utilizados para estimar la ET debido a su precisión y amplio rango de aplicaciones en diferentes ecosistemas y condiciones climáticas (Jaramillo, 2006; Roman, et al., 2017; Méndez-Vázquez, et al., 2011). Este modelo combina el balance de energía, es decir, como la ET consume parte de la energía en forma de radiación que recibe la superficie de la tierra, es decir, a mayor energía disponible, mayor ET; siempre que haya disponibilidad de agua; y la transferencia de masa, que se refiere al vapor de agua que se pierde hacia la atmósfera, para estimar la ET de referencia (ET_o), es decir, la tasa de evapotranspiración de una superficie vegetal estandarizada (pasto o cultivos de referencia). La ecuación general considera la radiación neta (R_n), el flujo de calor del suelo (G), la diferencia de presión de vapor, la resistencia aerodinámica, la resistencia estomática del cultivo y la temperatura del aire (Allen et al., 1998). La ecuación de Penman-Monteith es ampliamente recomendada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) debido a su capacidad para integrar factores climáticos clave (Allen et al., 2006). El modelo Penman-Monteith se presenta en la siguiente ecuación:

$$ET = \frac{\Delta(Rn - G) + p_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})}$$

Donde Rn es la radiación neta, G es el flujo de calor del suelo, p_a es la densidad del aire, c_p es el calor específico del aire, e_s es la presión de vapor de saturación, e_a es la presión de vapor actual, γ es el calor latente de vaporización del agua, r_a es la resistencia aerodinámica y r_s es la resistencia estomática.

b) Priestley- Taylor

Es un modelo que estima la evapotranspiración potencial en condiciones donde el agua no es un recurso limitante, este modelo es útil en regiones donde la radiación solar es el principal factor que controla la evapotranspiración, especialmente en zonas húmedas o dónde los suelos están bien irrigados. Ésta ecuación esta basada en el equilibrio energético en la superficie de la tierra y asume que ET está dominada por la radiación neta disponible y las características termodinámicas del aire.

$$ET = \alpha * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * (R_n - G)$$

Dónde: α : coeficiente empírico de Priestley-Taylor, generalmente con un valor de 1.26 para condiciones húmedas. Éste varía según las condiciones, Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación en función de la temperatura (kPa/°C), γ es la constante psicrométrica que depende de la presión atmosférica. R_n es la radiación neta en la superficie, y G es el flujo de calor en el suelo (Miralles *et. al*, 2011).

c) Modelos satelitales

La teledetección ofrece un método rentable para estimar la ET a escalas regionales y globales. Se han desarrollado varios modelos, incluyendo el Algoritmo de Balance de Energía Superficial Terrestre (SEBAL), el Balance de Energía Superficial Simplificado Operacional (SSEBop) y otros, que utilizan imágenes de satélite para obtener estimaciones de ET (Zhang *et al.*, 2016; Awada *et al.*, 2021). Estos modelos utilizan

datos de sensores remotos para estimar la ET basándose en principios físicos, como el balance de energía y la relación entre la vegetación y la transpiración.

MODIS, que es un espectrorradiómetro de resolución moderada y se encuentra a bordo de dos satélites del sistema Earth Observing System (EOS) y cuenta con productos como el modelo MOD16 es uno de los más utilizados para estimar la ET a escala global (Salazar-Martínez et al., 2022). Utiliza datos del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de los satélites Terra y Aqua. El producto satelital MOD16A2 de MODIS obtiene datos de evapotranspiración con resolución temporal de 8 días o anual, a través de un algoritmo hecho y adaptado por Cleigman *et. al* 2007. Este algoritmo usa como variables características de la vegetación, el índice de área foliar (LAI) la presión de aire, temperatura de aire, humedad, albedo, fracción de la radiación fotosintéticamente activa (FPAR), el valor de la conductancia en el dosel, y usa la ecuación Penman-Monteith en su algoritmo para estimar el valor de ET

Para los datos meteorológicos se toman variables de datos diarios, mientras que, para la cobertura foliar, albedo, cobertura terrestre, LAI y FPAR, se utilizan datos censados de 8 a 16 días. Una de las variables más importantes que considera MOD16A2 es la conductancia superficial a la transpiración, sin embargo, el modelo no considera la apertura estomática nocturna en zonas de altas temperaturas (Running, et al., 2021). Pero una de las ventajas al obtener estas mediciones, es el acceso a los datos de manera libre y gratuita a través de los productos satelitales de la NASA.

GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam Model) es un satélite cuyo conjunto de algoritmos estiman componentes de evapotranspiración y mide la humedad del suelo en la zona de las raíces. Los datos obtenidos por GLEAM son censados a través de microondas y considera la profundidad óptica de la vegetación. Usando la ecuación Priestley-Taylor como base algorítmica, calcula la evaporación potencial y utiliza variables de radiación neta superficial y temperatura del aire superficial. Este componente satelital utiliza componentes de: transpiración, evaporación del suelo desnudo, pérdida por interceptación, sublimación, evaporación de agua, y es capaz de dar valores para; humedad de suelo superficial y de raíces, evaporación potencial y estrés evaporativo (Miralles *et. al*, 2011).

Si bien el modelo fue pensado para climas tropicales, en 2017 se publica una modificación con ajustes en el algoritmo para su uso de manera global. Estas variables usan tasas de infiltración de agua como una función del gradiente de humedad en el suelo, obteniendo datos de balance hídrico global, validados con mediciones de 91 torres de flujos turbulentos y 2325 sensores de humedad del suelo en diferentes ecosistemas (Miralles et. al, 2025).

El modelo Atmosphere-Land Exchange Inverse (ALEXI) (Anderson *et al.*, 2007) estima la ET a escalas regionales y continentales, utilizando datos de teledetección térmica. El algoritmo de ALEXI se basa en el modelo de balance de energía de dos fuentes (Two-Source Energy Balance, TSEB), que separa la superficie terrestre en dos componentes principales: el dosel vegetal y el suelo desnudo. Este enfoque permite una estimación más precisa de los flujos de energía y, por ende, de la ET.

El modelo emplea observaciones de la temperatura de la superficie terrestre obtenidas de satélites geoestacionarios, como los de la serie GOES. Al analizar las diferencias de LST en intervalos de tiempo específicos, ALEXI infiere los flujos de calor sensible y latente entre la superficie y la atmósfera.

ANTECEDENTES

Cuantificar la ET es fundamental especialmente en ecosistemas áridos y semiáridos donde la disponibilidad de agua es limitada. La medición precisa de la ET es esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos en estas regiones.

El método de flujos turbulentos (FT) mide directamente los flujos de calor latente y sensible entre la superficie terrestre y la atmósfera, proporcionando estimaciones continuas y locales de la ET (Burba, 2013). Sin embargo, su implementación requiere una inversión significativa en equipos y es adecuada principalmente para áreas homogéneas y relativamente planas. En contraste, los modelos basados en sensores remotos utilizan datos satelitales para estimar la ET en escalas espaciales más amplias, aunque a menudo dependen de modelos semiempíricos que pueden introducir incertidumbre.

Una comparación entre la ET obtenida con Flujos Turbulentos y la evapotranspiración estimada con métodos semiempíricos (Prestley-Taylor, Penman-Monteith,

Thornthwaite) realizada en el matorral xerófilo de Bernal, Querétaro, mostró una correlación moderada ($R^2 = 0.6$), indicando que estos últimos tienden a subestimar la ET en condiciones semiáridas (Hernández y Sosa 2020). Esto sugiere que los métodos teóricos pueden no capturar adecuadamente la dinámica hídrica en estos ecosistemas, donde la disponibilidad de agua es altamente variable y la vegetación ha desarrollado adaptaciones específicas para sobrevivir en condiciones de estrés hídrico.

