



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TORREÓN
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**ESTIMACIÓN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA UTILIZANDO
ECUACIONES CON LIMITACIÓN DE DATOS EN ZONAS ÁRIDAS**

Tesis que presenta:

OSCAR JAVIER VAZQUEZ REYES

Como requisito para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN IRRIGACIÓN

Director de tesis:

Ph.D. JOSE ERNESTO FRÍAS RAMÍREZ



**Torreón, Coahuila, México
Diciembre, 2019**

Tesis elaborada bajo la supervisión del comité particular de tesis la cual ha sido aprobada y aceptada como requisito para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN IRRIGACIÓN

COMITÉ PARTICULAR

DIRECTOR DE TESIS: _____

PhD. JOSÉ ERNESTO FRÍAS RAMÍREZ

ASESOR: _____

DR. JOSÉ ALFREDO MONTEMAYOR TREJO

ASESOR: _____

DR. JOSÉ ELIGIO SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

Torreón, Coahuila, México

Diciembre 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios mi vida, por permitirme continuar mi carrera, darme fuerza y valor en momentos difíciles y decisivos en mi formación que hasta el día de hoy está llena de experiencias y aprendizajes.

Con gratitud al Instituto Tecnológico de Torreón por la oportunidad de continuar mi preparación académica para la obtención de un grado más en mi formación profesional, así como a todo el plantel académico de posgrado.

Especialmente mencionar al PhD. José Ernesto Frías Ramírez por la confianza, enseñanzas y apoyo para llevar a cabo esta investigación.

Al Dr. Eligio Sánchez y el Dr. José Alfredo Montemayor por asesoría brindada.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico proporcionado para la realización de este trabajo de investigación.

A mi familia que fue el motivo para culminar con este objetivo.

Mencionar también a la Universidad Juárez del Estado de Durango Facultad de Agricultura y Zootecnia, por haber contribuido en este trabajo, especialmente a la Dra. Maribel Navarro quienes facilitaron los datos de la estación climática automática ubicada en este plantel.

DEDICATORIAS

A mis padres por apoyarme siempre, motivarme para superarme cada día y estar conmigo en cada paso que he dado.

A mi esposa Luz Elena Romero porque siempre creyó en mí y me dio su apoyo en los momentos más difíciles de esta etapa con su paciencia y confianza.

A mis hijos Renata y Tadeo, el motor de mi vida, me hicieron fuerte en momentos complicados.

A mis compañeros, e incondicionales amigos: Brenda, Tanaita y Guillermo siempre pude confiar en ellos. Compañeros Aurelio y Antonio, con quienes compartí momentos gratos y con nuevas experiencias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIAS.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	4
1.1.1. Objetivos específicos	4
1.2. Hipótesis	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1. El agua en la agricultura	6
2.1.1. Consumo de agua en cultivos.....	7
2.2.1. Evaporación.....	8
2.2.2. Transpiración	9
2.2.3. Evapotranspiración	10
2.3. Diferentes conceptos de evapotranspiración	11
2.3.1. Evapotranspiración de referencia	11
2.3.2. Evapotranspiración de cultivo bajo condiciones estándar.....	11
2.3.3. Evapotranspiración de cultivo bajo condiciones no estándar	12
2.4. Factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración	12
2.4.1. Radiación solar	12
2.4.2. Temperatura del aire	13
2.4.3. Humedad relativa.....	13
2.4.4. Velocidad del viento	14
2.5. Factores que afectan la evapotranspiración	15
2.5.1. Variables climatológicas.....	15
2.5.2. Clima.....	15
2.5.3. Humedad del suelo	17
2.5.4. Factores de cultivo.....	18

2.5.5. Factores biológicos	19
2.6. Métodos para determinar la evapotranspiración	19
2.6.1. Métodos directos	20
2.6.2. Métodos indirectos.....	21
2.6.3. Métodos climatológicos.....	22
2.6.4. Método de Hargreaves	22
2.6.5. Métodos basados en la ecuación de combinación del balance de energía y de la transferencia turbulenta del vapor de agua	23
2.6.6. Método Penman-Monteith.....	25
2.7. Evapotranspiración con limitación de datos	26
2.8. Punto de rocío	27
2.9. Validación de modelos	27
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1. Área de estudio.....	29
3.2. Determinación de evapotranspiración.....	30
3.2.1. Determinación de evapotranspiración de referencia con datos completos	31
3.2.2. Determinación de evapotranspiración de referencia con limitación de datos	32
a) Rutina de cálculo de cuando no se dispone de la variable de radiación solar	33
3.2.3. Calculo del déficit de presión de vapor (VPD)	35
3.2.4. Presión de vapor a saturación (e_s).....	36
3.2.5. Presión de vapor a saturación (e_s).....	36
a) Rutina de cálculo de presión de vapor actual (e_a).....	37
b) 3.3.7. Rutina de cálculo de presión de vapor actual cuando no existe la variable humedad relativa con temperatura mínima.....	38
c) Rutina de cálculo de presión de vapor actual cuando no existe la variable humedad relativa calculando temperatura de rocío.....	38
d) Rutina de cálculo de presión de vapor actual cuando no existe la variable humedad relativa con el método Penman Monteith temperatura.	39
3.3. Evaluación de ecuaciones	40
3.3.1. Determinación del error relativo absoluto	40

4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1.	Estimación de ETo para el sitio Main Campus	42
4.1.1.	Error relativo	43
4.2.	Estimación de ETo para el sitio Leyendecker.....	45
4.2.1.	Error relativo	46
4.3.	Estimación de ETo para el sitio Artesia	47
4.3.1.	Error relativo	49
4.4.	Estimación de ETo para el sitio Fabián Gracia.....	51
4.4.1.	Error relativo	52
4.5.	Estimación de ETo para el sitio Venecia	53
4.5.1.	Error relativo	55
4.6.	Índice De Concordancia.....	56
5.	CONCLUSIONES.....	58
VI.	LITERATURA CITADA	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos necesarios para estimar ETo por el Método FAO- 56.....	32
Tabla 2. Índice de concordancia (I.A) y eficiencia (EF) en el cálculo de la evapotranspiración para ecuaciones con limitación de datos.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4. 1. Estimaciones de ETo para el sitio Main Campus 2016-2018 con el método FAO-56, limitación de datos, PMT Y la ecuación de ajuste con (T Dew) sin datos de radiación solar y humedad relativa.	43
Figura 4.1.1. Estimación del error relativo de ETo para Main Campus promedio mensual.	44
Figura 4. 2. Estimaciones de ETo para el sitio Leyendecker 2016-2018 con el método FAO-56, limitación de datos, PMT Y la ecuación de ajuste con (T Dew) sin datos de radiación solar y humedad relativa.	46
Figura 4.2.1. Estimación del error relativo de ETo para Leyendecker promedio mensual.	47
Figura 4.3. Estimaciones de ETo para el sitio Artesia 2018 con el método FAO-56, limitación de datos, PMT Y la ecuación de ajuste con (T Dew) sin datos de radiación solar y humedad relativa.	49
Figura 4.3.1. Estimación del error relativo de ETo para Artesia promedio mensual para el año 2018.	50
Figura 4.4. Estimaciones de ETo para el sitio Fabián García 2018 con el método FAO-56, limitación de datos T min, PMT Y la ecuación de ajuste con (T Dew) sin datos de radiación solar y humedad relativa.	52

Figura 4.4.1. Estimación del error relativo de ETo para Fabián García promedio mensual para el año 2018.	53
Figura 4.5. Estimaciones de ETo para el sitio Venecia 2018 con el método FAO-56, limitación de datos T min, PMT Y la ecuación de ajuste con (T Dew) sin datos de radiación solar y humedad relativa.....	55
Figura 4.5.1 Estimación del error relativo de ETo para Venecia promedio mensual para el año 2018.	56

RESUMEN

La evapotranspiración de referencia (ET_o), es el parámetro más importante para estimar el consumo de agua, programar el riego y hacer un uso eficiente del agua.

Actualmente el método Penman-Monteith (FAO 56), es el más usado en el mundo para estimar ET_o, y recomendado por la Organización para la Agricultura y la Alimentación como método estándar.

La principal limitación para su uso es la disponibilidad de los datos climáticos que requiere. Existen rutinas para estimar ET_o cuando se carecen de datos climáticos; con el propósito de estimar ET_o en zona áridas, se evaluó la precisión y aplicabilidad de tres ecuaciones para su estimación con carencia de datos de clima.

Cálculos de ET_o fueron realizados para cinco sitios: Campus Las Cruces de la Universidad Estatal de Nuevo México y sus centros de investigación Leyendecker, Artesia y Fabián García, en Nuevo México, Estados Unidos; así como la Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango en México. Las estimaciones de ET_o se hicieron con datos climáticos completos y con limitación de datos de radiación solar y humedad relativa. La precisión de las ecuaciones, se evaluó mediante el error relativo y el índice de concordancia, considerando como método de referencia el FAO 56, con datos climáticos completos.

Los resultados de esta investigación permiten concluir que las rutinas para calcular evapotranspiración de referencia con limitación de datos, tienen aplicabilidad en zonas semiáridas. Las rutinas más precisas fueron las basadas en temperatura de rocío y Penman-Monteith temperatura

Palabras claves: evapotranspiración de referencia, presión de vapor actual, temperatura de rocío, índice de concordancia.

SUMMARY

Reference evapotranspiration (ET_o), is the most important parameter to estimate water consumption, irrigation scheduling and efficient water use.

Nowadays the FAO-56 Penman-Monteith method is the most used in the world to estimate ET_o, and recommended from the Food and Agriculture Organization as the standard method.

The main limitation to use this method is the availability of the required weather data. There are step by step calculations to estimate ET_o when there is a lack of climate data; with the purpose to estimate the crop water consumption in arid regions, it was evaluated the precision and applicability of three equations to estimate this parameter when there is limited climate data.

Estimates of ET_o were performed for five sites, New Mexico State University main campus and its research centers Leyendecker, Artesia and Fabian Garcia, in New Mexico, USA; as well as the Agriculture and Range Science School of the Juarez University of Durango State in Mexico. The estimates of ET_o were done with all required weather data and with lack of solar radiation and relative humidity data. The precision of the equations was evaluated by using the relative error and the index of agreement, considering as reference the FAO-56 with full weather data.

The results of this research allowed to conclude that the step by step calculations of ET_o with lack of climate data, have applicability in arid zones. The equations with greater precision were the alternatives based on dew point temperature and the Penman Monteith temperature method.

Key words: Reference evapotranspiration, actual pressure vapor, dew point temperature, index of agreement.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el recurso hídrico para su uso en la agricultura es cada vez más limitante debido a la contaminación que se presenta y la disminución en la cantidad de precipitación debido al cambio climático global, con base a las dificultades que enfrenta la humanidad es necesario tener un conocimiento real del balance hídrico de cualquier región en sus diferentes niveles y se logra con una buena estimación de ETo (Rodríguez-Santiago *et al.*, 2012). El uso de agua sin restricciones ha aumentado a nivel global a un ritmo acelerado de más del doble del crecimiento de la población en el siglo XX y dejando muchas regiones sin suministro de un servicio de agua confiable debido al ritmo de desarrollo económico, urbanización y sobre todo la contaminación de zonas áridas y semiáridas (FAO, 2013).

El deterioro de los mantos acuíferos ha comenzado a afectar la producción del norte de México, como la Comarca Lagunera donde el potencial de agua subterránea se constituye por 10 acuíferos la mayoría de estos se encuentran en un entorno de sobreexplotación, con una cantidad mayor de agua extraída que agua recargada, llevando a la extracción del vital líquido cada vez más profunda, generando problemas por contenido de sales (Cervantes, 2006). Representado así una de las regiones en donde el agua es un recurso escaso que limita la actividad económica, debido a la competencia por el agua entre los sectores

consumidores (agricultura de riego por bombeo y gravedad, sector residencial, ganadería e industrias), (García *et al.*, 2006).

Conocer los requerimientos de agua del cultivo es indispensable para realizar una planificación correcta del riego y mejorar la eficiencia de uso del agua, suministrando al cultivo la cantidad de agua suficiente para satisfacer plenamente sus necesidades. Uno de los parámetros más importantes es la evapotranspiración (ET_o), que se define como la pérdida de agua del suelo por dos procesos distintos: a) evaporación del agua contenida en el suelo y b) transpiración del agua contenida en las plantas (Rodríguez, 2012).

Para determinar la evapotranspiración existen métodos directos e indirectos; entre los que destacan los empíricos y semi-empíricos los cuales usan datos meteorológicos, y estos métodos incluyen ecuaciones de balance de energía complejas que requieren un número mayor de variables climatológicas, o ecuaciones simples que usan un mínimo de variables meteorológicas (Hargreaves y Samani, 1985). Actualmente la FAO recomienda el uso del método de Penman-Monteith, también conocido como FAO-56; es el método estándar para estimar la evapotranspiración de referencia usada para la programación de riego, la planificación agrícola o los balances hídricos regionales (Hargreaves y Samani, 1985) ;(Gonzales *et al.*, 2000).

La principal limitante para usar el método FAO56 es la disponibilidad y calidad de los datos climáticos requeridos por el método (Zotarelli, 2010).

Existen rutinas de cálculos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) cuando no se tienen todos los datos requeridos (radiación solar y humedad relativa), (Zotarelli *et al.*, 2010); siendo estas dos variables climáticas las que influyen más en la determinación de ET_o (Pacheco-Tolentino, 2017);); (Allen *et al.*, 2005). (Todorovic *et al.*, 2013), los cuales estiman la radiación solar y la concentración de vapor actual (Zotarelli, 2010); (Todorovic *et al.*, 2013); (Allen *et al.*, 2005). Comúnmente la radiación neta y la concentración de vapor actual se calculan con base a mediciones de temperatura, las diferencias en la evapotranspiración de referencia con limitación de datos climáticos se consideran aceptables en un rango de 3 -10 % Pacheco-Tolentino, (2017). El propósito de esta investigación fue evaluar ecuaciones para determinar evapotranspiración de referencia con limitación de datos utilizando temperaturas mínimas, medias y máximas y su precisión para su utilización en zonas áridas.

1.1. Objetivo general

- Evaluar la precisión y aplicabilidad en la estimación de la evapotranspiración en zonas áridas, por el método FAO 56, mediante el uso de ecuaciones con limitación de datos climáticos.

1.1.1. Objetivos específicos

- Obtener la evapotranspiración de referencia mediante el método FAO-56 con datos climáticos completos considerándose como método de referencia.
- Estimar la evapotranspiración de referencia mediante el método FAO- 56, con limitación de datos y mediante rutinas de cálculo basadas en temperatura mínima, temperatura de rocío.
- Evaluar la aplicabilidad y precisión de la evapotranspiración de referencia obtenida con las ecuaciones de estudio, mediante comparación con el método de referencia.

1.2. Hipótesis

- Es posible estimar la evapotranspiración en zonas áridas con precisión utilizando ecuaciones para datos de clima limitados.
- Al menos una de las ecuaciones utilizadas tiene aplicabilidad en zonas áridas para estimar ETo por FAO 56.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El agua en la agricultura

A nivel mundial, el empleo del agua y su gestión han sido un factor esencial para elevar la productividad de la agricultura y asegurar una producción previsible (FAO, 2002). El agua es esencial para aprovechar el potencial de la tierra y para permitir que las variedades mejoradas tanto de plantas como de animales utilicen plenamente los demás factores de producción que elevan los rendimientos. Al incrementar la productividad, la gestión sostenible del agua contribuye a asegurar una producción mejor tanto para el consumo directo como para el comercio, favoreciendo así la producción de los excedentes económicos necesarios para elevar las economías rurales (FAO, 2015).

Por otra parte, el mayor crecimiento poblacional y económico del país ha ocurrido en las zonas con menor disponibilidad de agua. Así, en el centro y norte del país, donde se tiene 31% de la disponibilidad de agua nacional, se concentra 77% de la población, a diferencia de la zona sureste, en la que 23% de la población cuenta con 69% del recurso disponible (CONAGUA, 2017). La distribución territorial en el país es naturalmente irregular, lo que da como resultado que el uso del agua no se distribuya equitativamente.

La FAO afirmó que existe un alto potencial para ampliar el uso de las tierras agrícolas. Sin embargo, debe considerarse la competencia entre el crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las reservas ambientales y los usos recreativos

de las mismas, pues también se encuentran zonas con difícil acceso o de calidad inferior. Asimismo, como consecuencia de esta competencia, existe una degradación progresiva de los sistemas productivos localizados en tierras y aguas que garantizan la seguridad alimentaria y los medios de vida rurales en el mundo (FAO, 2011).

En los últimos 20 años, la agricultura mexicana creció por abajo del conjunto de la economía. En la década de 1990 (1993-2000) el PIB agropecuario creció 2,7% en promedio anual, y en lo que va del siglo XXI (2000-2011), su aumento ha sido de 1,1% en promedio anual (INEGI, 2013). En periodos iguales, la economía creció 3,6% y 1,8% respectivamente. Comparado con otros países de América Latina, el progreso de la agricultura en México en los últimos diez años ha estado prácticamente por debajo del conjunto de la región, con excepción de Haití, Cuba y Colombia (Gomez-Oliver y Tacuba-Santos, 2017).

2.1.1. Consumo de agua en cultivos

El uso del agua se distribuye desproporcionadamente, ya que la actividad agrícola consume más agua, esto es, 77% del total disponible; el 22% restante se distribuye en otras actividades como el sector público 13% y la industria 9% (Salazar-Moreno *et al.*, 2014).

El proceso de uso del agua por los cultivos tiene dos componentes principales: uno debido a las pérdidas por evaporación del suelo y del cultivo, usualmente llamada evapotranspiración del cultivo (ET_C) y el otro que incluye todas las

pérdidas resultantes de la distribución del agua en el cultivo. Algunas pérdidas de agua son inevitables y son necesarias para mantener el balance de las sales; sin embargo, estas pérdidas son minimizadas con métodos de riego eficientes y con un manejo apropiado del cultivo, (Tanner y Sinclair, 1983; Monteith, 1990; Steduto *et al.*, 2006).

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) es fundamental para la estimación de las necesidades del agua de los cultivos y la consiguiente programación de los riegos. El uso consuntivo está formado por la evapotranspiración más el agua que utilizan las plantas en la formación de sus tejidos durante todo el ciclo y equivale al 1% del agua utilizada aproximadamente, por lo que el consumo total de agua por la planta puede considerarse igual a la evaporación (Berengena y Gavilán, 2005).

2.2. Conceptos relacionados con evapotranspiración

2.2.1. Evaporación

Es el proceso mediante el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se separa de fuentes como la superficie del suelo, la vegetación húmeda, el pavimento, los cuerpos de agua (Zotarelli *et al.*, 2010). Este proceso requiere dos tipos de energía: la radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, (Fernández, 1997). Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es

determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo (Allen *et al.*, 1998).

2.2.2. Transpiración

Se define como el proceso mediante el cual el agua líquida que se encuentra contenida en el espacio intercelulares de los estomas se convierte en vapor de agua y pasa a la atmósfera a través de la apertura de los estomas, cutícula y la epidermis. El agua que absorbe la planta a través de las raíces en su mayor parte es transpirada y sólo un bajo porcentaje es empleado en la actividad fisiológica de la misma (Allen *et al.*, 2005).

La transpiración es básicamente un proceso mediante el cual el agua se evapora de los espacios aéreos en las hojas de la planta. Por lo tanto, está controlada fundamentalmente por los mismos factores que dominan la evaporación, es decir, la radiación solar, temperatura, velocidad del viento, y los gradientes de presión de vapor. Además, la transpiración se ve afectada en alguna medida por el tipo de planta y su densidad. La transpiración ocurre casi en su totalidad en el día bajo la radiación solar. Por la noche, los poros o estomas de las plantas se cierran y un porcentaje muy pequeño de humedad se libera desde la superficie de la planta (Hernández, 2013).

La tasa de transpiración también es influenciada por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo. Diversas clases de plantas pueden tener diversas tasas de transpiración. Por otra parte, no

solamente el tipo de cultivo, sino también su estado de desarrollo, el medio donde se produce y su manejo, deben ser considerados al evaluar la transpiración (Schelsinger y Jasechko, 2014).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y ambos procesos dependen de la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa (es decir, el déficit de presión de vapor) y la velocidad del viento. La tasa de transpiración también está influenciada por las características del cultivo, los aspectos ambientales y las prácticas de cultivo. Diferentes tipos de plantas pueden tener diferentes tasas de transpiración. No solo se debe considerar el tipo de cultivo, sino también el desarrollo del cultivo, el medio ambiente y el manejo al evaluar la transpiración. Por ejemplo, cuando el cultivo es pequeño, el agua se pierde predominantemente por la evaporación del suelo debido a que la superficie cubre poco de la superficie del suelo, pero una vez que el cultivo está bien desarrollado y cubre completamente el suelo, la transpiración se convierte en el proceso principal (Allen *et al.*, 1998).

2.2.3. Evapotranspiración

La evapotranspiración se define como la pérdida de agua hacia la superficie mediante la combinación de dos procesos simultáneos que son difícilmente separados, el agua se pierde por evaporación de la superficie del suelo y por otra parte mediante la transpiración del cultivo (Domingo *et al.*, 2002).

2.3. Diferentes conceptos de evapotranspiración

2.3.1. Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia es denominada E_{To} , y refiere a la tasa evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua; la superficie determinada como referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas. Con base en el manual de la FAO "Guía para la determinación de requerimiento de agua para los cultivos" el concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para determinar la demanda evapotranspirativa de la atmosfera, independientemente del desarrollo del cultivo y de las prácticas de manejo (FAO, 2006).

2.3.2. Evapotranspiración de cultivo bajo condiciones estándar

La evaporación de un cultivo bajo condiciones estándar (E_{Tc}) es correspondida a la cubierta vegetal del mismo, libre de enfermedades y con un suministro adecuado de nutrientes, desarrollado bajo condiciones óptimas de humedad de suelo permitiendo obtener una máxima producción con dichas condiciones, por lo que la evapotranspiración bajo condiciones estándar depende únicamente de la etapa de crecimiento en la cual se encuentre el cultivo.

2.3.3. Evapotranspiración de cultivo bajo condiciones no estándar

La evapotranspiración de cultivo bajo condiciones no estándar se refiere a la evapotranspiración de cultivos que crecen bajo manejo y condiciones ambientales diferentes de las condiciones estándar.

En condiciones de campo, la evapotranspiración real del cultivo puede desviarse de ET_c debido a las condiciones no óptimas como la presencia de plagas y enfermedades, salinidad de suelo, baja nutrición de suelo y limitación o exceso de agua, esto puede ocasionar un crecimiento deficiente de las plantas, menor densidad de plantas y así reducir la tasa de evapotranspiración por debajo de los valores de ET_c .

2.4. Factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración

2.4.1. Radiación solar

El proceso de la evapotranspiración está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La radiación solar es la importante fuente de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año. Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol, esta cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y para las diversas estaciones del año. La radiación solar real que alcanza la superficie

evaporante depende de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación. Cuando se determina el efecto de la radiación solar en la evapotranspiración, se debe también considerar que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua. Parte de la energía solar se utiliza también para calentar la atmósfera y el suelo (Allen *et al.*, 2006).

2.4.2. Temperatura del aire

La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco (Allen *et al.*, 2006).