Aunque cada vez es mayor la accesibilidad a los modelos con sensores remotos, estos han demostrado un buen desempeño en diversas regiones (Senkondo *et al.*, 2019; Ha *et al.*, 2015), su aplicación en zonas áridas y semiáridas presenta desafíos debido a la escasez de vegetación y la heterogeneidad del suelo, lo que puede afectar la precisión de las estimaciones (Du, *et al.*, 2020; Burchard-Levine *et al.*, 2021).

En este sentido, Salazar-Martínez *et al.* (2022) proponen de manera integrada el uso de MOD16 y ALEXI como sensores satelitales para el cálculo de ET y usa el método de FT para estandarizar y comparar estos valores obtenidos vía remota en regiones que se encuentran en latitudes bajas (hacia el ecuador) , sin embargo, sugiere consideraciones al usar FT como método de referencia para datos de ET en ecosistemas donde no hay un cierre en el balance de energía, es decir, la suma de los flujos de energía, no es igual a la radiación neta. Otro de los trabajos que explora el uso de productos satelitales es el de Trezza *et al.* (2013), donde se utilizan las bandas de reflectancia del satélite MODIS y de LANDSAT aplicando el algoritmo de balance de energía METRIC, para calcular la ET en el Rio Grande en Nuevo México. Ellos encontraron que el algoritmo para estimar ET aplicado a MODIS es similar a su aplicación en LANDSAT, pero con una baja resolución espacial.

El desempeño de MOD16 para la estimación de ET, se ha evaluado contra las mediciones de FT en chaparral, matorral subtropical y matorral abierto del Noroeste de México. El mejor ajuste ($R^2 = 0.86$) se dio en el sitio de Rayón con matorral subtropical. Aunque el ajuste fue bueno en este sitio, MOD16 no es capaz de reconocer el súbito cambio en la ET cuando hay eventos de lluvia en ninguno de los sitios. Para sitios con matorral abierto, MOD16A2 subestima las mediciones de FT (Aguilar *et al.*, 2018).

Degano *et al.*, (2021), compara la serie de tiempo de 2017 hasta 2021 de datos de MOD16A2 contra la ET estimada con el método Penman- Monteith aplicado a estaciones meteorológicas de la pampa Argentina, encontrando una buena correlación entre los dos métodos ($R^2=0.86$).

Aunque los modelos basados en sensores remotos ofrecen la ventaja de cubrir áreas amplias y proporcionar estimaciones de ET en diferentes escalas espaciales y temporales, su precisión en ecosistemas áridos y semiáridos puede ser limitada. El método de FT, aunque más costoso y limitado en cobertura espacial, proporciona mediciones directas y precisas de la ET en estos entornos. Por lo tanto, una combinación de ambos enfoques o la evaluación de los productos satelitales con FT, puede ofrecer estimaciones más precisas y útiles para la gestión de los recursos hídricos en regiones áridas y semiáridas.

En este estudio se compararán los datos de ET obtenidos con un sistema de Flujos turbulentos y dos productos satelitales que ofrecen modelos de ET espaciotemporales para determinar qué tanto representan la ET que ocurre en un ecosistema semiárido de Querétaro.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Las estimaciones de evapotranspiración (ET) obtenidas a partir de los productos satelitales MOD16A2 y GLEAM coinciden con las mediciones in situ derivadas del método de flujos turbulentos?

Dado que el producto MOD16A2 utiliza como base para su algoritmo la ecuación Penman-Monteith, la cual ofrece una mejor adaptabilidad para calcular ET en diferentes ecosistemas al integrar variables meteorológicas y parámetros biofísicos, se espera que este producto satelital muestre una mayor correspondencia con las mediciones de la torre de flujos turbulentos en comparación con el producto GLEAM,

OBJETIVO GENERAL

Obtener mediciones de evapotranspiración de dos productos satelitales para compararlas con las obtenidas por el método de flujos turbulentos en un ecosistema semiárido de Querétaro para saber que tan precisas son las estimaciones de ET calculadas por los productos satelitales.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Desarrollar un código para extraer datos de evapotranspiración de satélites de uso libre y verificar su calidad.
- Homogeneizar las bases de datos para establecer un punto de comparación espacio temporal.
- Explorar regresiones tipo RMA para establecer la relación entre los datos satelitales con respecto a las mediciones de flujos de ET reales.

MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El área de estudio conocida como Bernal, está ubicada en el municipio de Ezequiel Montes en el estado de Querétaro (20.717° N, -99.941° W), a 2050 m s.n. m. y colinda con el municipio de Tolimán. El uso de suelo está destinado principalmente a la agricultura en un porcentaje del 56% y una zona urbana del 4.4% cuya actividad económica principal está destinada al turismo (Aguirre-Díaz et al., 2013). Esta localidad se encuentra en el eje neovolcánico y está formado por sierras y llanuras (INEGI, 2010). Se caracteriza por ser un valle poco profundo que presenta vientos cargados de humedad que soplan hacia el oeste desde el Golfo de México, sin embargo, la Sierra Gorda Queretana, ubicada a 60 km al este de Bernal, arroja una sombra de lluvia sobre el área (Segerstrom, 1961). La temperatura presenta un rango general de 16-20° C y una precipitación anual entre los 400-600 mm lo que representa un clima dominante semiseco templado y semiseco semicálido (García, 2004). Los vientos predominantes presentan orientación del este y noreste.

Datos

Se descargaron datos de evapotranspiración del producto satelital MODIS, MOD16A2, del periodo 2017-2019, correspondiente a las mediciones in situ de la estación Bernal. Se consultó la disponibilidad espacio-temporal de productos satelitales de evapotranspiración en el portal de la NASA (<https://lpdaac.usgs.gov/>). Se usó la aplicación AppEEARS <https://appeears.earthdatacloud.nasa.gov/> para extraer los datos puntuales del producto MOD16A2 que estima la Evapotranspiración con una resolución espacial de 500 m y temporal de 8 días. Los valores de ET del producto MOD16A2 no se filtraron por calidad, ya que los filtros de calidad están aplicados al producto base del LAI/FPAR (MOD15A2H), con esto descartamos píxeles que hayan tenido errores por fallas en el sensor o presencia de ruido atmosférico (Running, et. al., 2019). Se aplicó una función de interpolación tipo spline en el software R para obtener datos diarios. Ésta función se utilizó para ajustar curvas suaves en datos que no son lineales y en R, está se construye a partir de polinomios, los cuales se unen en puntos conocidos como nudos; al usar esta función continua y suave que describe la relación de las variables. Así mismo, se hicieron tablas dinámicas en Excel para obtener datos acumulados mensuales y cada 8 días para los años 2017-2018.

Se descargaron datos de evapotranspiración del satélite GLEAM en la página de libre acceso: <https://www.gleam.eu/>. Este satélite estima los datos de evapotranspiración diaria a una resolución espacial de 0.25 por 0.25 grados, lo que equivale aproximadamente a 27 kilómetros por lado, es decir, alrededor de 729 kilómetros cuadrados por píxel.. A su vez, el satélite solo distingue tres fuentes de evaporación: Suelo desnudo, vegetación corta y vegetación con dosel alto. Aunque GLEAM considera aguas abiertas, no considera ríos ni lagos en su estimación (Miralles et. al, 2011).

El modelo final de evapotranspiración está conformado por tres módulos para su cálculo, en el primero se calculan datos de evaporación de lluvia que son interceptados en el dosel. El segundo módulo describe el agua que se distribuye a partir de la precipitación entrante y la nieve en zonas de raíz. El tercer módulo utiliza

las condiciones de estrés obtenidas en función de la disponibilidad de agua en zona de raíces y la dinámica vegetativa. La evapotranspiración de cada uno de los componentes es calculado a través de la ecuación Priestley-Taylor. A través de un código en R, se extrapolaron datos de evapotranspiración diarios para los años 2017-2018 (Miralles et. al, 2011).

Los datos de la torre Flujos turbulentos se midieron a una altura de 6 metros con los siguientes instrumentos: Biomet system (LI-COR Biosciences, USA), para medir los flujos de agua y dióxido de carbono utilizando un analizador de circuito abierto IRGASON-EC-150, un anemómetro sónico CSAT3 y un higrómetro de criptón KH20; conectados a un CR3000, que funge como registrador de datos, en una torre de flujos turbulentos, recibe las señales de los instrumentos y los convierte en datos digitales (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EE. UU.). La humedad relativa, y temperatura del aire se midieron con una sonda HMP155A (Vaisala Corporation, Helsinki, Finlandia), la radiación neta se obtuvo a través con un radiómetro NR-Lite2 (Kipp and Zonen BV Delft, Países Bajos) y se midió la radiación fotosintética activa (PAR) con un sensor cuántico (SKP215; Skye Instruments, Llandrindod Wells, Reino Unido). Las mediciones del flujo de calor del suelo se implementaron con cuatro placas HFP01SC auto calibradas a 80 mm de profundidad y en cuatro posiciones representativas del paisaje (Hukseflux Thermal Sensors BV, Delft, Países Bajos). Tres sondas de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) (CS616) midieron el contenido volumétrico de agua en el suelo instaladas verticalmente, y dos juegos de sondas TCAV (termopar de suelo promedio) midieron la temperatura a 60 y 40 mm de profundidad de las placas HFP01SC (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EE.UU.). Se instaló un pluviómetro TE525 (Texas Electronics, Dallas, TX, EE. UU.) a 1,2 m de altura y a 3 m de la torre. Todas estas variables meteorológicas se midieron cada 5 s y los valores promedio se almacenaron cada 30 min, las precipitaciones se acumularon durante el mismo intervalo de tiempo. El paquete EddyPro (LI-COR Biosciences, EE. UU.) calculó los flujos de calor sensible (H) y latente (LE), esta información se obtuvo de los periodos 2017-2018 por Guevara et al. (2021). Se analizaron los datos cada 30 min para explorar la variabilidad temporal y se calcularon datos del acumulado diario y mensual.

Se eliminaron los valores negativos de ET en la base de datos de registros de flujos turbulentos que se obtuvieron cada 30 minutos, filtrando los datos para buscar cuales eran realmente consensación (que ocurren en la noche, con alta turbulencia y cuando $TDEW > T_{AIR}$). Solo encontramos 3 datos por lo que decidimos remover los datos negativos de ET atribuyendolo a errores en la instrumentación o condiciones de baja turbulencia. Se conservó el 58% de los registros de la base de datos original.

Análisis estadístico

Para comparar la similitud entre los datos obtenidos del producto MOD16A2 y de la torre de Flujos Turbulentos, se generó una base de datos acumulandolos diarios y cada 8 días. Se aplicaron modelos de regresión RMA (Reduced Major Axis). Éste tipo de regresión permite hacer un ajuste en la regresión simple bajo la premisa de que las variables tienen errores de medición, y que además, una es independiente de la otra, por lo que el comportamiento de una, no afecta a la otra. (Sokal and Rohlf 1981). Se decidió utilizar este tipo de regresión ya que al observar los datos graficos para la torre de flujos turbulentos, se encontró periodos donde la ET no fue registrada, a su vez, los satelites aún presentan deficiencias en la estimación de ET en regiones semi áridas. A diferencia de la regresión OLS(regresión lineal simple por mínimos cuadrados ordinarios), que asume que la variable independiente se mide sin error y en la que se minimiza las distancias verticales entre los puntos y la línea ajustada, asumiendo error en Y y una respuesta de la variable Y, respecto al comportamiento de X; la regresión RMA minimiza las distancias perpendiculares a la linea de ajuste, permitiendo una relación más simétrica entre X y Y.

En la regresión OLS los parámetros de pendiente y ordenada, permiten la comprobación de hipótesis comprobando ya sea una relación significativa lineal entre las variables X y Y, así mismo asume que la variable X fue medida sin error, mientras que Y, cambia respecto a X, pero fue medida con error. En este tipo de regresión una prueba de t basada en el valor de r; podemos aceptar o rechazar la hipótesis al comprobar si existe una relación lineal entre las variables, es decir, una responde a la otra. (Zar, 2010; Montgomery & Runger, 2018). Mientras, en una regresión RMA, las pruebas de hipótesis tienen parametros que no se estiman mediante cuadrados mínimos, en este tipo de regresión, una variable, no responde a la otra, por lo cual

no se puede evaluar directamente si la pendiente difiere de cero con una prueba de t, sin embargo, si puede usarse la correlación de Pearson (r) entre las variables como indicador del grado de asociación, pues la pendiente de RMA depende de r (Sokal & Rohlf, 1981; Legendre, 2018; Warton & Weber, 2002).

Las líneas de regresión permitieron evaluar cuantitativamente el rendimiento del producto MOD16A2 al establecer la relación entre los valores estimados por el satélite y las mediciones in situ obtenidas por la torre de flujos turbulento. (Willmott, 1982; Velpuri et al., 2013; McCabe et al., 2016). Así mismo, se hicieron gráficas de las regresiones en SigmaPlot para visualizar los puntos en donde coinciden los datos de la torre contra los obtenidos del producto satelital MOD16A2 (Salazar-Martinez et al., 2022). Se hizo el mismo procedimiento para comparar los datos para los años 2017-2018, entre la torre de Flujos turbulentos y GLEAM, sin embargo, en este caso, se acumularon los datos de manera diaria y mensual y se graficaron usando el programa SigmaPlot para evaluar diferencias o puntos de coincidencias entre los datos de la torre y GLEAM.

Se evaluó la concordancia de los dos satélites con los datos de Flujos turbulentos usando el coeficiente de determinación R^2 .

RESULTADOS

En la figura 1 se muestra la serie de tiempo de los datos de ET acumulados cada 8 días para el satélite MODIS (ET_MOD16A2) y la torre de flujos turbulentos (ET_FT)