2.4.3. Humedad relativa

El uso y utilización de medición de la humedad relativa tiene gran importancia en diversos sectores de la población, agricultura, industria, meteorología y el confort humano. La humedad relativa se puede definir como la proporción de vapor de agua real en el aire comparada con la cantidad de vapor de agua necesaria para la saturación a la temperatura correspondiente. La humedad relativa indica que tan próxima está el aire a la saturación, más que decir la cantidad real de vapor de agua en el aire. Se mide en porcentaje entre 0 y 100,

donde el 0 significa aire seco y 100% aire saturado de humedad (Suarez *et al.*, 2016).

2.4.4. Velocidad del viento

El proceso de remoción de vapor depende en alto grado del viento y de la turbulencia del aire, los cuales transfieren grandes cantidades de aire hacia la superficie evaporante. Con la evaporación del agua, el aire sobre la superficie evaporante se satura gradualmente con vapor. Si este aire no se substituye continuamente por un aire más seco, disminuye la intensidad de remoción de vapor de agua y la tasa de evapotranspiración disminuye (López-Urrea *et al.*, 2006).

La demanda evapotranspirativa es alta bajo condiciones de tiempo caliente y seco debido a la sequedad del aire y de la cantidad de energía disponible como radiación solar directa y calor latente. Bajo estas circunstancias, mucho vapor de agua puede ser almacenado en el aire mientras que el viento puede promover el transporte del agua permitiendo que se retire mayor cantidad de vapor de agua. Por otra parte, bajo condiciones atmosféricas húmedas, la alta humedad del aire y la presencia de nubes hacen que la tasa de evapotranspiración sea más baja. El aumento de la velocidad del viento para las dos condiciones climáticas presentadas, afecta la evapotranspiración en diferente forma como muestra la pendiente de las curvas. Cuánto más seca este la atmósfera, más grande será el efecto sobre la ET y mayor es la pendiente de la curva. Para las condiciones

húmedas, el viento puede sustituir el aire saturado solamente por aire levemente menos saturado y así reducir la energía térmica. Por tanto, bajo condiciones húmedas la velocidad del viento afecta la evapotranspiración en un grado mucho menos importante que bajo climas áridos en los que variaciones pequeñas en la velocidad del viento pueden dar lugar a importantes variaciones en la evapotranspiración (Allen *et al.*, 2006).

2.5. Factores que afectan la evapotranspiración

2.5.1. Variables climatológicas

Los parámetros climáticos más importantes que afectan la evapotranspiración son la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento (Allen *et al.*, 2006).

La evapotranspiración depende en gran medida de las condiciones locales, entre ellas del clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo, el tamaño de los campos, las características del medio circundante, la advección, la altitud, la humedad del suelo, la salinidad, el método de riego, los métodos y prácticas de cultivo entre otros (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2011).

2.5.2. Clima

Variación en función del tiempo: La evapotranspiración anual de un determinado cultivo variará algo para los diferentes climas de un año a otro. En comparación con la variación anual, la variación mensual de la evapotranspiración será mayor

Revisión de literatura

para un mes y un sitio dado y mayor aún será la variación diaria. La evapotranspiración diaria puede variar radicalmente, obteniéndose valores bajos en los días lluviosos, húmedos, nubosos y calmos, y valores altos en los días soleados, secos y ventosos (Allen *et al.*, 2005).

Variación en función de la distancia: Las estaciones meteorológicas situadas a cierta distancia de la zona en estudio, serán a veces la única fuente disponible de datos meteorológicos. Existen zonas con condiciones climáticas similares que abarcan cientos de kilómetros y otras zonas que presentan rápidos cambios del clima a corta distancia, como por ejemplo zonas áridas o semiáridas cercanas a un lago. Es evidente que en las zonas en las que hay rápidos cambios de climas en distancias cortas habrá que ser muy prudente al utilizar información de estaciones cercanas (Allen *et al.*, 2005).

Variación en función del tamaño del área de riego - la advección: Las tierras regadas producen un microclima diferente y la evapotranspiración puede ser distinta a los valores previstos en base a datos meteorológicos obtenidos en puntos situados fuera de la zona de regadío o recogidos antes de su establecimiento. El microclima diferente que se obtiene al regar, dependerá primeramente de la aridez del medio circundante, de los vientos y del tamaño de la superficie de riego. Se deben tener en cuenta los efectos de la advección, mediante la cual las masas de aire calientes provenientes de otros sitios, al pasar por los campos regados desprenderán calor. En los bordes del área regada, existirá el efecto de "ropa tendida", es decir los vientos calientes

circundantes aumentarán los valores de evapotranspiración, y en el centro existirá el efecto de “oasis” donde la mayor humedad dificultará el proceso de evapotranspiración. No existe un modo simple de evaluar los efectos de la advección sobre la evapotranspiración (Söckle *et al.*, 2004).

Variación en función de la altitud: La evapotranspiración cambia sensiblemente de acuerdo a la altitud de una zona climática dada. Estas diferencias se deben a cambios en la temperatura, la humedad y la distribución diurna-nocturna del viento desde las zonas litorales hasta los valles de montañas altas. También la radiación puede ser diferente en las zonas bajas a las de grandes alturas (Allen *et al.*, 2006).

2.5.3. Humedad del suelo

Nivel de humedad: Los métodos de predicción de la evapotranspiración de un cultivo, tienen en cuenta las condiciones climáticas y las características del mismo y suponen que habrá una gran disponibilidad de agua en el suelo. Luego del riego o la lluvia, no habiendo pérdidas considerables, la humedad del suelo decrecerá fundamentalmente debido a la evapotranspiración. Al secarse el suelo, se reducirá la proporción del agua transmitida por él a las raíces y por consiguiente, esto repercutirá en la tasa de absorción del agua por la planta y la evapotranspiración tenderá a disminuir (Tijerina-Chávez *et al.*, 2001).

Absorción del agua del suelo: La absorción real del agua por el suelo está determinada por el tipo y la profundidad de las raíces. A su vez, la profundidad

de las raíces y su extensión lateral están condicionadas por el carácter genético del cultivo y también por la textura y la estructura del suelo, la presencia de estratos impermeables, la profundidad de la capa freática y el nivel de agua disponible en el suelo en el momento del desarrollo de las raíces, y por la temperatura del suelo, especialmente en los períodos iniciales del desarrollo. Una aireación deficiente del suelo reduce también la tasa y la amplitud del desarrollo de las raíces. La profundidad hasta donde la planta extrae agua se denomina profundidad efectiva de las raíces (Tijerina-Chávez *et al.*, 2001).

Niveles freáticos: Unos suelos demasiado húmedos pueden ser tan perniciosos para el crecimiento de las plantas como los suelos que disponen de poca agua en la rizosfera, debido a la falta de oxígeno. Cuando la capa freática es alta y los suelos están saturados, se reduce el crecimiento y la evapotranspiración de la mayoría de los cultivos (Degioanni *et al.*, 2006).

2.5.4. Factores de cultivo

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos, aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar se refiere

a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas (Allen *et al.*, 2006).

2.5.5. Factores biológicos

Cuando el cultivo crece y va cubriendo el suelo, la tasa de ET aumenta como consecuencia del incremento del índice foliar y de altura de las plantas.

La ET está asimismo regulada por el crecimiento de apertura de las estomas, que controlan en gran parte el volumen de transferencia de vapor de agua entre los tejidos vegetales y el aire (Allen *et al.*, 2006).

2.6. Métodos para determinar la evapotranspiración

Debido a la gran dificultad que existe en medida directa de la evapotranspiración, han sido desarrollados gran cantidad de modelos, muy realistas físicamente, pero a expensas de una gran complejidad: necesitan demasiadas medidas o estimaciones de parámetros que hacen difícil su aplicación. De lo contrario hay ecuaciones que solo precisan datos meteorológicos que habitualmente están disponibles, pero que fueron derivadas haciendo suposiciones que limitan significativamente la aplicación (Sánchez y Carvacho, 2006).

Con base a esto se pueden discutir tres categorías de métodos: métodos denominados de medición o directos, métodos de estimación o indirectos y por último de balance de agua en el suelo (Castillo-Rodríguez *et al.*, 2006).

2.6.1. Métodos directos

Los métodos de medición directos calculan la evapotranspiración a través del control de ingresos y salidas de agua en el suelo que sustenta una cubierta vegetal; por ello miden o cuantifican directamente la evapotranspiración en cualquier cultivo o tipo vegetal para las condiciones de suelo, clima y disponibilidad de agua del lugar en estudio. Estos métodos, aunque entregan mejores resultados más cercanos a la realidad, usualmente son costosos, complejos y requieren de bastante tiempo para llegar a resultados concluyentes (Belmonte, 2006).

Y entre los métodos directos se encuentra el lisímetro y el balance hídrico se determina a partir de la selección del modelo de las llamadas “ecuaciones diferenciadas” de Lvovitch, (1959), cuya ecuación esencial se pronuncia a continuación (González, 1988):

$$P=Q+E_A\pm\Delta S$$

Dónde: P= precipitación, Q= escurrimiento, EA= evapotranspiración real,

ΔS = cambios en el almacenamiento de agua (suelo, vegetación, aguas subterráneas, lagos naturales y artificiales, etc.).

2.6.2. Métodos indirectos

A pesar de que los métodos directos son más precisos para determinar la evapotranspiración, éstos son difíciles de aplicar, por ello lo más común en estudios de grandes áreas (región o país) es utilizar diversas fórmulas, ecuaciones o modelos basados en diferentes variables meteorológicas o climáticas de fácil disposición a partir de la red de estaciones meteorológicas convencionales (Tijerina *et al.*, 2001).

Los métodos indirectos son los más utilizados en los estudios geográficos y medioambientales. Se trata por lo general de simplificaciones de algunos de los métodos directos ya señalados, que a través de correlaciones entre medidas obtenidas por aquellos y medidas de una o más variables climáticas o meteorológicas han permitido derivar fórmulas empíricas para estimar la capacidad evaporativa de un ambiente determinado. Generalmente la calibración de estos métodos se hace con mediciones realizadas con lisímetros o en parcelas experimentales (Sánchez y Carvacho, 2006). Dentro de los métodos indirectos se pueden diferenciar dos grupos de modelos: las formulaciones empíricas, o parcialmente teóricas, que relacionan la evapotranspiración con datos climáticos, y los basados en la correlación entre la evapotranspiración de zonas cultivadas con las pérdidas de agua de un estanque o bandeja de evaporación (Vasquez-Méndez *et al.*, 2011).

2.6.3. Métodos climatológicos

Entre los métodos climatológicos se encuentran los métodos basados en la temperatura del aire, los cuales estiman la tasa de evapotranspiración con base a la temperatura del aire únicamente. Otros métodos están basados en la radiación, en las cuales la evapotranspiración está relacionada directamente con la radiación solar. Dichos métodos son los más simples y fáciles de aplicar, dado que, por lo general, sólo requieren la temperatura del aire como parámetro principal; no obstante, son los que entregan los resultados menos confiables (Chávez-Ramírez *et al.*, 2013).

2.6.4. Método de Hargreaves

La ecuación que se atribuye a Hargreaves permite el cálculo de la evapotranspiración potencial a partir de la temperatura y humedad relativa. Sin embargo, la ecuación indicada por León (1975) fue utilizada para calcular la evapotranspiración real, al agregar un coeficiente de cultivo. Recientemente ha sido aplicada, también con modificaciones, para calcular la evapotranspiración potencial (Flores *et al.*, 2007).

El método de Hargreaves de la diferencia de temperatura se recomienda para localidades donde no es apropiado importar datos de radiación de una estación cercana, ya sea porque no ocurren condiciones de clima homogéneas, o porque no se cuenta con datos para la región (Hargreaves y Allen, 2003). En el año

1975 Hargreaves publica la siguiente fórmula para estimar la evapotranspiración de referencia diaria en mm (Hargreaves y Allen, 2003).

$$ET_o = 0.0135R_s (T_{media} + 17.8)$$

Más tarde Hargreaves y Samani propusieron la siguiente expresión para la radiación solar que llega a nivel del suelo (Hargreaves *et al.*, 2003) ;(Samani, 2000).

$$R_s = \alpha R_a \sqrt{TD}$$

Finalmente, los autores recomendaron que el coeficiente se incrementara a 0.0023. Con lo cual la ecuación ajustada es (Hargreaves *et al.*, 2003):

$$ET_o = 0.0023R_a (T_{media} + 17.8) \sqrt{TD}$$

2.6.5. Métodos basados en la ecuación de combinación del balance de energía y de la transferencia turbulenta del vapor de agua

Esta ecuación se presentó por primera vez en el año 1989 por Allen y desde su aparición a la fecha ha recibido una amplia aceptación para estimar la ET_o . La ecuación está definida para calcular la ET_o de una superficie extensa de pasto

verde de altura uniforme, en activo crecimiento, que cubre completamente el suelo y que permanece en óptimas condiciones de humedad de suelo. Además, considera los siguientes parámetros fijos: una altura de 0,12 m, una rugosidad de la cubierta vegetal que se opone a la transferencia de vapor igual al 10 % de la rugosidad que opone la cubierta vegetal al movimiento del viento, una altura del plano de referencia aerodinámico igual a 0,08 m, una resistencia de la cubierta vegetal de 70 s/m y un albedo igual a 0,23. Estos parámetros fijos se basan en algoritmos relacionados con el índice de área foliar y de pasto de una altura promedio (Allen *et al.*, 1998).

En el método Penman-Monteith, se describe la ETo diaria de una referencia de pasto hipotética tal como sigue (Allen *et al.*, 1998)

$$E_{To} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$$

Dónde:

ETo = evapotranspiración sobre un cultivo de referencia (mm/día)

Rn = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m² día)

G = flujo de calor del suelo (MJ m² día)

T = temperatura promedio del aire a 2 metros de altura (°C)

U2 = velocidad promedio diaria del viento a 2 metros de altura (m/s)

e_s = presión de vapor en saturación (kPa)

e_a = presión de vapor actual (kPa)

Δ = pendiente de la curva de presión de vapor versus temperatura (kPa/°C)

γ = constante psicométrica (kPa/°C).

2.6.6. Método Penman-Monteith

En el año 1990, la FAO organizó una reunión entre expertos e investigadores en colaboración con la International Commission for Irrigation and Drainage y con la World Meteorological Organization (WMO) en un intento de consolidar terminología y conceptos y realizar una profunda revisión y actualización metodológica. (Smith *et al.*, 1990) propusieron una nueva definición basada en la ecuación de combinación de Penman-Monteith, según la cual la evapotranspiración de referencia sería la tasa de ET de un cultivo hipotético con valores fijos de altura (12 cm), resistencia de la cubierta vegetal (70 s m^{-1}) y albedo (0.23), que representa la ET de una superficie extensa cubierta de gramíneas verdes, de altura uniforme y crecimiento activo, que cubre completamente el terreno y no padece de falta de agua. Recientemente se ha publicado (Allen *et al.*, 1998). El último estándar FAO basado también en la ecuación de Penman-Monteith en el que se proponen procedimientos para resolver casos en los que hay limitación de datos e información climática para diferentes cultivos.

El método PMT utiliza como entrada solo la temperatura mínima y máxima del aire para la estimación de ETo mediante la ecuación PM ETo (Allen *et al.*, 1998); (Popova *et al.*, 2006). Cuando se aplica el método PMT, existe la necesidad de ajustar la temperatura utilizada para la estimación de la presión de vapor real. La Tmin podría ser mayor que temperatura de rocío en una estación meteorológica no de referencia, como para una estación ubicada dentro de una ciudad o que tenga suelo seco o descubierto. Entonces, el valor estimado para temperatura de rocío y de temperatura mínima puede requerir corrección (Allen, 1996); (Allen *et al.*, 1998); (Temesgen *et al.*, 1999), que se espera que sea mayor en climas más áridos. Las pautas para el cálculo PM-ETo (Allen *et al.*, 1998). Incluyen dos enfoques cuando faltan datos meteorológicos: utilizando una ecuación alternativa como la ecuación empírica Hargreaves-Samani (HS) (Hargreaves y Samani, 1985), o utilizando métodos alternativos para estimar Rn, VPD y U al calcular ETo con el mismo método PM-ETo, por lo tanto, el mínimo de datos requeridos consiste en Tmax y Tmin. (Todorovic *et al.*, 2013).

2.7. Evapotranspiración con limitación de datos

El método estándar de la FAO Penman-Monteith (PM-ETo) para calcular la evapotranspiración de referencia, además de la temperatura, necesita datos de radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento que en la mayoría de las estaciones climáticas faltan y/o no adquieren los requisitos de calidad apropiados. Por lo tanto, en la mayoría de los casos, la ETo se debe estimar con

limitación de datos meteorológicos utilizando solo temperatura máxima y mínima. Básicamente, se utilizan dos procedimientos cuando no hay más datos de temperatura disponibles: la ecuación de Hargreaves-Samani (HS), o el método PM-ET_o con parámetros climáticos estimados a partir de los datos disponibles limitados, Método de temperatura (PMT) (Todorovic *et al.*, 2013).

La programación del riego en tiempo real requiere de la estimación de la evapotranspiración en períodos cortos, sin embargo debido a la dificultad de la disponibilidad de datos climáticos se ha planteado desarrollar y evaluar la precisión de estimaciones diarias de ET_o con datos faltantes para poder calcular la evapotranspiración (Pacheco-Tolentino, 2017).

2.8. Punto de rocío

La temperatura del punto de rocío o condensación es la temperatura a la cual el vapor de agua presente en el aire se condensa cuando se enfría a presión constante produciendo rocío o niebla (Bentley, 1998).

2.9. Validación de modelos

La validación de un modelo se define como la demostración de su exactitud para una aplicación concreta, en la que se efectúa para comparar las predicciones del modelo con observaciones reales (Barrales *et al.*, 2004).

Estas comparaciones, idealmente, se deben efectuar usando métodos estadísticos adecuados, con un nivel de confianza aceptable, de tal modo que las inferencias sean correcta, menciona (Flavelle, 1992). Que el análisis de

regresión lineal de los resultados calculados y los datos medidos se puede utilizar para evaluar los resultados de una validación de manera más objetiva y cuantitativa.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El proyecto de investigación se realizó considerando cinco sitios de estudio distintos, cuatro en Estados Unidos de Norte América; los campos experimentales de la Universidad Estatal de Nuevo México: (NMSU): Main Campus, Leyendecker, Artesia, Fabian Garcia, del Estado de Nuevo México y Uno en los Estados Unidos Mexicanos; el campo experimental de la Facultad de Agricultura y Zootecnia de la Universidad Juárez de Estado de Durango (UJED) en el estado de Durango, México. Utilizando los datos climáticos de tres diferentes años: 2016, 2017 y 2018. La Universidad Estatal de Nuevo México (NMSU) campus principal está ubicado en las Cruces, NM. EUA. Con ubicación geográfica en la latitud de 32.754° N, la longitud de -104.384 W con una elevación de 1026.0 msnm. El centro de investigación de cultivos experimental Leyendecker de la misma universidad, en Valle de Mesilla, ubicado en la latitud de 32.282° N, la longitud de -106.760 W con una elevación de 1186.0 msnm. El centro de ciencias de Artesia, en el condado de Eddy con una latitud de 32.75 °, longitud – 104.38 y una elevación de 1027.05 msnm. La estación meteorológica de la Facultad de Agricultura y Zootecnia con ubicación geográfica en 25°46'56" N latitud, la longitud de 103 °23' W con una elevación de 1100 msnm.

El desierto Chihuahuense tiene una extensión aproximada de 507,000 km² y se extiende desde de México (en los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango,

Materiales y métodos

Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas) hasta el norte, en el sur de Texas, Nuevo México y una pequeña parte de Arizona. Hacia el occidente y el oriente el desierto chihuahuense está delimitado por la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental. Una pequeña porción, a lo largo del río Grande, se encuentra por debajo de los 900 m; la mayor parte de este desierto se ubica entre los 1,300 y 1,800 m. Las vastas planicies e inmensas cuencas no drenadas del desierto chihuahuense se alternan con cadenas montañosas en donde el intervalo altitudinal varía desde 800 m, en los valles, hasta los 2,500 m en las cumbres de las montañas (Granados-Sánchez y Sánchez-González, 2003).

La precipitación media anual varía de 175 mm, en los valles de Coahuila, hasta 300-400 mm en las montañas localizadas en los límites occidental y sur. Entre el 65 y 80 % de la lluvia cae durante los meses de verano, entre junio y septiembre, con una ligera precipitación de octubre a diciembre. Entre enero y mayo el área es muy seca; las temperaturas diurnas en verano son de 5.5 a 11 °C, inferiores a las del desierto de Sonora, excepto en las partes menos elevadas a lo largo del Río Grande.

3.2. Determinación de evapotranspiración

La evapotranspiración de referencia se estimó con dos ecuaciones diferentes:

Se utilizaron datos de clima de los cinco sitios experimentales para los años 2016- 2018; la primera con datos meteorológicos completos, usando el método Penman-Monteith (PM-FAO-56). Esta estimación se consideró como la

referencia para determinar la precisión. La segunda rutina consistió en estimar la ETo con limitación de datos, particularmente radiación solar (Rs) y humedad relativa (Hr); considerando ecuaciones basadas en temperatura de rocío (Kenett 2010), y basadas en valores de temperaturas mínima (Zotarelli, 2010) y mediante el método Penman Monteith Temperatura, (Allen, 2008), para estimar la presión de vapor actual. Para posteriormente evaluar la precisión y aplicabilidad de estas ecuaciones para zonas áridas. La radiación solar se estimó con la ecuación de (Samani, 1982).

3.2.1. Determinación de evapotranspiración de referencia con datos completos

Cálculos de la Evapotranspiración de referencia por el método PM-FAO 56 de acuerdo a (Zotarelli *et al.*, 2010):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U^2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U^2)}$$

Dónde:

ET_o: evapotranspiración de referencia [mm día⁻¹]

R_n: radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m⁻² día⁻¹]

G: densidad del flujo de calor en el suelo [MJ m⁻² día⁻¹]

T: temperatura del aire [°C]

μ₂: velocidad del viento registrada a 2 m de altura [m s⁻¹]

e_s: presión de vapor de saturación [kPa]

e_a : presión de vapor [kPa]

$e_s - e_a$: déficit de presión de vapor de saturación [kPa]

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor [kPa °C⁻¹]

γ : constante psicométrica [kPa °C⁻¹]

Tabla 1. Datos necesarios para estimar ETo por el Método FAO- 56

Parámetro	Símbolo	Unidad
Temperatura máxima	T_{max}	°C
Temperatura mínima	T_{min}	°C
Humedad relativa máxima	RH_{max}	%
Humedad relativa mínima	RH_{min}	%
Radiación solar	R_s	MJ m ⁻² d ⁻¹
Velocidad del viento	U_2	m s ⁻¹ at h ^b m
Altitud	Z	M
Día juliano	J	-
Latitud	LAT	grados

3.2.2. Determinación de evapotranspiración de referencia con limitación de datos

Considerando que este método requiere muchos datos climáticos, que en la mayoría de las estaciones no están disponibles, se estimó la evapotranspiración de referencia utilizando ecuaciones para determinar la radiación solar y la

concentración de vapor; mediante el método Penman-Monteith Temperatura (PMT) que utiliza como entrada solo la temperatura mínima y máxima del aire para la estimación de la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.*, 1998); (Popova *et al.*, 2006); (Todorovic *et al.*, 2013) de los años 2016 a 2018 para los sitios de Leyendecker y Main Campus, del 2018 para Artesia, Fabián García y Venecia Dgo.

a) Rutina de cálculo de cuando no se dispone de la variable de radiación solar

La Radiación solar derivada de las diferencias térmicas (R_s), cuando no se dispone de datos de radiación solar en la estación meteorológica, se calculó usando la ecuación de (Samani, 2004):

$$R_s = K_{RS} \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} R_a$$

Dónde:

K_{RS} = Donde la masa terrestre domina y las masas de aire no están fuertemente influenciadas por un gran cuerpo de agua, Allen (1995) sugirió $K_{RS} = 0.17 (P / P_o)^{0.5}$; para regiones "costeras" se propone usar $K_{RS} = 0.20 (P / P_o)^{0.5}$ para tener en cuenta los efectos de elevación en la capacidad de calor volumétrica de la atmósfera, donde P y P_o son presión atmosférica media de la clase y su nivel, respectivamente [kPa].