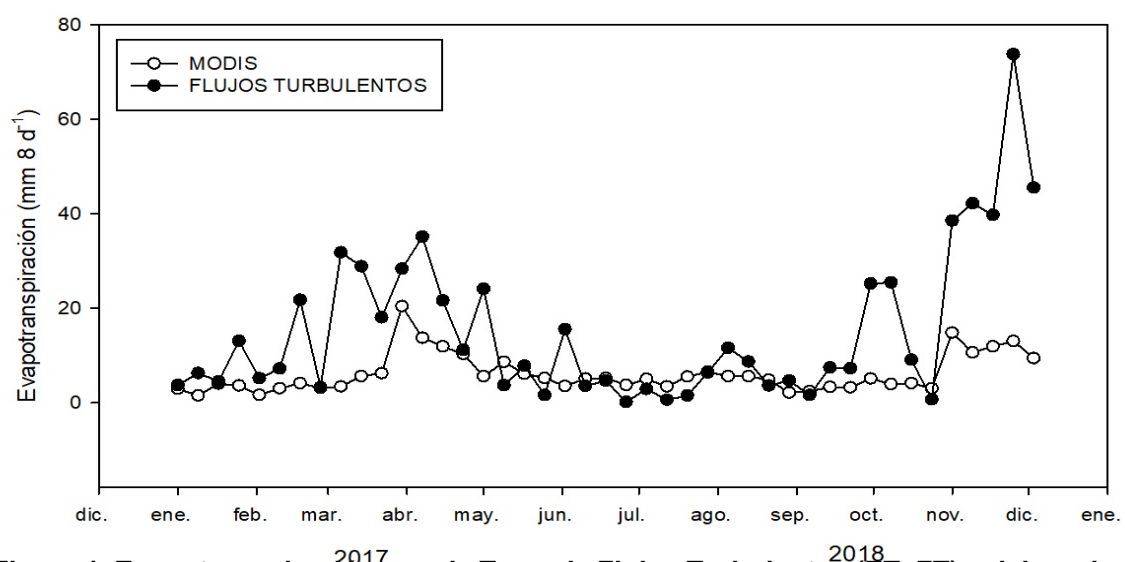


Figura 1. Evapotranspiración para la Torre de Flujos Turbulentos (ET_FT) y del producto MOD16A2 (ET_MOD16A2) para los años 2017 y 2018 cada 8 días.

para los años 2017 y 2018. En ambos años la ET aumenta en los meses de mayo a septiembre, coincidiendo con la temporada de lluvia y baja a partir del mes de octubre.

En general, los valores de FT son más sensibles a los cambios comparados con ET_MOD16A2. Esto se refleja cuando se registran lluvias y la ET aumenta de manera casi inmediata en los registros de datos. En la torre de FT no se cuentan con datos de precipitación medida con pluviómetro, pero la precipitación acumulada anual extraída de la base de datos Daymet (Thornton et al., 2022) en 2017 y 2018 fue de 428 y 206 mm, respectivamente. Mientras que la ET de FT para los mismos años fue de 286.9 y 342 mm año⁻¹. La ET acumulada anual de MOD16A fue de 136 y 169 mm año⁻¹ para 2017 y 2018 respectivamente. Es evidente que existen periodos de datos sin registrar en el sistema de FT, sobre todo en la temporada de lluvia de 2017, esto se debe a una falla en la instrumentación del sistema.

La ET acumulada mensual para MOD16A2 y FT se muestra en la figura 2.

En la Figura 3 se presentan las regresiones RMA entre la evapotranspiración estimada por el producto MOD16A2 (ET_MOD16A2) y la obtenida mediante la torre de flujos turbulentos (ET_FT), considerando los datos mensuales (A) y los acumulados cada 8 días (B). Se formó para los datos mensuales la ecuación $y = 0.381478x + 5.529309$, y un valor de R^2 de 0.07736. La pendiente con valor de 0.38 indica que los valores de ET_MOD16A2 son superiores a los registrados por la torre, es decir, el producto satelital tiende a sobreestimar la evapotranspiración respecto a las mediciones in situ. El bajo coeficiente de determinación R^2 refleja una baja concordancia lineal entre ambos conjuntos. Por otro lado, para los datos acumulados cada 8 días, la ecuación fue $y = 3.916362x - 8.847372$ y un valor de R^2 de 0.417851 reflejando una subestimación del producto para los valores de ET de acuerdo al valor de la pendiente, y observamos una mejor correlación entre los datos respecto a los valores mensuales.

Se observa que los datos de ET_FT son negativos para el mes de junio de 2018, esto se puede deberse al proceso de advección que sucede sobre todo en zonas áridas y semiáridas (Su et al., 2016), en el que el flujo horizontal de aire transporta humedad.

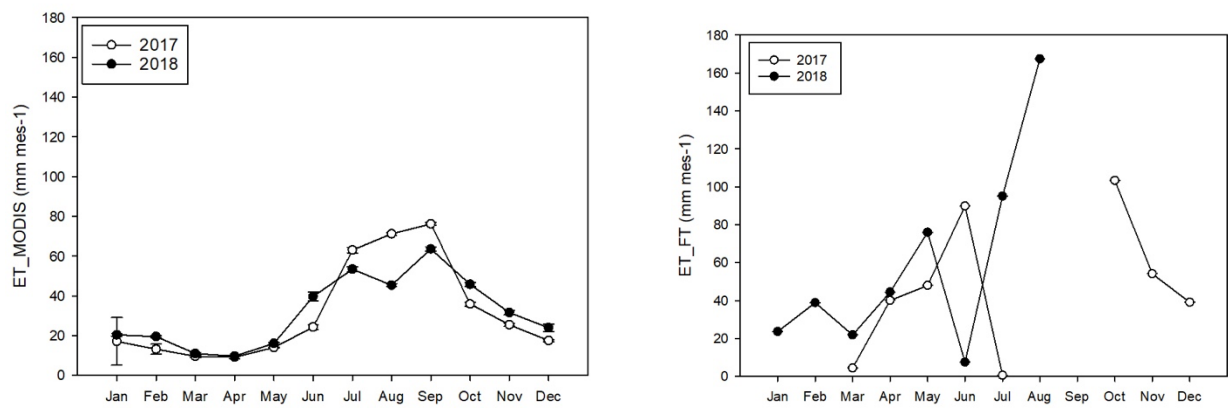


Figura 2. Datos de Evapotranspiración acumulada mensual del producto satelital MOD16A2 de MODIS (ET_MOD16A2) y de Torre de Flujos turbulentos (ET_FT) para los años 2017-2018.

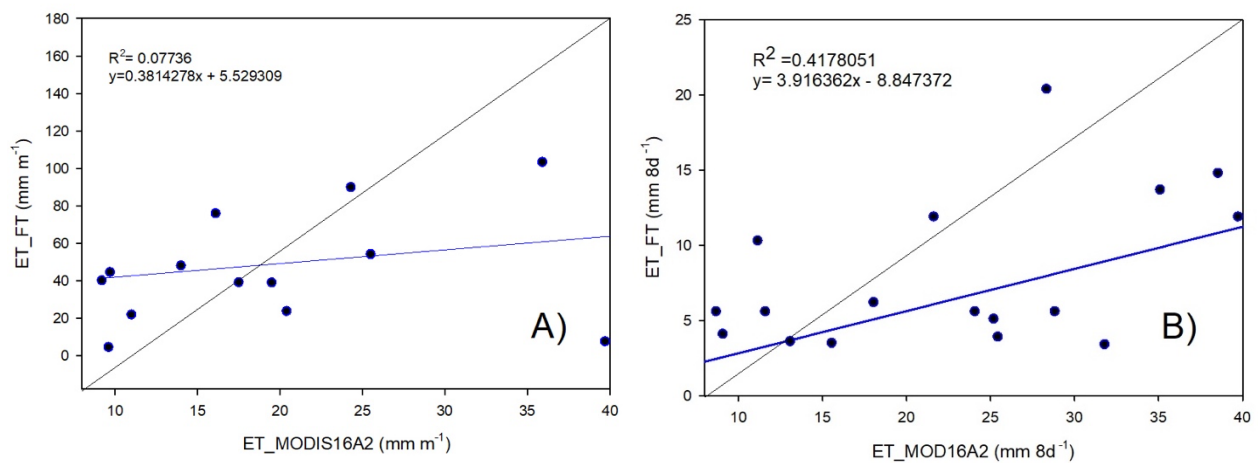


Figura 3. Regresión RMA de Evapotranspiración MODIS (ET_MOD16A2) y de Flujos Turbulentos (ET_FT) para A) datos mensuales y B) datos acumulados cada 8 días. La línea azul representa la regresión y la negra la relación 1:1.