Materiales y métodos

R_a = radiación extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]

T_{max} = temperatura máxima [$^{\circ}\text{C}$]

T_{min} = temperatura mínima [$^{\circ}\text{C}$]

La Radiación neta solar de onda corta (R_{ns}), está dada por:

$$R_{\text{ns}} = (1 - \alpha) R_s$$

Dónde:

R_{ns} = radiación neta solar o de onda corta [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$],

α = albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0.23

R_s = radiación solar entrante [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]

La Radiación solar para condiciones de cielo despejado (R_{so}) se calculó por:

$$R_{\text{so}} = (0.75 + 2E10^{-5}Z)R_a$$

Dónde:

$0.75 = a_s + b_s$

Z = elevación sobre el nivel del mar [m]

R_a = radiación extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]

La Radiación neta de onda larga (R_{nl}), se calculó por:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(T_{max} + 273.6)^4 + (T_{min} + 273.16)^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left[1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right]$$

Dónde:

R_{nl} = Radiación neta de onda larga [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]

σ = constante de Stefan-Boltzmann [$4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]

T_{max} = temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas

T_{min} = temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas

e_a = presión de vapor real [kPa]

R_s = radiación solar medida o calculada [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]

R_{so} = radiación en un día despejado [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]

La Radiación neta (R_n), es la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la Radiación neta de onda larga (R_{nl}) y se calcula por:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Dónde:

R_{ns} = la radiación solar o de onda corta neta, [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]

R_{nl} = radiación neta de onda larga, [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$]

3.2.3. Calculo del déficit de presión de vapor (VPD)

El déficit de presión de vapor se estima como la diferencia entre la presión de vapor de saturación (e_s) y la presión de vapor real (e_a):

$$\mathbf{VDP} = e_s - e_a$$

3.2.4. Presión de vapor a saturación (e_s)

Como el promedio a presión de vapor de saturación se relaciona con la temperatura del aire, se puede calcular a partir de la temperatura del aire, por lo tanto, la media de saturación de vapor de presión se calcula como la media entre la presión de vapor de saturación de las temperaturas diarias máximas y mínimas del aire.

$$e(T_{\max})= 0.6108\exp\left[\frac{17.27T_{\max}}{T_{\max}+237.3}\right]$$

$$e(T_{\min})= 0.6108\exp\left[\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min}+237.3}\right]$$

Dónde:

T_{\max} = temperatura máxima diaria del aire [°C]

T_{\min} = temperatura mínima diaria del aire [°C]

3.2.5. Presión de vapor a saturación (e_s)

La presión media de saturación de vapor para un día, semana o mes, debe ser calculada como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima media y la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima media del aire para ese periodo por (Zotarelli *et al.*, 2013); (Pacheco-Tolentino, 2013); (Todorovic *et al.*, 2013).

$$e_s = \frac{0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{\max}}{T_{\max} + 237.3} \right] + 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 237.3} \right]}{2}$$

a) Rutina de cálculo de presión de vapor actual (e_a).

La concentración de vapor actual se estimó mediante rutinas con datos climáticos completos (HR max y HR min) que se consideró como el valor de referencia; así como lo propuesto por el método PMT y estimando la Temperatura de rocío (Todorovic *et al.*, 2013); (Allen *et al.*, 1998).

- Para cuando se tiene datos de humedad relativa (HR) máxima y mínima, considerado en este estudio, como ecuación de referencia para las comparaciones de evapotranspiración de referencia diaria.

Ecuación para calcular la presión real de vapor cuando se dispone de datos de humedad relativa máxima y mínima: (Zotarelli, 2010).

$$e_a = \frac{e_{(T_{\min})} \left[\frac{RH_{\max}}{100} \right] + e_{(T_{\max})} \left[\frac{RH_{\min}}{100} \right]}{2}$$

Dónde:

e_a = presión real de vapor [kPa]

$e^\circ(T_{\min})$ = presión de saturación de vapor a la temperatura mínima diaria [kPa]

$e^\circ(T_{\max})$ =presión de saturación de vapor a la temperatura máxima diaria [kPa]

RH_{\max} = humedad relativa máxima [%]

RH_{\min} = humedad relativa mínima [%]

b) 3.3.7. Rutina de cálculo de presión de vapor actual cuando no existe la variable humedad relativa con temperatura mínima.

- Para cuando no existen datos de Hr o su calidad es cuestionable.

Cuando no se cuente con ningún dato de Humedad Relativa se usa el dato de

T_{\min}

$$e_a = e_{(T_{\min})} = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 237.3} \right]$$

c) Rutina de cálculo de presión de vapor actual cuando no existe la variable humedad relativa calculando temperatura de rocío.

Cuando los datos de radiación solar y humedad relativa no existen o su calidad es cuestionable se utilizará la temperatura de rocío para obtener la siguiente ecuación de ajuste (Kenneth, 2003):

$$\mathbf{a) T_{dew} = -0.0360*(T_m) + 0.9679*(T_n) + 0.0072*(T_x - T_n) + 1.0119}$$

Por lo tanto, la concentración de vapor a la temperatura de rocío se estimará con la siguiente ecuación:

$$e_{(T_{dew})} = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{dew}}{T_{dew} + 237.3} \right]$$

Dónde:

T_m= Temperatura media.

T_n= Temperatura mínima.

T_x= Temperatura máxima.

T_{dew}= Temperatura de rocío.

d) Rutina de cálculo de presión de vapor actual cuando no existe la variable humedad relativa con el método Penman Monteith temperatura.

Cuando los datos de radiación solar y humedad relativa no existen o su calidad es cuestionable se utilizará la temperatura de rocío para obtener la siguiente ecuación de ajuste (Allen, 2006).

$$\mathbf{a) PMT = T_{min} - 2}$$

Por lo tanto, la concentración de vapor se estimará con la siguiente ecuación

$$\mathbf{b) } e_{(PMT)} = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 TPMT}{T_{PMT} + 237.3} \right]$$

Dónde:

TPMT= Método Penman Monteith temperatura

T min= Temperatura mínima

3.3. Evaluación de ecuaciones

Para realizar la evaluación se efectuaron dos procesos con los cuales se verificó la precisión y aplicabilidad de las ecuaciones. Primeramente, para determinar la aplicabilidad se comparó la evapotranspiración estimada con limitación de datos con el método de referencia con datos completos FAO-56, obteniéndose el error relativo absoluto. Posteriormente se obtuvo el índice de concordancia de Wilmott mediante regresión entre datos estimados y Et de referencia (Wilmott, 1982). Este análisis estadístico de datos se hizo para cada sitio y años de observación.

3.3.1. Determinación del error relativo absoluto

El error absoluto en una medida de determinada magnitud, es la diferencia entre dicho valor y el valor verdadero de la medida; su expresión para determinarlo es:

$$Er = \frac{ET_{o1} - ET_{o2}}{ET_{o1}} * 100 :$$

Dónde:

Er: Error relativo.

ET_{o1}: Evapotranspiración de referencia con datos completos.

ET_{o2}: Evapotranspiración de referencia con limitación de datos.

3.3.2. Determinación del índice de concordancia de Wilmott

El índice de concordancia de Wilmott (I.A. por sus siglas en inglés), indica para un valor de 1 que se logra una concordancia perfecta, mientras que un valor de 0 refleja una pobre concordancia para su cálculo $P'i = P_i - O$ y $O'i = O_i - O$ (Wilmott, 1982).

$$I.A. = 1 - \frac{\sum(P_i - O)^2}{\sum[|P'i| + |O'i|]^2}$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Estimación de ETo para el sitio Main Campus

En la Figura 4.1 correspondiente al sitio NMSU Main Campus para los años 2016, 2017 y 2018, se muestra en el eje de las “Y” la evapotranspiración media mensual en mm/día, calculada con datos completos (FAO-56) y con limitación de datos y en el eje “X” los meses correspondientes al año. En la misma figura se observan valores de ETo mínimos de 1.81 y máximos de 8.04 para datos completos y valores mínimos de 1.4 a 1.6 y máximos de 6.81 a 8.04 para ecuaciones con límite de datos, por lo que las ecuaciones utilizadas muestran valores muy parecidos a la referencia. El comportamiento de la ETo en el tiempo, mostró una tendencia lógica de ir aumentando sus valores en los meses de mayo a agosto, conforme se incrementa la temperatura en el transcurso del año. La estimación de ETo que más se aproximó al valor de referencia, fue la correspondiente a la ecuación basada en temperatura de punto de rocío, esto coincide con lo reportado en el documento 56 de riego y drenaje de la (FAO, 2008, Allen et al., 2006, Simón, 2019).

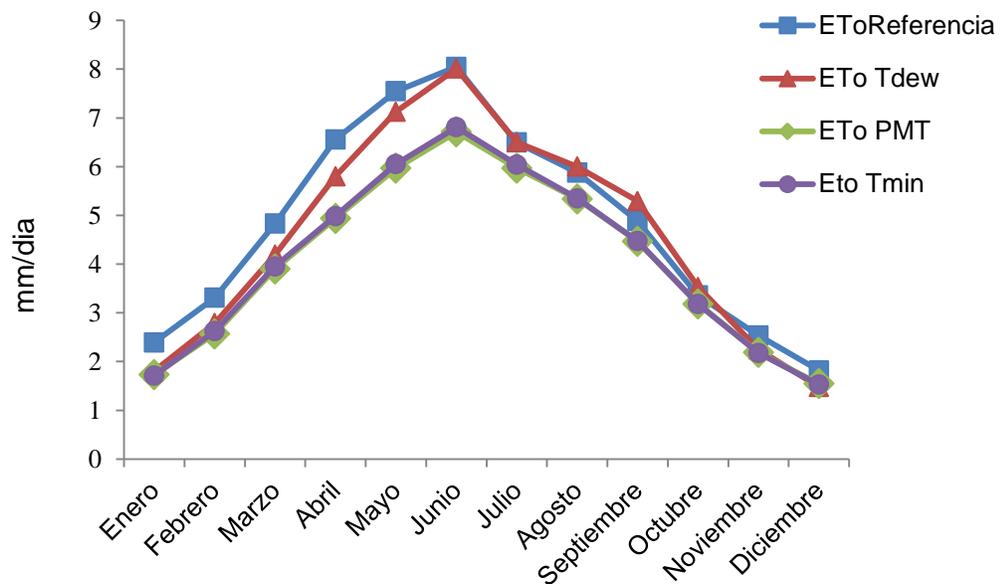


Figura 4.1. Estimaciones de ETo para el sitio Main Campus 2016-2018 con el método FAO-56, limitación de datos, PMT Y la ecuación de ajuste con (T Dew) sin datos de radiación solar y humedad relativa.