Los datos para evapotranspiración de GLEAM para 2017-2018 se acumularon diariamente y se graficaron. Durante los meses de julio a septiembre hay un incremento en los patrones de ET que coinciden con el temporal de lluvias en el Estado de Querétaro (Figura 4).

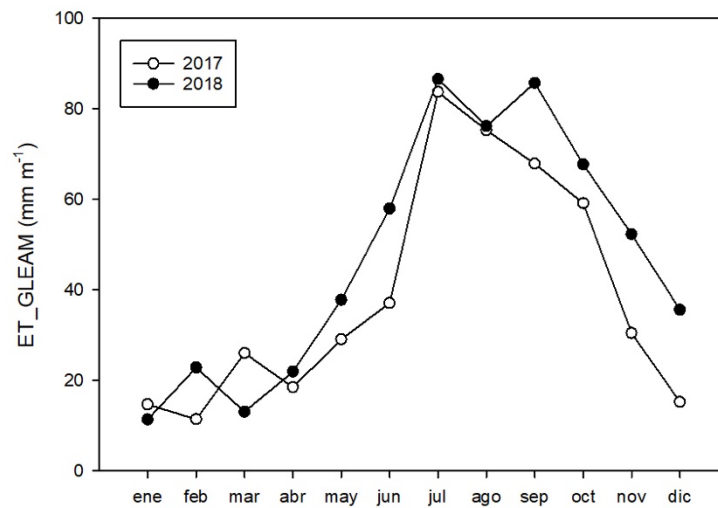


Figura 4. Datos de Evapotranspiración mensuales para el producto satelital GLEAM en los años 2017-2018.

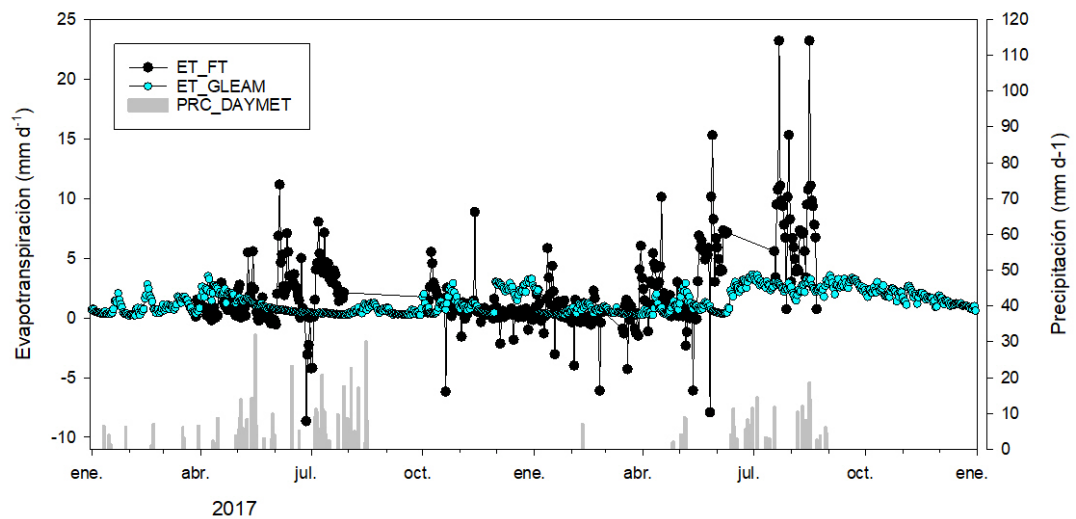


Figura 5. Evapotranspiración diaria de Torre de Flujos Turbulentos vs Producto satelital GLEAM para los años 2017-2018

Para los valores de evapotranspiración registrados por la torre y acumulados de manera diaria, se observa un mayor rango en la variabilidad en los valores de ET, comprobando la sensibilidad del instrumento ante el registro de la ET. Sin embargo, para GLEAM los datos fluctúan entre los 0 y -5 mm d⁻¹. Dado que la torre de flujos turbulentos dejó de registrar datos en algunos meses durante agosto a octubre 2017

y Julio 2018, se decidió eliminar estos datos de las graficas para evitar sesgo en el cálculo de la regresión (Figura 5).

De los datos mensuales para los años 2017-2018 de ET_GLEAM vs ET_FT, se hizo una regresión de tipo RMA, se obtuvieron los valores de la pendiente y se formó la ecuación $y = 0.57426x + 16.881$ y un valor de R^2 de 0.022919. Éstos datos sugieren que no hay correlación entre los patrones de ET registrados, sin embargo, de manera gráfica podemos observar que la mayoría de los puntos tienden hacia la pendiente (Figura 6).

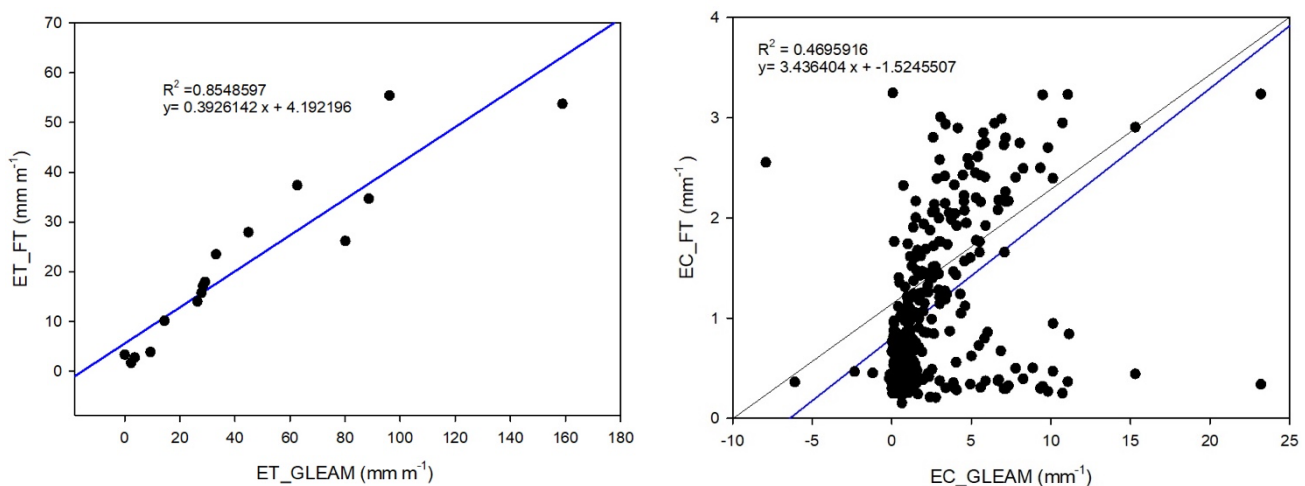


Figura 6. Regresión RMA de Evapotranspiración GLEAM y de Flujos Turbulentos (ET_FT) para A) datos mensuales y B) datos acumulados diarios. La línea azul representa la regresión y la negra la relación 1:1.

Cuando se hizo de manera gráfica la regresión de tipo RMA de GLEAM vs la Torre de Flujos Turbulentos, se observó una tendencia de los datos a agruparse en el centro pero sin tendencia a la pendiente y con los datos dispersos y sin aparente correlación. Mismo que se comprueba con el resultado de R^2 que es de 0.47 con una ecuación para la pendiente de forma $y = 3.436404x - 1.5245507$ (Figura 6).

DISCUSIÓN

Para poder conocer el movimiento de agua en le región de Bernal, se compararon dos productos satelitales que midieran ET con la Torre de Flujos Turbulentos. Los dos productos satelitales subestiman de manera general los valores de evapotranspiración comparados con lo registrado en la torre de flujos turbulentos en el ecosistema semiárido de Bernal.

El producto de ET de GLEAM resultó ajustarse mejor a los datos mensuales de FT ($R^2=0.85$). El algoritmo del producto GLEAM, calcula la ET potencial utilizando 14 variables entre las que se encuentran: la radiación neta superficial, temperatura del aire en la superficie, velocidad del viento, índice de área foliar, el déficit de presión de vapor, la humedad del suelo en zona de raíces y la humedad superficial. La resolución espacial de GLEAM para los datos en este estudio, fue de 0.25° , sin embargo, para julio de 2024, está resolución cambió a 0.1° y aumenta los datos registrados desde 1980 hasta 2023 (Gunston y Batchelor, 1983; Miralles *et al.*, 2016; Miralles *et al.* En revisión), aunque esta base de datos no fue utilizada para este trabajo. Las observaciones de las variables son de diferentes fuentes de sensores remotos: productos de precipitación de reanálisis, sensores de microondas e imágenes satelitales (Martens *et al.*, 2017).

En ecosistemas tropicales con precipitaciones entre $1250\text{-}2500\text{ mm año}^{-1}$, Pipatsitee *et al.* (2023), encontraron que GLEAM subestima los datos de evapotranspiración. Así mismo, Xu *et al.* 2024, también un resultado similar para ecosistemas áridos y semiáridos de China, con un sesgo relativo de -59% comprueba que la ecuación de Priestley-Taylor de GLEAM no puede ser aplicable a ecosistemas globales pues está diseñado para climas húmedos (debido a la parametrización del parámetro alfa) y las variables del algoritmo de GLEAM no son adecuadas en regiones secas y semiáridas, donde se ha visto que este parámetro es mayor (alrededor de 1.35 ± 0.05) (Priestley-Taylor, 1972). Además, el algoritmo de GLEAM se basa en datos meteorológicos de la reanálisis de ERA-Interim (CITA GLEAM). Según Xu *et al.*, 2024, en zonas áridas esta base de datos representa bien la temperatura del aire, pero subestima la

radiación neta. Estos dos factores podrían representar una fuente en la subestimación de modelo GLEAM comparado con datos de ET de FT en el sitio de Bernal.

Los valores de ET estimados por MODIS se ajustaron pobremente a los valores de ET de FT, tanto mensual ($R^2=0.08$) como acumulado cada 8 días ($R^2=0.42$) en el sitio de Bernal. El producto satelital MOD16A2 calcula datos de evapotranspiración a través de un algoritmo que considera 6 capas de datos sobre los ecosistemas terrestres: Calor latente, potencial de evapotranspiración, potencial de calor latente y se toman a 500 m. A nivel global, para validar la eficiencia del algoritmo del producto satelital, se estudiaron los datos de 46 torres de flujos turbulentos del año 2000 al año 2010, obteniéndose una media de error en el cálculo de ET del 24% en del 10 al 30% de las observaciones (Earth Science Data Systems, 2025). El algoritmo está basado en el modelo de estimación de evapotranspiración de Penman-Monteith, sin embargo, no considera ecosistemas donde las temperaturas son muy altas y el metabolismo de plantas con apertura estomática nocturna. MODIS clasifica el bioma en Bernal como pastizales basado en que su cobertura está dominada por plantas herbáceas anuales. Una de las características que asume MOD16 es que los biomas no sufren cambios fisiológicos (Running, et al., 2021).

Los productos satelitales utilizados en éste estudio requieren una reconsideración en el algoritmo que se usa para la interpretación de los datos sensados, Degano y colaboradores durante una serie de trabajos dedicados a la evaluación del producto MOD16A2, desde 2017 y hasta 2021 encuentran que el producto satelital sobreestima valores de evapotranspiración, y hacen un ajuste al algoritmo logrando un modelo que estima de manera mucho más eficiente los valores de ET, y donde el resultado de R^2 es de 0.83, lo que indica una alta correlación de los datos de MOD16A2 y los datos locales medidos por la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA) en Argentina (Degano et. al 2021). El trabajo de Degano abre las posibilidades a una reevaluación del algoritmo de MOD16A2 y en este trabajo evidenciamos que es necesario para regiones semiáridas, valorar la inclusión de variables que estos productos satelitales no consideran como la apertura estomática nocturna .

Así como Degano, otros autores como Duhan et. al. 2021 encontraron que MODIS sobreestima ET, en este caso, el producto satelital hizo una sobreestimación de ET en una región semiárida en la India.

En el estudio de Salazar-Martínez et al. (2002), se evaluó el desempeño para medir ET de los productos satelitales MOD16, ALEXI y GLEAM, en diferentes coberturas vegetales en zonas tropicales y subtropicales. MOD16 mostró un mejor desempeño en la sabana y pastizales con valores de R^2 en un intervalo de 0.6 a 0.7, lo cual indica que existe una correlación moderada para evapotranspiración contra los datos de la torre de flujos turbulentos. Para tratar de mejorar la precisión del producto y la correlación, aplicaron una corrección por el cierre de balance de energía, lo que permitió reducir el sesgo porcentual pero no la correlación entre los datos de MOD16 contra la torre. A su vez, GLEAM tuvo un mejor desempeño y una mejor correlación. Esto se atribuye a que GLEAM incluye un modelo de balance hídrico que simula tres capas de suelo, permitiendo que se pueda tener mejor representación en cuanto al estrés hídrico en los ecosistemas, así mismo, utiliza la ecuación de Priestley-Taylor, que reduce los errores en cuanto variables meteorológicas, y una variable importante a considerar que da mejor desempeño para GLEAM es que ajusta el coeficiente α en función de la altura de la vegetación, y modela la interceptación de lluvia en el dosel.

A través de la bibliografía consultada, los productos satelitales, sobreestiman o subestiman valores de ET de FT porque no consideran la gran variabilidad que presentan los ecosistemas y los algoritmos requieren ser ajustados (Burba and Anderson, 2010).

En este proyecto nos enfocamos en la importancia de las mediciones de flujos de energía y su relación en el ciclo del agua, y cómo esto influye en la evapotranspiración en ecosistemas áridos y semiáridos. La relevancia en conocer como es la dinámica del ciclo de agua en ellos y los instrumentos que se requieren para su medición. La evaluación de productos satelitales como MODIS y GLEAM fue fundamental ya que nos permitió analizar datos de evapotranspiración recolectados de manera remota y comparar la eficiencia de estos productos contra los datos obtenidos de la torre de flujos turbulentos en un ecosistema con poca disponibilidad de agua.

La zona estudiada, es un área donde en los últimos años ha crecido la actividad ganadera, agrícola y turística, por lo que el estrés generado por la degradación del ecosistema y sus organismos, afectan de manera directa la dinámica del balance hídrico, la economía de la región y la sustentabilidad de los recursos bióticos y abióticos de la región. El estado de Querétaro representa un ecosistema variado debido a su composición geográfica donde forma parte del eje neovolcánico transversal, Sierra Madre Oriental y el Altiplano Mexicano, esto implica también una gran variedad climática y vegetativa por lo que para resumir el tipo de vegetación en el estado, se habla de un ecosistema semidesértico, en el, prevalecen plantas con metabolismo tipo CAM (Metabolismo ácido de las crasuláceas) (Zamudio, et. al. 1992).