4.1.1. Error relativo

En la Figura 4.1.1., se muestran los resultados de la estimación del error relativo de las ecuaciones comparadas con el método de referencia para el sitio Main Campus para los años 2016, 2017 y 2018 con promedios mensuales calculados h para los 365 días del año. El error relativo calculado con las rutinas con limitación de datos presentan valores con un error promedio de 10%, se observa que la ecuación Tdew muestra valores mínimos de 7.56 % en meses más

calurosos y máximos de 16.30 % en días más fríos y cercas de 90 % de eficiencia en el cálculo de ETo, estos valores son similares a los reportados por (Pacheco Tolentino, 2017, Simón, 2019) donde mencionan que las ecuaciones con límite de datos pueden ser una alternativa cuando no se disponga de datos climático o sean deficientes, PMT obtiene menor porcentaje de error con valores mínimos de 7.25 y máximos de 13.98 % siendo menores en todos los meses comparada con Tmin esto coincide con lo mencionado por la (FAO, 2006) en su documento 56 de riego y drenaje.

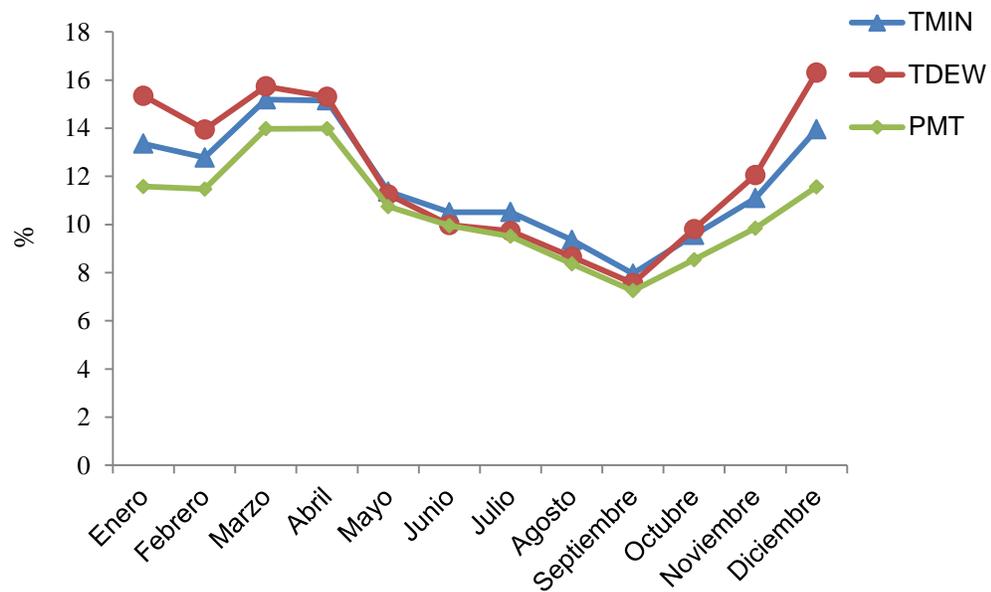


Figura 4.1.1. Estimación del error relativo de ETo para Main Campus promedio mensual.

4.2. Estimación de ETo para el sitio Leyendecker

En la Figura 4.1 correspondiente al sitio Leyendecker para los años 2016, 2017 y 2018, se muestra en el eje de las “Y” la evapotranspiración media mensual en mm/día, calculada con datos completos (FAO-56) y con limitación de datos y en el eje “X” los meses correspondientes al año. En la misma figura se observan valores de ETo mínimos de 1.90 y máximos de 7.29 para datos completos y valores mínimos de 1.6 a 4.4 y máximos de 6.47 a 8.52 para ecuaciones con límite de datos, por lo que las ecuaciones utilizadas muestran valores muy parecidos a la referencia. El comportamiento de la ETo en el tiempo, mostró una tendencia lógica de ir aumentando sus valores en los meses de marzo a octubre conforme se incrementa la temperatura en el transcurso del año. La estimación de ETo que más se aproximó al valor de referencia, fueron las correspondiente a la ecuaciones basada en temperatura de punto de rocío T_{dew} y PMT, esto coincide con lo reportado en el documento 56 de riego y drenaje de la (FAO, 2006, Allen et al., 2006, Simón, 2019) contrario a la ecuación T_{min} que sobrestima el valor en todos los meses.

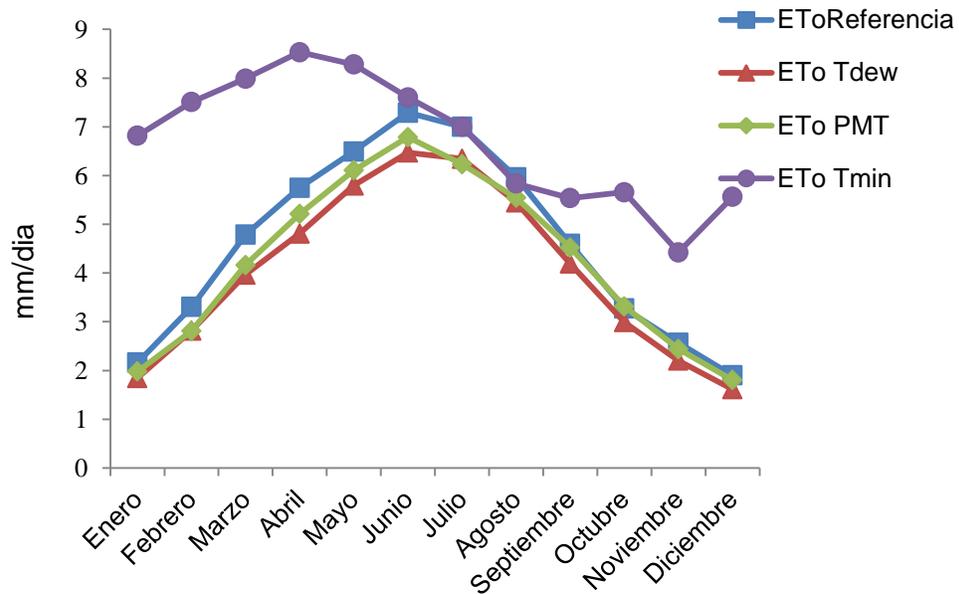


Figura 4.2. Estimaciones de ET₀ para el sitio Leyendecker 2016-2018 con el método FAO-56, limitación de datos, PMT Y la ecuación de ajuste con (T Dew) sin datos de radiación solar y humedad relativa.

4.2.1. Error relativo

En la Figura 4.2.1., se muestran los resultados de la estimación del error relativo de las ecuaciones comparadas con el método de referencia para Leyendecker para los años 2016, 2017 y 2018 con promedios mensuales en calculados con 365 días de cada año. El error relativo calculado con las rutinas con limitación de datos presentan valores con un error promedio máximo de 10%, se observa que la ecuación Tdew muestra valores mínimos de 7.90 % en meses más calurosos y máximos de 16.71 % en días más fríos y cerca de 89.70 % de

eficiencia en el cálculo de ETo, estos valores son similares a los reportados por (Pacheco Tolentino, 2017, Simón, 2019) donde mencionan que las ecuaciones con límite de datos pueden ser una alternativa cuando no se disponga de datos climático o sean deficientes, PMT obtiene menor porcentaje de error con valores mínimos de 4.78 y máximos de 11.36 % siendo menores en todos los meses comparada con Tmin esto coincide con en lo mencionado por la (FAO, 2006) en su documento 56 de riego y drenaje.

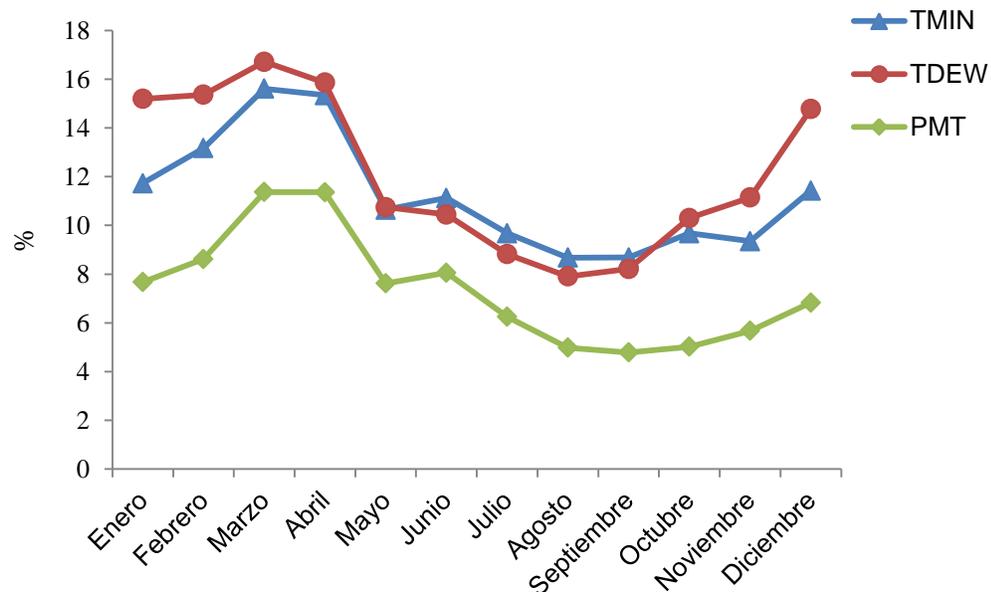


Figura 4.2.1. Estimación del error relativo de ETo para Leyendecker promedio mensual.

4.3. Estimación de ETo para el sitio Artesia

En la Figura 4.3 correspondiente al sitio Artesia para el año 2018, se muestra en el eje de las “Y” la evapotranspiración media mensual en mm/día, calculada

con datos completos (FAO-56) y con limitación de datos y en el eje "X" los meses correspondientes al año. En la misma figura se observan valores de ETo mínimos de 2.03 y máximos de 9.14 para datos completos y valores mínimos de 1.65 a 2.05 y máximos de 7.65 a 10.47 para ecuaciones con límite de datos, por lo que las ecuaciones utilizadas muestran valores muy parecidos a la referencia. El comportamiento de la ETo en el tiempo, mostró una tendencia lógica de ir aumentando sus valores en los meses de marzo a octubre conforme se incrementa la temperatura en el transcurso del año. La estimación de ETo que más se aproximó al valor de referencia, fueron las correspondiente a la ecuaciones basada en temperatura de punto de rocío PMT y Tmin, esto coincide con lo reportado en el documento 56 de riego y drenaje de la (Allen et al., 1998) contrario a la ecuación Tdew que sobrestima el valor en los meses de mayo a octubre con un valor aproximado de 3% de diferencia.

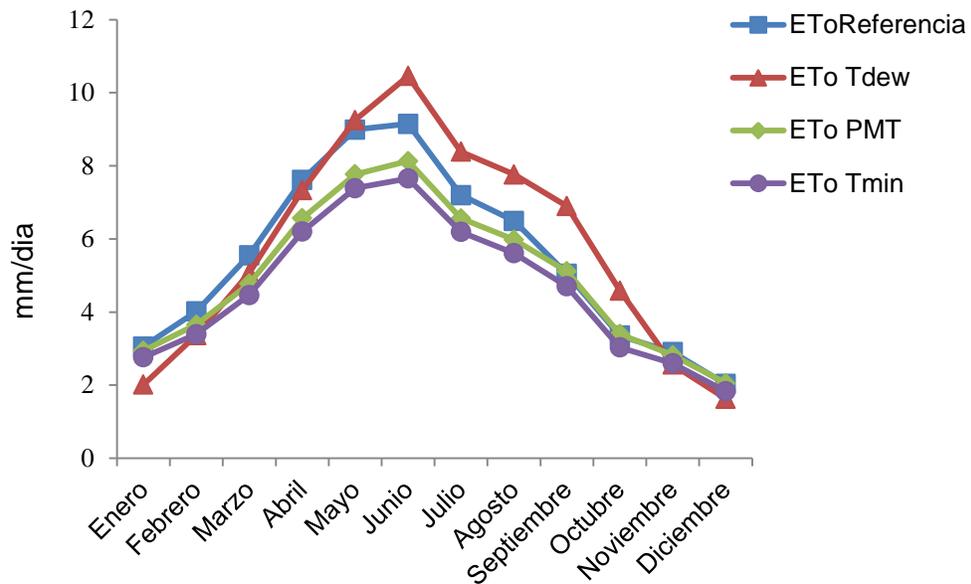


Figura 4.3. Estimaciones de ETo para el sitio Artesia 2018 con el método FAO-56, limitación de datos, PMT Y la ecuación de ajuste con (T Dew) sin datos de radiación solar y humedad relativa.