Los organismos vegetales que son capaces de presentar este tipo de metabolismo se encuentran en sitios con poca disponibilidad de agua. En el proceso de fotosíntesis CAM (Metabolismo ácido de las crasuláceas), las plantas fijan CO_2 principalmente en la noche y posteriormente durante el día, éste es asimilado en los cloroplastos por el ciclo C_3 . Es el CO_2 lo que da un punto de partida en la medición remota del cierre estomático nocturno, sin embargo, para medir esta molécula, se requieren métodos como 1) Titulación del tejido macerado, 2) Análisis enzimático y 3) Medición de asimilación de CO_2 (Andrade et. al. 2007). Si bien, los primeros dos son métodos más precisos, resulta imposible medir CO_2 en un ecosistema bajo estas metodologías. Por lo que medir la asimilación de CO_2 es la mejor forma de observar en un ecosistema como se mueve ésta molécula y por ende, su correlación directa con la apertura y cierre estomáticos.

Los organismos en los ecosistemas se ven expuestos a un gran conjunto de condiciones bióticas y abióticas, el agua es un recurso indispensable para existencia de la vida como la conocemos. El conocimiento de la dinámica del agua, sus patrones de precipitación y evapotranspiración (es decir, ganancia y pérdida de agua), representan una gran influencia en las dinámicas sobre fenología de las plantas y presentando una gran influencia en la productividad primaria y el flujo de CO_2 en el suelo (Briones, et. al. 2018).

Es importante que los productos satelitales como GLEAM y MODIS que son de libre acceso y que continuamente están haciendo ajustes en sus algoritmos, añadan variables a medir, o hagan ajustes en las variables que se miden tomando en cuenta las condiciones climáticas de cada región sensada. El cambio climático podría dificultar estos supuestos debido a los cambios drásticos en temperatura, lluvias atemporales o torrenciales, sequías, etc. Por lo que es importante que los productos satelitales estén adaptados para considerar todos los escenarios. En este trabajo ambos productos tomaban distintas variables para obtener valores de ET, un ajuste en el algoritmo de MOD16, que fue el producto satelital que obtuvo mejor correlación en los datos, así como la inclusión de variables como el modelo de balance hídrico de GLEAM, podrían mejorar la capacidad de MOD16 para obtener valores de ET más precisos y con mayor correlación a la torre de Flujos turbulentos.

CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se realizó una comparativa entre mediciones de evapotranspiración de una torre de flujos turbulentos y dos productos satelitales: MODIS y GLEAM. Cada producto satelital está basado en el cálculo de evapotranspiración a través de ecuaciones que permiten su cálculo. En el caso de MODIS, se usa Penman-Montheith y en el caso de GLEAM se usa Priestley-Taylor. Cada ecuación requiere utilizar diferentes variables para el cálculo de ET, lo que hace que las mediciones entre los productos, varíen significativamente.

GLEAM, de los satélites evaluados en este trabajo, resultó ser el producto con más variables sensadas, por lo que podría dar información más acertada sobre los datos de ET calculados a través del algoritmo, sin embargo, es un producto que no está diseñado para condiciones climáticas extremas como en ambientes semi-áridos. A pesar de esto, es un producto que se ha enfocado en actualizar la forma de sensor y procesar los datos, es posible que futuras actualizaciones del producto, permitan una estimación más acertada de datos de ET para la zona estudiada.

Es evidente que ninguno de los productos satelitales considera variables importantes para regiones semiáridas, pues fueron creadas con diferentes objetivos. Aunque

existen actualizaciones para ambos y actualmente fueron ajustados para medir datos de ET de manera global, sigue existiendo un sesgo al no considerar todos los tipos de vegetación, como lo son las plantas con metabolismo CAM; y condiciones de sequía. Sin embargo, en este trabajo se evidenció también, que las torres de flujos turbulentos tampoco consideran las condiciones nocturnas indispensables en el ecosistema estudiado.

Dentro de los resultados recolectados de la torre, hay meses con datos faltantes, lo que podría explicar la gran diferencia entre los acumulados mensuales que presentan más correlación entre los datos, a comparación de los datos diarios o cada 8 días. Sin embargo, el sesgo y falta de correlación también están ligadas de manera directa con la forma y las variables que toman en cuenta los productos satelitales para el cálculo de ET. A pesar de que se creía que MODIS tendría mejor correlación de los datos de ET estimados, respecto a la torre de FT, resultó ser GLEAM la que demostró mejor correlación, esto resulta esclarecedor para futuras referencias y uso del satélite en trabajos que busquen conocer de manera más acertiva el movimiento de agua en regiones semiáridas.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, A., Flores, H., Crespo, G., Marín, M., Campos, I., & Calera, A. (2018). Performance assessment of MOD16 in evapotranspiration evaluation in Northwestern Mexico. *Water*. <https://doi.org/10.3390/W10070901>

Aguirre-Díaz, G. J., Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., Labarthe-Hernández, G., López-Martínez, M., Bellon, H., & Nieto-Obregón, J. (2013). Geologic setting of the Peña de Bernal Natural Monument, Querétaro, México: An endogenous volcanic dome. *Geosphere*, 9, 557–571. <https://doi.org/10.1130/GES00843.1>

Ahmadi, S. H., & Fooladmand, H. R. (2008). Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: A case study, south of Iran. *Irrigation Science*, 26, 303–312.

Allen, G. R., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO, Roma.

Andrade, J. L., Barrera, E. D., Reyes-García, C., Ricalde, M. F., Vargas-Soto, G., & Cervera, J. C. (2007). El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (81), 37–50.

AppEEARS Team. (2023). Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEEARS) (Ver. 3.39). NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, USA. <https://appeears.earthdatacloud.nasa.gov>

Bowen, I. S. (1926). The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 27(6), 779–787.

Briones, O., Búrquez, A., Martínez-Yrizar, A., Pavón, N., & Perroni, Y. (2018). Biomasa y productividad en las zonas áridas mexicanas. *Madera y Bosques*, 24(spe), e2401898. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401898>

Brutsaert, W. (1982). *Evaporation into the atmosphere: Theory, history, and applications*. Springer.

Burba, G., & Anderson, D. (2010). *A brief practical guide to eddy covariance flux measurements: Principles and workflow examples for scientific and industrial applications*. Li-Cor Biosciences.

Chao, X., Wang, W., Hu, Y., & Liu, Y. (2024). Evaluation of ERA5, ERA5-Land, GLDAS-2.1, and GLEAM potential evapotranspiration data over mainland China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 51, 101651. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101651>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (s.f.). *Procesos ecológicos*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/procesose>

Degano, M. F., Rivas, R. E., Carmona, F., Faramiñán, A. M. G., & Olivera Rodríguez, P. S. (2021). Calibración del producto de evapotranspiración potencial “MOD16A2” para la Región Pampeana Argentina.

Domingo, F., Villagarcía, L., & Were, A. (2002). ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: Estado actual y evolución.

Earth Science Data Systems, NASA. (2025). MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006 [Dataset]. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-mod16a2-006>

Ehleringer, J. R., Hall, A. E., & Farquhar, G. D. (1997). Impact of climate change on agriculture: Evaluation of adaptation strategies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89(3), 105–123.

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM.

Guevara-Escobar, A., González-Sosa, E., Cervantes-Jiménez, M., Suzán-Azpiri, H., Queijeiro-Bolaños, M. E., Carrillo-Ángeles, I. G., & Cambrón-Sandoval, V. H. (2021). Machine learning estimates of Eddy Covariance carbon flux in a scrub in the Mexican Highland. *Biogeosciences*, 18(2), 367–392. <https://doi.org/10.5194/bg-18-367-2021>

Harper, W. V. (2014). Reduced Major Axis Regression: Teaching alternatives to least squares. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Teaching Statistics (ICOTS9, July 2014)*. <http://iase-web.org>

Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. Academic Press.