4.3.1. Error relativo

En la Figura 4.3.1., se muestran los resultados de la estimación del error relativo de las ecuaciones comparadas con el método de referencia para el sitio Artesia para al año 2018 con promedios mensuales en calculados con 365 días de cada año. El error relativo calculado con las rutinas con limitación de datos presentan valores con un error promedio máximo de hasta 16 %, se observa que la ecuación Tdew muestra valores mínimos de 6.16 % en meses más

calurosos y máximos de 49.08 % en días más fríos siendo en ese sitio donde se presenta el error más alto, para el caso de esta ecuación, estos valores son similares a los reportados por (Pacheco Tolentino, 2017, Simón, 2019) donde mencionan que las ecuaciones con límite de datos pueden ser una alternativa cuando no se disponga de datos climático o sean deficientes, PMT obtiene menor porcentaje de error con valores mínimos de 6.28 y máximos de 17.37 % siendo menores en todos los meses comparada con Tmin esto coincide con en lo mencionado por la (FAO, 2006) en su documento 56 de riego y drenaje.

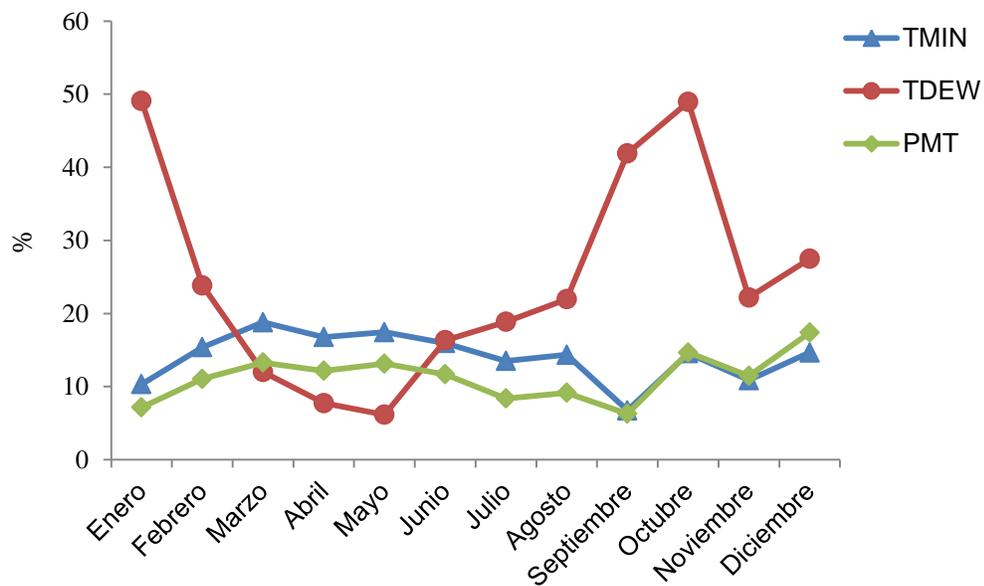


Figura 4.3.1. Estimación del error relativo de ETo para Artesia promedio mensual para el año 2018.

4.4. Estimación de ETo para el sitio Fabián Gracia

En la Figura 4.4 correspondiente al sitio Fabián García para el año 2018, se muestra en el eje de las “Y” la evapotranspiración media mensual en mm/día, calculada con datos completos (FAO-56) y con limitación de datos y en el eje “X” los meses correspondientes al año. En la misma figura se observan valores de ETo mínimos de 1.69 y máximos de 7.57 para datos completos y valores mínimos de 1.33 a 1.55 y máximos de 6.75 a 7.56 para ecuaciones con límite de datos, por lo que las ecuaciones utilizadas muestran valores muy parecidos a la referencia. El comportamiento de la ETo en el tiempo, mostró una tendencia lógica de ir aumentando sus valores en los meses de marzo a octubre conforme se incrementa la temperatura en el transcurso del año. En la estimación de ETo para este sitio todas las ecuaciones se aproximaron al valor de referencia, por lo tanto coincide con lo reportado por (Allen et al., 1998, Zotarelli, 2010, Pacheco-Tolentino, 2017, Simón 2019).

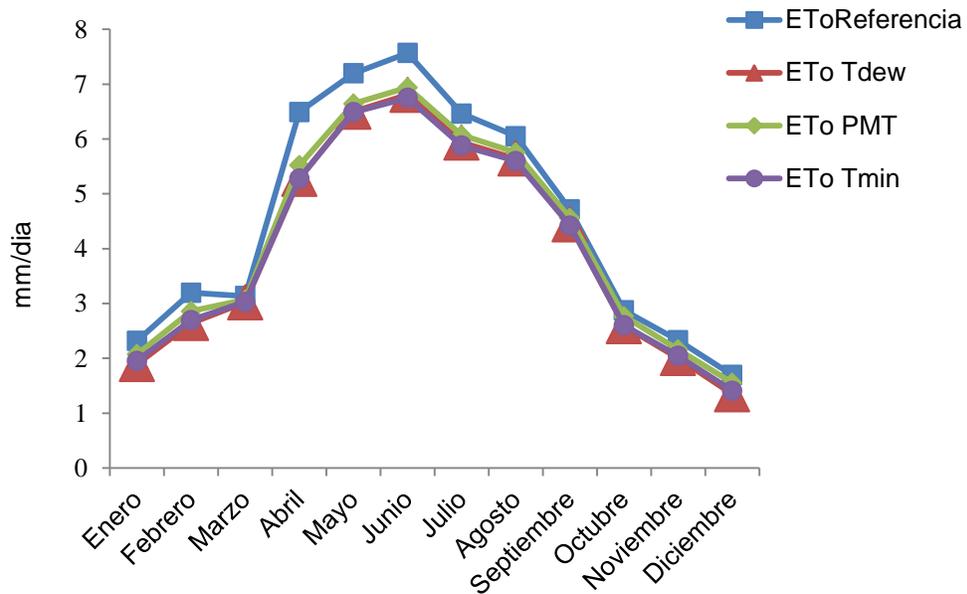


Figura 4.4. Estimaciones de ET₀ para el sitio Fabián García 2018 con el método FAO-56, limitación de datos T min, PMT Y la ecuación de ajuste con (T Dew) sin datos de radiación solar y humedad relativa.

4.4.1. Error relativo

En la Figura 4.4.1., se muestran los resultados de la estimación del error relativo de las ecuaciones comparadas con el método de referencia para el sitio Fabián García para al año 2018 con promedios mensuales en calculados con 365 días de cada año. El error relativo calculado con las rutinas con limitación de datos presentan valores con un error promedio máximo de 12 % mostrando una eficiencia en el cálculo de ET₀ cercas del 88 %, se observa que la ecuación

Tdew muestra valores mínimos de 5.60 % en meses más calurosos y máximos de 19.73 % en días más fríos PMT obtiene menor porcentaje de error con valores mínimos de 3.63 y máximos de 13.71 % siendo menores en todos los meses comparada con Tmin esto coincide con lo reportado por (Allen et al, 2006, FAO 2006, Zotarelli, 2010).

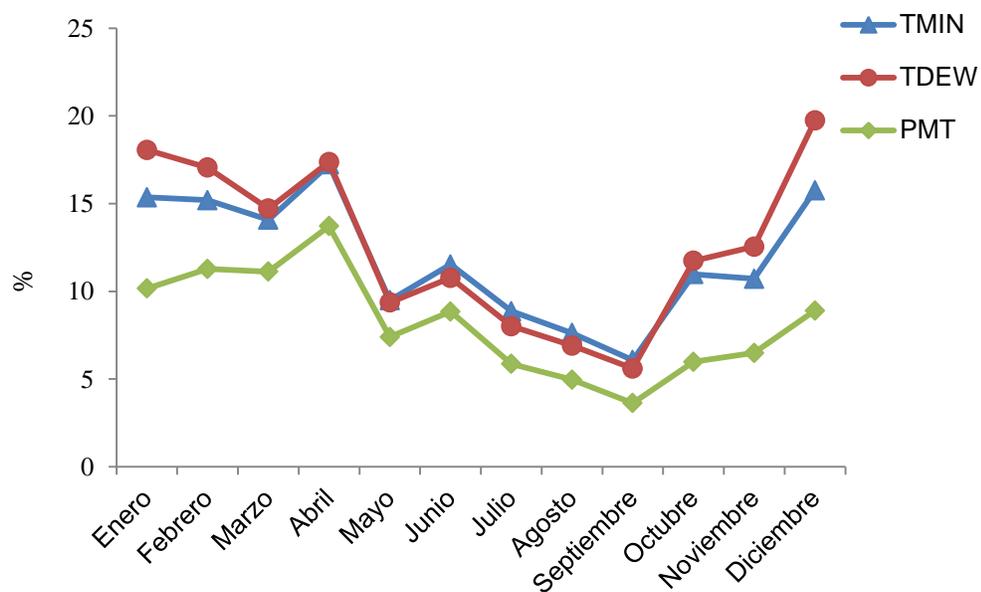


Figura 4.4.1. Estimación del error relativo de ETo para Fabián García promedio mensual para el año 2018.

4.5. Estimación de ETo para el sitio Venecia

En la Figura 4.5. Correspondiente al sitio Venecia para el año 2018 para los meses de enero a julio. Se muestra en el eje de las “Y” la evapotranspiración media mensual en mm/día, calculada con datos completos (FAO-56) y con

limitación de datos y en el eje "X" los meses correspondientes al año, la estimación de ETo se hizo para todos los meses del año detectando un error en la determinación de los datos climáticos, por lo que se tomaron datos hasta el mes de julio, concordando con (Simón 2019, Zotarelli, 2010) que una de las principales limitantes del método de referencia es la cantidad de datos climáticos que requiere.. En la misma figura se observan valores de ETo mínimos de 3.19 y máximos de 8.69 para datos completos y valores mínimos de 3.21 a 3.41 y máximos de 8.63 a 10.41 para ecuaciones con límite de datos, todas la ecuaciones se aproximaron al valor de referencia en todos los meses, por lo tanto coincide con lo reportado por (Allen et al., 1998, Zotarelli, 2010, Pacheco-Tolentino, 2017, Simón 2019).

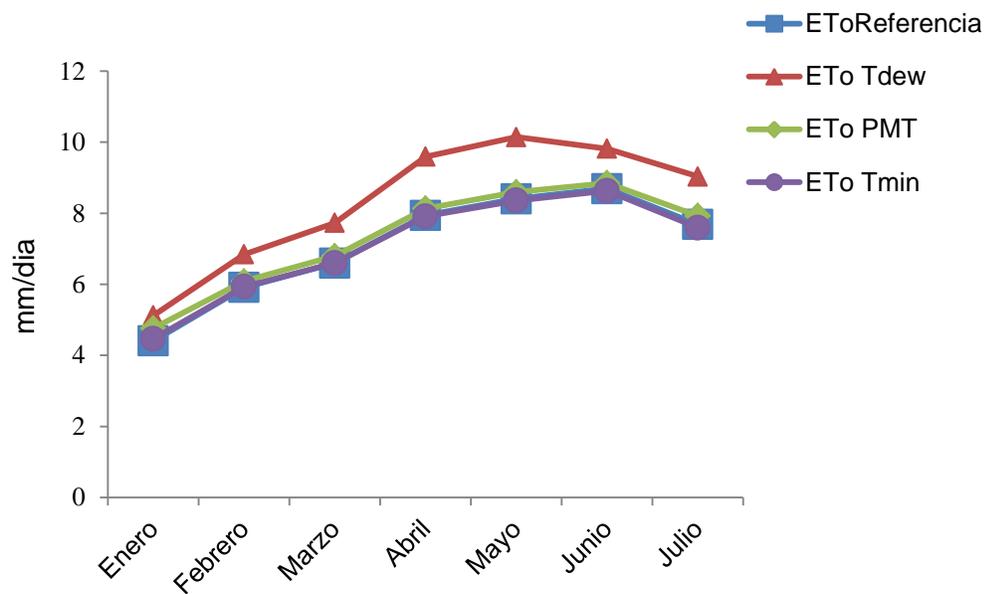


Figura 4.5. Estimaciones de ETo para el sitio Venecia 2018 con el método FAO-56, limitación de datos T min, PMT Y la ecuación de ajuste con (T Dew) sin datos de radiación solar y humedad relativa.