INEGI. (2023). Aspectos geográficos de Querétaro: Compendio 2022. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/...>

Jiang, S., Wei, L., Ren, L., Xu, C.-Y., Zhong, F., Wang, M., Zhang, L., Yuan, F., & Liu, Y. (2021). Utility of integrated IMERG precipitation and GLEAM potential evapotranspiration products for drought monitoring over mainland China. *Atmospheric Research*, 247, 105141. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105141>

Li, Z., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., & Zhang, X. (2009). A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data. *Sensors*, 9(5), 3801–3853. <https://doi.org/10.3390/s90503801>

Maderey Rascón, L. E., & Jiménez Román, A. (2001). Alteración del ciclo hidrológico en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma por la transferencia de agua a la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, (45), 24–38.

Martens, B., Miralles, D. G., Lievens, H., van der Schalie, R., de Jeu, R. A. M., Fernández-Prieto, D., Beck, H. E., Dorigo, W. A., & Verhoest, N. E. C. (2017). GLEAM

v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, 10(5), 1903–1925. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1903-2017>

McNaughton, K. G., & Jarvis, P. G. (1991). Predictions of transpiration and evaporation from forest canopies. In *Forest ecosystems: Concepts and management* (pp. 457–479). Elsevier.

Miralles, D. G., Bonte, O., Koppa, A., Baez-Villanueva, O. M., Tronquo, E., Zhong, F., Beck, H. E., Hulsman, P., Dorigo, W. A., Verhoest, N. E. C., & Haghdoust, S. (2025). GLEAM4: Global land evaporation and soil moisture dataset at 0.1° resolution from 1980 to near present. *Scientific Data*, 12, 416.

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. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 453–469. <https://doi.org/10.5194/hess-15-453-2011>

Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2018). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (7th ed.). John Wiley & Sons.

Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. In *Symposia of the Society for Experimental Biology* (Vol. 19, pp. 205–234). Cambridge University Press.

Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W. (2019). MOD16A2/MOD16A2GF/MYD16A2/MYD16A2GF Version 6: Global Terrestrial Evapotranspiration Product (User Guide). NASA LP DAAC. https://lpdaac.usgs.gov/documents/494/MOD16_User_Guide_V6.pdf

Ohmura, A. (1982). Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. *Journal of Applied Meteorology*, 21(4), 595–598.

Palacios-Vélez, E., Palacios-Sánchez, J. E., & Palacios-Sánchez, L. A. (2011). *Agricultura de riego asistida con satélites*.

Pérez, E. O., & González Sosa, E. (2020). Comparación de la evapotranspiración obtenida por el método de Eddy covariance y métodos semiempíricos en una zona semiárida. *PCT*, 3(6), 92–104. <https://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas/article/view/246>

Pérez, J., González, M., & Sánchez, S. (2016). Impact of climate change on evapotranspiration in arid and semi-arid ecosystems. *Environmental Hydrology*, 34(2), 89–103.

Pipatsitee, P., Ninsawat, S., Tripathi, N. K., Shanmugam, M., & Chitsutti, P. (2023). Estimating daily potential evapotranspiration using GNSS-based precipitable water vapor. *Heliyon*, 9, e17747. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17747>

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.

Ramírez, M., de la Peña-Domene, M., Ascanio, A., Rivas, L., Ochoa-García, H., & Varela, C. (2024). El agua en el semiárido de Jalisco: Sequía, vulnerabilidad, cambio climático y derechos humanos. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792017000100041

Román Román, L., Díaz Valdés, T., López Avendaño, J. E., Watts, C., Cruz Bautista, F., Rodríguez Casas, J., & Rodríguez, J. C. (2017). Evapotranspiración del cultivo de sandía (*Citrullus lanatus*) en la costa de Hermosillo, Sonora, México. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 41–49.

Running, S., Mu, Q., & Zhao, M. (2021). MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.061>

Salazar-Martínez, D., Holwerda, F., Holmes, T., Yépez, E. A., Hain, C., Alvarado-Barrientos, M. S., Ángeles-Pérez, G., Arredondo-Moreno, T., Delgado-Balbuena, J., Figueroa-Espinoza, B., Garatuza-Payán, J., Del Castillo, E. G., Rodríguez, J., Rojas-

Robles, N. E., Uuh-Sonda, J. M., & Vivoni, E. R. (2022). Evaluation of remote sensing-based evapotranspiration products at low-latitude Eddy covariance sites. *Journal of Hydrology*, 610, 127786. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127786>

Schulze, E. (2000). Evapotranspiration and its importance in the global water cycle. *Water Resources Research*, 36(2), 523–539.

Segerstrom, K. (1961). Geology of the Bernal-Jalpan Area, Estado de Querétaro, Mexico. *Geological Survey Bulletin*, 1104, 19–82.

Sellers, P., Schimel, D., & Randerson, J. (1997). Ecosystem function and structure in arid and semi-arid regions. *Global Change Biology*, 3(5), 391–404.

Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (1981). *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research* (2nd ed.). W. H. Freeman.

Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1951). The role of evapotranspiration in climate. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 3, 16–39.

Trezza, R., Allen, R., & Tasumi, M. (2013). Estimation of actual evapotranspiration along the Middle Rio Grande of New Mexico using MODIS and Landsat imagery with the METRIC model. *Remote Sensing*, 5, 5397–5423. <https://doi.org/10.3390/RS5105397>

Vásquez-Méndez, R., Ventura-Ramos, E. Jr., & Acosta-Gallegos, J. A. (2011). Habilidad de estimación de los métodos de evapotranspiración para una zona semiárida del centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(3), 399–415. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000300008

Velasco, E., Pressley, S. N., Grivicke, R., Allwine, E., Coons, T., Foster, W. M., Jobson, B. T., Westberg, H., Ramos, R., Hernández, F., Molina, L. T., & Lamb, B. (2009). Eddy covariance flux measurements of pollutant gases in urban Mexico City.

Atmospheric Chemistry and Physics, 9(19), 7325–7342. <https://doi.org/10.5194/acp-9-7325-2009>

Villarreal, S., Vargas, R., Yepez, E. A., Acosta, J. S., Castro, A., Escoto-Rodríguez, M., López, E., Martínez-Osuna, J., Rodríguez, J. C., Smith, S. V., Vivoni, E. R., & Watts, C. J. (2016). Contrasting precipitation seasonality influences evapotranspiration dynamics in water-limited shrublands. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(2), 494–508. <https://doi.org/10.1002/2015JG003169>

Warton, D. I., & Weber, N. C. (2002). Common slope tests for bivariate structural relationships. *Biometrical Journal*, 44(2), 161–174. [https://doi.org/10.1002/1521-4036\(200203\)44:2<161::AID-BIMJ161>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1521-4036(200203)44:2<161::AID-BIMJ161>3.0.CO;2-N)

Zamudio, S., Rzedowski, J., Carranza, E., & Calderón de Rzedowski, G. (1992). La vegetación del estado de Querétaro. Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro e Instituto de Ecología, A.C.

Zar, J. H. (2010). *Biostatistical Analysis* (5th ed.). Prentice Hall.

Zhang, K., Kimball, J., & Running, S. (2016). A review of remote sensing-based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3. <https://doi.org/10.1002/wat2.1168>

Zhang, L., Dawes, W., & Walker, G. (2010). Predicting the effects of climate change on evapotranspiration in semi-arid regions. *Journal of Hydrology*, 381(1), 133–146.

Zimmermann, E. (2022). Adaptación del método propuesto por FAO para evaluar la evapotranspiración real en el modelo de simulación hidrológica SHALL. *Cuadernos del CURIHAM*, 28.