4.5.1. Error relativo

En la Figura 4.5.1., se muestran los resultados de la estimación del error relativo de las ecuaciones comparadas con el método de referencia para el sitio Venecia para al año 2018 con promedios mensuales en calculados con 365 días de cada año. El error relativo calculado con las rutinas con limitación de datos presentan valores con un error promedio máximo de hasta 16 % mostrando una eficiencia en el cálculo de ETo cercas del 84 %, se observa que la ecuación Tdew muestra

valores mínimos de 11.24 % en meses más calurosos y máximos de 17.04 % en días más fríos PMT obtiene menor porcentaje de error con valores mínimos de 7.36 y máximos de 15.05 % las ecuaciones evaluadas muestran ser muy similares a la referencia (Pacheco-Tolentino, 2017, Simón, 2019).

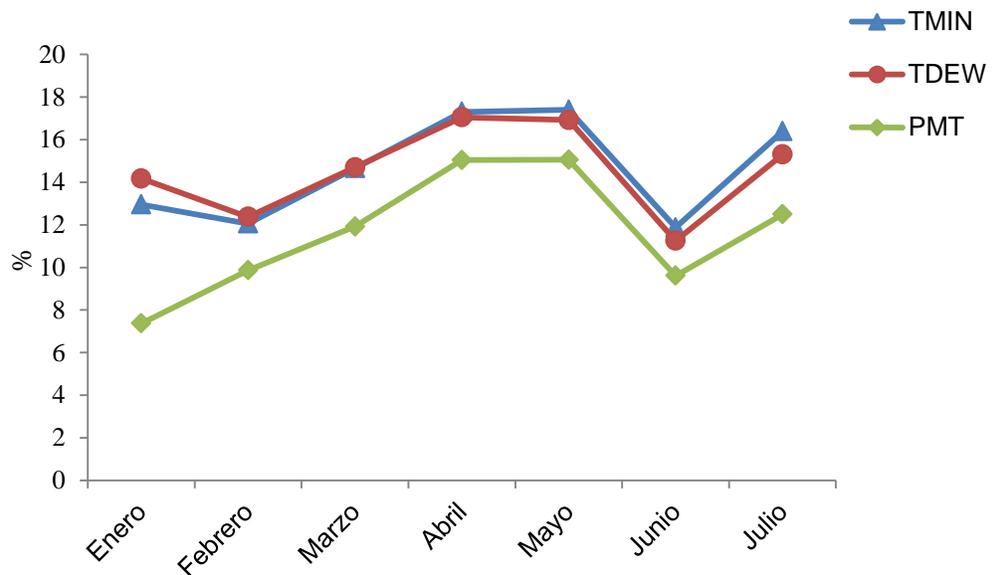


Figura 4.5.1. Estimación del error relativo de ETo para Venecia promedio mensual para el año 2018.

4.6. Índice De Concordancia

Para determinar la precisión de las ecuaciones con limitación de datos climáticos se calculó el índice de concordancia (Wilmott, 2006). Comparado con el método de referencia FAO-56 con datos completos. En la tabla 2 se observa

el índice de concordancia es cercano a 1 en todos los sitios y en todos los años con valores mínimos de 0.90 y máximos de 0.98 representando una alta concordancia de la ecuación de ajuste con base al método de referencia.

Tabla 2. Índice de concordancia (I.A) y eficiencia (EF) en el cálculo de la evapotranspiración para ecuaciones con limitación de datos.

Sitio	Año	I.A			EF		
		T MIN	TDEW	PMT	T MIN	T DEW	PMT
NMSU	2016	0.97	0.98	0.98	0.90	0.92	0.92
	2017	0.97	0.97	0.97	0.89	0.89	0.91
	2018	0.96	0.97	0.97	0.87	0.87	0.89
LEYENDECKER	2016	0.97	0.97	0.98	0.88	0.88	0.94
	2017	0.96	0.96	0.98	0.86	0.86	0.93
	2018	0.96	0.96	0.98	0.86	0.86	0.92
ARTESIA	2018	0.95	0.96	0.97	0.84	0.82	0.91
FABIAN G.	2018	0.91	0.97	0.98	0.64	0.90	0.94
VENECIA	2018	0.90	0.91	0.93	0.65	0.66	0.75

5. CONCLUSIONES

Las rutinas utilizadas para determinar ETo mostraron una precisión aproximada a 90% lo que representa que puede ser una alternativa para calcular ETo cuando se presente limitación de datos de radiación solar (R_s) y humedad relativa (H_r).

Las ecuaciones a partir de temperatura de rocío T_{dew} y la ecuación de Penman-Monteith temperatura fueron las que mostraron mayor precisión en la estimación de ETo.

Con base en la precisión y en el bajo error relativo obtenido se puede concluir que en este estudio que todas la ecuaciones tienen aplicabilidad en zonas áridas.

VI. LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith 1998. "Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56." Rome: 1-15
- Allen, R., A. I. Walter, R. Elliott, T. Howell, D. Itenfisu y M. Jensen 2005. "The asce standardized reference evapotranspiration equation." The American Society of Civil Engineers: 1-70
- Allen, R., L. Pereira, D. Raes y M. Smith 2006. "Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos." Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO): 1-298.
- Barrales, V., L. Peña, R., I. Fernández, R., B., P. 2004. Validación de modelos: Un enfoque aplicado. Agricultura Técnica, 64(1), 66-73.
- Belmonte-Serrano, F. y A. Romero-Díaz 2006. "Medida de la evapotranspiración real en coberturas vegetales semiáridas (Cuenca de Mula, Murcia), según las variaciones de humedad del suelo medidas mediante el procedimiento (TDR)." Papeles de Geografía 43: 5-17.
- Bentley, R (1998). Temperature and Humidity Measurement. Vol. 1 Handbook of Temperature Measurements, chapter 7. Springer-Verlag, Singapore.

Literatura citada

Berengena, J. y P. Gavilán 2005. "Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131: 147-163.

CONAGUA 2007. "Estadísticas del agua en México." SEMARNAT.

Domingo, F., Villagarcía, L. y Were, A. 2002. ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución. *Ecosistemas* 2003/1

FAO 2002. "El agua y la agricultura." *Cumbre Mundial Sobre La Alimentación*: 1-5.

FAO 2006. *Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO): 1-298.

FAO 2011. "The state of the world's land and water resources for food and agriculture (solaw)." *Managing systems at risk Rome and Earthscan*, Londres,: 1-308

FAO 2013. "Afrontar la escasez de agua (Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria)." Roma 1-97.

FAO 2015. "Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030." *Departamento Económico y Social*: 1-15.

Literatura citada

- Flavelle, P. 1992. Una medida cuantitativa de la validación del modelo y su uso potencial para fines regulatorios. Recursos hídricos. 15:5-13
- Flores, F., R. Pérez y M. Lillo 2007. "Comparación de tres modelos de estimación de evapotranspiración mediante imágenes MODIS." Teledetección-Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional: 1-8.
- García-Salazar, J., J. Alberto, E. Guzmán-Soria y M. Fortis-Hernández 2006. "Demanda y distribución del agua en la Comarca Lagunera, México." Agrociencia 40: 269-276.
- Gómez-Oliver, L. y A. Tacuba-Santos 2017. "The rural development policy in Mexico." Journal of Economic 14: 42.
- Gonzales, J. I. 1998. Hidrología Práctica. Editorial Pueblo y Educacion. Ciudad de la Habana, cuba.
- González, M.A. y B.Hernández (2000), "Estimación de las necesidades hídricas del tomate", Revista Interamericana Terra, vol. 17, núm. 4, pp.45-50.
- Hargreaves, G. H. y R. G. Allen 2003. "History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation." Journal of Irrigation and Drainage Engineering: 53-63.

Literatura citada

Hargreaves, G.H. y Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric. 1(2):96-99.

Hernández, G. R. 2013. "Transpiración." Botanical Book: 1-10.

INEGI 2013. "Sistema de Cuencas Nacionales de México." 1-75.

Kennet, G.,H. R. Mahmood. C. Carslon 2003. Estimating Daily Dew Point Temperature for The Northern Great Plains Using Maximum and Minimum Temperature. Agronomy Jurnal Vol 95:March-april 2003.

Lvovitch S. A. 1959. Hidrología práctica. Editorial pueblo y educacion. Ciudad de la Habana Cuba,p 110.

Pacheco-Tolentino, N. 2017. "Estimación de ETo potencial por los métodos FAO56 y Hargreaves-Samani con limitación de datos climáticos." 1-79.

Rodríguez-Santiago, S., R. Arteaga-Ramírez, D. M. Sangerman-Jarquín, R. Cervantes-Osornio y A. Navarro-Bravo 2012. "Evapotranspiración de referencia estimada con Fao-Penman-Monteith,Priestley-Taylor, Hargreaves y RNA" Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 3: 1535-1549.

Literatura citada

- Salazar-Moreno, R., A. Rojano-Aguilar y I. L. López-Cruz 2014. "La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada." *Tecnología y Ciencias del Agua* 5: 177-183.
- Samani, Z. 2000. "Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 126: 265-267.
- Samani, Z. 2004. "Discussion of "History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation" by George H. Hargreaves and Richard G. Allen. J." *Irrig. Drain. Eng* 130: 447-448.
- Sánchez, M. y L. Carvacho 2006. "Estimación de evapotranspiración potencial, ETP, a partir de imágenes NOAA-AVHRR en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins." *Revista de Geografía Norte Grande*: 49-60.
- Schlesinger, W. H. y S. Jasechko 2014. "Transpiration in the global water cycle." *Agricultural and Forest Meteorology*: 189-117.
- Suárez, T., L. A. González, J. Beltrán 2006. "sistema de medición de la humedad relativa usando un DSSP." *Revista de ingeniería electrónica, automática y de comunicaciones*: 90-107.
- Tijerina-Chávez, L., R. Villaman-Peña, A. Quevedo-Nolasco y G. Crespo-Pichardo 2001. "Comparación de algunos Métodos Micrometeorológicos para estimar la Evapotranspiración, en el área de Montecillo, México."

Literatura citada

TERRA/Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Posgraduados 19: 281-291.

Todorovic, M., K. Biljana y L. S. Pereira 2013. "Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates." *Journal of Hydrology* 481: 166-176.

Vásquez-Méndez, R., E. J. Ventura-Ramos y J. A. Acosta-Gallegos 2011. "Suitability of evapotranspiration estimation methods for semiarid Central Mexico." *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3: 399-41.

Willmott, C. J. 1982. "Some comments on the evaluation of model performance." *American Meteorological Society* 63: 1309-1317.

Willmott, C. J. and Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82.

Zotarelli, L., D. Michael, C. Consuelo, K. W. Romero y K. T. Migliaccio 2010. "Step by step calculation of the Penman-Monteith evapotranspiration (FAO56 Method)." University of Florida, IFAS Extension 1-12.